



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM QUÍMICA

LUANA MARIA SILVA DE FIGUEIRÊDO

**ELETROSSÍNTESE DE PONTOS QUÂNTICOS DA LIGA DE TELURETOS DE
CÁDMIO E ZINCO**

Recife
2025

LUANA MARIA SILVA DE FIGUEIRÊDO

**ELETROSSÍNTESE DE PONTOS QUÂNTICOS DA LIGA DE TELURETOS DE
CÁDMIO E ZINCO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Licenciatura
Plena em Química da Universidade
Federal de Rural de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título
de Licenciada em Química.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Navarro
(UFPE)

Coorientador: Dr. Felipe Leon N Sousa
(CETENE)

Recife
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecária: Suely Manzi – CRB/4 - 809

F475e Figueirêdo, Luana Maria Silva de
 Eletrossíntese de pontos quânticos da liga de teluretos de cádmio
 e zinco / Luana Maria Silva de Figueirêdo. – 2025.
 66 f.: il.

 Orientador: Marcelo Navarro.
 Coorientador: Felipe Leon Nascimento de Sousa
 Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura Plena em
 Química) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,
 Departamento de Química, Recife, BR-PE, 2025.
 Inclui bibliografia, apêndice(s) e anexo(s).

 1. Química – Estudo e ensino 2. Síntese orgânica
 3. Eletroquímica 4. Fotoquímica 5. Fotoluminescência
 6. Nanopartículas I. Navarro, Marcelo, orient. II. Sousa, Felipe Leon
 Nascimento de, coorient. III. Título

CDD 540

LUANA MARIA SILVA DE FIGUEIRÊDO

**ELETROSSÍNTESE DE PONTOS QUÂNTICOS DA LIGA DE TELURETOS DE
CÁDMIO E ZINCO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Licenciatura
Plena em Química da Universidade
Federal Rural de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título
de Licenciada em Química.

Aprovado em: 13/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Dr. Felipe Leon Nascimento de Sousa (Coorientador)
Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste - CETENE

Profa. Dra. Flávia Christiane Guinhos de M. Barreto Silva (Examinadora Interna)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Brenand Anjos dos Santos Souza (Examinador Externo)
Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste - CETENE

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelo dom da vida e por todas as oportunidades que surgiram ao longo do caminho, e a Maria por derramar graças e interceder por mim.

A minha família, que é a minha base e inspiração, meu marido Matheus, minha avó Maria e madrinha Rosilda, e a todos que sempre estão ao meu lado mesmo que indiretamente.

Ao meu orientador Marcelo Navarro e ao coorientador Felipe Sousa com quem aprendi muito durante o tempo de iniciação científica, onde pude conhecer uma área totalmente nova e atual da química e fazer experimentos no PIBIC, servindo agora como tema para minha monografia. Como também a FACEPE pela bolsa de iniciação científica concedida, que por esse fomento pude conseguir executar minha pesquisa.

Ao Laboratório de Eletrossíntese e sistema multiusuário do Programa de Pós-graduação da UFPE pela infraestrutura e uso de equipamentos, assim também ao CETENE pelo uso de reagentes.

Aos professores do curso de Licenciatura Plena em Química que contribuíram significativamente para a minha formação, e pela UFRPE por proporcionar um ambiente tão acolhedor em qual pude ter várias experiências que foram bem proveitosas para a minha formação.

A todos que passaram pelo meu caminho, trazendo aprendizados, momentos bons, que construíram memórias que estarão sempre comigo.

“A natureza usa apenas os fios mais longos para tecer seus padrões, de modo que cada pequeno pedaço de seu tecido revela a organização de toda a tapeçaria”
(Feynman, s.d.).

RESUMO

O descarte inadequado de corantes e rejeitos orgânicos causam problemas ambientais devido à sua toxicidade e difícil degradação. Os fotocatalisadores nanoestruturados são alternativas as rotas tradicionais de tratamento de efluentes utilizando a radiação solar como fonte primária de energia. Neste trabalho foram desenvolvidos pontos quânticos (PQs) de ligas ternárias de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0, 0,2, 0,5, \text{ e } 0,8$) e ancorados na superfície do óxido de molibdênio com superfície modificada com agente sililante (3-Aminopropil)triethoxysilano (APTES), verificando a ação do nanofotocatalisador ($\text{MoO}_3/\text{CdZnTe}$) na descoloração do corante azul de metileno. Sendo os PQs baseados em CdTe um modelo óptico para fotoluminescência e posicionamento de bandas. Os PQs foram eletrossintetizados usando a célula eletroquímica de cavidade sob corrente elétrica de -30mA , e estabilizados pelo ácido 3-mercaptopropiônico (MPA). Observou-se a modulação das bandas de emissão e absorção em função da proporção de Zn/Cd e tempo de aquecimento. Essas curvas de luminescência em relação ao tempo demonstram as mudanças de recombinação de cargas. Os nanofotocatalisadores foram caracterizados por técnicas instrumentais como as espectroscopias de absorção na região do UV-vis e de Fotoluminescência, estruturalmente por Difração de raios-X (DRX), e morfológicamente por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O bandgap óptico dos pontos quânticos das ligas ternárias de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0, 0,2, 0,5, \text{ e } 0,8$) foram no intervalo de 2,0 a 2,5 eV. A progressiva substituição de íons Cd^{2+} por Zn^{2+} promoveu o deslocamento hipsocrômico desde $\lambda_{\text{em}} = 612 \text{ nm}$ ($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, $x=0$) até $\lambda_{\text{em}} = 579 \text{ nm}$ ($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, $x=0,8$) após 8 h de refluxo e uma maior definição na banda de absorção. Verificamos a importância da adição do zinco na melhoria das propriedades fotoluminescentes. Os QDs de maior fotoluminescência (1h, 4h e 8h) foram ancorados na superfície do MoO_3 . Os PQs foram ancorados na superfície do óxido de molibdênio por meio da interação do MPA e o AEAPTS. A presença dos PQs sobre a superfície do MoO_3 foi verificada pelos espectros de energia dispersiva de raios-X obtidos por MEV. Foram desenvolvidos experimentos de adsorção e descoloração do azul de metileno com os grupos MoO_3 , MoO_{3-x} -AEAPTS (MOS) e MOS-CdZnTe, sob irradiação com lâmpada UVB ($\lambda = 365 \text{ nm}$, 6W), entretanto o MoO_3 apresentou 90% de capacidade adsorptiva do corante inicial.

Palavras-chave: eletrossíntese, pontos quânticos, fotoluminescência.

ABSTRACT

The improper disposal of organic waste represents a significant environmental challenge due to their inherent toxicity and resistance to degradation. Nanostructured photocatalysts represent a promising alternative to traditional effluent treatment methods, utilizing solar radiation as a primary energy source. In this work, quantum dots (QDs) of ternary alloys $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0, 0.2, 0.5, \text{ and } 0.8$) were developed and anchored on the surface of molybdenum oxide with a silylating agent (3-Aminopropyl)triethoxysilane (APTES). The action of the nanophotocatalyst ($\text{MoO}_3/\text{CdZnTe}$) in the decolorization of the methylene blue dye was verified. The CdTe-based quantum dots serve as an optical model for photoluminescence and band positioning. The quantum dots were electrosynthesized using a cavity electrochemical cell under -30 mA electric current and stabilized by 3-mercaptopropionic acid (MPA). The emission and absorption bands were tuned in function of ratio Zn/Cd and heating time. These luminescence-time curves demonstrate changes in charge recombination. The nanophotocatalysts were characterized by instrumental techniques such as UV-vis absorption and photoluminescence spectroscopy, structurally by X-ray diffraction (XRD), and morphologically by Scanning Electron Microscopy (SEM). The optical bandgap of the quantum dots of the ternary alloys $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0, 0.2, 0.5, \text{ and } 0.8$) was in the range of 2.0 to 2.5 eV. The progressive replacement of Cd^{2+} ions by Zn^{2+} promoted a hypsochromic shift from $\lambda_{\text{em}} = 612 \text{ nm}$ ($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, $x = 0$) to $\lambda_{\text{em}} = 579 \text{ nm}$ ($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, $x = 0.8$) after 8 h of reflux and a greater definition in the absorption band. The addition of Zn^{2+} promoted the enhancement of photoluminescence properties. The quantum dots with a higher photoluminescence (1h, 4h and 8h) were anchored in the MoO_3 surface. The quantum dots were anchored to the surface of the molybdenum oxide through the interaction of MPA and AEAPTS. The presence of PQs on the MoO_3 surface was verified by the energy dispersive X-ray spectra obtained by SEM. Adsorption and discoloration experiments of methylene blue were developed with the MoO_3 , $\text{MoO}_3\text{-AEAPTS}$ (MOS) and MOS-CdZnTe groups, under irradiation with a UVB lamp ($\lambda = 365 \text{ nm}$, 6W), however, MoO_3 presented 90% of adsorptive capacity of the initial dye.

Keywords: electrosynthesis, quantum dots, photoluminescence.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estruturas dos principais cromóforos dos corantes orgânicos.	19
Figura 2 – Esquema de fotodegradação de poluentes orgânicos usando nanoestruturas de TiO_2 como fotocatalisador.	22
Figura 3 – Efeito da escala de tamanhos do ponto quântico de CdSe .	25
Figura 4 – (a) Janelas de emissão dos diferentes semicondutores, (b) formação de estruturas do tipo núcleo@casca, e (c) correlação entre tamanho e emissão nos pontos quânticos.	28
Figura 5 – Diagrama de fases do $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.	29
Figura 6 – Métodos tradicionais para produção dos pontos quânticos.	30
Figura 7 – Montagem do compartimento catódico: (A) barra de grafite, (B) barra com fita Teflon®, (C) base (cavidade de Teflon®), (D) pesagem do calcogênio telúrio e grafite, (E) transferência, (F) prensagem.	33
Figura 8 – Célula de cavidade utilizada no processo de síntese.	34
Figura 9 – Montagem da aparelhagem para a realização da eletrossíntese síntese de PQs.	35
Figura 10 – Fluxograma do processo de eletrossíntese.	36
Figura 11 – Modificação do molibdênio com adição do agente sililante AEATPS.	37
Figura 12 – Determinação das condições para a sensibilização do MoO_3 .	38
Figura 13 - Solução de azul de metileno 10 mg/L e sua estrutura molecular.	39
Figura 14 – Diferença de coloração ao decorrer do tempo na liga $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0,8$).	41
Figura 15 – Espectros de absorção UV-vis com curvas de Tauc e espectros de emissão das amostras de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ para $x = 0$ (a) e (e), respectivamente, $x = 0,2$ (b) e (f), respectivamente, $x = 0,5$ (c) e (g), respectivamente, e $x = 0,8$ (d) e (h), respectivamente.	42
Figura 16 – Posicionamento relativo de bandas dos pontos quânticos de CdTe-AMP em pH 13.	46
Figura 17 – Ancoragem dos PQs de CdZnTe ($x = 0,8$) nos tempos de 1h, 4h e 8h.	47

Figura 18 – (a) Imagem de MEV do MoO_3 , (b) Imagem de MEV do MoO_3 -APTS- $\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{Te}$.	49
Figura 19 – Soluções com o indicador azul de metileno contendo MoO_3 -APTS, $\text{MoO}_3/\text{CdZnTe}$ (4 horas de aquecimento), MoO_3 , padrão azul de metileno.	50
Figura 20 - Soluções de azul de metileno contendo MoO_3 -APTS, $\text{MoO}_3/\text{CdZnTe}$ (4 horas de aquecimento), MoO_3 , padrão azul de metileno no reator com uma lâmpada irradiando 365 nm e potência de 6 W.	51
Figura 21 – Espectros de absorção e curvas de intensidade de absorção do azul de metileno.	52
Figura 22 – Espectros de absorção e curvas de intensidade de absorção do (a)Azul de metileno + MoO_3 .	53
Figura 23 – Espectros de absorção e curvas de intensidade de absorção do (a)Azul de metileno + MoO_3 -APTS.	54
Figura 24 – Espectros de absorção e curvas de intensidade de absorção do Azul de metileno + MoO_3 -APTS- CdZnTe .	55
Figura 25 – Fotocatalisadores: MoO_3 , MoO_3 -APTS, MoO_3 -APTS- CdZnTe , indicador, respectivamente. após o período de fotocatalise.	56
Figura 26 – MoO_3 após as 4 horas de fotocatalise.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Avanço dos band-gaps ópticos com o tempo de aquecimento das soluções de PQs de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.	43
Tabela 2 –	Avanço dos comprimentos de onda de emissão com o tempo de aquecimento	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

λ	Comprimento de onda
λ_{em}	Comprimento de onda da radiação eletromagnética
μm	Micrômetro
AEAPTS	N- β -aminoetil- γ -amino-propil-trimetóxisilano
APL	Arranjo Produtivo Local
Cd^{2+}	Íon Cádmio com carga 2+
CdSe	Seleneto de Cádmio
CdTe	Telureto de Cádmio
CdZnTe	Telureto de Cádmio e Zinco
$Cd_{1-x}Zn_xTe$	Telureto de Cádmio e Zinco onde $x=0; 0,2; 0,5; 0,8$
CO_2	Gás carbônico
DRX	Difração de raios-X
eV	elétron-Volt
FACEPE	Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco
H_2O	Água
keV	Quiloelétron-volt
$M\Omega.cm^{-1}$	Mega-Ohms por centímetro, unidade de resistência
mA	Miliampere
MB	Azul de metileno
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MoO_3	Trióxido de Molibdênio
MOS	Trióxido de Molibdênio modificado com o agente sililante N- β -aminoetil- γ -amino-propil-trimetóxisilano
Mesh	Unidade de medida de granulometria, número de aberturas por polegada linear de peneira
MPA	Ácido mercaptopropiônico
$NaClO_4$	Perclorato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
nm	Nanômetro
$O_2^{\cdot-}$	Superóxido
OH	Hidroxila

pH	Potencial hidrogeniônico
PIBIC	Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica
POA	Processos Oxidativos Avançados
PPG	Programa de Pós-Graduação
PQs	Pontos Quânticos
S m ⁻¹	Siemens por metro (unidade de condutividade elétrica)
THF	Tetraidrofurano
TiO ₂	Dióxido de Titânio
TOC	Total Organic Carbon (Carbono Orgânico Total)
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
UV	Ultravioleta
UV-vis	Ultravioleta-Visível
UV-Vis-NIR	Ultravioleta-Visível-Infravermelho próximo
UVB	Ultravioleta B
Zn ²⁺	Íon Zinco com carga 2+
ZnO	Óxido de Zinco
ZnS	Sulfeto de Zinco
ZnTe	Telureto de Zinco
W	Watt

