



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BACHARELADO EM QUÍMICA INDUSTRIAL**

MARIA DA GUIA DOS SANTOS SILVA

**EFEITO DA MODIFICAÇÃO DO ÓXIDO DE ESTANHO COM Ag^{2+} E Cu^{2+} NA
EFICIÊNCIA FOTOCATALÍTICA DO CORANTE RODAMINA B**

**CAMPINA GRANDE-PB
2024**

MARIA DA GUIA DOS SANTOS SILVA

**EFEITO DA MODIFICAÇÃO DO ÓXIDO DE ESTANHO COM Ag^{2+} E Cu^{2+} NA
EFICIÊNCIA FOTOCATALÍTICA DO CORANTE RODAMINA B**

Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado em Química Industrial da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de graduação em Bacharel em Química Industrial.

Área de concentração: Química Inorgânica.

Orientador: Prof. Dra. Mary Cristina Ferreira Alves.

**CAMPINA GRANDE-PB
2024**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586e Silva, Maria da Guia dos Santos.

Efeito da modificação do óxido de estanho com Ag^{2+} e Cu^{2+} na eficiência fotocatalítica do corante Rodamina B [manuscrito] / Maria da Guia dos Santos Silva. - 2024.

31 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

"Orientação : Prof. Dra. Mary Cristina Ferreira Alves, Departamento de Química - CCT".

1. Rodamina B. 2. Óxido de Estanho. 3. Corantes. I. Título
21. ed. CDD 541.395

MARIA DA GUIA DOS SANTOS SILVA

**EFEITO DA MODIFICAÇÃO DO ÓXIDO DE ESTANHO COM Ag^{2+} E Cu^{2+} NA
EFICIÊNCIA FOTOCATALÍTICA DO CORANTE RODAMINA B**

Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado em Química Industrial da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de graduação em Bacharel em Química Industrial.

Área de concentração: Química Inorgânica.

Aprovada em: 21 de Novembro de 2024.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Kaline Rosario Moraes Ferreira** (***.498.034-**), em **29/11/2024 05:23:38** com chave **3bfa1ac6ae2b11efbd102618257239a1**.
- **Deoclecio Ferreira de Brito** (***.403.587-**), em **28/11/2024 19:24:19** com chave **82d8b046add711ef96a11a7cc27eb1f9**.
- **Mary Cristina Ferreira Alves** (***.387.174-**), em **28/11/2024 19:05:34** com chave **e422bc32add411efa8ac06adb0a3afce**.

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

Tipo de Documento: Termo de Aprovação de Projeto Final

Data da Emissão: 11/12/2024

Código de Autenticação: ced908



EFEITO DA MODIFICAÇÃO DO ÓXIDO DE ESTANHO COM Ag^{2+} E Cu^{2+} NA EFICIÊNCIA FOTOCATALÍTICA DO CORANTE RODAMINA B

EFFECT OF MODIFICATION OF TIN OXIDE WITH Ag^{2+} AND Cu^{2+} ON THE PHOTOCATALYTIC EFFICIENCY OF RHODAMINE B DYE

Maria da Guia dos Santos Silva^{1*}

RESUMO

Óxidos semicondutores têm sido produzidos e investigados em relação às suas propriedades e potenciais aplicações, incluindo o uso como fotocatalisadores para purificação de aquíferos, por meio da degradação ou remoção de corantes orgânicos. Neste trabalho, foram sintetizados óxido de estanho modificado com Cu^{2+} e Ag^{2+} (com 4 e 6%), utilizando o método dos precursores poliméricos. Os materiais obtidos foram caracterizados por espectroscopia na região do infravermelho, UV-visível e Difração de Raios-X (DRX). Os testes fotocatalíticos foram realizados em um reator fotocatalítico com lâmpada UV-C Philips de 30 W ($\lambda = 254$ nm, 4,9 eV) e corante Rodamina-B(RB) em solução aquosa nas concentrações de 10ppm e 5ppm, com tempo reacional variando 1-4 horas. Os padrões de DRX apresentaram picos característicos do SnO_2 e confirmaram a presença a Ag e Cu, de acordo com as cartas ICDD, utilizadas na identificação dos óxidos modificados. Os espectros de infravermelho apresentaram bandas características dos materiais obtidos, e os valores de *band gap* calculados a partir dos espectros UV-visíveis utilizando o *Método Tauc* para melhor ajustes dos valores observados, os valores obtidos variam de 3,0 a 3,4 eV, sendo adequados para a faixa de 4,9 eV da lâmpada utilizada. Nos ensaios fotocatalíticos com o corante, todas as amostras demonstraram atividade fotocatalítica, destacando-se as amostras com 4% e 6% de Cu^{2+} , que apresentaram os melhores resultados, com taxas de 51,4% e 61,7%, respectivamente em uma solução de 5ppm da RB e com 41,4% e 46,5%, respectivamente em uma solução de 10ppm da RB, com tempo reacional de 4 horas. Concluindo que é satisfatório a aplicação do material na fotodegradação do corante RB.

Palavras-Chave: rodamina b; óxido de estanho; Corantes.

¹ Graduanda em Química Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). E-mail: mariadaguiasantoss37@gmail.com

ABSTRACT

Semiconductor oxides have been produced and investigated regarding their properties and potential applications, including their use as photocatalysts for aquifer purification, through the degradation or removal of organic dyes. In this work, tin oxide modified with Cu^{2+} and Ag^+ (with 4 and 6%) were synthesized using the polymeric precursor method. The obtained materials were characterized by infrared, UV-visible spectroscopy and X-ray Diffraction (XRD). The photocatalytic tests were performed in a photocatalytic reactor with a 30 W Philips UV-C lamp ($\lambda = 254 \text{ nm}$, 4.9 eV) and Rhodamine-B (RB) dye in aqueous solution at concentrations of 10 ppm and 5 ppm, with reaction time ranging from 1 to 4 hours. The XRD patterns showed peaks characteristic of SnO_2 and confirmed the presence of Ag^{2+} and Cu^{2+} , in agreement with the ICDD charts used to identify the modified oxides. The infrared spectra showed bands characteristic of the materials obtained, and the band gap values calculated from the UV-visible spectra using the Tauc method for better adjustments of the observed values, the values obtained range from 3.0 to 3.4 eV, being adequate for the 4.9 eV range of the lamp used. In the photocatalytic tests with the dye, all samples demonstrated photocatalytic activity, highlighting the samples with 4% and 6% Cu^{2+} , which presented the best results, with rates of 51.4% and 61.7%, respectively, in a 5 ppm RB solution and with 41.4% and 46.5%, respectively, in a 10 ppm RB solution, with a reaction time of 4 hours. Concluding that the application of the material in the photodegradation of the RB dye is satisfactory.

Keywords: rhodamine b; tin oxide; dyes.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	8
2.	OBJETIVOS.....	9
2.1	OBJETIVO GERAL.....	9
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1	CORANTES.....	10
3.1.1	RODAMINA B.....	11
3.2	FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA.....	12
3.3	ÓXIDO DE ESTANHO (SnO ₂).....	14
4.	METODOLOGIA.....	16
4.1	PREPARAÇÃO DO ÓXIDO DE ESTANHO MODIFICADO.....	18
4.2	CARACTERIZAÇÃO.....	19
4.2.1	ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO.....	19
4.2.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	19
4.2.3	ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NA REGIÃO DO ULTRAVIOLETA-VISÍVEL (UV-VIS)	19
4.3	TESTES FOTOCATALÍTICOS.....	20
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
6.	CONCLUSÃO.....	26
	REFERÊNCIAS.....	27

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura química da rodamina B.....	10
Figura 2 - Processo fotocatalítico.....	12
Figura 3 - Fluxograma para obtenção do citrato de estanho.....	16
Figura 4 - Fluxograma para obtenção do citrato de estanho.....	18
Figura 5 - Fotoreator utilizado durante os testes fotocatalíticos.....	19
Figura 6 - Rodamina B em solução aquosa com concentração entre 5 e 10 ppm antes da degradação.....	20
Figura 7 - Padrões de DRX do SnO ₂ dopado com prata (Ag ²⁺), obtido à 800°C por 2 horas.....	20
Figura 8 - Padrões de DRX do SnO ₂ e dopado com cobre (Cu ²⁺), obtido à 800°C por 2 horas.....	21
Figura 9 - Espectros do infravermelho do óxido de estanho dopado com cobre a 4 e 6 % a 800°C.....	22
Figura 10 - Espectros do infravermelho do óxido de estanho dopado com prata a 4% a 800°C.....	22
Figura 11 - Espectros de absorção na região UV-Visível e valores de band gap de materiais de SnO ₂ dopados com cobre.....	23
Figura 12 - Monitoramento da banda de absorção (553 nm) do RB na presença dos catalisadores.....	24

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população e a necessidade de inovações cada vez mais rápidas, que acompanhem o desenvolvimento, a indústria de modo geral, busca trazer novidades e maneiras mais eficientes de satisfazer as nossas necessidades. O ser humano traz consigo uma cobiça por texturas e cores que acompanham o dia a dia movimentado e, pensando no lucro que essa demanda traz, às empresas procuram fabricar produtos mais coloridos e que resistam por mais tempo a exposição, contudo, a natureza acaba sofrendo esse impacto, com acúmulo de resíduos sólidos, gasosos e líquidos que podem trazer consequências irreversíveis (Toniollo *et al.*, 2015).

