

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA/ DEPARTAMENTO DAS ÁREAS ACADÊMICAS II
BACHARELADO EM QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ALINE SOUZA CASTRO

**AVALIAÇÃO FOTOCATALÍTICA DO TiO_2 FUNCIONALIZADOS
COM NANOPARTÍCULAS METÁLICAS**

**GOIÂNIA
2025**

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: ALINE SOUZA CASTRO

Matrícula: 20201011080310

Título do Trabalho: Avaliação fotocatalítica do TiO₂ Funcionalizados com Nanopartículas Metálicas

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo. ()
Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

GOIÂNIA, 15/09/2025.

Local Data

Aline Souza Castro

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

ALINE SOUZA CASTRO

**AVALIAÇÃO FOTOCATALÍTICA DO TiO_2 FUNCIONALIZADOS
COM NANOPARTÍCULAS METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso, submetido à Coordenação do curso de Bacharelado em Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Química.

Orientador: Lidiaine Maria dos Santos
Coorientador: Roberta Karoline Morais Ferreira

GOIÂNIA

2025

C355a Castro, Aline Souza.

Avaliação fotocatalítica do TIO_2 : funcionalizados com nanopartículas metálicas / Aline Souza Castro. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2025.
25f.

Orientação: Lidiaine Maria dos Santos.

Coorientação: Roberta Karoline Morais Ferreira.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Química, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Fotocatálise. 2. Corantes. I. Santos, Lidiaine Maria dos (orientação). II. Ferreira, Roberta Karoline Morais (coorientação). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 660.299 5

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

ATA DE DEFESA DE ARTIGO CIENTÍFICO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Artigo Científico intitulada **Avaliação fotocatalítica do TiO₂ Funcionalizados com Nanopartículas Metálicas**, sob orientação de Lidiaine Maria dos Santos, apresentada pela aluna **Aline Souza Castro (20201011080310)** do Curso **Bacharelado em Química (Câmpus Goiânia)**. Os trabalhos foram iniciados às **10:30** do dia **30/09/2025** pela Professora presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Lidiaine Maria dos Santos** (Presidente)
- **Waleria Rodovalho** (Examinadora Interna)
- **Allane Catharina Carvalhaes Rodrigues** (Examinadora Interna)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Artigo Científico, passou à arguição da candidata. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota : 7,5

Observação / Apreciações:

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Lidiaine Maria dos Santos** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Waleria Rodovalho** (809.415.081-53), em **08/09/2025 14:10:00** com chave **a74f0dec8cd611f0a0b1005056a537a4**.
- **Lidiaine Maria dos Santos** (020.982.071-31), em **08/09/2025 13:47:01** com chave **7110d27c8cd311f08394005056a537a4**.
- **Allane Catharina Carvalhaes Rodrigues** (032.431.851-06), em **09/09/2025 09:42:06** com chave **6501c9268d7a11f08d8e005056a537a4**.

Este documento foi emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QrCode ao lado ou acesse https://suap.ifg.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Ata de Projeto Final

Data da Emissão: 09/09/2025

Código de Autenticação: f156e3



Avaliação fotocatalítica do TiO₂ Funcionalizados com Nanopartículas Metálicas

Aline S. Castro^a, Roberta Karoline Moraes Ferreira^a, Lidiaine Maria dos Santos^a

^aDepartamento de Áreas Acadêmicas II, Instituto Federal de Goiás – campus Goiânia, 74055-110 Goiânia – GO, Brasil

() Manuscrito com material suplementar

(X) Manuscrito sem material suplementar

*e-mail: aline.castro@academico.ifg.edu.br

ORCID – Aline S. Castro: <https://orcid.org/0009-0006-5533-5731>

O presente estudo teve como objetivo avaliar a atividade fotocatalítica do TiO₂ funcionalizado com nanopartículas metálicas para a degradação do corante Ponceau 4R. Para isso, o TiO₂ foi sintetizado pelo método sol-gel, seguido por tratamento hidrotérmico para aprimorar suas propriedades. A incorporação de nanopartículas metálicas foi realizada por fotodeposição. Os materiais foram caracterizados por análise térmica, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier e difração de raios X. A análise de difração de raios X (DRX) confirmou que a estrutura cristalina da fase anatase do TiO₂ foi mantida em todas as amostras, e a análise térmica indicou que o material é termicamente estável até 600 °C. Os resultados experimentais de fotodegradação do corante Ponceau 4R demonstraram que o TiO₂ funcionalizado com prata apresentou melhor desempenho, alcançando uma eficiência de descoloração de 83% em 120 minutos, superior tanto ao TiO₂ puro (64%) quanto ao TiO₂ modificado com cobre (54%). A alta eficiência da prata é explicada por sua capacidade de capturar elétrons, evitando a recombinação de pares elétron-buraco e, conseqüentemente, aumentando a produção de radicais livres oxidantes. Em contrapartida, a troca com cobre mostrou-se ineficiente, inibindo a atividade fotocatalítica ao atuar como centro de recombinação para elétrons e buraco.

Palavras-chave: Dióxido de titânio (TiO₂); fotocatalise; nanopartículas metálicas; degradação de corantes.

The present study aimed to evaluate the photocatalytic activity of TiO₂ functionalized with metal nanoparticles for the degradation of the Ponceau 4R dye. To this end, TiO₂ was synthesized by the sol-gel method, followed by hydrothermal treatment to enhance its properties. The incorporation of metal nanoparticles was performed by photodeposition. The materials were characterized by thermal analysis, Fourier transform infrared spectroscopy, and X-ray diffraction. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed that the anatase phase crystal structure of TiO₂ was maintained in all samples, and thermal analysis indicated that the material is thermally stable up to 600 °C. The experimental photodegradation results of the Ponceau 4R dye demonstrated that silver-functionalized TiO₂ performed better, achieving a decolorization efficiency of 83% in 120 minutes, superior to both pure TiO₂ (64%) and copper-modified TiO₂ (54%). Silver's high

efficiency is explained by its ability to capture electrons, preventing the recombination of electron-hole pairs and, consequently, increasing the production of oxidizing free radicals. Conversely, exchange with copper proved inefficient, inhibiting photocatalytic activity by acting as a recombination center for electrons and holes..

Keywords: Titanium dioxide (TiO_2); photocatalysis; metal nanoparticles; dye degradation.

INTRODUÇÃO

O crescimento industrial tem intensificado os impactos negativos da ação humana sobre o meio ambiente, como a contaminação de recursos hídricos por efluentes industriais. Esses efluentes podem conter compostos orgânicos persistentes e tóxicos, como corantes, solventes, e resíduos de hidrocarbonetos, que contribuem para a degradação de ecossistemas aquáticos e afetam diretamente a saúde humana. Métodos convencionais de tratamento de água, como coagulação, floculação e filtração, não são eficazes na completa mineralização desses poluentes. Diante desse cenário, a busca por tecnologias sustentáveis e eficientes para a degradação de contaminantes tem se intensificado.^{1,2}

O ponceau 4R (P4R) é um corante azo comum nas indústrias alimentícia e têxtil, conhecido por sua alta estabilidade e resistência. No entanto, sua presença em efluentes representa risco ambiental e a saúde humana, pois seus subprodutos podem ser mutagênicos e carcinogênicos. Como os métodos de tratamento tradicionais não conseguem remover ou mineralizar o corante de forma eficaz, novas tecnologias se fazem necessárias.³

O Processo de Oxidação Avançada (POA) surge como alternativa para a degradação e mineralização de diferentes poluentes persistentes presentes em águas residuais. Os POAs agem formando radicais livres, como o radical hidroxila, que são capazes de oxidar e quebrar a maioria dos compostos orgânicos na água. Dentro dos POAs, a fotocatalise heterogênea com dióxido de titânio (TiO_2) é uma das tecnologias mais promissoras para a degradação desses compostos.⁴

As nanopartículas de TiO_2 têm atraído atenção devido ao seu custo-benefício, propriedades físicas e químicas que dependem exclusivamente do tamanho da partícula, morfologia, fase e cristalinidade. Essa versatilidade permite que as nanopartículas de TiO_2 sejam empregadas em uma ampla gama de aplicações, como dispositivos optoeletrônicos, células solares, fotocatalise, atividades antimicrobianas, catalisadores, desintoxicação ambiental, sensoriamento, células de combustível, baterias de íons de lítio e produção de hidrogênio.⁵⁻⁸

Apesar do grande potencial e das qualidades notáveis das nanopartículas de TiO_2 , o seu uso tecnológico é limitado.⁹ As limitações são decorrentes da baixa área superficial e a visibilidade delimitada na região visível do espectro, pois a ampla banda proibida da fase anatase ($\sim 3,2$ eV) permite sua ativação apenas sob radiação UV. Além disso, a rápida

recombinação dos pares elétron-buraco diminui a eficiência do processo, restringindo a aplicação prática do TiO_2 .¹⁰