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVO.....	17
2.1 Objetivos específicos	17
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
3.1 Indústria têxtil	18
3.1.1 Efluentes têxteis.....	18
3.1.2 Tipos de corantes	18
3.2 Processos de tratamento	20
3.2.1 Convencionais	20
3.2.2 Processos oxidativos avançados	21
3.2.2.1 Fotocatálise	21
3.4 Semicondutores	23
3.4.1 Éxciton e transferência de energia.....	24
3.4.2 Pontos quânticos	25
3.4.3 Agente estabilizante.....	26
3.4.4 $Cd_{1-x}Zn_xTe$	26
3.4.5 Métodos de síntese.....	29
4 METODOLOGIA.....	32
4.1 Eletrossíntese	32
4.1.1 Pontos quânticos de $Cd_{1-x}Zn_xTe$	32
4.2 Modificação do molibdênio.....	37
4.3 Ancoragem dos pontos quânticos.....	38
4.4 Caracterização	38
4.5 Ensaios de atividade fotocatalítica do corante azul de metileno	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1 Caracterização óptica do Telureto de Cádmio e Zinco	40
5.2 Ancoragem dos pontos quânticos dos sistemas de $Cd_{1-x}Zn_xTe$ na superfície do MoO_3	47
5.3 Caracterização morfológica do compósito $Cd_{1-x}Zn_xTe/MoO_3$	48
5.4 Fotodegradação do corante azul de metileno	50
6 CONCLUSÃO.....	57

7 PERSPECTIVAS.....	58
REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

O setor têxtil impulsiona a economia local de várias microrregiões do Nordeste, particularmente no polo de confecções têxteis de Pernambuco. O município de Toritama é o segundo maior polo de confecção de jeans do país possuindo mais de mil fábricas, e junto com Surubim, Caruaru e Santa Cruz do Capibaribe formam o Arranjo Produtivo Local (APL), fornecendo 120 mil empregos diretos e 360 mil indiretos. (SEBRAE, 2019)

Em Toritama são produzidas aproximadamente 800 mil peças por mês, e para cada uma são utilizadas de 10 a 40 litros de água, totalizando um gasto de 8 a 32 milhões de litros de água (LIMA, 2006). Na produção das peças são utilizados diversos tipos de corantes para o tingimento dos tecidos, que são substâncias orgânicas solúveis em água que possuem grupos cromóforos responsáveis por dar cor às peças. Entretanto, estes compostos são usados em concentrações muito altas e são liberados dos tecidos, principalmente durante a etapa de lavagem. Onde os processos convencionais de tratamento de efluentes não são capazes de tratar toda carga de corantes. (MACEDO et al, 2020)

O primeiro problema ambiental é associado a cor conferida a água, que não permite a penetração de luz solar e muda a dinâmica de espécies vegetais e algas, que em cadeia alteram a concentração de oxigênio dissolvido levando a morte de animais e o desequilíbrio desencadeado pela presença de seres anaeróbios. (RITTER, 2017) Muitos destes corantes são compostos orgânicos conhecidos como "persistentes" significando que eles resistem aos processos naturais de degradação, permanecendo no ecossistema por longos períodos, acumulando-se na cadeia alimentar e exercendo efeitos tóxicos. (SILVA, 2018) A toxicidade do corante tanto para os seres vivos ali presentes quanto para a população que mora ao redor dos mananciais de despejo de efluentes têxteis, trazendo riscos para a sua saúde; prejuízos econômicos para o turismo e a pesca.

Visando o desenvolvimento de estratégias complementares às convencionais para o problema da remoção de corantes de efluentes têxteis, uma das estratégias químicas mais promissoras são os Processos Oxidativos Avançados (POA) devido a sua alta eficiência para a degradação de corantes, uma das técnicas mais empregadas neles são os processos Fenton, foto-Fenton, sonólise, ozonização, degradação induzida por radiação e a fotocatalise (SILVA, 2018), com o destaque

para o último, que será tratado nesta monografia. O uso de catalisadores nanoestruturados baseados em diferentes classes de materiais fotoativos permite aceder a maiores índices de degradação dos corantes orgânicos e inorgânicos. (RAJABI et al, 2015) Sendo um dos principais objetivos a completa mineralização dos corantes com a formação dos produtos o dióxido de carbono, a água e outros produtos não tóxicos (NOSSOL, 2016).

A fotocatalise heterogênea utiliza-se de um catalisador sólido, que no caso estudado é o telureto de cádmio e zinco (CdZnTe) que é ativado ao absorver luz e pode promover reações fotoquímicas e degradar poluentes. Foi escolhido este por ser um misto das ligas de CdTe (Telureto de Cádmio) e ZnTe (telureto de Zinco), que não requerem o uso de outros agentes químicos no processo, onde o CdTe não gera contaminantes, preserva a luminescência dos pontos quânticos e propriedades adsorptivas (Costa, 2022) além de sua eficiência na absorção da luz visível, porém por conter cádmio é tóxico podendo também ser instável. Já o ZnTe é menos tóxico porém também é instável (Passos, 2020), não absorvendo muito a luz quando o CdTe .

Com o CdZnTe se busca o melhor destes dois semicondutores, variando as proporções de cádmio e zinco consegue-se ajustar melhor a largura da banda proibida (band gap), absorvendo mais a luz. Além de que aumentando a proporção do zinco em relação ao cádmio se torna um composto menos tóxico. Porém não é uma liga que possui muitas referências, aparecendo pouco na literatura, geralmente é mais utilizada em detectores de radiação (CONNOR, 2020).

Os pontos quânticos podem ser binários, ternários ou quaternários. Neste trabalho foram utilizados pontos quânticos ternários de telureto de cádmio e zinco ($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$) como materiais candidatos para fotocatalise do corante modelo: azul de metileno. O azul de metileno foi escolhido por vários fatores, entre eles por ele ser um poluente cancerígeno então sua remoção e transformação em subprodutos menos tóxicos é muito importante para o meio ambiente e população, sua presença é facilmente observada por possuir uma tonalidade azul, é ativo no Uv-Vis apresentando picos característicos que desaparecem após a degradação assim como também a sua coloração. (DIN et al, 2021)

Há diversos estudos que utilizam como modelo o dióxido de titânio (TiO_2) e o óxido de zinco (ZnO) como semicondutores devido às suas propriedades e baixo custo, porém como possuem bandgap muito alto há limitações na absorção da luz

visível. Em relação ao TiO_2 , o ZnO atua em maiores faixas de espectro sob luz visível e ultravioleta, mas sua eficiência diminui quando há uma recombinação entre elétrons e lacunas. Além disso, sua atividade fotocatalítica e estabilidade são comprometidas durante a radiação UV quando há fotocorrosão. (NOHARA, 2022) E o TiO_2 não utiliza a região UV da luz solar de modo eficiente, pois como ela representa de 3 a 4% do espectro, ele é fotoativo apenas nessa área. (SHAHMORADI, 2012)

Tendo o CdZnTe como sistema fotoluminescente modelo. Os nanocristais de das ligas ternárias de CdZnTe que podem ter suas janelas ópticas sintonizadas para potencializar a fotocatalise de corantes orgânicos, além de possuir um alto potencial químico de superfície que reflete a energia associada à interação de um componente com a interface entre duas fases. Como foco da investigação desenvolveu-se a eletrossíntese de ligas de semicondutores dos sistemas de telureto de cádmio e zinco ($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$), visando a modulação das propriedades ópticas, como rendimento quântico, ampliação da intensidade de fotoluminescência, além da diminuição da toxicidade do nanomaterial com a progressiva diminuição da quantidade de cádmio. Foram desenvolvidos experimentos iniciais de formação de heteroestruturas entre os pontos quânticos e o trióxido de molibdênio (MoO_3) e sua ação como fotocatalisador foi avaliada.

2 OBJETIVO

Obter pontos quânticos dos sistemas ternários de Telureto de Cádmio e Zinco ($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$) pela progressiva substituição do Cd^{2+} por Zn^{2+} , avaliando o impacto nas propriedades ópticas e eletrônicas do material. Visando a hierarquização do nanomaterial em trióxido de molibdênio modificado, e avaliação da ação da heteroestrutura como fotocatalisador de corantes orgânicos.

2.1 Objetivos específicos

- i. Produzir eletroquimicamente os Pontos Quânticos CdZnTe em meio aquoso, com uso do estabilizante ácido mercaptopropiônico (MPA);
- ii. Avaliar o efeito da substituição do íon Cd^{2+} por Zn^{2+} nas propriedades ópticas da liga ternária $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0, 0,2, 0,5, \text{ e } 0,8$);
- iii. Caracterizar as propriedades ópticas dos pontos quânticos por técnicas espectroscópicas como a de absorção na região do UV-visível e de fotoluminescência;
- iv. Modificar a superfície do MoO_3 com agente sililante N- β -aminoetil- γ -amino-propil-trimetóxisilano (AEAPTS);
- v. Ancorar as nanopartículas de CdZnTe no MoO_3 ;
- vi. Caracterizar as heteroestruturas morfologicamente e composicionalmente por microscopia eletrônica de varredura;
- vii. Realizar ensaios de fotodegradação com o corante modelo azul de metileno.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Indústria têxtil

No Brasil, a indústria têxtil é um dos setores mais antigos, iniciado no séc. XIX e expandido desde 1930 (FUJITA; JORENTE, 2015). Atualmente gera muitos empregos, cerca de 1,3 milhões de postos de trabalho, e é essencial pois a vestimenta faz parte do dia a dia de todas as pessoas (ABIT, 2025). No entanto, desde a etapa de tingimento até a de acabamento merece um pouco de atenção, pois geram os efluentes industriais, que são nocivos à saúde por conter substâncias prejudiciais e corantes que não se degradam facilmente.

3.1.1 Efluentes têxteis

O processo de produção de tecidos possui seis etapas: preparação da matéria-prima, fiação e tecelagem, tingimento, acabamento, lavagem final e processos auxiliares, descarte de resíduos sólidos (MULTIÁGUA, 2022). Tratamentos primários (coagulação e floculação, neutralização, precipitação, e processo fenton e foto-fenton) e secundários (lodos ativados, biofiltros e reatores anaeróbios) são aplicados pelas lavanderias (NUNES, 2019; QUEIROZ et al., 2019). Entretanto, a clandestinidade de muitas microempresas, faz com que estes tratamentos convencionais não sejam aplicados e ao decorrer dessas etapas os efluentes têxteis gerados são descartados nos corpos hídricos das proximidades, contaminando-os com corantes que não foram fixados à fibra. O que gera impactos ambientais, como a poluição hídrica tornando a água nociva para seres humanos e ao ecossistema local, emissão de gases tóxicos devido aos produtos químicos, impactos no solo e na vegetação, entre outros.

3.1.2 Tipos de corantes

Como a demanda têxtil é alta, houve a necessidade de ter um aperfeiçoamento nos corantes para que possuísem uma maior resistência e boa fixação na coloração dos tecidos produzidos, evitando para que não haja o desbotamento das peças (ZANONI; CARNEIRO, 2001). Porém, essa condição de

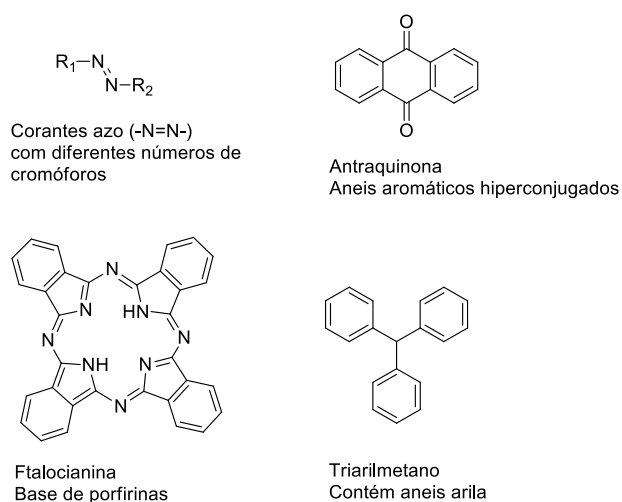
fixação após interagir com a superfície do material pode ser o motivo de sua toxicidade, que ocorre devido à sua estrutura (BANAT et al., 1996).

Os corantes possuem em sua estrutura anéis aromáticos e/ou duplas ligações que são responsáveis pela sua cor, denominados de cromóforos, e o grupo auxocromos que provocam ou intensificam a cor dos anteriores. (GOMES, 2000) E devido a isso, os corantes sintéticos podem ser classificados de acordo com a sua estrutura química.

Se o corante tiver o grupamento $N=N$ - como grupo cromóforo, ele é denominado de Azo que é um dos mais utilizados, podendo ser classificado como mono, di, tri ou poli. Se ele possuir como grupo cromóforo anéis aromáticos e grupos carbonílicos é denominado de Antraquinona. Se o corante tiver ramos criados por três anéis arila, é o triarilmetano, que absorve muito bem na região visível. E se for constituído por quatro anéis isoindóis que é a mistura de um anel benzênico com um anel pirrol, é a ftalocianina, um composto de coordenação macrocíclico (SANTOS, 2019).

O esquema apresentado na Figura 1 apresenta um esquema com as principais estruturas químicas presentes nos corantes orgânicos:

Figura 1 – Estruturas dos principais cromóforos dos corantes orgânicos



Fonte: A AUTORA, 2025.

Além de sua estrutura, de acordo com a Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM) os corantes também podem ser classificados de acordo com o

seu modo de fixação à fibra têxtil, eles podem ser ácidos, à cuba, azóicos, básicos, diretos, dispersivos, enxofre e reativos. (SANTOS, 2019).

3.2 Processos de tratamento

O tratamento dos efluentes é essencial para proteger a saúde humana e a integridade dos ecossistemas naturais, evitando assim a contaminação dos rios, solos e vegetação. Minimizando os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de resíduos industriais, por meio da remoção dos poluentes e resíduos tóxicos. A seguir serão brevemente apresentados os tipos de estratégias de tratamento de efluentes e algumas das características dos processos oxidativos avançados (POA).

3.2.1 Convencionais

Os processos de tratamento de efluentes são, convencionalmente, via estratégias físicas, químicas e/ou biológicas.