A água está presente em praticamente quase todas as formas de produção de materiais em nosso dia a dia, o que emite um cuidado com esse bem mundial que está cada vez mais escasso e que as indústrias não têm o zelo necessário para manter a natureza segura de impactos industriais, afetando diretamente a vida marinha (Silva, 2022). A indústria têxtil é uma grande fonte de lucro e inovação, mas também uma fonte de poluição sem precedentes, emitindo gases poluentes, sólidos cumulativos e principalmente a liberação de efluentes tóxicos em corpos hídricos, como a liberação de corantes (Nascimento, 2021).

Os corantes são compostos orgânicos, que possuem uma alta solubilidade em água, com uma estrutura cromófora e grupos auxotróficos, que são estruturas polares capazes de se ligarem a outras estruturas polares e fixar suas cores nos materiais. A presença desses corantes em corpos hídricos acaba impossibilitando a passagem de luz solar sobre a água e, assim afetando a vida de plantas aquáticas que precisam obrigatoriamente da luz solar para se reproduzirem, além de afetar a vida de seres aquáticos que, quando em contato com essas substâncias sofrem com doenças incuráveis causando a diminuição desses seres e prejudicando diretamente o equilíbrio na cadeia alimentar (Pinheiro, 2010).

Neste aspecto, a rodamina B é um corante de cor avermelhada, com estrutura catiônica, pertencente à família dos compostos xantenos. Os corantes presentes na família dos xantenos possuem características de cores fluorescentes e são bastante utilizados em diversos tipos de materiais, como indústria têxtil, alimentícia, medicinal e em coloração em análises biológicas (Barros *et al.*, 2023). Por outro lado, a rodamina B é potencialmente prejudicial à saúde, tanto de animais e plantas aquáticas quanto para a vida humana, podendo causar lesões na pele, no trato respiratório e olhos, além de ser uma substância cancerígena. Por esses fatores é importante a remoção dessa substância na natureza, com métodos eficazes e que se tornem capazes de realizar a retirada completa da rodamina B (Secco, 2015).

Dentre os métodos utilizados para o tratamento desses poluentes, destaca-se a fotocatalise heterogênea, um caso particular dos processos oxidativos avançados (POAs). A fotocatalise heterogênea se baseia no processo catalítico que envolve a utilização de um fotocatalisador sólido para acelerar reações químicas sob a influência da luz. Esta influência ganhou destaque significativo nas últimas décadas devido ao seu potencial em diversas aplicações ambientais e industriais, como a manipulação de substâncias químicas, a síntese de compostos químicos e a produção de energia renovável (Nogueira *et al.*, 1998).

Neste sentido, os semicondutores possuem papel importante na fotocatalise devido às suas propriedades eletrônicas únicas, que os tornam altamente eficazes para promover reações químicas com a ajuda da luz. Em um processo de fotocatalise, o semicondutor atua como fotocatalisador, absorvendo energia luminosa e promovendo a formação de pares de elétron-buraco que impulsionam as reações redox (oxidação-redução) na superfície do material (Balapure *et al.*, 2024).

Assim, o objetivo deste trabalho é sintetizar SnO_2 dopado com Ag^{2+} e Cu^{2+} utilizando o método dos Precursores Poliméricos, com o intuito de analisar as alterações estruturais em função das dopagens e correlacioná-las com suas propriedades fotocatalíticas no processo de manipulação do corante rodamina B.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Sintetizar óxido de estanho (SnO_2) dopado a base de cobre (Cu^{2+}) e prata (Ag^{2+}), com o método dos precursores poliméricos em diferentes concentrações de dopagens, com intuito de analisar as características fotocatalíticas dos óxidos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar a fotodegradação do corante rodamina B;
- Analisar as influências das modificações estruturais através da dopagem com Ag e Cu nas propriedades fotocatalíticas dos materiais obtidos;
- Avaliar a eficiência dos fotocatalisadores em diferentes concentrações do corante rodamina B;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CORANTES

Os corantes poluentes representam um problema ambiental significativo devido ao impacto dos resíduos lançados nos sistemas aquáticos e solos. Muitos desses corantes possuem estruturas complexas e são projetados para serem resistentes à luz, calor e processos biológicos, dificultando sua degradação no meio ambiente. A alta estabilidade dessas moléculas permite que elas persistam e se acumulem, representando riscos à vida aquática, ao solo e, eventualmente, à saúde humana (Rech *et al.*, 2016).

Os corantes industriais, especialmente os sintéticos, geram grandes impactos ambientais, principalmente em águas residuais. As indústrias têxteis, de couro e de papel estão entre as principais fontes de efluentes ricos em corantes, que podem se degradar em aminas aromáticas, substâncias que são tóxicas e cancerígenas. Essas substâncias alteram o pH da água e reduzem a fotossíntese das plantas aquáticas, afetando toda a cadeia alimentar (Lin *et al.*, 2023).

Essa problemática ambiental, ocupa pesquisadores do ramo com discussões de como conseguir amenizar esses impactos causados pelos descartes em efluentes importantes para abastecimento populacional, por exemplo o descarte de substâncias orgânicas, como os corantes, que estão crescendo em larga escala e cada vez menos preocupadas com as consequências que esse descarte oferece (Braga, 2024).

A principal preocupação em relação a essas substâncias orgânicas lançadas no meio ambiente, está associada aos seus efeitos tóxicos na saúde humana e na vida selvagem. Muitos desses compostos são prejudiciais e afetam o sistema hormonal de animais e humanos e podem levar a problemas como câncer, defeitos congênitos, problemas de fertilidade e distúrbios imunológicos. A exposição crônica a baixas concentrações de substâncias orgânicas pode gerar efeitos cumulativos que afetam, especialmente, comunidades que vivem próximas a locais de descarte inadequado de resíduos industriais ou agrícolas (Branco, 2016).

Embora existam métodos físicos e químicos para tratar os efluentes, eles nem sempre são eficientes ou economicamente viáveis. Assim, novas abordagens, como a biorremediação com microrganismos, fotocatalise heterogênea e tecnologias avançadas, estão sendo estudadas como alternativas mais sustentáveis para reduzir o impacto ambiental dessas toxinas (Mourão *et al.*, 2024).

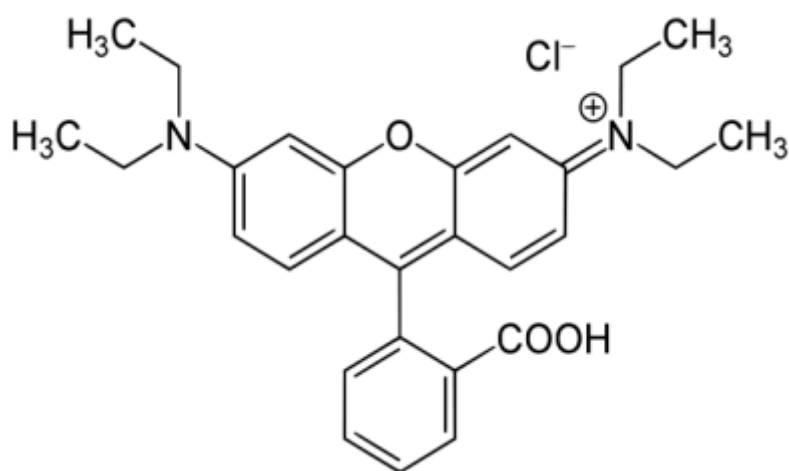
A produção e o descarte de corantes, especialmente os sintéticos, têm impactos ambientais significativos. Muitos corantes sintéticos são persistentes no meio ambiente e podem ser tóxicos para a fauna e flora aquática. Os corantes à base de metais pesados, por exemplo, podem se acumular no ambiente e na cadeia alimentar, gerando problemas ecológicos (Souza *et al.*, 2020).