A fim de superar esses desafios, pesquisadores tem explorado a modificação da superfície do TiO_2 como uma estratégia promissora para otimizar a sua atividade fotocatalítica.¹¹ A deposição de metais nobres na superfície de nanopartículas de TiO_2 , como a prata (Ag) e o cobre (Cu),^{12,13} tem se mostrado uma abordagem eficiente para a modificação da estrutura eletrônica, expandindo seu comprimento de onda de absorção do UV para a região do visível por estreitamento eficiente da banda proibida.¹⁴ Além disso, essa técnica pode ser utilizada também para dificultar a recombinação de portadores de carga gerados pela luz, impedindo a transferência vetorial de elétrons para as ilhas de nano metais depositados, o que contribui para aumentar a fotoatividade.¹⁵

Diversos métodos químicos são empregados na síntese de nanopartículas, entre os quais se destacam a precipitação química, método pechini, o método hidrotermal e o sol-gel.¹⁶⁻¹⁹ Entre eles, o método sol-gel é uma abordagem eficiente que proporciona uma distribuição uniforme. As vantagens deste método são devidas ao benefício de obter pó cristalino nanométrico de alta pureza, distribuição estreita de tamanho de partícula e a obtenção de estruturas nanométricas homogêneas em baixas temperaturas de síntese.²⁰

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo investigar a eficiência fotocatalítica do TiO_2 obtido pelo método sol-gel e posteriormente tratado termicamente por via hidrotermal. O material foi modificado com nanopartículas de Ag e Cu, incorporadas em sua superfície por fotodeposição, de modo a potencializar suas propriedades catalíticas. A avaliação foi realizada a partir da degradação do corante P4R, utilizado como contaminante modelo devido à sua ampla aplicação industrial e reconhecida persistência no meio ambiente.

Dióxido de titânio (TiO_2)

A nanotecnologia tem revolucionado a forma como manipulamos a matéria em escala nanométrica, abrindo portas para a inovação em diversas áreas. A capacidade de controlar materiais em uma escala pequena permite a exploração de propriedades únicas, como as propriedades ópticas. Os pontos quânticos, ao serem excitados por radiação luminosa, emitem luz de cores específicas que dependem diretamente do seu tamanho, esse fenômeno conhecido como confinamento quântico, é fundamental para a criação de novas tecnologias.^{21,22}

O TiO_2 é um óxido metálico semicondutor, sendo frequentemente utilizado como fotocatalisador. Suas propriedades autolimpantes, antibacterianas e purificação do ar o tornam um material de grande interesse. Ademais, é um material de baixo custo, não tóxico e possui alta estabilidade química e térmica.²³ Com elevada constante dielétrica, o TiO_2 é promissor para a fabricação de componentes eletrônicos, como capacitores de alta densidade e dispositivos de memória.²⁴ Sua alta refração e opacidade o tornam um pigmento branco ideal para tintas e revestimentos.²⁵ Sua não toxicidade e facilidade de dispersão também o qualificam para aplicações em diversos setores, incluindo a indústria alimentícia, cosmética e farmacêutica.²⁵

O TiO_2 é um composto extraído da *Ilmenita*, um dos minérios mais abundantes da Terra.²⁶ Comercialmente, a produção de TiO_2 ocorre por dois processos principais, o processo de sulfato e o processo de cloreto. A escolha de cada processo depende das propriedades desejadas no pigmento final e das características do minério utilizado.²⁷

A estrutura cristalográfica dos polimorfos de TiO_2 é encontrada em três fases na natureza (Figura 1), sendo elas, a anatase (tetragonal), o rutilo (tetragonal) e a broquita (ortorrômbica). O rutilo é a fase cristalina mais estável do TiO_2 , enquanto a anatase e a broquita são formas metaestáveis que, sob altas temperaturas, tendem a se transformar em rutilo.²⁸

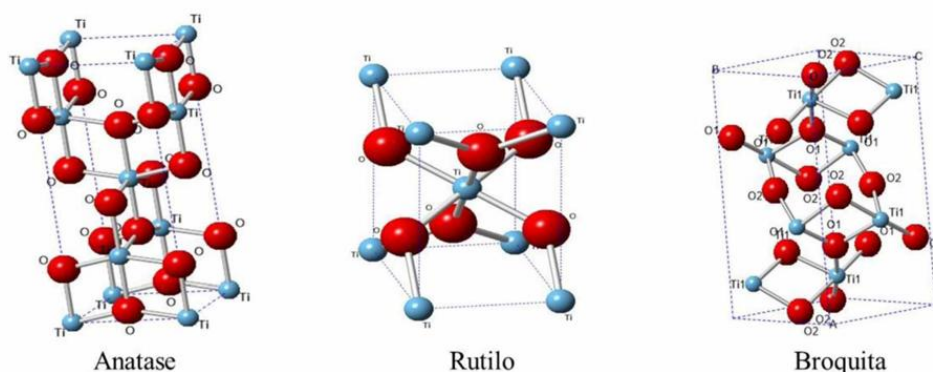


Figura 1- Estruturas do TiO_2 .²⁷

A fase anatase do TiO_2 exerce um papel crucial em sua atividade fotocatalítica, devido à sua fase alotrópica mais ativa e sua estrutura cristalina, que favorece a formação de defeitos e a adsorção de espécies reativas.²⁹ A menor taxa de recombinação de pares elétron-buraco na anatase contribui para uma maior produção de radicais hidroxila. A broquita TiO_2 tem sido menos explorada em estudos de fotocatalise em virtude das dificuldades na obtenção de amostras puras e da sua menor atividade, comparada à anatase.²⁸

Síntese de TiO_2

Nanopartículas de TiO_2 podem ser obtidas por diversas rotas sintéticas, dentre as mais comumente são sol-gel, hidrotérmico, solvotérmico, síntese assistida por micro-ondas.¹⁶⁻¹⁹

Os métodos de síntese podem ser classificados em método de fase úmida e de fase gasosa. A fase úmida oferece maior flexibilidade para o controle da estequiometria dos reagentes e das propriedades do material, por outro lado, a fase gasosa é promissora para produção em larga escala, pois não requer processos complexos. Entre os métodos de fase úmida, os mais comumente empregados são o sol-gel, hidrotérmico e o solvotérmico, que permitem a obtenção de produtos com alta pureza e homogeneidade.^{30,31}

O método sol-gel é utilizado devido à sua versatilidade na obtenção de óxidos com propriedades físico-químicas ajustáveis como, tipo de precursor, pH e relação água/precursor, permitindo a obtenção de compostos com alta área superficial, alta

pureza, homogeneidade e com morfologia controlável. Este método de síntese ocorre em uma etapa e consiste na formação de um gel (nanopartículas ou partículas) a partir de uma solução homogênea.³²

Modificações no TiO₂

O TiO₂ possui algumas desvantagens que limitam seu uso em determinadas aplicações. A principal delas é a sua ampla banda proibida (3,0–3,2 eV) entre as bandas de condução (CB) e de valência (VB), que exige radiação ultravioleta para promover a excitação eletrônica. Essa característica restringe sua atividade fotocatalítica à região do espectro eletromagnético onde a radiação solar é menos abundante. Além disso, a alta taxa de recombinação de pares elétron-buraco no TiO₂ diminui a eficiência de conversão de energia luminosa em energia química ou elétrica.³³

As nanopartículas de TiO₂ não modificadas apresentam baixa eficiência fotocatalítica sob luz solar, devido a sua restrita absorção na região ultravioleta, que representa apenas 3 a 5% do espectro solar. Essa limitação decorre da ampla banda proibida (~ 3,2 eV) da fase anatase, que impede a ativação do material por radiação visível. Para superar esse desafio e ampliar a faixa de absorção, diversos estudos, tem buscado estratégias capazes de reduzir a energia da banda proibida e favorecer a utilização da luz visível.³⁴⁻³⁸ Uma das abordagens mais eficazes é a modificação da superfície do TiO₂ com metais como a prata (Ag) e o cobre (Cu), que atuam tanto no ajuste da estrutura eletrônica quanto na redução da recombinação dos pares elétron-buraco, resultando em maior eficiência fotocatalítica.^{39,40}