Em estágio inicial os efluentes passam por um pré-tratamento para separar sólidos grosseiros e homogeneização do efluente, como tratamento físico pode-se passar por filtração e sedimentação, como tratamento químico tem a precipitação química por meio de uso de produtos químicos, coagulação e a floculação, e como tratamento biológicos tem as lagoas de estabilização e os reatores biológicos (MULTIÁGUA, 2022). Os sistemas operacionais não necessariamente passam por todas estas etapas, e possuem diferentes combinações, entretanto existem legislações que definem indicadores da qualidade da água após tratamento do efluente. A resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) Nº 430 DE 13/05/2011 define condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Indicando, por exemplo os limites máximos de compostos inorgânicos e orgânicos, faixa de pH e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DQO).

Mesmo aliando várias destas técnicas convencionais a carga orgânica nos efluentes ainda é muito alta (COSTA, 2023), e os corantes orgânicos de característica persistente requerem de estratégias avançadas de tratamento. Neste sentido, pesquisas têm sido desenvolvidas com outras tecnologias mais avançadas

para a remoção desses poluentes, como os processos oxidativos avançados (POAs). (SILVEIRA, 2017)

3.2.2 Processos oxidativos avançados

São técnicas para degradar poluentes orgânicos e inorgânicos que não podem ser removidos por meios convencionais, podendo ser utilizadas sozinhas ou aliadas a outras técnicas de tratamento, visando remover os compostos tóxicos ou transformá-los em substâncias que sejam degradadas facilmente. Estes processos utilizam catalisadores, que utilizam diversas fontes primárias de energia (luz solar, fotovoltaica, fototérmica, entre outras) para geração de espécies químicas altamente reativas, como os radicais hidroxila ($\cdot\text{OH}$) e superóxidos ($\text{O}_2^{\cdot-}$), que são oxidantes extremamente potentes e não seletivos. Diferentes materiais são utilizados como catalisadores, e visando processos fotocatalíticos, ou seja, aqueles onde o processo de geração das espécies reativas de oxigênio é produzido na interface dos catalisadores por meio da utilização da luz como fonte primária de energia, materiais como os semicondutores despontam por conta da estabilidade físico-química e sintonização da região espectral de absorção de luz.

3.2.2.1 Fotocatálise

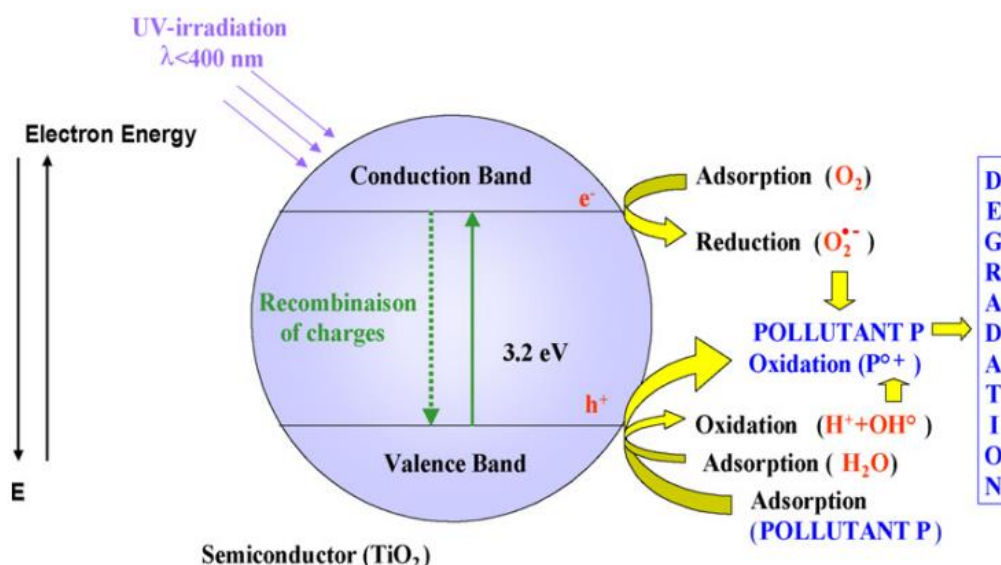
A fotocatálise pode ser classificada em homogênea e heterogênea, em que ambos os processos utilizam de luz (ultravioleta ou visível) para acelerar as reações químicas na superfície do fotocatalisador. A diferença entre os dois processos está associada à fase em que o catalisador se encontra em relação aos reagentes. Na fotocatálise homogênea, o catalisador e os reagentes estão na mesma fase, geralmente em solução, o que significa que o catalisador está completamente dissolvido no meio reacional, formando uma única fase. Já na fotocatálise heterogênea, o catalisador está em uma fase diferente dos reagentes, sendo geralmente um sólido em contato com um líquido ou um gás, de modo que a reação ocorre na interface entre o catalisador sólido e o meio onde os reagentes estão dissolvidos ou dispersos. (TAFAREL, 2018)

A heterogênea apresenta uma maior vantagem em relação a homogênea, pois seus materiais e catalisadores estão em diversas fases, podendo ser mais facilmente separada e reutilizável. (KIRANKUMAR; SAMATHI, 2020)

Os semicondutores são exemplos de materiais que podem ser obtidos de forma nanoestruturada e que, quando excitados por radiação, promovem a migração de elétrons da banda de valência para a banda de condução, deixando lacunas na banda de valência. (LARSEN, s.d.)

A fotocatalise utilizando pontos quânticos (PQs) que são semicondutores nanoestruturados tem sua atuação baseada em diminuir os processos de recombinação de cargas e aumentar a separação nas interfaces dos semicondutores, por meio de processos oxirredutivos. Os efeitos de quantização, aos quais os PQs estão associados ao estarem em estado de confinamento quântico, tem seus efeitos de composição química e escala de tamanho. Tendo direto efeito nos posicionamentos relativos das bandas de valência e de condução (COSTA et al, 2020). O posicionamento relativo das bandas influenciará diretamente na produção de espécies potencialmente oxidativas aos corantes orgânicos, como $\text{OH}\cdot$ e $\text{O}_2\cdot^-$ (SILVA et al, 2022). Esses processos são chamados de processo de oxidação avançada (POA) (CHANG et al, 2012), que está esquematizado na Figura 2 abaixo.

Figura 2 - Esquema de fotodegradação de poluentes orgânicos usando nanoestruturas de TiO_2 como fotocatalisador.



Fonte: HERMANN, 2010.

Na figura acima, o dióxido de titânio é utilizado como exemplo de semicondutor na fotocatalise heterogênea. Quando irradiado por luz ultravioleta com comprimento de onda inferior a 400 nm – e energia superior ao seu bandgap de 3,2 eV –, os elétrons são promovidos da banda de valência para a banda de condução, gerando buracos (h^+) na banda de valência. Esse processo resulta na formação de pares elétron-buraco (e^- / h^+) no interior do semicondutor. (HERMANN, 2010)

O elétron da banda de condução é transferido para as moléculas de O_2 da superfície e as reduz, formando assim radicais superóxido $O_2^{\cdot-}$, que por serem muito reativos, reagem oxidando os poluentes orgânicos parcial ou totalmente. (HERMANN, 2010)

Já os buracos de elétron (h^+) presentes na banda de valência, podem oxidar diretamente os poluentes ou adsorver na superfície moléculas de água ou íons hidroxila (OH^-), formando assim radicais hidroxila $HO^{\cdot}$, que por também serem muito reativos colaboram para a degradação dos poluentes. Essas espécies radicalares são chamadas de espécies reativas de oxigênio e que atuam oxidando as estruturas dos corantes fragmentando-os e em função das sequenciais etapas de redução alcançar a mineralização, transformando os corantes em produtos em H_2O e o CO_2 . (MOHAMADPOUR; AMANI, 2024)

3.4 Semicondutores

Segundo FRAGA, 2017, um material é classificado como semicondutor quando a 0 Kelvin apresenta uma diferença entre suas bandas de condução e de valência: a banda de valência encontra-se preenchida de elétrons e a banda de condução encontra-se vazia. Os semicondutores possuem uma condutividade intermediária (10^{-6} a 10^4 S m^{-1}) entre os materiais condutores (10^5 a 10^7 S m^{-1}) e os materiais isolantes (10^{-20} a $10^{-10} \text{ S m}^{-1}$). Essa característica permite selecionar as aplicações de cada uma das classes de materiais. (SWART, 2008)

Considerando a diferença dos posicionamentos de bandas de cada um dos materiais, podemos elencar o posicionamento dos condutores, onde as bandas de valência e condução se sobrepõe, onde não haverá bandgap. Os elétrons possuem livre fluxo entre as bandas de valência e condução, dessa forma o bandgap dos materiais condutores é aproximadamente zero, $E_g = 0 \text{ eV}$. Já para os materiais semicondutores, possuem uma separação entre as bandas verificável, geralmente

possui valores de bandgap na faixa de 0,1 eV até 4 eV. Nos materiais isolantes a diferença entre as bandas é muito grande, maior que 4 eV. A análise combinada de condutividade e energia de separação das bandas faz com que os materiais semicondutores apresentem propriedades singulares, conduzindo melhor do que um isolante mas não tão bem quanto um metal. Ganhando ainda mais destaque ao considerarmos os efeitos de confinamento quântico. (SWART, 2008)

Dessas propriedades que os materiais semicondutores apresentam é de poderem conduzir eletricidade a temperatura ambiente pela presença de elétrons na banda de condução além das lacunas na banda de valência, devido a um estímulo térmico ou absorção de fóton.

Um dos principais usos de materiais semicondutores é associado à capacidade de acelerar reações químicas na presença de luz, atuando como nanofotocatalisador. Dentre esses materiais, podemos citar óxidos metálicos, nitretos metálicos, calcogenetos metálicos e compostos dos grupos III-V da tabela periódica com destaque para os dicalcogenetos de metais de transição, os quais possuem uma grande variedade devido a combinação entre alguns dos metais de transição e os calcogênios enxofre, selênio e telúrio. (FRAGA, 2017)

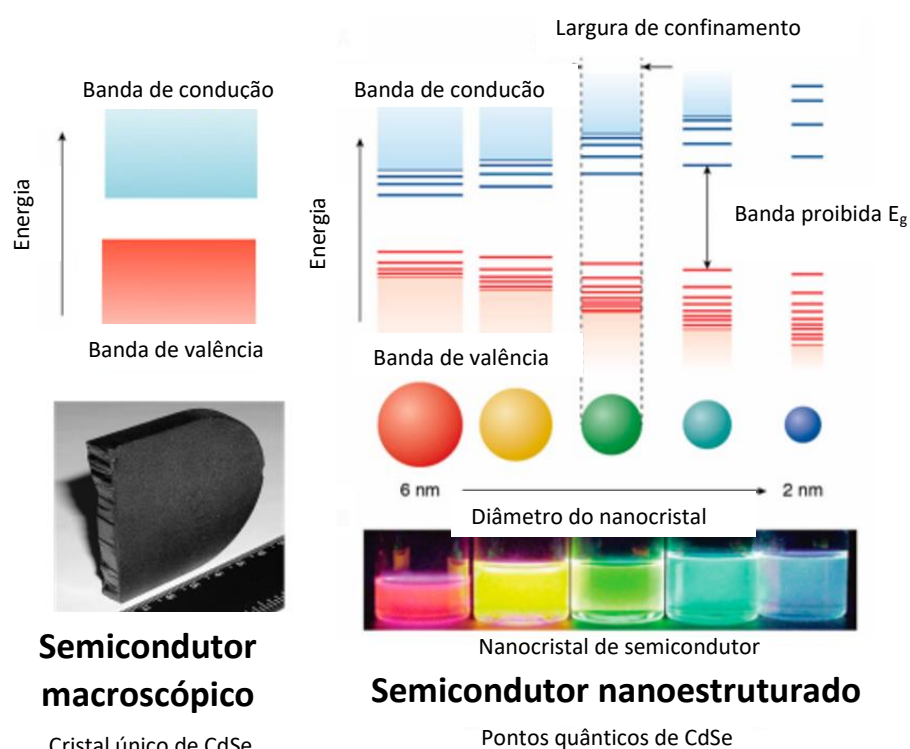
3.4.1 Éxciton e transferência de energia

Na teoria de bandas, a banda de valência é o estado fundamental populado pelos elétrons, já a banda de condução é o estado excitado, ao qual os elétrons são promovidos desde a banda de valência, ao receber energia igual ou superior a energia que os separa (o bandgap). Quando um elétron absorve uma energia ($h\nu$) igual ou superior ao seu bandgap, ele é promovido da banda de valência para a banda de condução. Esse processo de excitação e população da banda de condução leva a formação de uma quase-partícula chamado de éxciton que é definida pelo par elétron-buraco de elétron ($e^- - h^+$). Naturalmente, o éxciton possui uma força eletrostática envolvida, visto que é descrito por uma carga positiva e negativa. (BENATTO et al., 2020)

3.4.2 Pontos quânticos

Os pontos quânticos são nanopartículas semicondutoras coloidais, que variam de 2 a 10 nm de diâmetro. São nanoestruturas que estão susceptíveis ao regime de confinamento quântico e suas regiões de absorção e emissão de radiação são dependentes da composição química e do tamanho das nanopartículas. (RABOUW; DONEGÁ, 2016) Essa dependência é apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Efeito da escala de tamanhos do ponto quântico de CdSe.



Fonte: RABOUW; DONEGÁ, 2016, adaptado.

A Figura 3 apresenta o efeito da escala de tamanhos do material. O CdSe quando em escala macroscópica (bulk) possui valor de bandgap estreito. Onde visualiza-se o material de cor preta, associado a absorção completa do espectro visível. Já ao diminuir o tamanho do material tornando-o nanoparticulado desde 6 nm até 2 nm é possível discretizar estados de energia e criar uma maior separação energética entre banda de valência e de condução (RABOUW; DONEGÁ, 2016). Dessa forma, a formação dos éxcitons (par elétron-buraco de elétron) é possível, e o

tempo de vida que esse elétron poderá popular o estado excitado sem recombinar influenciará diretamente no seu rendimento quântico.

Dependendo do tamanho desta nanopartícula ela modula a energia do elétron, que quando excitados irão emitir luz em um determinado comprimento de onda. Se ela for menor a coloração emitida será no comprimento do azul e do verde, e se for maior do amarelo e vermelho.