A rodamina B é um exemplo de corante sintético, muito utilizado principalmente em indústrias têxteis e de tintas. Esse corante pertence à família das rodaminas, uma classe de compostos fluorescentes que são usados não apenas como corantes, mas também em aplicações de pesquisa científica (Lima, 2017).

3.1.1 RODAMINA B

A rodamina B é um corante fluorescente orgânico, de cor rosa/avermelhado que pertence à classe das xantenos. É potencialmente solúvel em água e em álcoois e é classificado como ácido. A rodamina B possui a fórmula molecular $C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$ (Figura 1) e sua estrutura apresenta um sistema de anéis conjugados, um grupo de sal de amônio, amina, alceno, ácido carboxílico e éter (Raza *et al.*, 2023).

Figura 1: Estrutura química da rodamina B



Fonte: Macedo, 2012.

A rodamina B apresenta efeitos perigosos à saúde humana, causando náuseas, irritação nos olhos, garganta e pele, além de tosse e outros sintomas desagradáveis, a substância também é cancerígena e neurotóxica. Com o uso bastante significativo desse corante em

diversas aplicações a rodamina B se torna prejudicial também a fauna e flora, prejudicando a fotossíntese das plantas, pureza de efluentes e fatalidades em animais (Shaikh *et al.*, 2019).

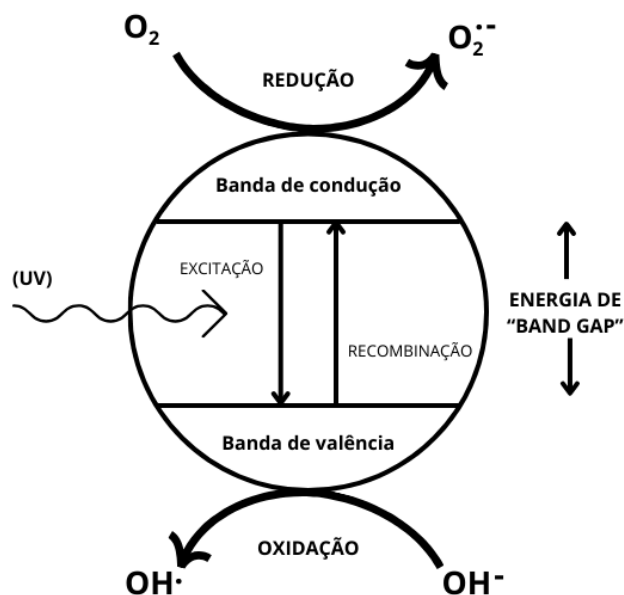
Na degradação da rodamina B, essa molécula é interpretada como um composto com carga positiva, devido à sua característica catiônica. Entretanto, em solução, essa carga positiva é neutralizada pela dissociação do grupo carboxílico, gerando uma carga negativa. Devido à presença de pares de elétrons livres e aos sistemas conjugados insaturados, a rodamina B adquire uma “carga efetiva” próxima de zero. Esse fator é relevante, pois permite ignorar as variações nas atividades fotocatalíticas dos materiais, tanto pelo mecanismo de adsorção do poluente na superfície do catalisador quanto pela transferência direta de elétrons entre eles (Costa *et al.*, 2023).

Diversas estratégias têm sido investigadas na literatura como soluções para a remoção de corantes em águas contaminadas, incluindo tratamentos biológicos, aeróbicos, coagulação, adsorção, catálise e fotocatalise, entre outros. Entre essas opções, a fotocatalise heterogênea tem demonstrado eficácia. Esse processo é uma forma de processo oxidativo avançado (POA), em que o radical hidroxila (OH) atua como o principal agente oxidante. A fotocatalise heterogênea é especialmente vantajosa em aplicações práticas, pois permite a separação do catalisador após a reação, reduzindo o risco de contaminação e gerando benefícios econômicos e ambientais (Cuzzati *et al.*, 2024).

3.2 FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA

A fotocatalise heterogênea é um processo oxidativo que consiste na emissão de uma luz ultravioleta (UV) ou visível em semicondutores para mover elétrons da banda de valência para a banda de condução, gerando os chamados elétron-buraco por uma energia *band gap* (Figura 2), com característica oxidante, que são capazes de produzir hidroxilas ($\bullet\text{OH}$) como radical através da oxidação das moléculas de água presentes no semicondutor. Essas hidroxilas que são liberadas durante o processo fotocatalítico possuem elétrons desemparelhados, assim, reagem com as moléculas orgânicas, fazendo com que ocorra o processo de degradação (Wolff *et al.*, 2022).

Figura 2: Processo fotocatalítico



Fonte: Adaptado de Balbino, 2015.

No processo de fotocatalise heterogênea, o elétron-buraco formado entre a banda de valência e a banda de condução é o autor da formação dos radicais de hidroxila proveniente das moléculas de água absorvidas superfície do semicondutor, no que posteriormente oxidam o contaminante orgânico. Dessa forma, o processo fotocatalítico pode ser dividido em duas formas, o direto e o indireto. No processo direto as cargas geradas são transferidas diretamente do fotocatalisador para o poluente, devido à adsorção na superfície do fotocatalisador pelo aprisionamento do elétron-buraco, enquanto no processo indireto, as cargas geradas são dispersas no meio, formando espécies ($\bullet\text{O}^2$, H_2O_2 e $\bullet\text{OH}$) que irão reagir com o poluente (Dantas, 2022).

A fotocatalise heterogênea está em foco nos últimos anos, além de um método eficaz na degradação de poluentes, a fotocatalise heterogênea pode ser ativada através da luz solar, que é uma fonte de energia sustentável e que não atinge o meio ambiente. Além de aplicações em efluentes, também é aplicada para retirar poluentes do solo e atmosfera. Estudos são feitos com semicondutores de diferentes tipos na fotocatalise, que permite um amplo leque de possibilidades, tornando viável a degradação de diferentes tipos de poluentes (Wang *et al.*, 2022).

Todos esses avanços na fotocatalise heterogênea apesar de promissores, apresentam alguns desafios, como a recombinação dos pares elétron-buraco, que reduz a eficiência da

ocorrência, e as limitações na absorção de luz, uma vez que o TiO_2 , por exemplo, responde apenas à radiação UV, que corresponde a uma pequena fração do espectro solar. Para superar esses obstáculos, diversas estratégias vêm sendo estudadas como a modificação do catalisador, a dopagem do TiO_2 com metais (como platina, prata ou ouro) ou com não-metais (como nitrogênio, enxofre ou carbono) pode reduzir a recombinação dos pares elétron-lacuna e ampliar a capacidade de absorção de luz visível. Esses dopantes introduzem novos níveis de energia dentro da banda proibida, facilitando a condução dos elétrons mesmo com luz visível (Thind *et al.*, 2023).

O óxido de estanho (SnO_2) é um material semicondutor que também desempenha um papel importante na fotocatalise heterogênea. Comumente utilizado como alternativo ao óxido de titânio (TiO_2), o SnO_2 possui propriedades únicas que o tornam adequado para aplicações de fotocatalise, especialmente em processos de tratamento de águas residuais e purificação de ar (Jain *et al.*, 2022).

3.3 ÓXIDO DE ESTANHO (SnO_2) PURO E MODIFICADO

O óxido de estanho (SnO_2) é um semicondutor amplamente investigado em processos fotocatalíticos, especialmente em aplicações voltadas ao tratamento de poluentes, graças à sua alta estabilidade química, transparência e ampla disponibilidade. No contexto da fotocatalise, o SnO_2 atua absorvendo luz onde a energia é superior ao seu intervalo de banda (geralmente entre 3,6 e 4,0 eV), o que provoca a excitação de elétrons para a banda de condução, gerando pares elétron-buraco. Esses pares se deslocam até a superfície do material, facilitando reações de oxidação e redução que contribuem na degradação de contaminantes orgânicos presentes em ambientes aquosos (Nascimento *et al.*, 2022).

Estudos recentes mostram que o SnO_2 pode ser combinado com outros materiais, como o ZnCo_2O_4 e o BiOI , formando heteroestruturas que maximizam a separação de pares elétron-buraco, um fator que aumenta significativamente a eficiência fotocatalítica em ambientes de luz visível (Chen *et al.*, 2023).