As nanopartículas de Ag têm o potencial de realizar a recombinação não radiativa de portadores de carga no nível de energia Ag(3d) abaixo da CB, melhorando a vida útil do elétron/buraco sob irradiação UV nos catalisadores de TiO₂, potencializando a eficiência fotocatalítica.⁴¹ Já a modificação do TiO₂ com Cu amplia sua sensibilidade à luz visível, facilitando a excitação do fotocatalisador e atuando como um eficiente sítio de armadilha de portadores de carga. Essa propriedade favorece a separação de elétrons e buracos, reduzindo a taxa de recombinação, melhorando o desempenho do material em aplicações fotocatalíticas.⁴²

Fotocatálise heterogênea

A fotocatalise surge como uma das tecnologias mais promissoras para o tratamento de águas residuais, entre os vários processos de oxidação avançada (POAs). A fotocatalise heterogênea por semicondutores, como o TiO₂, tem sido amplamente estudada para o tratamento de efluentes contendo corantes azo e outros poluentes orgânicos.^{43,44}

A base da fotocatalise heterogênea é a fotoativação de um semicondutor, TiO₂. Quando esse semicondutor é irradiado ou excitado por uma energia luminosa, igual ou superior a sua energia de *band gap*, um elétron da BV é transferido para a BC, levando a formação de pares elétron/buraco (e^-/h^+) com capacidade de transporte e transferência de carga, conforme mostrado na Figura 2. Esse par elétron-buraco, quando na superfície do

catalisador, pode sofrer recombinação interna gerando calor ou reagir com espécies adsorvidas e participar de reações de oxidação-redução.^{43,45-48}

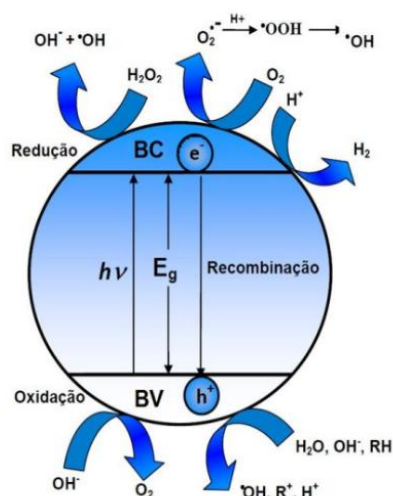


Figura 2- Esquema simplificado para a fotoativação de um semicondutor, e da produção de radicais oxidantes.⁴⁷

Além disso, os buracos localizados na BV apresentam potenciais de oxidação na faixa de +2,0 a +3,5V.⁴⁷ A presença de oxigênio é essencial para prevenir o processo de recombinação do par elétron-buraco.⁴⁵ O oxigênio atua consumindo o elétron (e^-_{bc}), iniciando a sequência de reações, estas reações incluem a formação e a decomposição do peróxido de hidrogênio, resultando na produção de radicais de hidroxila, levando a degradação de poluentes orgânicos.^{43,45-48}

A fotocatalise heterogênea tem sido utilizada para degradar uma ampla gama de contaminantes, incluindo substâncias orgânicas como alcanos, álcoois, ácidos carboxílicos, fenóis, polímeros, pesticidas, herbicidas e corantes.⁴⁹ Desse modo, essa técnica também é eficaz na degradação de moléculas biológicas, com capacidade de inativar microrganismos como bactérias, o que a atribui importante atividade bactericida.⁵⁰ Diversos estudos também se concentram na aplicação específica da fotocatalise para a remoção de corantes têxteis, e corantes utilizados no ramo alimentício e cosmético.⁵¹⁻⁵³

Ponceau 4R

O Ponceau 4R, também conhecido como E124, é um corante azo (-N=N-) sintético amplamente utilizado nas indústrias alimentícia, cosmética e farmacêutica para conferir coloração vermelha intensa a produtos como bebidas, confeitos, sobremesas e medicamentos.^{54,56} Quimicamente, trata-se de um sal trissódico do ácido 1-(4-sulfo-1-naftil-azo)-2-naftol-6,8-di-sulfônico (Figura 3).

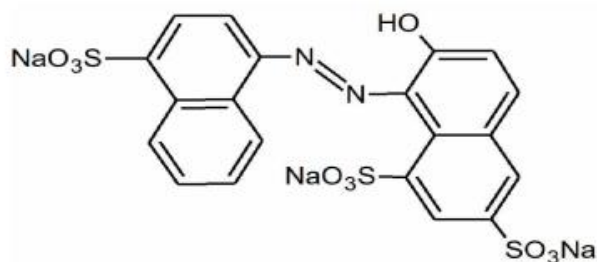


Figura 3- Estrutura do corante Ponceau 4R. ²⁷

Apesar de sua alta estabilidade térmica e resistência à luz, o Ponceau 4R apresenta baixa biodegradabilidade, o que contribui para a sua persistência no ambiente quando descartado em efluentes industriais.⁵⁴ Além disso, estudos toxicológicos indicam que, em concentrações elevadas, pode provocar reações alérgicas e efeitos adversos, sendo seu uso regulamentado por órgãos da saúde com limites máximo de ingestão diária aceitável.⁵⁴⁻⁵⁶

PARTE EXPERIMENTAL

Síntese TiO₂ puro

O material TiO₂ puro foi sintetizado pelo método sol-gel.⁶⁶ Para a síntese, o tetraisopropóxido de titânio foi aplicado como o precursor de titânio.

Na síntese, 150 mL de tetraisopropóxido de titânio (97%, Sigma Aldrich) foram adicionados a 380 mL de álcool isopropílico (99,5%, Neon), mantidos sob agitação magnética (Centauro) durante 30 minutos a temperatura ambiente. Em seguida, 200 mL de água destilada foram vertidas nesta solução, a qual foi mantida sob agitação magnética (Centauro) por 30 minutos. O precipitado branco foi separado com auxílio de uma centrífuga (Universal 320R, Hettich), seguida de lavagem com água destilada por três vezes. Após lavar e remover o sobrenadante, o material decantado foi transferido para um recipiente de teflon com capacidade de 100 mL, e submetido a tratamento térmico hidrotérmico, que consiste no tratamento térmico de um sistema heterogêneo em meio aquoso sob controle da temperatura e/ou da pressão. A reação ocorreu em um reator hidrotermal mantido em estufa (Lucadema) a 200°C por 8 horas. Após o tratamento térmico, o material foi levado para secagem em estufa (Lucadema) a 100°C por 6 horas.

Modificação superficial de TiO₂ por fotorredução com metais

A modificação superficial do TiO₂ com Ag e Cu foi realizada por fotorredução, utilizando nitrato de prata (AgNO₃) e nitrato de cobre tri-hidratado [Cu(NO₃)₂.3H₂O] como precursores metálicos.²⁷

Para a modificação com Ag, preparou-se uma suspensão em béquer contendo 10 mL de água destilada, adicionou-se 1,84g do fotocatalisador TiO₂ puro e 0,53g de AgNO₃ (99%, Neon). A quantidade de AgNO₃ adicionada foi ajustada para obter concentração de

5,0% de Ag na superfície do TiO₂. A suspensão foi mantida sob agitação por 30 minutos antes de ser submetida ao processo de fotorredução. Após esse tempo, aplicou-se radiação UV por um período de 30 minutos. A fonte de radiação UV foi mantida a 10 cm de distância do sistema na posição vertical em relação ao béquer, a intensidade luminosa da lâmpada UV (Philips) foi de 16W.

De forma análoga, para a modificação com Cu, uma segunda suspensão foi preparada em béquer, adicionando-se 10 mL de água destilada, 1,84g do TiO₂ puro e 0,2823g de Cu(NO₃)₂.3H₂O (95%, Neon). As concentrações de Cu na superfície do TiO₂ foram ajustadas para o mesmo teor de 5,0%. Esta suspensão também foi agitada por 30 minutos e, em seguida, exposta à radiação UV por mais 30 minutos para a fotorredução.

Após a conclusão dos respectivos processos de fotorredução, cada material foi lavado por 3 vezes com água destilada, tendo auxílio de uma centrífuga (Universal 320R, Hettich). O sobrenadante foi descartado e o material foi seco em estufa (Lucadema) a 70°C por 2 horas.

Caracterizações

As amostras foram caracterizadas por diferentes técnicas físico-químicas. A caracterização térmica do TiO₂ foi realizada por termogravimetria acoplada à calorimetria diferencial exploratória (TG/DSC), utilizando um analisador NETZSCH STA 449F3 disponibilizado pelo CRTI/UFG, com o objetivo de avaliar as transformações da amostra durante o aquecimento. A estrutura cristalina do TiO₂ puro e dos materiais modificados com Ag (TiO₂Ag5%) e Cu (TiO₂Cu5%) foi investigada por difração de raios X (DRX), em um difratômetro D6 Phaser (Bruker) disponibilizado pelo CAiTec/UEG, na faixa de 2θ entre 10° e 90°. Os grupos funcionais presentes no TiO₂ puro foram identificados por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), empregando um espectrômetro Frontier (PerkinElmer) com pastilhas de KBr disponibilizado pelo CAiTec/UEG.