É possível verificar o estado de confinamento quântico dos semicondutores nanoestruturados quando os seus valores de bandgap excedem os valores do material bulk. (SILVA, 2014)

3.4.3 *Agente estabilizante*

A depender da nanopartícula utilizada e o efeito que se pretende alcançar, os pontos quânticos podem ser modificados adquirindo novas funções e estruturas, quando se há a adição de agentes de cobertura. Também chamados de agentes estabilizantes, eles podem ter cargas positivas ou negativas, a depender do pH do meio, possuindo diversas funções como estabilizar as partículas e impedir seu crescimento descontrolado, evitar que o produto final se aglomere, melhorar as propriedades estruturais, podem aumentar até 50% o rendimento quântico das nanopartículas, entre outras. (RAMOS, 2018)

Além disso, estudos mostram que ao haver o recobrimento com os estabilizantes ácido mercaptopropiônico (MPA) e cisteamina (CA) a toxicidade dos pontos quânticos de CdTe eram menores do que os que não eram revestidos, que apresentavam uma toxicidade moderada, pois eles isolam o núcleo tóxico. (LOVRIC et al, 2005)

3.4.4 $Cd_{1-x}Zn_xTe$

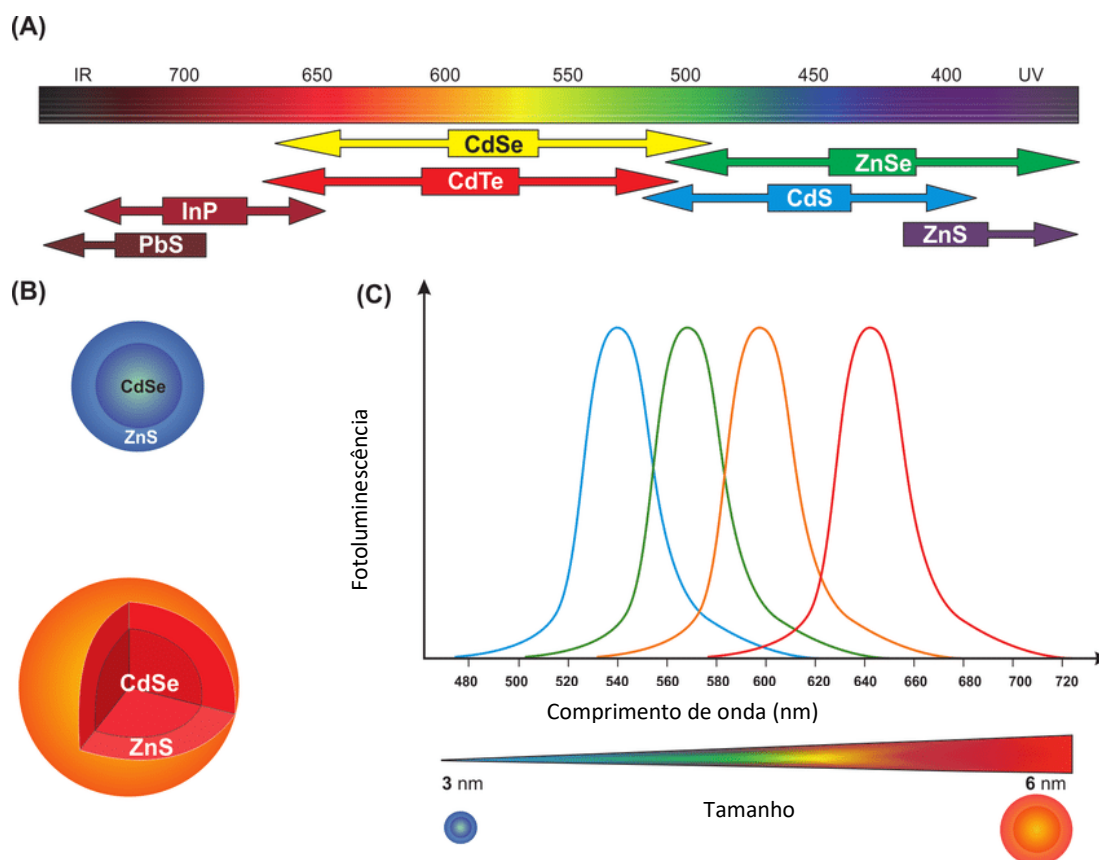
É um semicondutor ternário, que por possuir diferentes combinações possui uma banda proibida ajustável, permitindo diversas aplicações ópticas e eletrônicas, como em imagens de raio x, espectroscopia de raios gama, dosímetros, medições industriais, etc. (KROMEK, s.d.) Se encontrando na forma cúbica de face centrada, onde cada átomo de cádmio ou de zinco está coordenado em geometria tetraédrica a 4 átomos de telúrio, e vice-versa. (MATOS, 2012)

Os pontos quânticos de CdTe, onde sua principal característica é a sua emissão de luz sintonizável em função do tamanho das nanopartículas, evidenciando os diferentes regimes de confinamento quântico. O CdTe na forma bulk, ou seja, macroscópica, é um semicondutor de gap direto e apresenta valor bandgap de 1,5 eV. (MATOS, 2012) Ao ter seu tamanho reduzido entre 2 a 7 nm é possível sintonizar sua emissão desde o infravermelho próximo até o verde (Figura 4).

Na figura 4(a) é mostrado o espectro do infravermelho até o ultravioleta, e a depender da escolha do semicondutor ele emite nestas faixas, quando menor ele for emitirá mais azul, e se for maior emitirá vermelho. Quanto maior a extensão da seta mais faixas do espectro são alcançáveis, por isso é bem importante a escolha dos materiais a serem estudados. Na figura 4(c) também é mostrado que pelo tamanho da nanopartícula é possível verificar para onde ela se deslocará, quanto maior ela for mais para o vermelho. E acima quanto mais alto o pico maior a luminescência, e como ele é estreito demonstra que os pontos quânticos emitem em comprimentos de onda bem específicos. Os picos só estão assim pois na figura 4(b) a casca estabiliza e melhora a emissão, pois o CdSe sozinho apresenta defeitos em sua superfície que comprometem sua eficiência quântica, e o ZnS funciona como uma casca protetora melhorando suas propriedades de luminescência e estabilidade.

HINES e GUYOT-SIONNEST (1996) foram os pioneiros a sintetizarem com esta estrutura de núcleo@casca dos pontos quânticos de CdSe recoberto por uma e duas camadas de ZnS, havendo um aumento de 50% no rendimento quântico de emissão quando comparados com o CdSe sozinho. E também é importante controlar a espessura da casca pois se for muito fina pode gerar instabilidade, e se for aumentar muito pode apresentar defeitos no nanomaterial. (SILVA et al., 2010)

Figura 4 – (a) Janelas de emissão dos diferentes semicondutores, (b) formação de estruturas do tipo núcleo@casca, e (c) correlação entre tamanho e emissão nos pontos quânticos.

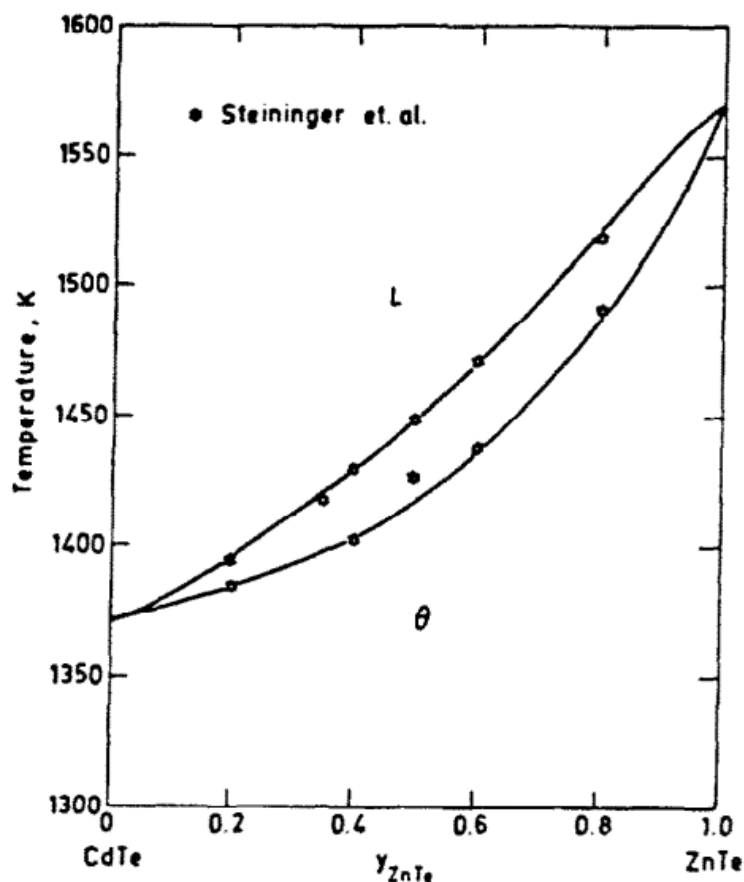


Fonte: MASHINCHIAN et al., 2014, adaptado.

O ternário é baseado na substituição de posições catiônicas de Cd^{2+} por Zn^{2+} , diminuindo não apenas a toxicidade do sistema, mas amplificando propriedades ópticas. O ZnTe é uma estrutura de baixa estabilidade coloidal, e ainda é um desafio sintético. (KIM et al., 2010)

Ele pode gerar e movimentar os portadores de carga sendo um ótimo candidato para a degradação de poluentes. E é muito usado em detectores de raios x e dispositivos fotovoltaicos. O CdTe destaca-se com suas aplicações optoeletrônicas como displays em QLEDs, partes fotoativas de células fotovoltaicas e como sondas espectroscópicas de processos químicos e físicos. (SAM, s.d.)

Neste diagrama de fases da figura 5 abaixo do sistema de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ é mostrado que o CdTe e o ZnTe apresentam no estado sólido uma miscibilidade completa. (SINGH; SHARMA, 1992)

Figura 5 – Diagrama de fases do $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.

Fonte: SINGH; SHARMA, 1992.

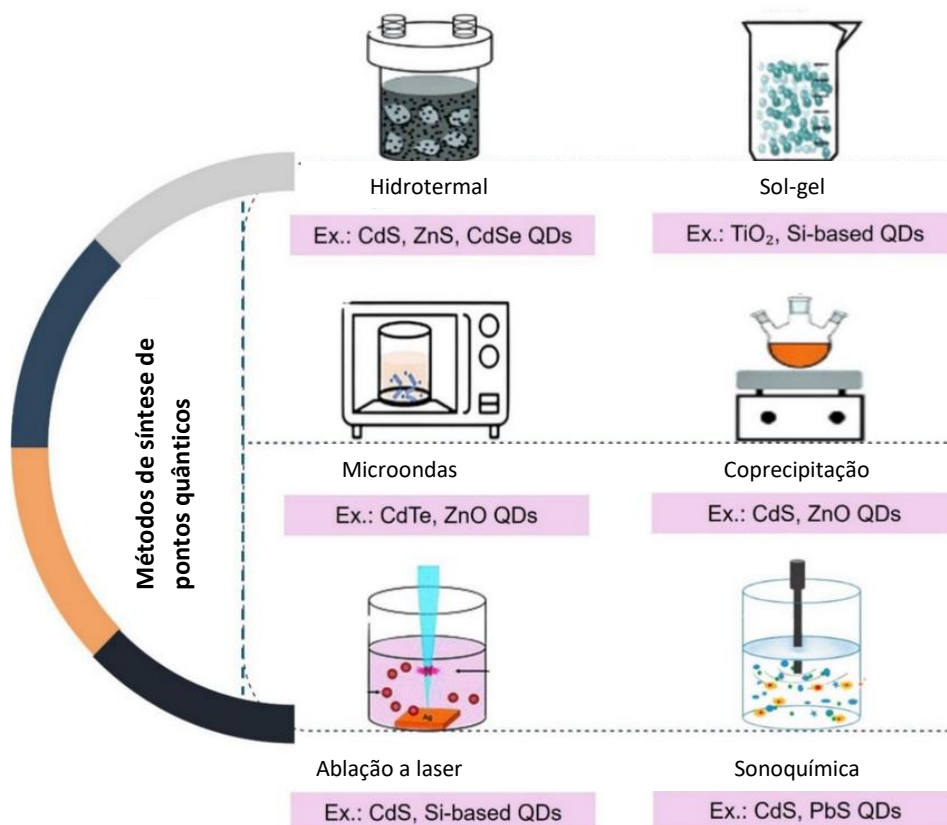
Como se pode observar na figura 5 os sistemas binários puros de CdTe e ZnTe se fundem em 1371 K e 1573 K, respectivamente (SINGH; SHARMA, 1992) E para todas as razões molares de ZnTe avaliadas os autores verificaram a obtenção em uma única fase cristalina (θ) que atende a estrutura wurtizita do CdTe e do ZnTe. Sendo assim um comportamento essencial para os semicondutores, pois eles permitem que sejam realizadas variações em suas proporções molares, gerando portadores de carga que podem alterar suas propriedades.

3.4.5 Métodos de síntese

Métodos tradicionais incluem hidrotermal, sol-gel, sonoquímica, coprecipitação, ablação a laser e assistida por microondas (Figura 6). Cada uma dessas técnicas possui características singulares. Entre elas, as estratégias top-down incluem a síntese sonoquímica e ablação a laser, enquanto as rotas bottom-up

englobam os métodos hidrotermal, sol-gel e assistido por microondas. (KUMAR et al., 2025)

Figura 6 – Métodos tradicionais para produção dos pontos quânticos.



Fonte: KUMAR et al., 2025, adaptado.

A vertente top-down é baseada na quebra de um material maior até chegar em estruturas menores, nanométricas, utilizando-se de métodos físicos, como exemplo tem-se a esfoliação do grafite até se tornar grafeno. Já no bottom-up as partículas vão crescendo até as dimensões nanométricas, podendo haver um maior controle no tamanho e qualidades dos nanocristais, como por exemplo na formação de pontos quânticos. (SATTLER, 2010)

E para formar estes pontos quânticos, os processos eletroquímicos que também estão dentro da vertente bottom-up têm sido bastante utilizados para sintetizar os nanocristais. (PASSOS, 2020)

Segundo a metodologia aplicada de PASSOS et al. (2016), o pó do calcogeneto é preparado, adsorvido e prensado em eletrodo de grafite em pó que

sofre um processo de redução e migram para reagir com a solução presente no compartimento central.