Semelhante ao TiO_2 , o SnO_2 , ao ser irradiado com luz UV, absorve fótons e promove elétrons da banda de valência para a banda de condução, gerando pares elétron-buraco. Esses pares podem reagir com moléculas de água (H_2O) (Equação 1) ou íons hidroxila (OH^-) e superóxido ($\text{O}_2^{\cdot-}$) (Equação 3), adsorvidos na superfície do incidente, gerando radicais hidroxila ($\cdot\text{OH}$) (Equação 2), que são altamente reativos. Esses radicais podem degradar

compostos orgânicos e poluentes, como corantes, pesticidas e outras substâncias tóxicas, em processos de fotocatalise (Mourão *et al.*, 2009).



Um dos desafios no emprego do SnO_2 é a alta taxa de recombinação entre os elétron-buraco, o que limita sua eficiência fotocatalítica. Para contornar essa limitação, utiliza-se estratégias como a dopagem com metais de transição (como cobre e prata) e a combinação com outros materiais para formar heteroestruturas. A dopagem, em especial, altera o band gap e a mobilidade dos elétrons, permitindo que o SnO_2 absorva luz em comprimentos de onda mais próximos ao espectro visível, favorecendo o uso de luz solar como fonte energética na fotocatalise (Pinto *et al.*, 2022).

O óxido de estanho é amplamente estudado em suas diversas morfologias nanométricas, como nanopartículas, nanobastões, nanofios e folhas ultrafinas. A capacidade de ajustar a forma e a estrutura do SnO_2 permite aprimorar suas propriedades físico-químicas. Por exemplo, as nanopartículas de SnO_2 com diâmetro inferior ao raio de Bohr ($\sim 2,7$ nm) apresentam características quânticas que aumentam sua eficiência em aplicações fotocatalíticas. Já as estruturas em formato de nanofios e nanobastões são eficazes em sensores de gás e em aplicações de armazenamento de energia. O controle da morfologia é fundamental para aumentar a área de superfície e a mobilidade de elétrons, o que, por sua vez, melhora o desempenho do SnO_2 em processos como a fotocatalise. Métodos de síntese, como o tratamento solvotérmico e a dopagem com metais, ajudam a direcionar essas morfologias, otimizando o material para usos específicos em dispositivos de energia e sensores de poluentes (Pinto *et al.*, 2022).

O óxido de estanho modificado (SnO_2) é um material amplamente pesquisado por suas propriedades promissoras na fotocatalise, especialmente na degradação de poluentes orgânicos. A modificação do óxido de estanho com outros elementos, como metais de transição ou óxidos metálicos, visa aprimorar sua capacidade de absorção de luz e reduzir a recombinação de pares elétron-buraco. Isso torna o SnO_2 mais eficiente na geração de espécies reativas que atacam e decompõem compostos tóxicos em ambientes aquosos. O material modificado apresenta propriedades otimizadas em relação à versão pura, o que

amplia sua aplicação em tratamentos de água contaminada por poluentes orgânicos difíceis de remover apenas por processos convencionais (Zhang *et al.*, 2021).

Um ponto importante na aplicação do óxido de estanho modificado na fotocatalise é o controle da sua morfologia e tamanho das partículas, que influenciam diretamente a eficiência fotocatalítica. A síntese de nanopartículas de SnO₂ com modificações de estrutura, como dopagem com metais ou combinação com outros semicondutores, aumenta a área superficial e a quantidade de sítios ativos, promovendo maior exposição ao contaminante e facilitando a decomposição fotoquímica. Além disso, as modificações podem ampliar a sensibilidade do SnO₂ para a absorção na região do visível, permitindo que o material seja ativado sob luz solar, uma fonte de energia renovável e abundante (Liu *et al.*, 2020).

Muitos desafios ainda estão presentes no desenvolvimento de fotocatalisadores baseados em SnO₂ modificado, como a estabilidade química do material em ambientes reais e a possibilidade de formação de subprodutos tóxicos durante a reação. A pesquisa atual busca soluções para esses problemas, investigando combinações de materiais que aumentem a durabilidade e minimizem efeitos secundários indesejados. O uso do SnO₂ modificado mostra-se promissor para aplicações ambientais sustentáveis, especialmente quando associado a estratégias que integrem a fotocatalise em processos de tratamento de efluentes industriais e na purificação de água potável (Kumar *et al.*, 2023).

4. METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, foi necessário realizar a síntese do óxido de estanho, os materiais usados estão descritos na Tabela 1. Para a realização do experimento, foram feitos cálculos estequiométricos para todas as substâncias utilizadas.

Tabela 1: Reagentes usados na síntese do óxido de estanho (SnO₂).

REAGENTES	FÓRMULA	PUREZA (%)	FABRICANTES
Ácido cítrico anidro	C ₆ H ₈ O ₇	99,5	Neon
Ácido nítrico	HNO ₃	65,0	Química moderna
Etilenoglicol	HOCH ₂ CH ₂ OH	99,0	Química moderna
Cloreto de estanho	SnCl ₂ ·2H ₂ O	99,9	Dinâmica
Nitrato de prata	AgNO ₃	99,0	Synth

Nitrato de cobre	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	99,5	Neon
------------------	--	------	------

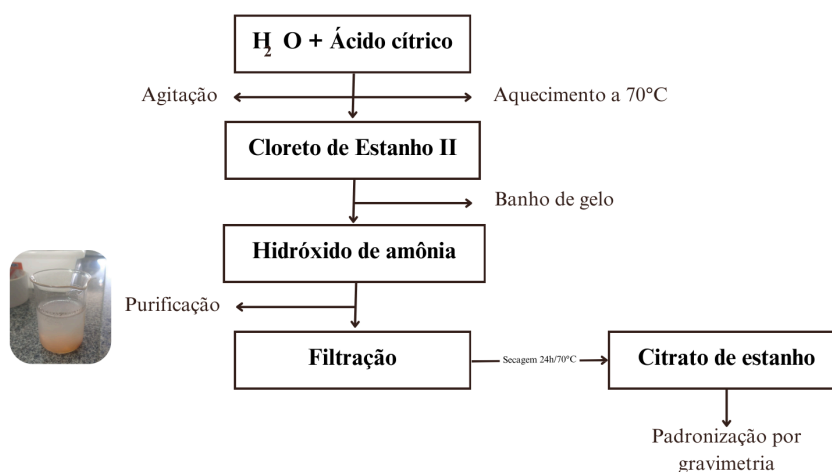
Fonte: Própria, 2024.

Inicialmente foi preparado o citrato de estanho (Figura 3) a fim de se obter 200 gramas. Em um béquer o ácido cítrico anidro foi adicionado juntamente com água destilada para diluição, a mistura foi submetida a agitação com aumento da temperatura até atingir 60 a 70 °C. Posteriormente foi adicionado o cloreto de estanho até a completa diluição. Após essa etapa, o béquer contendo a mistura, foi emergido em um recipiente com gelo a fim de diminuir a temperatura em aproximadamente 0°C, essa temperatura é almejada para que ocorra a precipitação do citrato de estanho. Nessa mistura foi adicionado o hidróxido de amônio para que ocorresse a precipitação do citrato de estanho. Em seguida, verificou-se o pH, com o auxílio de uma papel pH, no qual permaneceu menor ou igual a 3, isso mostra que não houve a formação do estanho metálico $\text{Sn}(\text{OH})_4$. Após observar a formação do precipitado, se seguiu para a etapa de eliminação dos cloretos, o precipitado foi “lavado” múltiplas vezes com água destilada.

Durante o período de lavagem do precipitado, foi verificado se o cloreto foi retirado, utilizando o teste do íon cloreto (Cl^-) com o nitrato de prata (AgNO_3), a confirmação da eliminação dos cloretos se dá através de uma cor vermelho tijolo na água da lavagem do precipitado após a adição do nitrato de prata.

Posteriormente, o precipitado foi levado à estufa a 70°C no período de 6 horas, após ser seco, o pó foi desaglomerado e colocado em um recipiente para armazenamento dentro do dessecador.

Figura 3: Fluxograma para obtenção do citrato de estanho



Fonte: Própria, 2024.