Ensaio Fotocatalíticos

Os testes para determinação da atividade fotocatalítica foram realizados utilizando 100 mg.L⁻¹ de fotocatalisador e uma concentração de corante equivalente a 31 mg.L⁻¹, em um reator com capacidade de 200 mL. A fonte de luz ultravioleta foi uma lâmpada germicida de 16W (Philips). A suspensão, inicialmente, foi mantida no escuro, sob banho ultrassônico (GT Sonic, Professional Ultrasonic Cleaner) por 30 minutos. Em seguida, a suspensão foi exposta a radiação por 120 minutos. As amostras foram coletadas, a cada 20 minutos, com auxílio de uma seringa. Para a determinação da concentração de Ponceau 4R foi realizada leitura em um espectrofotômetro (UV-M51, Bel Photonics) 200 a 800 nm. Os ensaios foram realizados em duplicata.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise termogravimétrica

Para otimizar o tratamento térmico, avaliar as temperaturas de transição de fase e a estabilidade térmica do óxido sintetizado, foram realizadas análises térmicas do TiO_2 .

A atividade térmica do TiO_2 foi acompanhada pela análise termogravimétrica (Figura 4). A curva TG apresenta uma faixa de 34,8 °C a 106,3 °C, com um pico endotérmico máximo atingindo 73,9 °C. Esse comportamento é típico da eliminação de água fisicamente adsorvida e de solventes orgânicos residuais utilizados durante a síntese. Essa perda inicial de massa, que neste caso contribui com parte dos 10,97% totais de perda, se estende até 600 °C.^{57,58} A análise foi conduzida até a temperatura de 600 °C, pois o foco do trabalho é avaliar o comportamento térmico do material em condições brandas, ou seja, abaixo de 600 °C. Essa escolha evita alterações estruturais significativas, como a transição de fase anatase - rutilo, que geralmente ocorre acima de 600 °C, preservando assim as características morfológicas e a área superficial para um bom desempenho fotocatalítico.^{59,60}

No segundo evento, na curva DSC, observou-se uma curva exotérmica ampla entre aproximadamente 200 °C e 450 °C, e é acompanhada de uma perda de massa contínua. Essa região pode ser associada ao início da reorganização estrutural da matriz amorfa do TiO_2 , preparando-se para a cristalização da fase anatase.⁶¹

Acima de 450–500 °C, observa-se a estabilização térmica da curva TG e o fim das transições térmicas detectadas por DSC, indicando que o material atinge um estado estrutural mais estável. Isso sugere a formação de uma rede mais ordenada, possivelmente com início de fase cristalina, onde o TiO_2 deixa de apresentar comportamento amorfo após essa faixa de temperatura.⁵⁷

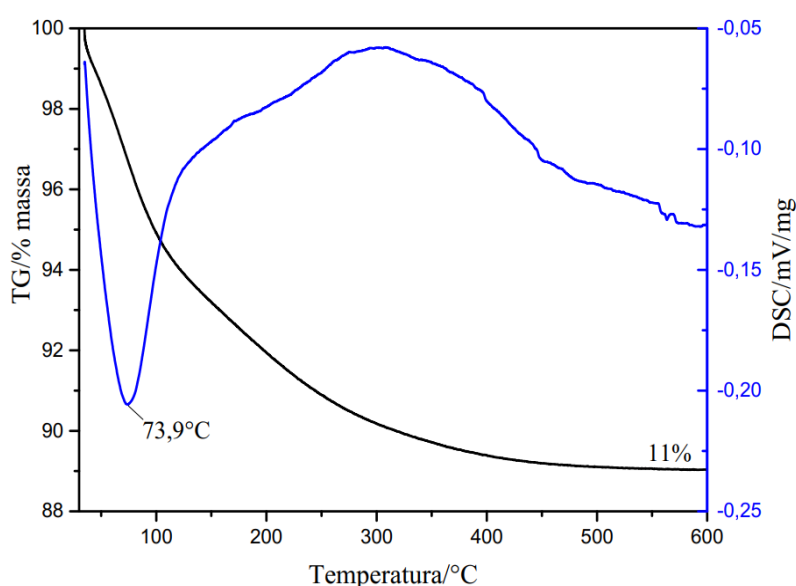


Figura 4 – Curva termogravimétrica do óxido sintetizado pelo método sol-gel sem tratamento térmico.

De modo geral, os resultados da análise térmica evidenciam que o TiO_2 sintetizado apresenta boa estabilidade até temperaturas próximas a 600°C . Esse comportamento é relevante para aplicações fotocatalíticas, uma vez que a preservação da fase anatase e de uma elevada área superficial favorecem o desempenho do material. Ressalta-se que a análise térmica foi realizada apenas para o TiO_2 puro, utilizado como matriz, pois este passa por tratamento térmico na etapa hidrotermal. Já as amostras modificadas com Ag e Cu não foram submetidas a essa análise, uma vez que a fotorredução empregada na incorporação dos metais não altera a estrutura cristalina da matriz, tornando desnecessária nova caracterização térmica.

Difração de raios X

A análise dos padrões de DRX das amostras de TiO_2 puro e modificado com Ag e Cu são indicados nas Figuras 5. Todos os picos de difração observados revelaram que a fase cristalina predominante em todas as amostras é a anatase, conforme identificado pelo cartão de referência JCPDS 21-1272, com a presença de traços de broquita representado no plano 121 (JCPDS 29-1360).

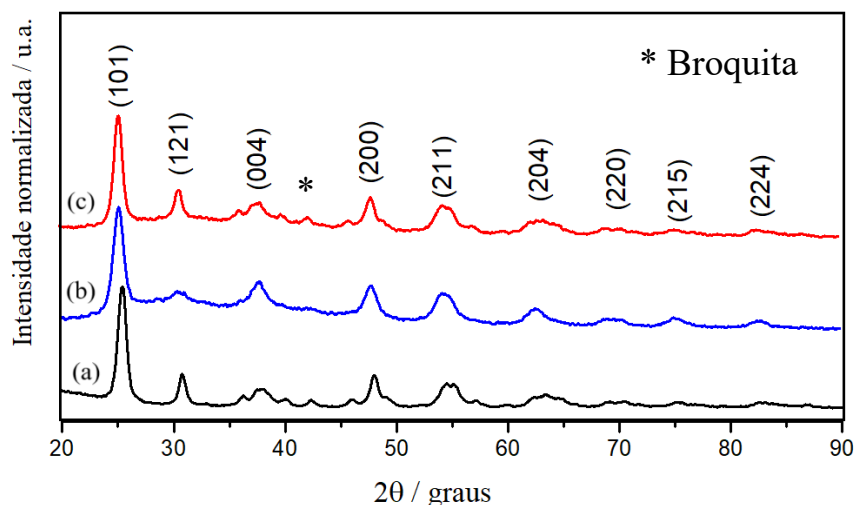


Figura 5 – Difratomogramas de raios X das amostras TiO_2 puro modificadas com Ag e Cu. (a) TiO_2 puro, (b) $\text{TiO}_2\text{Cu}5\%$, (c) $\text{TiO}_2\text{Ag}5\%$.

Os difratogramas DRX mostram a fase anatase como fase predominante em todas as amostras. Contudo, um pico entre $40\text{--}50^\circ$ (2θ), atribuído ao plano (221) da broquita, é claramente observado em TiO_2 puro (a) e TiO_2 modificado com Ag (c), porém atenuado em TiO_2 modificado com cobre (b). A presença do Cu pode ter inibido o crescimento do cristalito do TiO_2 .⁶²

Não foram detectados picos de difração adicionais correspondentes as fases cristalinas Ag e Cu, sugerindo que a redução de Ag e Cu sobre a superfície do TiO_2 não alterou a estrutura cristalina do óxido. Isso pode indicar que os modificantes metálicos são colocados na superfície dos cristais sem serem covalentemente ancorados na rede

cristalina.^{63,64} Esse resultado corrobora com o que foi mencionado na análise térmica, em que apenas o TiO_2 puro foi avaliado, uma vez que a fotorredução empregada na modificação com metais não promove alterações estruturais na matriz, tornando desnecessária nova caracterização térmica.

Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

O espectro de infravermelho do TiO_2 puro, conforme ilustrado na Figura 6, apresenta bandas de absorção características que permitem a sua identificação e a análise da sua superfície. Uma banda de absorção larga e intensa na região de $3000\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ é atribuída à vibração de estiramento dos grupos hidroxila ($-\text{OH}$) e das moléculas de água adsorvidas na superfície do TiO_2 . A banda em $\sim 1620\text{ cm}^{-1}$ corresponde aos modos de flexão das moléculas de água. As bandas de estiramento das ligações Ti-O e Ti-O-Ti estão presentes na região abaixo de 1000 cm^{-1} , com uma banda larga e intensa centrada por volta de $600\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ que é característica da rede cristalina do TiO_2 .^{65,66}

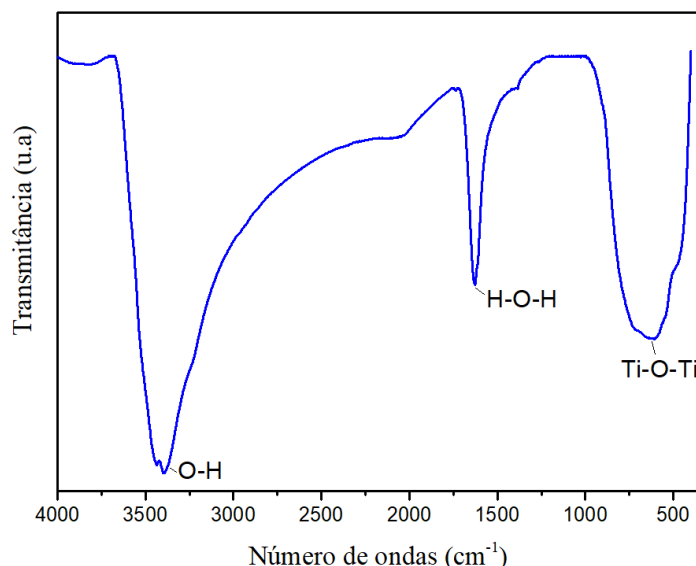


Figura 6– Espectros de infravermelho da amostra de TiO_2 puro.

A análise dos espectros de FTIR das amostras $\text{TiO}_2\text{Ag}5\%$ e $\text{TiO}_2\text{Cu}5\%$ (Figura 7) revela bandas típicas do TiO_2 e de grupos funcionais associados. A banda larga e intensa observada entre 3600 e 3400 cm^{-1} é atribuída às vibrações de estiramento do grupo hidroxila ($-\text{OH}$), indicando a presença de água adsorvida e/ou hidroxilas superficiais. O pico em torno de 1630 cm^{-1} está relacionado à deformação de dobramento da molécula de água (H-O-H) fisicamente adsorvida na superfície do material.

A região abaixo de 1000 cm^{-1} apresenta uma banda larga e intensa, estendendo-se de 800 a 400 cm^{-1} , característica das vibrações de estiramento da ligação Ti-O-Ti , confirmando a formação da rede cristalina do TiO_2 .

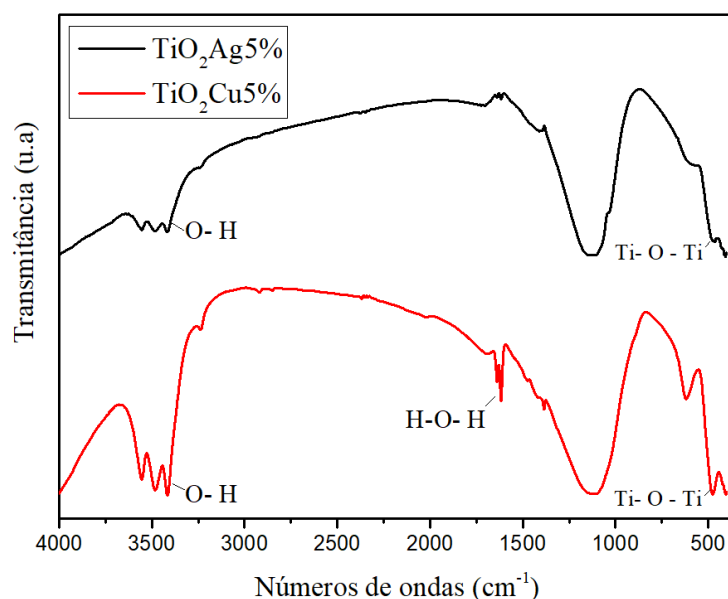


Figura 7– Espectros de infravermelho das amostras TiO₂Ag5% e TiO₂Cu5%.

De forma geral, os espectros das amostras são bastante semelhantes, indicando que a dopagem com 5% de Ag ou Cu não promoveu alterações significativas nas principais bandas de absorção do TiO₂. Cabe destacar, contudo, que o FTIR é mais eficiente na identificação de grupos funcionais do que na detecção de pequenas modificações estruturais ou da presença direta dos dopantes em baixas concentrações.

Assim, os resultados de FTIR obtidos devem ser considerados preliminares, sendo necessárias análises complementares e metodologicamente mais refinadas para confirmar com maior precisão os efeitos da modificação metálica na matriz de TiO₂.

Ensaio de degradação fotocatalítica do Ponceau 4R

Para investigar a eficiência fotocatalítica dos fotocatalisadores, foram conduzidos experimentos de fotodegradação usando o corante P4R. Durante os testes, foram observadas e registradas as alterações no espectro de absorção UV-Vis. Os resultados obtidos em escala de laboratório são apresentados na Tabela 1 e na Figura 8.

Tabela 1 – Descoloração do corante P4R por via fotocatalítica em 120 minutos de reação.

Fotocatalisador	k ₁ / min	R ²	Descoloração
TiO ₂ puro	0,0081	0,9782	64%
TiO ₂ Ag5%	0,01652	0,98345	83%
TiO ₂ Cu5%	0,00672	0,99495	54%

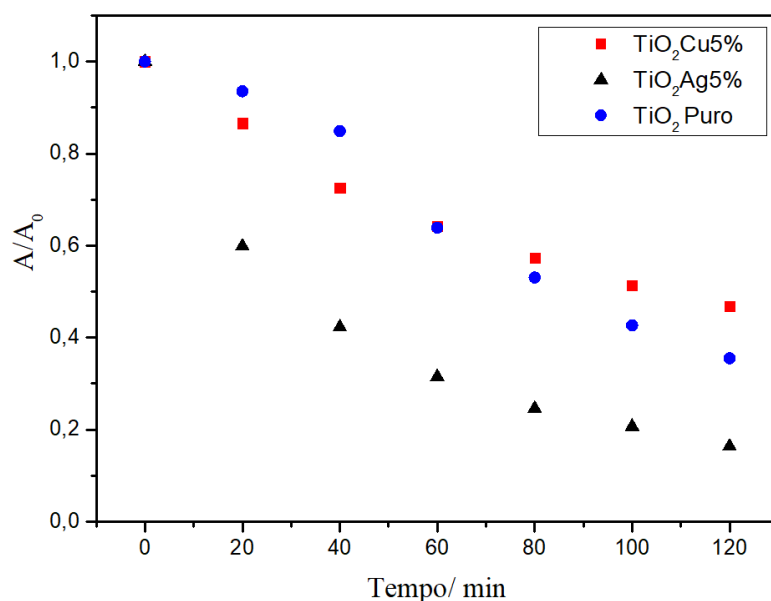


Figura 8 – Avaliação dos fotocatalisadores: (●) TiO₂ puro; (■) TiO₂Cu5%; (▲) TiO₂Ag5%. Condições experimentais: Reator em escala de laboratório; tempo de reação: 120 min; [P4R] = 31 mg.L⁻¹; [Fotocatalisador] = 100 mgL⁻¹; pH = 6,9; Fonte de irradiação: lâmpada germicida UV de 16W.

A Tabela 1 e a Figura 8 apresentam os resultados do estudo fotocatalítico, comparando a eficiência de três diferentes materiais na descoloração do corante P4R. Os resultados obtidos demonstram discretas diferenças em relação aos catalisadores empregados. O TiO₂ modificado com Ag destacou-se por sua alta eficiência, apresentando uma taxa de descoloração e uma constante de velocidade de primeira ordem significativamente superior ao TiO₂ puro.