Na eletrossíntese é aplicada uma corrente elétrica para promover as reações redox. O valor do potencial elétrico e range de corrente terão influência na cinética de oxidação ou redução, e consequentemente na evolução de espécies químicas utilizadas no crescimento das nanopartículas. A eletrossíntese é vantajosa por possuir baixo impacto ambiental, controle de parâmetros do material como concentração e tempo, ótima reprodutibilidade, deposição direta sobre superfícies, etc. (CHEN, 2024)

4 METODOLOGIA

Foram escolhidos para sintetizar os pontos quânticos do sistema modelo de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ para se avaliar as melhores condições em relação as quantidades de Cádmio e Zinco adicionadas em diferentes tempos de observação e utilizá-las posteriormente na degradação do corante azul de metileno. Tendo como segunda etapa a mútua sensibilização do MoO_3 com o $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ a fim de potencializar o efeito cascata para transferência de energia.

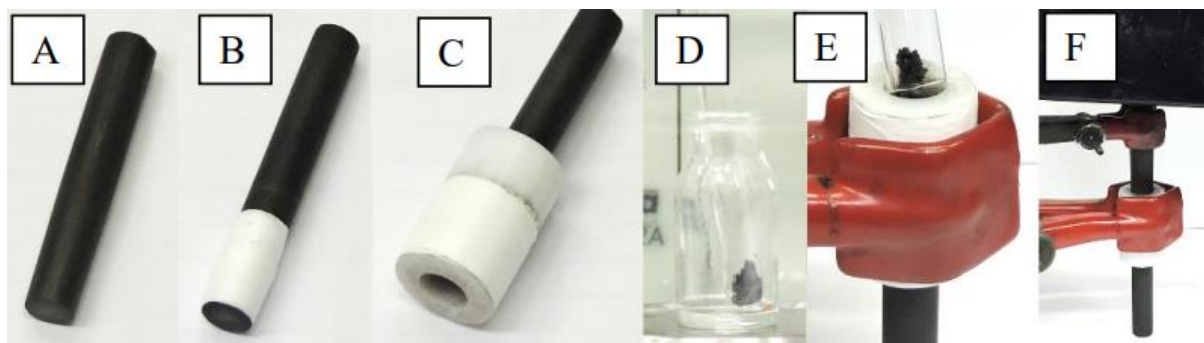
Para todos os procedimentos foram utilizados solventes puros. Água ultrapura deionizada (18,0 M Ω cm) filtrada no equipamento da Barnstead Thermolyne, modelo D7031. Perclorato de sódio (NaClO_4 , $\geq 98\%$), grafite em pó (tamanho da partícula $< 20\ \mu\text{m}$), enxofre em pó (S^0 , 99,9%, 100 mesh), telúrio em pó (Te^0 , 99,8%, 200 mesh) e ácido 3-mercaptopropiônico 31 (AMP, $\geq 99,8\%$) obtidos pela Sigma Aldrich. Hidróxido de sódio ($\text{NaOH} > 98\%$) obtido pela Vetec. Álcool metílico, acetona e etanol foram na Dinâmica, Brasil.

4.1 Eletrossíntese

4.1.1 Pontos quânticos de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$

Foi utilizada a metodologia one-pot reportada pelo Grupo de Eletrossíntese-UFPE para a produção dos PQs da liga ternária de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. (FREITAS, 2018) (SOUZA, 2021) Consistindo numa célula eletroquímica de três compartimentos, onde o compartimento catódico (macroeletrodo de carbono) é baseado na mistura de 50 mg de grafite em pó e 6,5 mg de telúrio em pó (99.8%, 200 mesh). Sendo condicionados em um suporte de teflon e base de grafite, prensado com 30 N por 10 minutos. Todo o passo a passo consta na ilustração da figura 7.

Figura 7 – Montagem do compartimento catódico: (A) barra de grafite, (B) barra com fita Teflon®, (C) base (cavidade de Teflon®), (D) pesagem do calcogênio telúrio e grafite, (E) transferência, (F) prensagem.



Fonte: PASSOS, 2020.

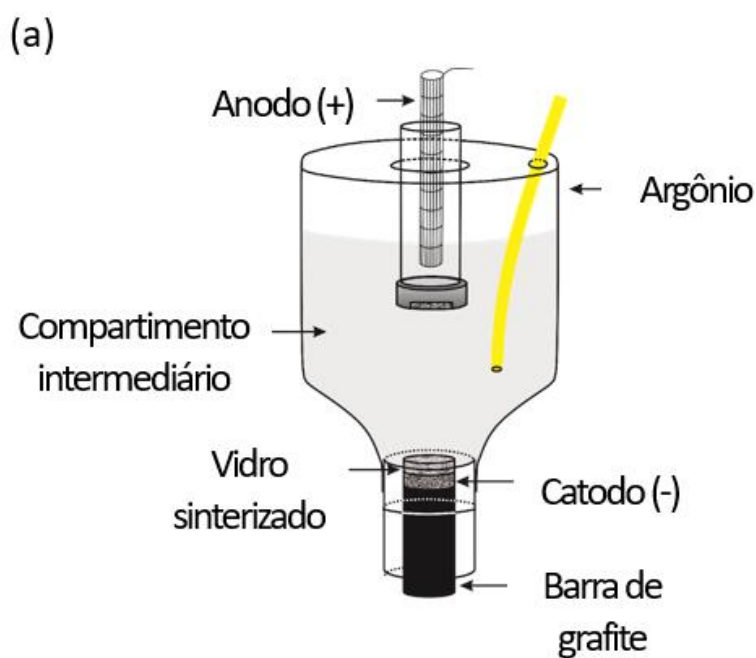
E então, são separados da solução utilizando-se um disco de vidro sinterizado, que é colocado em tratamento de ultrassom com uma solução eletrolítica de NaClO_4 $0,05 \text{ mol.L}^{-1}$ e água destilada. Possibilitando assim, a redução do telúrio e a liberação por difusão para o compartimento central, onde as partículas vão de regiões mais concentradas para as menos concentradas, e também impedindo que o grafite passe para o compartimento central.

No compartimento central, foi adicionada uma solução com os precursores dos íons de Cádmio(II) e Zinco(II). Para preparação da solução que fica situada no compartimento central, são utilizadas 22,7 mL de água destilada, 3,3 mL de perclorato de sódio, 60 μL de ácido mercaptopropiônico ($\geq 99\%$), e a quantidade de acetato de cádmio e zinco em diferentes proporções, atendendo as proporções molares de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x$, onde $x = 0; 0,2; 0,5; \text{ e } 0,8$. Foram utilizadas soluções estoque de acetato de cádmio e acetato de zinco de concentração $0,25 \text{ mol.L}^{-1}$. O pH de cada solução presente no compartimento central que após as adições fica bastante ácido, sendo então ajustado para 7, por meio de uma solução de $\text{NaOH } 1 \text{ mol.L}^{-1}$, contribuindo para a desprotonação dos grupos quelantes (SOUSA, 2021), que ao possuírem pares de elétrons livres ligam-se mais fortemente aos metais. Garantindo assim a eficiência do processo de redução e difusão que ocorre no compartimento catódico. As amostras foram nomeadas como CZ0, CZ0.2, CZ0.5, CZ0.8.

Para fechar o ciclo eletroquímico, o anodo de aço inox foi imerso em solução de $\text{NaOH } 1 \text{ mol.L}^{-1}$ e separado do compartimento central da célula por meio de uma membrana semipermeável de nafion®. A reação foi conduzida sob agitação e desoxigenação com gás argônio. O esquema dessas etapas é mostrado na figura 8.

As reações foram realizadas no potenciostato Autolab Metrohm 302N, com o software NOVA 2.1.6, sendo conduzida a eletrossíntese em procedimento cronopotenciométrico com corrente de -30 mA por 288 segundos.

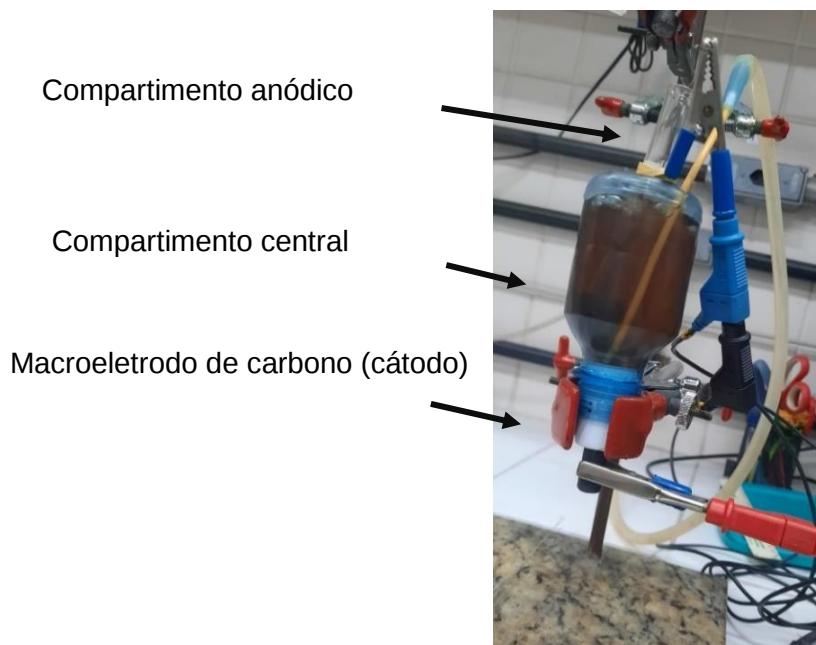
Figura 8 – Célula de cavidade utilizada no processo de síntese



Fonte: SOUSA, 2021.

Na figura 9 é apresentado a descrição de onde ficam estes compartimentos citados e como se mostra na prática após a síntese ser realizada.

Figura 9 – Montagem da aparelhagem para a realização da eletrossíntese síntese de PQs.



Fonte: A AUTORA, 2025.

Na célula eletroquímica de cavidade são formadas as nanopartículas, após o reajuste de pH para 7 com a solução de solução de NaOH 1 mol.L⁻¹, as soluções são transportadas para um balão volumétrico de 100, 150 mL e aquecidas a banho maria a 100 °C sob refluxo, presas em um suporte universal.

O tempo de aquecimento é de 12 horas, e a cada meia hora são retiradas alíquotas de 1 mL até chegar em 4 horas, passando das 4 horas são retiradas de 1 em 1 hora. Permitindo acompanhar a evolução do band-gap óptico com o crescimento da partícula e estimar o posicionamento relativo de bandas por meio da eletronegatividade absoluta de Mulliken.

Os espectros de absorção dos coloides foram registrados no espectrômetro de absorção na região do ultravioleta-visível Agilent 8453, utilizando uma cubeta de quartzo de duas faces polidas. Os espectros de absorção foram registrados entre 200 e 1.100 nm. Os espectros de luminescência das mesmas soluções também foram registrados na região entre 400 e 1.100 nm em um espectrofluorímetro Fluorolog3 Horiba Jobin Yvon equipado com um fotomultiplicador Hamamatsu R928P e uma lâmpada 150W XeHg.

O fluxograma na figura 10 abaixo descreve de forma simplificada cada etapa da síntese, desde a preparação da solução até a etapa de luminescência durante aquecimento.

Figura 10 - Fluxograma do processo de eletrossíntese.



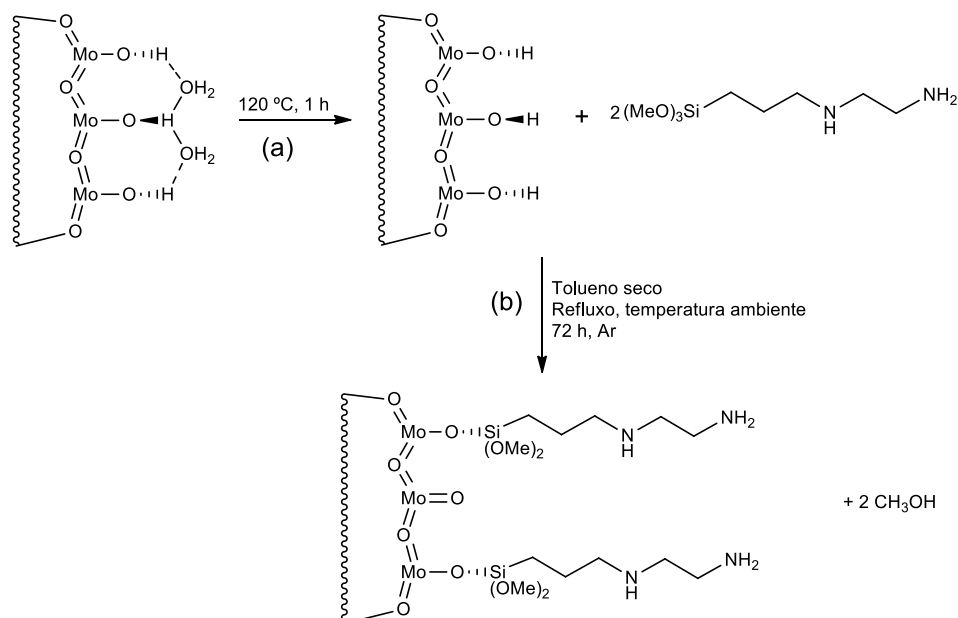
Fonte: A AUTORA, 2025.

4.2 Modificação do molibdênio

O trióxido de molibdênio fornecido gentilmente pela cooperação com o Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE). A modificação da superfície do MoO_3 segue algumas etapas. A primeira delas é a ativação em forno horizontal, para retirar a umidade da superfície do molibdênio, a $100\text{ }^\circ\text{C}$ por 1 hora. Depois de retirado do forno horizontal, o pó branco de MoO_3 foi colocado em um balão de fundo redondo contendo 5 mL de tolueno e 1 mL do agente sililante N-β-aminoetil-γ-amino-propil-trimetóxisilano (AEATPS), seguido de agitação por 72 horas, sob argônio, em condições controladas de temperatura e pressão, como ilustrado na figura 11.

Em seguida, o sólido foi filtrado e lavado consecutivamente com solventes como o THF, diclorometano, metanol e hexano para que o agente sililante que não foi imobilizado fosse removido. Então, o material foi colocado novamente no forno horizontal, mantido durante 5 horas a $100\text{ }^\circ\text{C}$ para retirar qualquer umidade que ainda estiver presente.

Figura 11 – Modificação do molibdênio com adição do agente sililante AEATPS.



Fonte: COSTA, 2023.

4.3 Ancoragem dos pontos quânticos

Foram pesados 0,1 g do trióxido de molibdênio modificado com o agente sililante EATPS três vezes, e cada um foi colocado em um balão volumétrico de 25 mL. Posteriormente, foram acrescidos em cada um 5 mL da solução de CdZnTe durante os tempos de 1h, 4h e 8h, respectivamente, segundo a figura 12 abaixo, para que fosse realizada a ancoragem dos PQs. Todas essas soluções foram agitadas sob refluxo por 30 minutos. Após este tempo, foi formado um precipitado no fundo do recipiente e o líquido sobrenadante foi retirado com o auxílio de uma pipeta. O precipitado foi lavado 3 vezes com acetona e com água e centrifugado para obtenção uma maior separação entre o líquido e o sólido.