4.1 PREPARAÇÃO DO ÓXIDO DE ESTANHO MODIFICADO

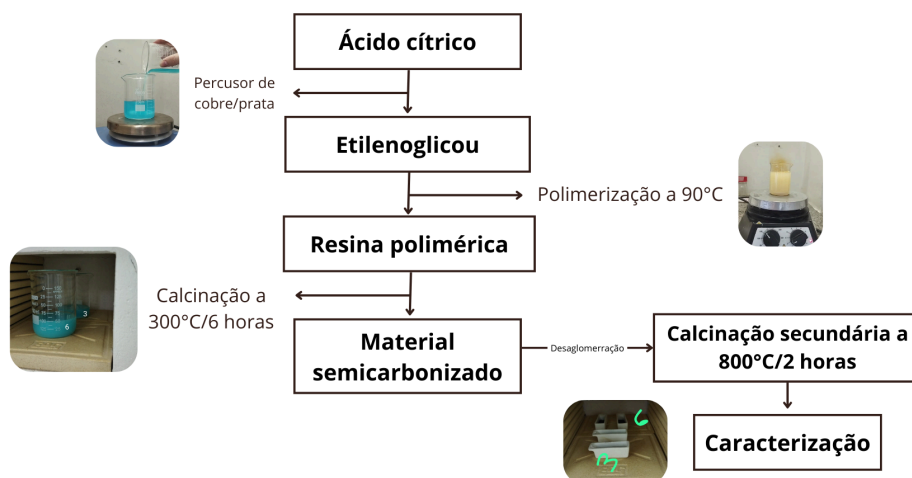
Na dopagem do estanho com cobre e prata (Cu^{2+} e Ag^{2+} respectivamente) (Figura 4), foram feitos cálculos estequiométricos para todas as substâncias utilizadas, a fim de obter 2 gramas de óxido de estanho dopado com cada metal.

Inicialmente, o citrato de estanho foi preparado adicionando uma pequena quantidade de água destilada até se obter a consistência de pasta, em seguida foi colocado o ácido nítrico para que ocorra a diluição e formação do Sn^{4+} , ocorrendo a liberação do NOX com a formação de um gás alaranjado. Essa mistura foi colocada sob agitação, até atingir a temperatura de 60°C .

Ao mesmo tempo, foi preparado uma solução contendo o ácido cítrico anidro, diluído em água destilada, com o nitrato de cobre/prata, que foi colocada sob agitação, até atingir a temperatura de 60°C . Após a temperatura ser atingida em ambas as misturas em agitação, a mistura de ácido cítrico anidro ácido nítrico e nitrato de cobre/prata, foi adicionada lentamente a mistura de citrato de estanho e em seguida foi colocado o etilenoglicol, aumentou-se o aquecimento para obter a temperatura de 90°C , a fim de reduzir o volume e formar a resina polimérica (poliesterificação).

Assim, a resina polimérica passou por um tratamento térmico inicial a 300°C por 2 horas em uma mufla para remover a matéria orgânica. Em seguida, o material foi pulverizado e peneirado em uma malha de 100 mesh. O pó precursor passou por uma segunda etapa de calcinação para cristalização, realizada a 800°C por tempos diferentes (2 e 6 horas) com o objetivo de avaliar as alterações estruturais no material. Após essa etapa, foi peneirado em malha de 250 mesh e caracterizado por meio de difração de raios X (DRX), espectroscopia vibracional na região do infravermelho (IV) e espectroscopia de absorção na região do ultravioleta-visível (UV-vis).

Figura 4: Fluxograma para obtenção do citrato de estanho



Fonte: Própria, 2024.

4.2 CARACTERIZAÇÃO

Os materiais obtidos neste trabalho foram caracterizados por DRX, FTIR e Uv-visível, no Núcleo de Pesquisa e Extensão (LACOM) da UFPB, por meio de uma parceria estabelecida com o grupo de pesquisa.

4.2.1 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO

As amostras foram certificadas em um espectrofotômetro IRPRESTIGE-21 (SHIMADZU), utilizando o método de pastilha com KBr. A análise foi realizada na faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1} .

4.2.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Para a certificação das amostras, utilizou-se um difratômetro de raios X modelo DRX-6000 da SHIMADZU, operando a 2 kVA, com tensão de 30 kV e corrente de 30 mA.

4.2.3 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NA REGIÃO DO ULTRAVIOLETA-VISÍVEL (UV-VIS)

Os espectros de absorção na região UV-vis foram obtidos com um espectrofotômetro SHIMADZU, modelo UV-2550, registrando dados na faixa de 800 a 190 nm.

4.3 TESTES FOTOCATALÍTICOS

Os testes fotocatalíticos foram conduzidos no Laboratório de Síntese Inorgânica e Quimiometria (LabSIQ), localizado no complexo de laboratórios Edvaldo Oliveira (Mará), pertencente ao Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Um fotorreator (Figura 5) de madeira com dimensões aproximadas de 25 x 27 x 90 cm (altura x largura x comprimento) foi utilizado, equipado com três lâmpadas UV-C Philips de 30 W cada ($\lambda = 254$ nm), introduzidos na parte superior do dispositivo. No entanto, apenas uma lâmpada central foi usada para manter a temperatura interna do fotorreator próxima à temperatura ambiente (28°C). As bandas de aquisição do corante rodamina B foram certificadas através de leituras em um espectrofotômetro UV-Vis, utilizando 0,100 g de orientação em 100 mL de solução de corante e água destilada, nas concentrações de 5 e 10 ppm (Figura 4). As leituras foram feitas a cada 1 hora no período de 4 horas (Figura 6).

Figura 5: Fotorreator utilizado durante os testes fotocatalíticos



Fonte: Própria, 2024.

Figura 6: Rodamina B em solução aquosa com concentração entre 5 e 10 ppm antes da degradação

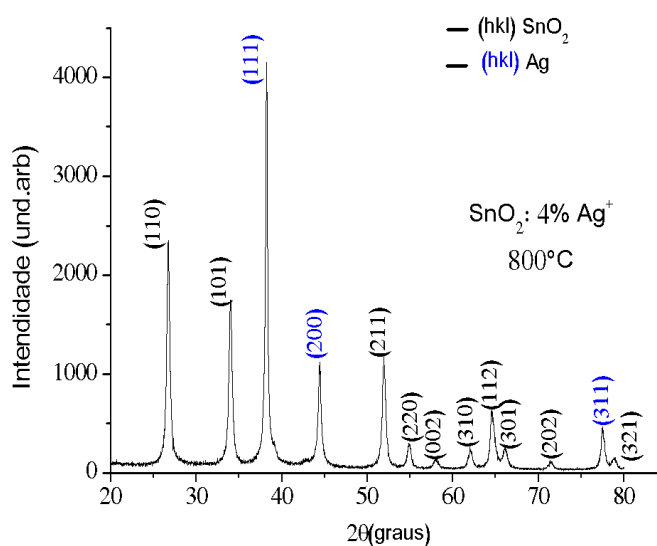


Fonte: Própria, 2024.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os padrões de DRX dos óxidos de SnO_2 dopado com Cu e Ag são apresentados nas Figura 7 e Figura 8, respectivamente. Os materiais foram obtidos com sucesso pelo método dos precursores poliméricos a 800°C por 2 horas e exibiram picos bem definidos e boa qualidade cristalina.

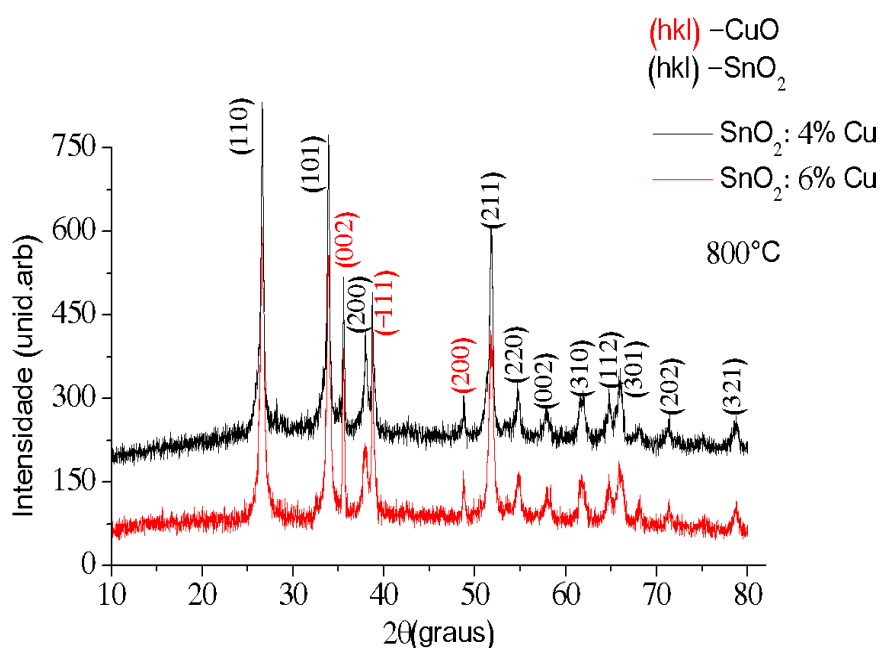
Figura 7: Padrões de DRX do SnO_2 dopado com prata (Ag^{2+}), obtido à 800°C por 2 horas



Fonte: Própria, 2024.