Esse desempenho pode ser atribuído ao papel da Ag como um sequestrador de elétrons, facilitando a captura dos elétrons excitados pela radiação UV, inibindo a rápida recombinação dos pares elétron-buraco. Com isso, a vida útil das espécies reativas (elétrons e buracos) é prolongada, permitindo que mais radicais hidroxila e ânions superóxido sejam gerados, sendo os principais responsáveis pela degradação do corante. Além disso, a Ag possui ação bactericida, atuando na inibição de enzimas e na interação com o DNA bacteriano, o que contribui para a eliminação de microrganismos.⁶⁸ Esse efeito é registrado na literatura, resultados mostram que o TiO₂ modificado com Ag é um dos fotocatalisadores mais eficazes para a eliminação de substâncias orgânicas em soluções aquosas.^{69,70}

Em contrapartida, com o fotocatalisador TiO₂ modificado com Cu, os resultados foram menos promissores. Sua constante de velocidade foi menor que a do TiO₂ puro, resultando em uma descoloração de 54%. Embora o Cu também possa atuar como receptor de elétrons e diminuir o *band gap*, sua eficácia é altamente dependente da concentração e do método de incorporação ao TiO₂. Isso indica que, nas condições experimentais do estudo, a modificação com Cu não apenas falhou em melhorar a atividade fotocatalítica do TiO₂, como também a inibiu. Uma possível explicação para esse resultado é o fato de o Cu ter atuado como um centro de recombinação para os pares

elétron-buraco fotogerados. Essa recombinação acelerada diminuiu a disponibilidade das espécies reativas de oxigênio.⁷¹⁻⁷³

CONCLUSÃO

O material TiO₂ puro foi sintetizado com eficiência pelo método sol-gel. A análise térmica evidenciou que o TiO₂ obtido apresenta resultados esperados típicos de materiais sintetizados via rota úmida. Com base na análise de DRX, as amostras de TiO₂, tanto pura quanto as modificadas com a Ag e Cu, mantiveram a estrutura cristalina anatase como fase predominante, e a incorporação com metais não alterou a rede cristalina do TiO₂ devido à ausência de picos de difração referentes a Ag e Cu. No espectro de infravermelho do TiO₂ puro foi possível observar a presença de grupos hidroxila, moléculas de água e vibrações de estiramento das ligações de Ti-O e Ti-O-Ti, típicas da estrutura do TiO₂. Já os espectros FTIR das amostras TiO₂Ag5% e TiO₂Cu5% apresentaram apenas diferenças sutis, insuficientes para caracterizar mudanças relevantes na matriz do TiO₂. Quanto ao desempenho fotocatalítico, a incorporação de Ag promoveu uma melhoria expressiva da atividade do catalisador, ao contrário do observado para o Cu, que não apresentou efeito significativo.

REFERÊNCIAS

1. ALBORNOZ, S. L. M.: **Síntese e caracterização de fotocatalisadores mistos contendo TiO₂ e cobre e avaliação da atividade fotocatalítica frente a um substrato modelo (fenol)**; Tese de doutorado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/46/46133/tde-28022007-174000/en.php>. Acesso em: 03 de ago. 2025.
2. SEIXAS, J. N.; Silva, G. E. H.; NASCIMENTO, L. E.; NETRO, N. F. A.; MOTTA, F. V.; CARREÑO, N. L.; Estudo da obtenção de nanopartículas de TiO₂ pelos métodos solvotérmico assistido por micro-ondas e sol-gel. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v.5, p.18-24, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.15210/rbes.v5iEsp.14409>. Acesso em: 10 ago. 2025.
3. RODRIGUES, Patrícia da Silva. **Estudo da ingestão de sete corantes artificiais pela população brasileira**. Tese (Doutorado em Ciência e tecnologia e Tecnologia de alimentos) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/233291>. Acesso em: 18 ago. 2025
4. JALLOULI, N.; PASTRANA-MARTÍNEZ, L. M.; RIBEIRO, A. R.; N.; MOREIRA, N. F.; FARIA, J. L.; HENTATIA, O.; SILVA, A. M. T.; MOHAMED, K. Heterogeneous photocatalytic degradation of ibuprofen in ultrapure water, municipal and pharmaceutical industry wastewaters using a TiO₂/UV-LED system. **Chemical Engineering Journal**, v.334, p. 976-984, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.045>. Acesso em: 4 de ago. 2025.
5. PANDEY, A; SINGH, F; GARG, A; KANJILAL. D.; KUMAR, L. Work function modulation and charge transport studies of 100 MeV Au⁷⁺ ions irradiated TiO₂ films for optoelectronic devices. **Optical Materials**, v.143, n.114180, 2023. Disponível em:

<https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.optmat.2023.114180>. Acesso em: 20 set. 2024.

6. BIBI, S.; SAKHAWAT, S. S.; MUHAMMAD, S.; SIDDIQ, M.; KIRAN, L.; ALDOSSARI, S. A.; SALEH, M. S. M.; SARWAR, S. Cu-doped mesoporous TiO₂ photocatalyst for efficient degradation of organic dye via visible light photocatalysis. **Chemosphere**, v. 339, n. 139583, oct. 2023. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.chemosphere.2023.139583>. Acesso em: 20 set. 2024.

7. SUKHADEVE, G.K.; BANDEWAR, H.; JANBANDHU, S.Y.; JAYARAMAIAH, J.R.; GEDAM, R.S. Photocatalytic hydrogen production, dye degradation, and antimicrobial activity by Ag-Fe co-doped TiO₂ nanoparticles. **Journal of Molecular Liquids**, v.369, n. 120948, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120948>. Acesso em: 20 set. 2024.

8. BORREGO-PÉREZ, J.A.; GONZÁLEZ, F.; MEZA-AVENDANO, C. A.; MONTOYA, I. L. S.; LOPEZ- JUÁREZ, R.; HERNÁNDEZ, I.; ALONSO-GUZMAN, E. M.; MARTINEZ-MOLINA, W.; CHAVEZ-GARCIA, H. L. Structural, optical and photoluminescence properties of TiO₂ and TiO₂: Tm³⁺ nanopowders. **Optik**, v. 227, n.166083, feb. 2021. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.ijleo.2020.166083>, Acesso em: 20 set. 2024.

9. GANDHI, V. G.; MISHRA, M. K.; RAO, M. S.; KUMAR, A.; JOSHI, P. A.; SHAH, D. O. Comparative study on nano-crystalline titanium dioxide catalyzed photocatalytic degradation of aromatic carboxylic acids in aqueous medium. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v.17, p. 331 - 339, 2011. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.jiec.2011.02.035>. Acesso em: 20 set. 2024.

10. BINAS, V.; Venieri, D.; Kotzias, D.; Kiriakidis, G. Modified TiO₂ based photocatalysts for improved air and health quality. **J Materiomics**, v.3 p.3-16, 2017. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.jmat.2016.11.002>. Acesso em: 20 set. 2024.

11. NIMMY, A. V.; ANANDAKUMAR, V. M.; BIJU, V. Enhancing the visible-light sensitive photocatalysis of anatase TiO₂ through surface-modification. **Discover Materials**, v. 5, n.45, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43939-025- 00180-3>. Acesso em: 05 de ago. 2025.

12. STEFANOV, B. I. Photoelectrochemical and photocatalytic activity of photodeposition-functionalized Ag/TiO₂ and MnO_x/TiO₂ thin films. **Catalysis Today**, Bulgaria, v.459, n. 115447, p. 1-13, nov. 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586125002652>. Acesso em: 13 ago. 2025.

13. GRIBOV, E.; KOSHEVOY, E.; FAZLIEV, T.; LYULYUKIN, M.; KOZLOV, D. SELISHCHEV, D. Effect of surface Fe- and Cu-species on the flat-band potential and photoelectrocatalytic properties of N-doped TiO₂. **Rev. De fotoquímica e fotobiologia A: Quím**, v. 464, n 116342, 2025. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.jphotochem.2025.116342>. Acesso em: 05 mai. 2025.