Figura 12 – Determinação das condições para a sensibilização do MoO_3 .



Fonte: A AUTORA, 2025.

4.4 Caracterização

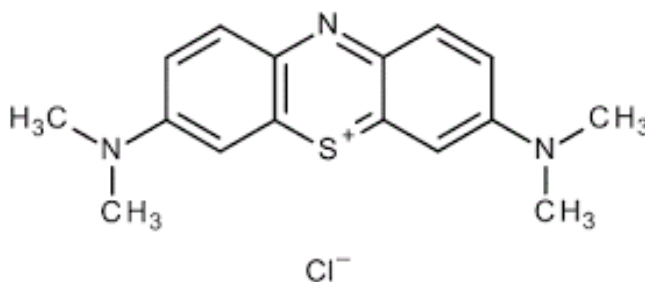
Os materiais em forma de pó formados depois da ancoragem dos PQs no molibdênio modificado, foram caracterizados estrutural e morfologicamente pela microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um microscópio Mira3 Tescan (locado no PPG em Ciência de Materiais da UFPE) sob potencial de 30 keV, e então foram obtidos posteriormente espectros de energia dispersiva de raios-X (EDX), que permitem identificar os elementos químicos presentes nas amostras analisadas. Além de serem observados as suas propriedades espectroscópicas de emissão e de absorção, utilizando um espectrofotômetro Agilent 8453 UV-Vis-NIR para absorção com lâmpada de tungstênio e deutério e comprimentos de onda entre 190 e 1100 nm, com resolução de 1 nm. E para emissão um espectrofluorímetro Fluorolog3

Horiba Jobin Yvon equipado com um fotomultiplicador Hamamatsu R928P e uma lâmpada 150W XeHg.

4.5 Ensaios de atividade fotocatalítica do corante azul de metileno

Antes de serem realizados os ensaios de descoloração, uma solução de azul de metileno 10 mg/L foi preparada para que pudesse ser utilizada. Como consta na figura 13.

Figura 13 - Solução de azul de metileno 10 mg/L e sua estrutura molecular.



Fonte: A AUTORA, 2025.

Foram pesados 8 mg dos fotocatalisadores e colocados no reator com 30 mL de solução aquosa do azul de metileno de concentração 10 mg/L, sob constante agitação magnética por meio de uma barra cilíndrica magnética e um agitador magnético. Os materiais passaram pela etapa de adsorção sem irradiação por 30 minutos, é nesta etapa que há a aproximação da molécula do corante azul de metileno ao sítio ativo fotocatalítico, que quando posteriormente há a incidência da luz é onde ocorrem as reações redox geradas pelos radicais livres (CHENAB, et al, 2020). Após este tempo, foi realizada a irradiação da solução com uma lâmpada de comprimento de onda de 365 nm e potência de 6 W. A cada 30 minutos foram retiradas alíquotas de cada uma das soluções, e centrifugadas permitindo que assim o fotocatalisador fosse recuperado. Este processo durou mais 3 horas, onde após a centrifugação foram realizadas medidas de absorção no UV-Vis com o sobrenadante, e então foram devolvidos ao reator.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização óptica do Telureto de Cádmio e Zinco

Adicionar zinco a estrutura CdTe permite a melhoria de propriedades ópticas e eletrônicas, apresentando um gap de energia maior, em relação ao CdTe, puro. Ao mudar a razão molar de zinco (Zn^{2+}) na liga semicondutora pode-se modular a janela óptica, chegando aos comprimentos de onda de absorção e de emissão específicas que se deseja. Além de melhorar a qualidade cristalina do material, reduzindo os defeitos, fazendo com que a probabilidade dos elétrons se recombinarem seja maior, aumentando assim o rendimento quântico.

Então como melhora na qualidade que a energia elétrica será convertida em luz, haverá a emissão de um brilho maior tornando-o assim bom para aplicações em fotocatalise. E nas propriedades eletrônicas o zinco faz com que os portadores de carga tenham maior mobilidade e melhora a estabilidade térmica do semicondutor.

Após os procedimentos de síntese dos PQs descritos no procedimento experimental, foi realizado tratamento térmico para o crescimento das nanopartículas. Durante o aquecimento das soluções sintetizadas a 100 °C em um balão volumétrico, foi realizado o acompanhamento de todas as proporções das ligas de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ através dos espectros UV-Vis. Para isso a amostra a ser analisada foi preparada e submetida ao feixe de luz do espectrofotômetro, que mede a quantidade de luz que é absorvida em cada comprimento de onda.

Da mesma forma foi realizado o acompanhamento através dos espectros de luminescência durante o decorrer do tempo de aquecimento, para acompanhamento do crescimento das nanopartículas. A figura 14 mostra a evolução do aspecto das nanopartículas com o tempo de aquecimento. O acompanhamento de bancada foi realizado com um laser, durante a primeira 1 hora de aquecimento as amostras luminescem na região do verde, e progressivamente vão deslocando para o amarelo, depois o laranja e por fim o vermelho, após completar 12 horas.

Quando há essa mudança de coloração indica que o tamanho do ponto quântico está sendo alterado, como foi do verde para o vermelho indica que houve um crescimento. E como o crescimento é inversamente proporcional a energia, a energia ao decorrer do tempo está diminuindo.

Figura 14 – Diferença de coloração ao decorrer do tempo na liga $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0,8$).

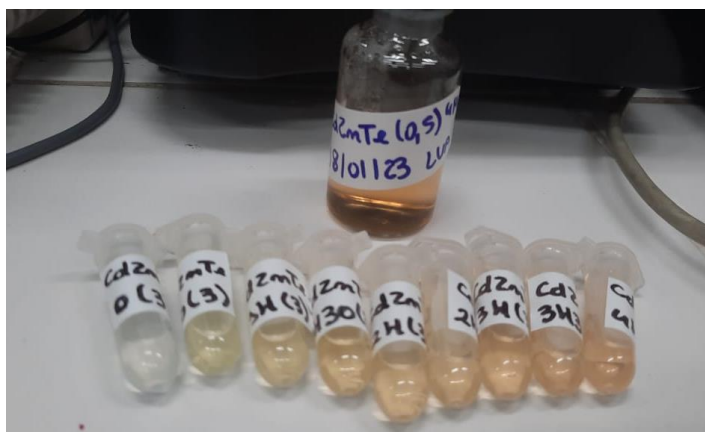
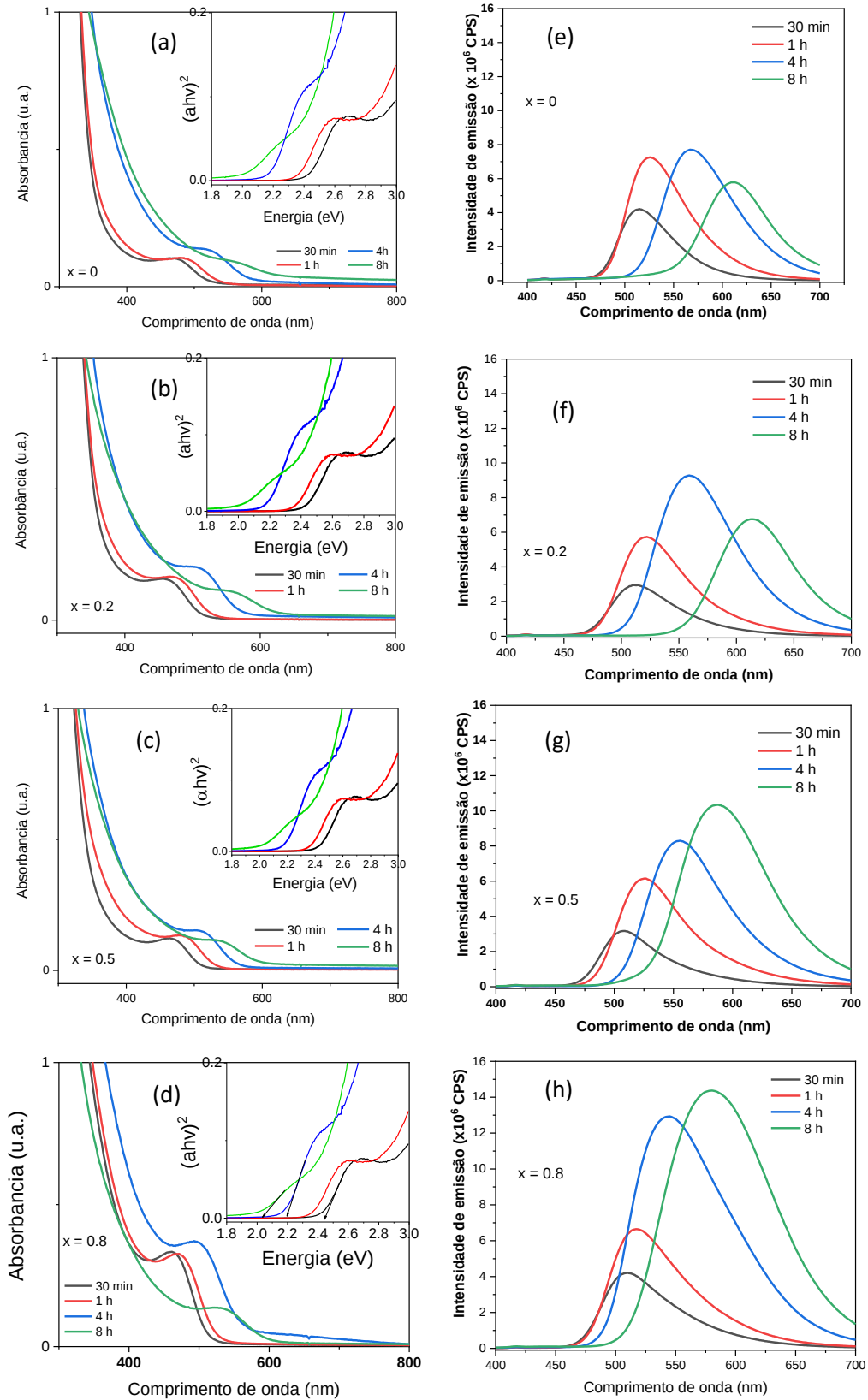


Figura 15 - Espectros de absorção UV-vis com curvas de Tauc e espectros de emissão das amostras de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ para $x = 0$ (a) e (e), respectivamente, $x = 0,2$ (b) e (f), respectivamente, $x = 0,5$ (c) e (g), respectivamente, e $x = 0,8$ (d) e (h), respectivamente.



Fonte: A AUTORA, 2025.

A partir da extrapolação linear das curvas de Tauc (em detalhe nos espectros Fig. 15a, 15b, 15c, e 15d) foi possível determinar os valores dos bandgaps ópticos. Os resultados são apresentados na Tabela 1. Os band-gaps ópticos não apresentaram grande modulação com a modificação da composição química (aumento do teor de zinco na blenda). Esta observação pode indicar diferentes processos que governam a fotoluminescência do sistema avaliado, não implicando diretamente na mudança dos valores de bandgaps, mas que podem modificar os mecanismos de recombinação de carga, via estados doadores e aceptadores de carga (DAP) que podem ser responsáveis pelo aumento da intensidade (SOUSA, 2021). Para investigar completamente o tema, espectroscopias resolvidas no tempo permitirão descrever fielmente os processos de recombinação de carga por meio de ajustes tri-exponenciais.

Tabela 1 – Avanço dos band-gaps ópticos com o tempo de aquecimento das soluções de PQs de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$.

$\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$	Tempos de aquecimento			
	30 min	1 h	4 h	8 h
X = 0	2,43 eV	2,37 eV	2,20 eV	2,02 eV
X = 0.2	2.43 eV	2.35 eV	2.22 eV	2.03 eV
X = 0.5	2.44 eV	2.39 eV	2.20 eV	2.03 eV
X = 0.8	2.45 eV	2.40 eV	2.21 eV	2.04 eV

Fonte: A AUTORA, 2025.

O efeito da concentração do Zn^{2+} nas ligas ternárias apresentou uma tendência de crescimento da intensidade de emissão na série avaliada. As Figuras 15e, 15f, 15g, e 15h apresentam o progressivo aumento da intensidade de emissão, evidenciando que o zinco melhora a dinâmica de transferência de carga. Verifica-se também que os comprimentos de onda de emissão máximos sofrem um deslocamento sutil hipsocrômico com o aumento da concentração de zinco e aumento da intensidade relativa, Tabela 2.

Tabela 2 – Avanço dos comprimentos de onda de emissão com o tempo de aquecimento

Cd _{1-x} Zn _x Te	Tempos de aquecimento			
	30 min	1 h	4 h	8 h
X = 0	515 nm	525 nm	567 nm	612 nm
X = 0.2	511 nm	521 nm	559 nm	614 nm
X = 0.5	507 nm	524 nm	554 nm	586 nm
X = 0.8	508 nm	517 nm	543 nm	579 nm

Fonte: A AUTORA, 2025.

Em função do aumento do teor de Zn²⁺ desde o CdTe puro até a liga com 80% de Zn²⁺ verificou-se os deslocamentos hipsocrômicos e que conduziu a diminuições de 7 nm após 30 min de aquecimento, 8 nm após 1 h de aquecimento, 24 nm após 4 h de aquecimento e 33 nm após 8 h de aquecimento. Estes dados indicam que a apesar de não mudar o bandgap óptico do material base, a adição do Zn²⁺ modifica o regime de crescimento das nanopartículas, tendo reflexos na intensidade de fotoluminescência. Onde medidas de rendimento quântico poderão auxiliar na quantificação do incremento de fotoluminescência.

Apesar de não serem verificados os deslocamentos dos band-gaps ópticos (Tabela 1), com a modificação da composição química há o deslocamento dos posicionamentos relativos de bandas por conta dos orbitais atômicos que fazem parte dos orbitais moleculares e estrutura de bandas, por discretização de estados.