Na Figura 7, observamos picos característicos do SnO_2 , conforme a carta ICDD 88-0287, com pico majoritário em (110), bem como a presença da prata com pico majoritário em (111), conforme a carta ICDD 04-0783, confirmando a obtenção do SnO_2 modificado com prata. Por outro lado, a Figura 6, apresenta picos característicos SnO_2 , com pico majoritário em 110 e picos característicos do cobre, confirmando a formação dos materiais modificados, confirmados seguindo as suas fichas catalográficas do Cobre (32-332) e SnO_2 .

Figura 8: Padrões de DRX do SnO_2 e dopado com cobre (Cu^{2+}), obtido à 800°C por 2 horas



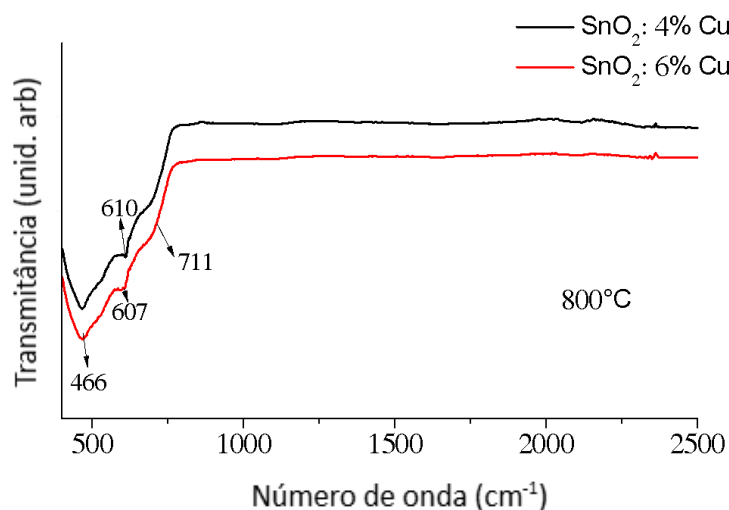
Fonte: Própria, 2024.

A Figura 9 apresenta os espectros na região do infravermelho para as amostras de SnO_2 dopadas com cobre em concentrações de 4% e 6%, obtidas a 800°C por 2 horas. Nas regiões de baixas frequências (~ 466 , 607 , 610 e 711 cm^{-1}), os picos estão associados a modos vibracionais de ligações do SnO_2 . As bandas principais observadas no espectro infravermelho do SnO_2 estão associadas às vibrações das ligações Sn–O. Elas normalmente aparecem na faixa de $450\text{--}650\text{ cm}^{-1}$, correspondentes às vibrações de estiramento (stretching) do Sn–O. Na faixa de $150\text{--}300\text{ cm}^{-1}$, estão relacionadas a modos vibracionais de flexão (bending). O pico em torno de 466 cm^{-1} , por exemplo, é característico das vibrações de estiramento Sn–O, que são comuns em materiais baseados em óxidos de estanho (Lachore *et al.*, 2022).

Quanto ao efeito da dopagem com Cu^{2+} , nota-se que a curva vermelha (SnO_2 com 6% de Cu) tem uma transmitância levemente inferior em relação ao SnO_2 com 4% de Cu, o aumento da concentração de Cu^{2+} no sistema do SnO_2 promove modificações nas regiões dos

poliedros do estanho, estas modificações podem estar associadas a defeitos estruturais eletrônicos provenientes da dopagem.

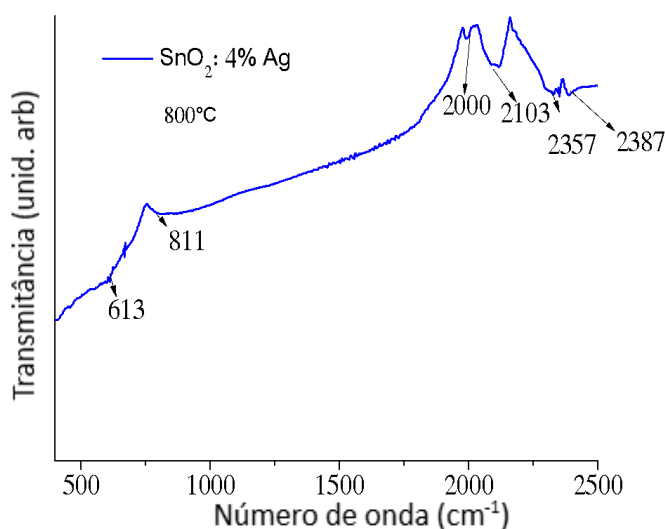
Figura 9: Espectros do infravermelho do óxido de estanho dopado com cobre a 4 e 6 % a 800°C



Fonte: Própria, 2024.

Os espectros de IR do SnO_2 modificado com a Ag^{2+} são apresentados na Figura 8. As bandas em 613 e 811 cm^{-1} , estão relacionados aos modos vibracionais do SnO_2 , especialmente à vibração Sn-O, típica de óxidos de estanho. Por outro lado, as interações das partículas de prata com o estanho modificaram os perfis das bandas de IR característicos para o SnO_2 nas regiões de baixas frequências, o que não foi observado na modificação com o cobre (Figura 9). Nas regiões em torno de 2000, 2103 a 2387 cm^{-1} , geralmente estão associados à as interações da Ag com os grupos de OH, CH, CH_2 referente aos estiramentos simétricos e assimétricos (Figura 10).

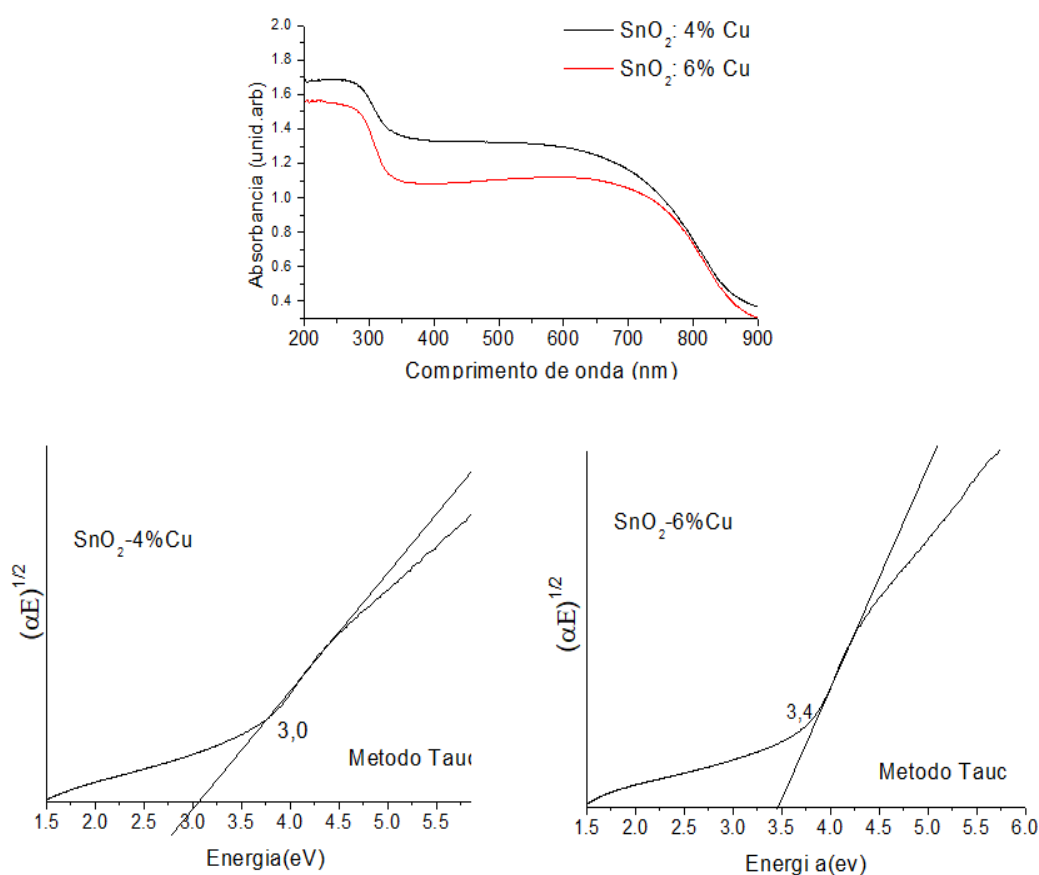
Figura 10: Espectros do infravermelho do óxido de estanho dopado com prata a 4% a 800°C



Fonte: Própria, 2024.