14. DEVI, L. G.; KAVITHA, R.; NAGARAJ, B. Bulk and surface modification of TiO₂ with sulfur and silver: Synergetic effects of dual surface modification in the enhancement of photocatalytic activity. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v.40, p. 832-839, 2015. Disponível em: [https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.mssp.2015.07.070](https://doi.org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.mssp.2015.07.070). Acesso em: 13 set. 2024.
15. AKHANI, S. B. Pathak, J.; Akhani, T.; Rathore, M. S. Structural and optical properties of Mg doped TiO₂ nanoparticles synthesized by sol-gel method. **Materials Today: Proceedings**, v. 40, p. 832-839, 2024. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.matpr.2024.02.029>. Acesso em: 13 set. 2024.
16. SAEFUMILLAH, A.; BAGUS, D. O. A.; RAMADHAN, R.; DEMY, R. F.; YULIZAR, Y.; SHOFIYANI. A. RAHMALIA, W.; HAIRIL, A. A. Photocatalytic degradation of methylene blue: unraveling structure-activity relationships and performance evaluation of Sol-Gel synthesized TiO₂ versus commercial TiO₂_P25. **Journal of Molecular Structure**, v. 1347, n.143277, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.143277>. Acesso em: 01 mai. 2025.
17. CHALLAGULLA, Swapna; NAGARJUNA, Ravikiran; GANESAN, Ramakrishnan; ROY, Sounak. TiO₂ synthesized by various routes and its role on environmental remediation and alternate energy production. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.nanoso.2017.10.002>. Acesso em: 10 de ago. 2025.
18. LEE, D.; LEE, G.; AHMAD, M. D.; PARK, K.; KIM, D. Synthesis of ilmenite-derived TiO₂ photocatalysts with different morphologies: Enhanced photocatalytic activity using ammonium hexafluorotitanate. **Ceramics International**, v.51, p.28802-28811, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.04.089>. Acesso em: 02 ago. 2024
19. HEYDARI, Z.; AVILLEZ, R.; LIU, L.; LETICHEVSKY, S. Streamlined production of white and black TiO₂ nanoparticles using a modified Pechini method. **Ceramics International**, v.51, p.21867-21875. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.02.347>. Acesso em: 14 jul. 2025.
20. PERDOANA, L. *et al.* Comparative study of the Cu-TiO₂ nanostructures obtained by solgel and microwave assisted sol-gel methods. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, v. 114, p. 965-982, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10971-025-06757-x>. Acesso em: 14 jul. 2025.
21. DARBANDI, M.; DICKERSON, J. H. Nanoscale engineering of TiO₂ nanoparticles: Evolution of the shape, phase, morphology, and facet orientation. **Materials Letters** v. 180, p. 212-218, 2016. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.matlet.2016.05.109>. Acesso em: 01 ago. 2024.
22. HLALI, S.; KALBOUSSI, A.; SOUIFI, A. Nanomaterials and Nanoelectronics: Synthesis, Properties, and Applications for Nanotechnology. **Silicon Carbide - Materials, Devices and Emerging Applications**, 2024. Disponível em: <https://www.intechopen.com/online-first/1207754>. Acesso em: 15 ago. 2025.
23. PARAPARI, P. S.; IRANNAJAD, M.; MEHDILO, A. Modification of ilmenite surface properties by superficial dissolution method. **Minerals Engineering**, v. 92, p.

- 160-167, 2016. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.mineng.2016.03.016>. Acesso em: 01 ago. 2024
24. KHAN, S. et al. A review on nanotechnology: Properties, applications, and mechanistic insights of cellular uptake mechanisms. **Journal of Molecular Liquids**, v.348, n. 118008, 2022. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.molliq.2021.118008>. Acesso em: 14 jul. 2025.
25. ZHOU, B.; ZHAO, X.; LIU, Y. The latest research progress on the antibacterial properties of TiO₂ nanocomposites. *The Journal of The Textile Institute*, v.116, n.4, p.634-660, 2025. Acesso em 10 ago. 2025.
26. LIAO, Y. et al. Controllable synthesis of brookite/anatase/rutile TiO₂ nanocomposites and single-crystalline rutile nanorods array. **Journal of Materials Chemistry**, ed. 16, 2012.
27. SANTOS, L. M. **Síntese e caracterização de TiO₂ com modificações superficiais para aplicação em fotocatalise heterogênea**. Tese de doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlandia, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/19192>. Acesso em: 18 de ago. 2024.
28. PAWAR, A.; SENDOĞDULAR, S. T.; GOUMA, P. A Brief Overview of TiO₂ Photocatalyst for Organic Dye Remediation: Case Study of Reaction Mechanisms Involved in Ce-TiO₂ Photocatalysts System. **Journal of Nanomaterials**, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2018/5953609>. Acesso em: 18 de ago. 2024.
29. KANDIEL, T. A. *et al.* Tailored Titanium Dioxide Nanomaterials: Anatase Nanoparticles and Brookite Nanorods as Highly Active Photocatalysts. **Chemistry of materials**, v. 20, p. 2050-2060, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/cm903472p>. Acesso em: 18 de ago. 2024
30. WANG, Y. et al. Review of the progress in preparing nano TiO₂: An important environmental engineering material. **Journal of Environmental Sciences**, v.26, p.2139-2177, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.09.023>. Acesso em: 18 de ago. 2024.
31. KHAN, S.; KATSUMATA, K.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, V.; TERASHIMA, C.; FUJISHIMA, A. Gas-Phase Synthesis for Mass Production of TiO₂ Nanoparticles for Environmental Applications. *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications*, p. 953-973, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36268-3>. Acesso em: 15 de ago. 2025.
32. SWAMINATHEN, A. N *et al.* Evaluation of synthesis of TiO₂ nanoparticles via solgel method using acetone. **Materials Today: Proceedings**, 2024. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.matpr.2024.05.012>. Acesso em: 18 de ago. 2024.
33. YU, B. *et al.* Facile synthesis of AgNPs modified TiO₂@g-C₃N₄ heterojunction composites with enhanced photocatalytic activity under simulated sunlight. **Materials Research Bulletin**, v.26, 2020. Disponível em: <https://doi->

- org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.materresbull.2019.110641. Acesso em: Acesso em: 18 de ago. 2024.
34. MUNAWAR, T. FATIMA, S.; NADEEM, M. S.; MUKHTAR, F.; AKBA, U. A.; HAKEEM, A. S.; IQBA, F. Tunability of physical properties of NiO by the introduction of rare earth metal (Y, Ho) dual doping for natural sunlight-driven photocatalysis. **J Mater Sci: Mater Electron**, v.34, n.687, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10854-023-10095-5>. Acesso em: 15 ago. 2025.
 35. HUANG, J.; L, G.; ZHOU, Z.; JIANG, Y.; HU, Q.; XUE, C.; GUO, W. Efficient photocatalytic hydrogen production over Rh and Nb codoped TiO₂ nanorods. **Chemical Engineering Journal**, v.337, p.282-289, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.088>. Acesso em: 15 ago. 2025.
 36. CUNHA, H.O.; LEITE, A.M.B.; BABU, R.S.; GAMA FILHO, H.S.; DOS SANTOS, R.S.; DOS ANJOS, M.J.; DE BARROS, A.L.F. Enhancing the Efficiency of Solar Cells Based on TiO₂ and ZnO Photoanodes Through Copper Oxide: A Comparative Study Using Vitis labrusca Extract and N3 Ruthenium Dye. **Colorants**, v.3, p.329-349, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/colorants3040023>. Acesso em: 15 ago. 2025.
 37. HELAÏLI, N.; BESSEKHOUAD, Y.; BOUGUELIA, A.; TRARI, M. Visible light degradation of Orange II using xCu_yO_z/TiO₂ heterojunctions. *Journal of Hazardous Materials*, v.168, p.484-492, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.066>. Acesso em: 15 ago. 2025.
 38. Yu, S.; Zhang, Y.; Dong, F.; Li, M.; Zhang, T.; Huang, H. Readily achieving concentration-tunable oxygen vacancies in Bi₂O₂CO₃: Triple-functional role for efficient visible-light photocatalytic redox performance. **Applied Catalysis B: Environmental**, v.226, p.441-450, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.12.074>. Acesso em: 15 ago. 2025.
 39. MICHALSKA, M. *et al.* The effect of surface modification with Ag nanoparticles on 21 nm TiO₂: anatase/rutile material for application in photocatalysis. **Materials Today Chemistry**, v.26, 2022. Disponível em: [https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.mtchem.2022.101123](https://doi.org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.mtchem.2022.101123). Acesso em:
 40. PAWAR, T. J.; LÓPEZ, D. C.; ROMERO, J. L. O.; MONTESINOS, J.V. Surface modification of titanium dioxide. *Journal of Materials Science*, v.58, p.6887-6930, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08439-x>. Acesso em: Acesso em: 18 de ago. 2024.
 41. HASAN, M. K. N. SHAHINOOR, M. I. MoO₃ and Ag co-synthesized TiO₂ as a novel heterogeneous photocatalyst with enhanced visible-light-driven photocatalytic activity for methyl orange dye degradation. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v.12 2019. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.enmm.2019.100244>. Acesso em: 10 mai.2025.
 42. PRAJAPAT, K. et al. Synthesis and characterization of TiO₂ nanoparticles: Unraveling the influence of copper doping on structural, surface morphology, and optical properties. **Chemical Physics Impact**, v.8, n.100607,2024. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.chphi.2024.100607>. Acesso em: 10 set. 2025.