O impacto do aumento da intensidade de emissão está na dinâmica de recombinação de cargas, assim a fotocatalise ganha especial significado na transferência de cargas. A figura 16 mostra o posicionamento relativo de bandas para as amostras de x=0, onde evidencia-se que, termodinamicamente, o posicionamento relativo dos potenciais das bandas de valência e condução são fundamentais para formação dos radicais de interesse. O maior limitante é o posicionamento relativo da banda de valência, onde maiores diferença entre banda de valência e linha de redução H₂O|OH[•] conduzem, termodinamicamente a maior produção de radicais hidroxila. O posicionamento de bandas foi calculado pela eletronegatividade absoluta de Mulliken (X). O método é baseado na média geométrica da eletronegatividade absoluta dos átomos constituintes, onde obtém-se

o valor pela ponderação entre a primeira energia de ionização (EI) e a afinidade eletrônica (AE) (X_A (eV) = $(E_{IE} + E_{AE})/2$) (GALAVOTTI et al., 2024).

A eletronegatividade absoluta de Mulliken pode ser calculada pela equação (1), sendo apresentada para o caso do $Cd_{1-x}Zn_xTe$:

$$X = [X_{Cd}^{1-x} \cdot X_{Zn}^x \cdot X_{Te}^1]^{1/(1-x)+x+1}$$

A equação será ajustada pelo número de unidades de cada átomo presente e pelo balanço entre energia de ionização e afinidade eletrônica de cada átomo constituinte. No caso do $Cd_{1-x}Zn_xTe$, existem 2 posições atômicas, dessa forma, o ajuste da potência fica em $\frac{1}{2}$.

A energia das bordas das bandas eletrônicas do semiconductor podem ser calculadas pelas equações a seguir:

$$E_{VB} = X - E^e - 0.5E_g$$

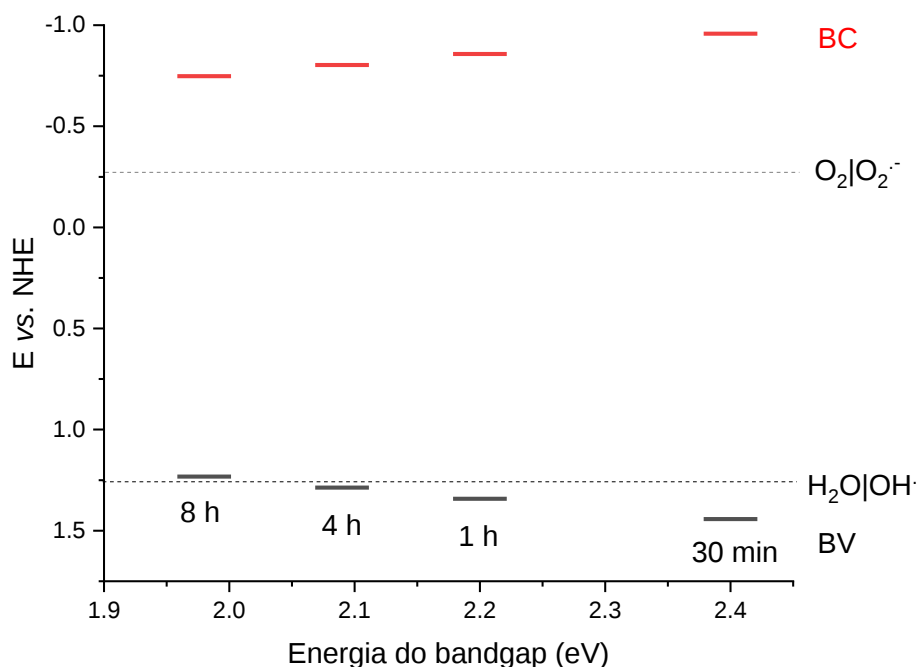
$$E_0 = -(X - E_{CB})$$

$$E_h = |E_0 - E_{VB}|$$

$$E_{CB} = E_{VB} - E_g$$

Onde E^e é a energia livre dos elétrons na escala do hidrogênio (ca. 4.5 eV). E_{VB} e E_{CB} são os potenciais das bandas de valência (VB) e de condução (CB), e E_g é o band gap do semiconductor. Usualmente utilizou-se o bandgap óptico obtido pela extrapolação das curvas de Tauc. Como referência para o posicionamento das bandas utiliza-se o potencial do vácuo E_0 e E_h a diferença de energia entre a banda de valência e o potencial do vácuo. Para as ligas de $Cd_{1-x}Zn_xTe$ avaliadas os posicionamentos de banda calculados são apresentados na figura 16.

Figura 16 – Posicionamento relativo de bandas dos pontos quânticos de CdTe-AMP em pH 13.



Fonte: A AUTORA, 2025.

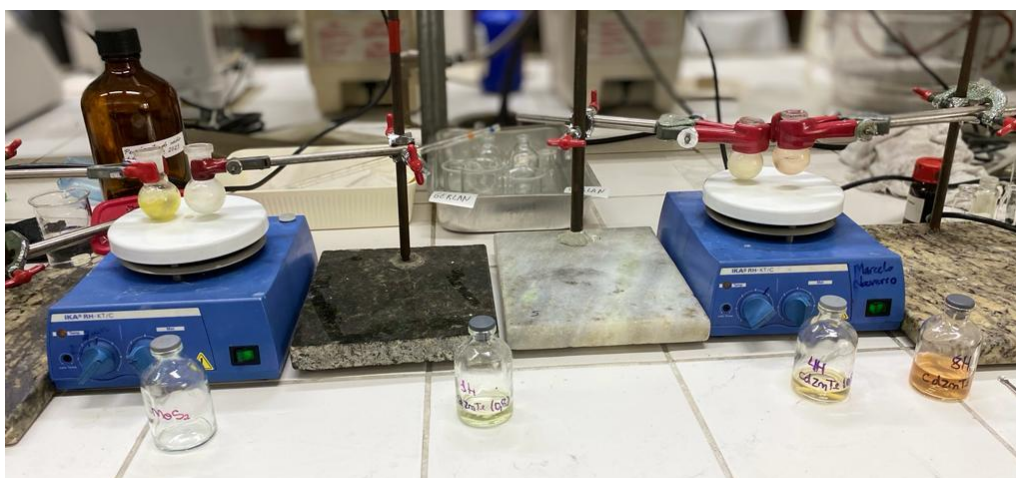
Verificou-se que o aumento do tempo de aquecimento nas ligas diminui progressivamente o valor do E_g e associado a isso, ocorre a mudança do posicionamento relativo de bandas. As bandas de valência tornam-se cada vez mais negativas, onde após 8 h de aquecimento seu valor é mais negativo que o valor da linha de redução do $\cdot\text{OH}$. As bandas de condução tiveram seus valores aproximados a linha de redução do oxigênio ao superóxido. Este entendimento é importante para compreender os possíveis caminhos de transferência de carga entre os PQs e os corantes orgânicos e espécies reativas de oxigênio.

Essa diminuição de potencial faz com que termodinamicamente, a transferência de carga da banda de condução para o oxigênio, seja dificultada. Dessa forma, a formação de espécies reduzidas como o superóxido tem sua concentração diminuída. Com as bandas de valência evidencia-se a tendência a oxidar as nanopartículas para tempos de aquecimento de 8h. Isso se deve a tendência do semiconductor possuir um potencial de banda de valência menor que a linha de redução do $\cdot\text{OH}$. Dessa forma, o potencial de célula evidencia o processo espontâneo de oxidação dos pontos quânticos.

5.2 Ancoragem dos pontos quânticos dos sistemas de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ na superfície do MoO_3

Os PQs do sistema de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0,8$) foram ancorados por adsorção na superfície do MoO_3 por 30 minutos, como observado na figura 17, visando sua estabilização. Eles foram escolhidos por apresentarem uma maior intensidade de emissão, convertendo a energia absorvida em luz de forma mais eficiente.

Figura 17 – Ancoragem dos PQs de CdZnTe ($x = 0,8$) nos tempos de 1h, 4h e 8h.



Fonte: A AUTORA, 2025.

Para esta etapa foram misturadas o trióxido de molibdênio modificado com AEPTS com as soluções que apresentavam a maior quantidade de zinco (0,8) nos tempos de 1, 4 e 8 horas e ficavam agitando sob refluxo.

Posteriormente, foi observado que os precipitados das soluções de CdZnTe ($x=0,8$) ancorados na superfície do MoO_3 não se dispersavam na água que estava presente no PQ, ficando grudado no vidro do balão de fundo redondo, mesmo após as lavagens com os solventes: acetona e água. Após raspagem das paredes do balão, foi possível isolar o material para que a próxima etapa pudesse ser realizada, demonstrando assim ser bastante hidrofóbico. Todos os nanocompósitos isolados continuaram apresentando propriedades luminescentes após o processo de ancoragem, demonstrando assim uma boa estabilidade.

5.3 Caracterização morfológica do compósito $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}/\text{MoO}_3$

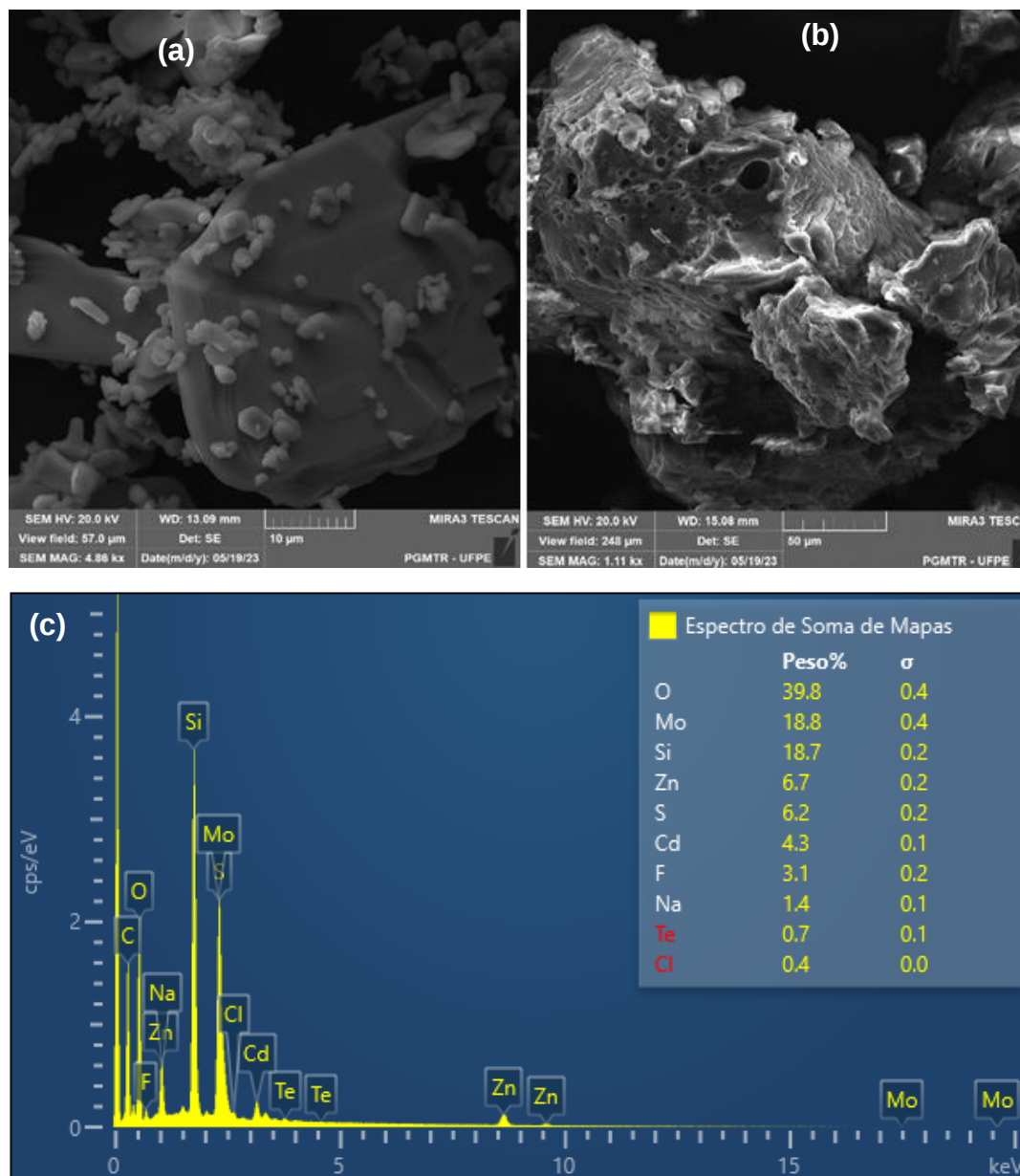
A microscopia eletrônica de varredura permite que uma amostra seja ampliada de milhares a milhões de vezes para ser analisada, revelando detalhes que não podem ser inspecionados em técnicas como a microscopia óptica. Nesta técnica um feixe de elétrons é direcionado para a superfície da amostra analisada, gerando sinais que são detectados e transformados em imagem com alta resolução, que fornecem informações sobre a morfologia e composição química.

Ao utilizar o microscópio eletrônico de varredura (Tescan Mira3) do Programa de Pós-graduação de Ciência dos Materiais da UFPE foram obtidas as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde se pode observar na figura 18 a modificação de superfície do óxido de molibdênio comparado com o MoO_3 -APTS- CdZnTe em escala microscópica.

A Figura 18 mostra a modificação do óxido de molibdênio a partir da ancoragem com os PQs do CdZnTe , a MEV também mostrou que as nanopartículas ficaram aglomeradas quando comparadas com as partículas de MoO_3 antes da modificação. As partículas do MoO_3 (Fig. 18a) apresentam formas bem definidas que demonstram morfologia bem definida, o que é importante para aplicações ópticas, colaborando para um transporte eficiente de cargas e uma boa adsorção de moléculas. Apresentando estrutura lamelar, o que caracteriza o MoO_3 em sua fase ortorrômbica, que se acumulam ao longo do eixo, formando menores partículas prismáticas. Já na imagem da direita (Fig. 18b) o CdZnTe provoca na superfície do MoO_3 uma alta rugosidade o que aumenta a sua área superficial, possuindo assim uma maior capacidade adsorviva de espécies, de interagir com a luz presente nos processos de fotocatalise. Porém a estrutura fraturada reduz a mobilidade dos elétrons, o que pode piorar o seu desempenho.

As imagens de microscopia foram obtidas com detector de elétrons secundários que permitem visualizar modificações nas amostras pelo contraste de imagem gerado pela modificação do número atômico dos constituintes da amostra. É possível verificar a superfície do MoO_3 com lamelas e pequenas partículas da ordem de $5\ \mu\text{m}$ (Fig. 18a). Com a modificação de superfície com o agente sililante e ancoragem dos pontos quânticos verificou-se o completo recobrimento da superfície do trióxido de molibdênio (Fig. 18b).