Os espectros de absorção na região do Uv-visível e os valores de *band gap* dos materiais dopados com cobre são apresentados na Figura 11. Podemos observar que as curvas de absorção apresentam um comportamento similar. Quanto aos valores de energia do *band gap* observamos que estes apresentam valores dentro do intervalo da lâmpada UVC utilizada nos testes fotocatalíticos (4,9 eV), fator importante tendo em vista que a fotocatalise geralmente ocorre banda a banda, ou seja, a formação do par elétron-buraco entre a banca de valência e banda de condução (Figura 11).

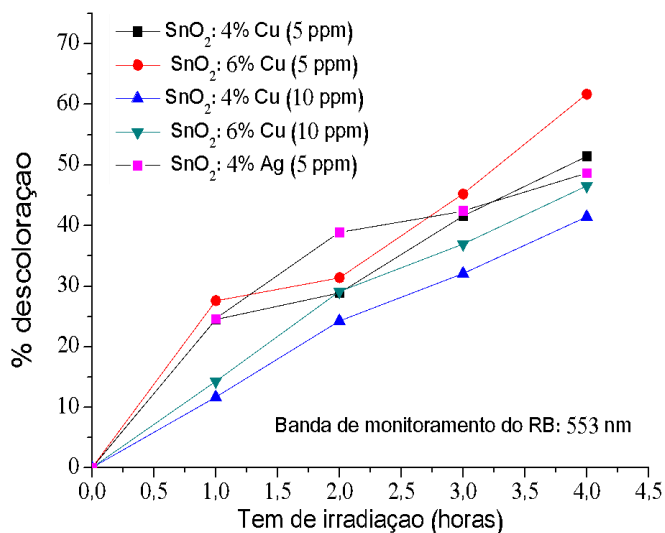
Figura 11: Espectros de absorção na região UV-Visível e valores de band gap de materiais de SnO₂ dopados com cobre



Fonte: Própria, 2024.

Em relação aos testes fotocatalíticos realizados no rodamina B, todos os materiais apresentaram atividade fotocatalítica, entretanto se obteve um resultado mais satisfatório na amostra de cobre a 6% em ambas as concentrações do corante, como podemos observar no monitoramento da banda do corante apresentado na Figura 12.

Figura 12: Monitoramento da banda de absorção (553 nm) do RB na presença dos catalisadores



Fonte: Própria, 2024.

A Tabela 2 apresenta os percentuais de degradação das amostras aplicadas em diferentes concentrações do corante com tempo reacional variando 1- 4 horas de irradiação, visando melhor analisarmos os percentuais de degradação dos fotocatalisadores.

Tabela 2 – Testes fotocatalíticos dos óxidos modificados em diferentes concentrações do corante RB (banda de monitoramento 553 nm):

Tempo reacional	SnO ₂ :4%Cu (5 ppm)	SnO ₂ :6%Cu (5 ppm)	SnO ₂ :4%Cu (10 ppm)	SnO ₂ :6%Cu (10 ppm)	SnO ₂ :4%Ag (5 ppm)
0h	0%	0%	0%	0%	0%
1h	24,5%	27,6%	11,7%	14,3%	24,6
2h	28,9%	31,4%	24,3%	29,1%	38,9
3h	41,6%	45,2%	32,1%	36,9%	42,4
4h	51,4%	61,7%	41,4%	46,5%	48,7

Fonte: Própria, 2024.

Conforme os dados apresentados na tabela 2, verificamos que as amostras dopadas com cobre apresentam melhores resultados, com 51,4 e 61,7 % em 4 horas de monitoramento para a concentração de 5 ppm. No entanto, o aumento da concentração diminui a eficiência dos fotocatalisadores, este fato pode estar relacionado com a saturação na superfície de contato dos óxidos em relação ao corante. Acredita-se que o aumento da massa do catalisador possa favorecer melhores resultados em relação à concentração de 10 ppm. Contudo, todos os materiais apresentaram atividade fotocatalítica promissora para a degradação da rodamina B.

6. CONCLUSÃO

A partir do método dos precursores poliméricos, obteve-se óxidos modificados com Ag e Cu^{2+} , a 800°C por 2 horas. A partir das caracterizações por DRX, FTIR e UV-visível foi possível confirmar a obtenção dos materiais pretendidos. Os modos vibracionais previstos na leitura para o IR confirmam a presença de óxido de estanho dopado com cobre e prata. Em relação às atividades fotocatalíticas com corante rodamina B, todas composições apresentaram atividades na fotodegradação dos corantes, sendo que o SnO_2 dopado com cobre apresentou melhores resultados atingindo 61,7% em 4 horas para a amostra dopada com 6% de cobre. Contudo, estes resultados encontrados sugerem que os materiais modificados são promissores para a sua utilização na degradação de corantes.

REFERÊNCIAS

- BALAPURE, A., DUTTA, J. R., & GANESAN, R. (2024). Recent advances in semiconductor heterojunctions: a detailed review of the fundamentals of photocatalysis, charge transfer mechanism and materials. *RSC Applied Interfaces*, 1(1), 43-69.
- BALBINO, R. D. O. (2015). Remoção do corante azul de metileno por fotocatalise heterogênea com radiação UV artificial e dióxido de titânio (TiO_2) como catalisador (Bachelor's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná).
- BARBOSA BARROS, T. R., SILVA BATISTA BARBOSA, T., LINS ALMEIDA BARBOSA, T., & FREIRE RODRIGUES, M. G. (2023). Adsorption of Rhodamine-B (RhB) and Regeneration of MCM-41 Mesoporous Silica. *Catalysis Research*, 3(1), 1-20.
- BRAGA, M. N. E. (2024). Aplicação dos óxidos binários de $\text{SnO}_2\text{-NiO}$ e $\text{SnO}_2\text{-ZnO}$ na fotodegradação do pesticida aldrin.
- BRANCO, C. (2016). Convenção de Estocolmo sobre poluentes orgânicos persistentes: impactos ambientais, sociais e econômicos associados.
- CHEN, H., HU, Y., YING, Z., XIA, Y., YE, J., ZHAO, J., & ZHANG, S. (2023). BiOI-SnO₂ Heterojunction Design to Boost Visible-Light-Driven Photocatalytic NO Purification. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4009.
- COSTA FONSECA, B. X., SANTOS, M. A. M., & FERREIRA, K. D. (2023). AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA DA RODAMINA B. *Anais do Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica do IFG*, 16(1).
- CUZZATI, F. L., PARRAS, G. A. S., FREITAS, G. D. S., PARIZI, M. P. S., & SOUZA, A. E. D. (2024). CaTiO₃: Influence of Ag Doping on Photocatalytic Activity for Application in Rhodamine B dye Removal. *Materials Research*, 27(suppl. 2), e20240201.
- DANTAS, A. B. B. (2022). Princípios da fotocatalise heterogênea: uma revisão.
- MACEDO, E. R., (2012). Fotofísica das Rodaminas B e 6g: Processos Fotocatalíticos e de engrandecimento da fluorescência. Curso De Pós-Graduação em Ciência Dos Materiais.