43. BACCARO, A. L. B.; CORDON, L. D.; NISHIMURA, F. G.; GUTZ, I. G. R. Fotocatálise mediada por TiO_2 no estado nanoparticulado: revisão da reatividade pelo conceito de traps e algumas aplicações em química analítica. **Quim. Nova**, v.42, p. 329-345, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170332>. Acesso em: 10 set. 2025.
44. BORGES, R. M. B. **Degradação de corantes têxteis ácidos e reativos por fotocatalise heterogênea, usando TiO_2 como fotocatalisador**. Tese de mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.bdt.d.uerj.br/handle/1/11946>. Acesso em: 10 set. 2025.
45. ROVERONI, L. A. M. **Aplicação da fotocatalise heterogênea para a degradação de corantes de uma indústria de cosméticos**. Tese de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.75.2010.tde-26072010-133617>. Acesso em: 10 set. 2025.
46. BELLIDO, J. D. A.; ALMEIDA, M. M.; SILVA, A. L. C.; OLIVEIRA, J. P. J.; SANTOS, C. A. V. Fotocatálise heterogênea aplicada no tratamento do corante rodamina b – uso de catalisador de TiO_2 sob radiação uv. **E-xacta**, v. 12, n. 1, p. 11-19, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18674/exacta.v12i1.2366>. Acesso em: 10 set. 2025.
47. MACHADO, A. E. H.; SANTOS, L. M.; BORGES, K. A.; BATISTA, P. S.; PAIVA, V. A. B.; MÜLLER JR., P. S.; OLIVEIRA, D. F. M.; FRANÇA, M. D. Potential applications for solar photocatalysis: from environmental remediation to energy conversion. **Solar Radiation**, p.339 - 378, 2012.
48. SANTOS, L. S. **Avaliação do processo combinado fotocatalítico e biológico para descoloração e remoção da matéria orgânica de efluentes têxteis**. Tese de mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.bdt.d.uerj.br/handle/1/12042>. Acesso em: 10 ago. 2025.
49. IBRAHIM, Umar; ABDULLAH, Abdul. Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**, v.9, p.1-12, 2008. Disponível em: <https://doi.org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.jphotochemrev.2007.12.003>. Acesso em: 05 de ago. 2025.
50. ISMAIL, W. et al. Improvement physical and photoelectrochemical properties of TiO_2 nanorods toward biosensor and optoelectronic applications. **Ceramics International**, v.50, p.17968-17976, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.286>. Acesso em: 10 set. 2025.
51. JEFFRIN, A. I.; RAMASAMY, P.; SATHE, V.; MAHALINGAM, U. Graphene oxide-silver nanocomposite platforms for multimodal applications: From SERS detection to photocatalysis and nano-filtration removal of textile effluent for environmental remediation. **Journal of Water Process Engineering**, v. 71, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107378>. Acesso em: 05 de ago. 2025.
52. SUMI, K.; SUPRAJA, K. S.; AASHIKA, R. C.; ARIVANANDHAN, M. Biomass-derived activated carbon/cerium oxide nanocomposite as adsorptive photocatalyst for effective removal of carcinogenic dye. **Materials Research Bulletin**, v.183, 2025.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2024.113212>. Acesso em: 05 de ago. 2025.

53. AI- WASIDI *et al.* Enhanced indigo carmine dye removal via chitosan-modified NiO-g-C₃N₄ catalyst: Adsorption and photocatalysis studies. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 320, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.145669>. Acesso em: 05 de ago. 2025.

54. Grass, P.; Salla, J. S.; Jahn, S. L.; Foletto, E. L. Novel application of FeIn₂S₄ as an efficient photo-Fenton catalyst for degradation of Ponceau 4R in aqueous solution. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v.19, p. 5059-5070, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03443-7>. Acesso em: 15 ago. 2025.

55. QIN, Z.; ZHANG, J.; LIU, Y.; WU, J.; LI, G.; LIU, J.; HE, Q. A Simple but Efficient Voltammetric Sensor for Simultaneous Detection of Tartrazine and Ponceau 4R Based on TiO₂/Electro-Reduced Graphene Oxide Nanocomposite. **Chemosensors**, v.8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/chemosensors8030070>. Acesso em: 15 ago. 2025.

56. ESMAIL, L. A.; JABBAR, H. S. Ultra small carbon dots from Crocus cancellatus as a highly fluorescence probe for synthetic Ponceau 4R dye sensing in food samples. **Diamond & Related Materials**, v.139, 2023. Disponível em: [https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.diamond.2023.110334](https://doi.org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.diamond.2023.110334). Acesso em: 15 ago. 2025.

57. COSTA, A. *et al.* Síntese e caracterização de nanopartículas de TiO₂. **Cerâmica**, v. 52, p. 255-259, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132006000400007>. Acesso em: 03 de ago. 2025.

58. LEWIS, T. R. H. **Síntese e modificação superficial do TiO₂ visando aumentar a eficiência do processo de fotocatalise heterogênea no tratamento de compostos fenólicos**. Tese de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.46.2005.tde-28022007-174000>. Acesso em: 03 de ago. 2025

59. ZHAO, H. *et al.* Fast and controllable anatase-to-rutile phase transition irradiated by NIR light. **Chinese Chemical Letters**, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2025.110815>. Acesso em: 15 ago. 2025.

60. HANAOR, D. A. H.; SORRELL, C. C. Review of the anatase to rutile phase transformation. **J Mater Sci**, v.46, p.855-874, 2011. Disponível em: <https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10853-010-5113-0>. Acesso em: 03 de ago. 2025.

61. MAHMOOD, A.; TEZCAN, F.; KARDAS, G. Thermal decomposition of sol-gel derived Zn_{0.8}Ga_{0.2}O precursor-gel: A kinetic, thermodynamic, and DFT studies. **Acta Materialia**, v. 146, p. 152-159, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.12.065>. Acesso em: 06 de ago. 2025.

62. QADERI, J.; MAMAT, C. R; JALIL, A. A. Preparation and Characterization of Copper, Iron, and Nickel Doped Titanium Dioxide Photocatalysts for Decolorization of Methylene Blue. **Sains Malaysiana**, v. 50, p.135-149, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17576/jism-2021-5001-14>. Acesso em: 15 ago. 2025.

63. BENSOUICI, F. et al. Synthesis, characterization and photocatalytic behavior of Ag doped TiO₂ thin film. **Superlattices and Microstructures**, v.85, p. 255-265, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.05.028>. Acesso em: 06 de ago. 2025.
64. YANG, X. et al. Preparation and photocatalytic performance of Cu-doped TiO₂ nanoparticles. **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, v. 25, p. 504–509, 2015. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63631-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63631-7). Acesso em: : 06 de ago. 2025.
65. RAMALINGAM, S. Synthesis of Nanosized Titanium Dioxide (TiO₂) by Sol-Gel Method. **IJITEE**, v.9, p.732-735, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.35940/ijitee.B1174.1292S219>. Acesso em: : 06 de ago. 2025.
66. MALLIGAVATHY, M. Role of hydrothermal temperature on crystallinity, photoluminescence, photocatalytic and gas sensing properties of TiO₂ nanoparticles. **Pramana – J. Phys**, v.90, 2018. Disponível em: [https://doi-org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12043-018-1533-1](https://doi.org.ez122.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12043-018-1533-1). Acesso em: : 06 de ago. 2025.
67. ABBAD, S. et al. Effect of silver doping on the photocatalytic activity of TiO₂ nanopowders synthesized by the sol-gel route. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103718>. Acesso em: 06 de ago. 2025.
68. AHMAD, Syed Anees et al. Bactericidal activity of silver nanoparticles: A mechanistic review. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 3, p. 756-769, 2020.
69. MELO, A.P. P.; SOTILES, A. R.; FERRI, E. A. V.; SIKORA, M. S.; PARABOCZ, C. R. Síntese e caracterização de nanocompósitos de caulinita e TiO₂ utilizando o método dos precursores poliméricos. **Revista Matéria**, v.26, n.2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210002.1260>. Acesso em: 15 de ago. 2025
70. LEONARDO, W. S. et al. Síntese, Caracterização e Atividade Fotocatalítica de Catalisadores Nanoestruturados De TiO₂ Dopados Com Metais. **Química nova**, v.36, p.382-386, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000300006>. Acesso em: 06 de ago. 2025.
71. TEODORO, V. et al. Influence of Cu-doped TiO₂ on its structural and photocatalytic properties. **Eclética Qui. Journal**, v.47, p.138-140, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.26850/1678-4618eqj.v47.1SI.2022.p130-140>. Acesso em: 06 de ago. 2025.
72. YANG, X. et al. Preparation and photocatalytic performance of Cu-doped TiO₂ nanoparticles. **Trans. Nonferrous Met. Soc**, v.25, p.504-509, 2015. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63631-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63631-7). Acesso em: 06 de ago. 2025.
73. YEE, C. L. et al. Effect of Synthesis Methods on Properties of Copper Oxide Doped Titanium Dioxide Photocatalyst in Dye Photodegradation of Rhodamine B. **Science and Technology Indonesia**, v.1 p. 91-97, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.26554/sti.2022.7.1.91-97>. Acesso em: 06 de ago. 2025.