- DO NASCIMENTO, J. L. A., CHANTELLE, L., DOS SANTOS, I. M. G., MENEZES DE OLIVEIRA, A. L., & ALVES, M. C. F. (2022). The influence of synthesis methods and experimental conditions on the photocatalytic properties of SnO₂: a review. *Catalysts*, 12(4), 428.
- HUANG, B. J., LI, F., ZHANG, C. W., LI, P., & WANG, P. J. (2014). Electronic structure and optical properties of Ag-doped SnO₂ nanoribbons. *RSC advances*, 4(79), 41819-41824.
- JAIN, S. K., FAZIL, M., NAAZ, F., PANDIT, N. A., AHMED, J., ALSHEHRI, S. M., ... & AHMAD, T. (2022). Silver-doped SnO₂ nanostructures for photocatalytic water splitting and catalytic nitrophenol reduction. *New Journal of Chemistry*, 46(6), 2846-2857.
- KUMAR, S., SHARMA, R., BHATTACHARYA, J., & MEHTA, S. (2023). "Challenges and Advances in SnO₂-Based Photocatalysts for Environmental Applications." *Applied Catalysis B: Environmental*, 327, 121943.
- LACHORE, W. L., ANDOSHE, M. A., AFIAR, F. G., E MEKONNEN, M. A. (2022). Propriedades estruturais, ópticas e elétricas do cobre (Cu) e do níquel [(Ni), cobre]: co-dopado Nanopartículas de SnO₂ preparadas porsol–gel método.
- LELLIS, B., FÁVARO-POLONIO, C. Z., PAMPHILE, J. A., & POLONIO, J. C. (2019). Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. *Biotechnology Research and Innovation*, 3(2), 275-290.
- Lin, J., Ye, W., Xie, M. et al. Environmental impacts and remediation of dye-containing wastewater. *Nat Rev Earth Environ* (2023).
- LIU, H., CHEN, L., LI, Y., & SUN, Z. (2020). "Morphology Control and Doping Effects on Photocatalytic Properties of SnO₂ Nanoparticles." *Catalysis Today*, 341, 56–65. [Link para o artigo](#).
- LOPES, O. F., MENDONÇA, V. R. D., SILVA, F. B., PARIS, E. C., & RIBEIRO, C. (2015). Óxidos de nióbio: uma visão sobre a síntese do Nb₂O₅ e sua aplicação em fotocatalise heterogênea. *Química Nova*, 38(1), 106-117.
- MANSOURI, E. H., & REGGABI, M. (2021). Association between type 2 diabetes and exposure to chlorinated persistent organic pollutants in Algeria: A case-control study. *Chemosphere*, 264, 128596.

- MISHRA, R. K., KUSHWAHA, A., & SAHAY, P. P. (2014). Influence of Cu doping on the structural, photoluminescence and formaldehyde sensing properties of SnO₂ nanoparticles. *RSC advances*, 4(8), 3904-3912.
- MOURÃO, R. S., VALE, B. R. C., FONSECA, A. F. V., CARVALHO, T. A., & SCHIAVON, M. A. (2024). Espectroscopia de fluorescência: dos fundamentos à influência dos parâmetros instrumentais para análises de corantes orgânicos e nanopartículas inorgânicas. *Química Nova*, 47(2), e-20230095.
- MOURÃO, H. A., MENDONÇA, V. R. D., MALAGUTTI, A. R., & RIBEIRO, C. (2009). Nanoestruturas em fotocatalise: uma revisão sobre estratégias de síntese de fotocatalisadores em escala nanométrica. *Química Nova*, 32, 2181-2190.
- NASCIMENTO, J. L. A. D. (2021). Efeitos estruturais e suas influências nas propriedades fotocatalíticas se SnO₂ sintetizado pelo método dos precursores poliméricos.
- NOGUEIRA, Raquel FP; JARDIM, Wilson F. (1998). A fotocatalise heterogênea e sua aplicação ambiental. *Química nova*, 21: 69-72.
- OLIVEIRA, M. O., LIMA A. S, E S, M. S. (2017). Descoloração da rodamina B por processos eletroquímicos e fotoquímicos. XXII SICITE.
- PINHEIRO, N. (2010). A Química dos Pigmentos. *Universidade de Campinas*.
- PINTO, A. H., NOGUEIRA, A. E., DALMASCHIO, C. J., FRIGINI, I. N., DE ALMEIDA, J. C., FERRER, M. M., ... & DE MENDONÇA, V. R. (2022). Doped tin dioxide (d-SnO₂) and its nanostructures: review of the theoretical aspects, photocatalytic and biomedical applications. *Solids*, 3(2), 327-360.
- RAJPUT, R. B., JAMBLE, S. N., & KALE, R. B. (2022). A review on TiO₂/SnO₂ heterostructures as a photocatalyst for the degradation of dyes and organic pollutants. *Journal of Environmental Management*, 307, 114533.
- RAZA, A., REHMAN, R., BATOOL, M., JAHANGIR, M. M., GHFAR, A. A., PRADHAN, S., & AKRAM, M. (2023). Adsorptive Elimination of Rhodamine B Dye by Synthetic Clay-Based Hetero-metallic Oxide Nanocomposite KAB-Ben for Rapid Wastewater Treatment. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(10), 654.

RECK, I. M., & PAIXÃO, R. M. (2016). Impactos ambientais dos corantes azo e tratamentos de remoção: uma revisão. *Uningá Review*, 28(2).

SECCO, M. R. (2015). Descoloração de solução aquosa contendo Rodamina B via processos oxidativos (UV, H₂O₂, H₂O₂/UV, Fenton e Foto-Fenton).

SHAIKH, W. A., CHAKRABORTY, S., & ISLAM, R. U. (2020). Photocatalytic degradation of rhodamine B under UV irradiation using Shorea robusta leaf extract-mediated bio-synthesized silver nanoparticles. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(4), 2059-2072.

SILVA, D. R. D. (2022). A contaminação dos recursos hídricos através da indústria têxtil e técnicas para o tratamento.

SILVA, J. A. B., BARROSO, R. D. C. A., RODRIGUES, A. J., COSTA, S. S., & FONTANA, R. L. M. (2014). A urbanização no mundo contemporâneo e os problemas ambientais. *Caderno de Graduação-Ciências Humanas e Sociais-UNIT-SERGIPE*, 2(2), 197-207.

SILVA WOLFF, G., BERGER, C., ELIAS, M. A., KUREK, A. P., & SUAVE, J. (2022). Fotocatálise heterogênea: uma revisão sobre os métodos promissores de imobilização de dióxido de titânio. *Revista técnico-científica do IFSC*, 1(12), 1-19.

THIND, S. S., PAUL, M., HAYDEN, J. B., JOSHI, A., GOODLETT, D., & MCINDOE, J. S. (2023). A highly efficient photocatalytic system for environmental applications based on TiO₂ nanomaterials. *Industrial Chemistry & Materials*, 1(3), 431-442.

SOUZA, E. C., DE SOUZA BORGES, R., SOARES, L. W. O., & VENTURA, R. A. (2020). A química dos corantes: um estudo sobre a obtenção de um corante natural proveniente do bagaço do caju. *Research, Society and Development*, 9(9).

TONIOLLO, M., ZANCAN, N. P., & WÜST, C. (2015). Indústria têxtil: sustentabilidade, impactos e minimização. In VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental (No. 6, pp. 23-26).

TUNDISI, J. G. (2008). Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. *Estudos avançados*, 22, 7-16.

WANG, H., LI, X., ZHAO, X., LI, C., SONG, X., ZHANG, P., & HUO, P. (2022). A review on heterogeneous photocatalysis for

ZHANG, Y., HE, Z., ZHU, Q., XIONG, L., & WANG, J. (2021). "Enhanced Photocatalytic Degradation Using Modified Tin Oxide: A Review on Recent Developments." *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106–115.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Francisco de Assis e Cleonice Maria, a quem tenho tanto orgulho de ser filha, apesar de todas as dificuldades, sempre me apoiaram, e me incentivaram a continuar na caminhada e não me deixaram desistir.

Ao meu irmão Wellington, por cuidar dos meus pais quando eu não estive por perto e por conversar comigo quando eu precisei de ajuda.

Ao meu gato Dobby (filho), que por muitas vezes foi meu apoio e minha fonte de segurança, ficando comigo em todos os momentos de angústia e ansiedade, mesmo sem entender, foi meu pontinho de paz.

A professora e orientadora Mary Cristina Ferreira Alves, agradeço pela oportunidade única de deixar que eu participasse da sua pesquisa, por acreditar em mim e me passar seu conhecimento.

A todos os professores das disciplinas que cursei onde pude aprender e compartilhar conhecimentos. Aos amigos de curso, em especial Matheus Alexandre e Felipe Charles, por aturarem meus discursos longos e ajudarem quando precisei.

A todos os meus amigos (Em especial Emilly Vitória e Maria Thays) em geral que ficaram comigo nessa jornada me apoiando e compartilhando seus conhecimentos que contribuíram com meu aprendizado.

A banca examinadora por se prontificar na avaliação, trazendo contribuições valiosas para melhoria do meu trabalho. A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

A Deus por está sempre ao meu lado me fazendo forte e me dando sabedoria para enfrentar toda essa trajetória que foi muito difícil, sem Ele não seria possível.

Muito obrigada!