Figura 18 - (a) Imagem de MEV do MoO_3 , (b) Imagem de MEV do MoO_3 -APTS- $\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{Te}$ e (c) espectro de EDX.



Fonte: A AUTORA, 2025.

Foram obtidos também os espectros de energia dispersiva de raios-X (EDX), onde os elementos químicos presentes nas superfícies das amostras foram analisados semi-quantitativamente. O espectro evidenciou a presença dos elementos dos PQs ancorados na superfície do MoO_3 . Verificou-se as linhas dos elementos químicos formadores do MoO_3 : linhas $K\alpha$ Mo 17.479 keV, $K\beta$ 19,602 keV, e $L\alpha$ 2,293 keV, e do oxigênio a linha $K\alpha$ O 0.525 keV. As linhas espectrais associadas aos formadores dos pontos quânticos também foram visualizadas: linhas

do zinco: $K\alpha$ Zn 8,639 keV, $K\beta$ 9,572 keV e $L\alpha$ 1,012 keV, a linha do cádmio $L\alpha$ Cd 3,134 keV e as linhas do telúrio $L\alpha$ Te 3,769 keV e $L\beta$ 4,576 keV.

A figura 18c mostra o espectro de EDX, mostrando a presença dos elementos Cd, Zn e Te dos PQs ancorados e as suas respectivas porcentagens em peso, medindo as energias dos raios-X que são emitidos quando elétrons com alta energia colidem com a amostra. O C, O e Si representando o agente sililante presente na superfície do óxido de molibdênio, além do C e O representarem também o agente estabilizante. Os sinais espectroscópicos do Si ($K\alpha$ em 1,7 keV) e o sinal do enxofre S sobreposto a linha $L\alpha$ do Mo ($k\alpha$) ambos em 2,3 keV. O sinal do enxofre detectado é proveniente da estabilidade.

5.4 Fotodegradação do corante azul de metileno

Buscando avaliar a ação do material como fotocatalisador se fez experimentos de fotocatalise. A fotodegradação da solução do corante azul de metileno (10mg L^{-1} , pH 5) foi realizada sob irradiação com luz UV de 6W (lâmpada de baixa potência) e agitação constante. A agitação acabou sendo diferente em cada béquer devido as posições das amostras serem diferentes sob o agitador, como mostra na figura 20. A nível experimental, foram adicionados 8 mg de cada fotocatalisadores em diferentes béqueres, permitindo verificar o efeito da hierarquização/montagem das estruturas na performance fotocatalítica.

Sendo as amostras: MB + MoO_3 , MB + $\text{MoO}_3\text{-APTS}$, MB + $\text{MoO}_3\text{-APTS-CdZnTe}$ (laranja) e MB + MB. Também se utilizou o MB sem fotocatalisador (branco, a fim de verificar o efeito da irradiação UV sobre o corante na ausência do catalisador), como mostra na figura 19.

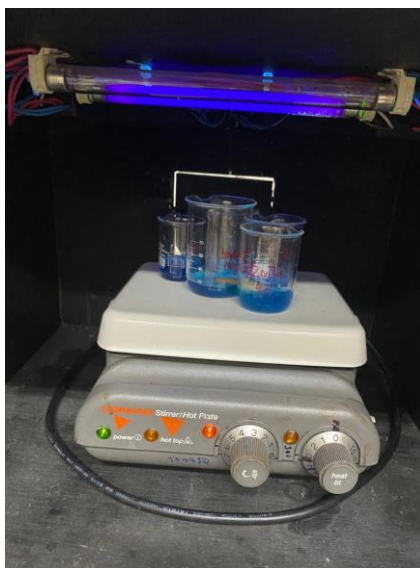
Figura 19 – Soluções com o indicador azul de metileno contendo $\text{MoO}_3\text{-APTS}$, $\text{MoO}_3\text{/CdZnTe}$ (4 horas de aquecimento), MoO_3 , padrão azul de metileno.



Fonte: A AUTORA, 2025.

A figura 20 mostra o comportamento do azul de metileno sob irradiação, após adsorção, não é verificada fotodegradação do corante, para a potência de lâmpada utilizada.

Figura 20 – Soluções de azul de metileno contendo MoO_3 -APTS, $\text{MoO}_3/\text{CdZnTe}$ (4 horas de aquecimento), MoO_3 , padrão azul de metileno no reator com uma lâmpada irradiando 365 nm e potência de 6 W.



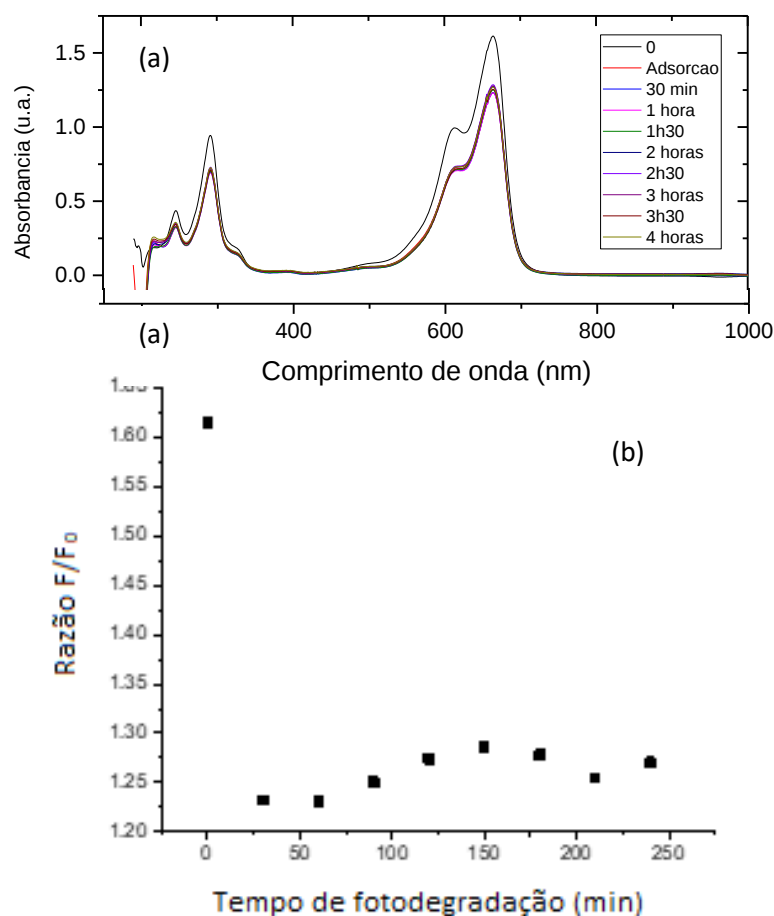
Fonte: A AUTORA, 2025.

Alíquotas foram coletadas a cada 30 minutos, sendo centrifugadas e realizada a leitura no espectrômetro de UV-vis. Após a leitura, o sobrenadante foi redisperso com o fotocatalisador e devolvido ao béquer para fotocatálise.

Nas próximas figuras são representados os espectros de absorção UV-Vis para a etapa de adsorção do corante nos fotocatalisadores e também da fotodegradação do corante azul de metileno registrados de alíquotas retiradas a cada 30 minutos até se completarem 4 horas, como também do tempo de adsorção 30 minutos antes. E ao lado de cada uma, estão as curvas de intensidade de absorção realizadas a partir de uma banda de absorção, que é quando a substância em um determinado comprimento de onda absorve uma maior quantidade de luz.

A figura 21 abaixo mostra a performance do corante azul de metileno puro para a etapa de adsorção.

Figura 21 – Espectros de absorção e curvas de intensidade de absorção do azul de metileno (a) razão de intensidade de absorção das condições iniciais e finais.

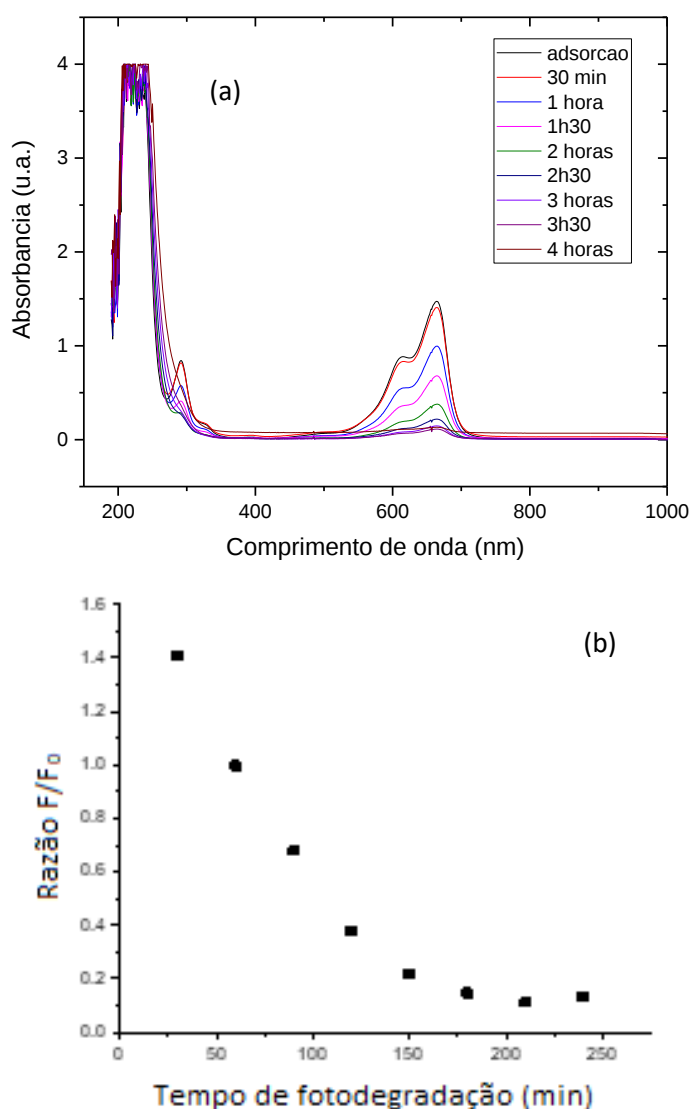


Fonte: A AUTORA, 2025.

Dessa forma, verifica-se que mesmo após 4 h de adsorção, não ocorreu maior adsorção de corante na superfície do material. Indicando que 30 minutos seria um tempo razoável para adsorção do corante na superfície do semicondutor e a partir deste ponto irradiar com radiação UV para promoção da descoloração/fotodegradação.

A figura 22 apresenta os espectros de absorção do azul de metileno na presença do MoO_3 . O experimento indicou que o MoO_3 tem alta capacidade adsortiva, adsorvendo 90% do corante inicial. O material foi disposto por 30 minutos sem irradiação e 3,5 h sob irradiação UV 365 nm (6W).

Figura 22 – Espectros de absorção e curvas de intensidade de absorção do (a)Azul de metileno + MoO₃ e (b) razão de concentração inicial e final do MB por absorbância.



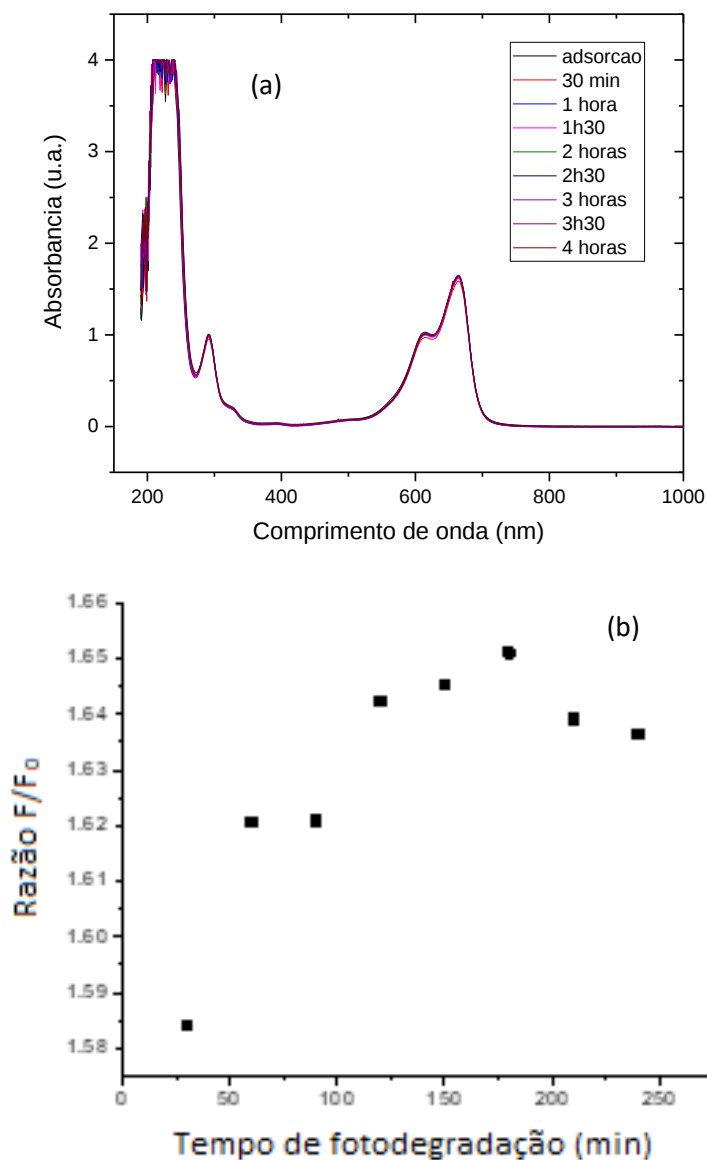
Fonte: A AUTORA, 2025.

O MoO₃ apresentou alta capacidade adsortiva e de decoloração do corante (Figura 22b). Onde a fotodegradação deve ser acompanhada posteriormente por meio de medidas de concentração de carbono total dissolvido (TOC), sendo uma medida direta que indica o grau de mineralização do corante obtido.

Seguindo a modificação de superfície do MoO₃, a amostra de azul de metileno na presença de MoO₃ modificado com o agente sililante (MoO₃-APTS) (Figura 23) mostrou que o agente sililante não melhora a capacidade adsortiva. O fenômeno é associado as interações físico-químicas presentes nos grupos químicos de superfície que não permitem a chegada das moléculas dos pigmentos orgânicos na

superfície do MoO_3 (Figura 23).

Figura 23 – Espectros de absorção e curvas de intensidade de absorção do (a)Azul de metileno + MoO_3 -APTS.



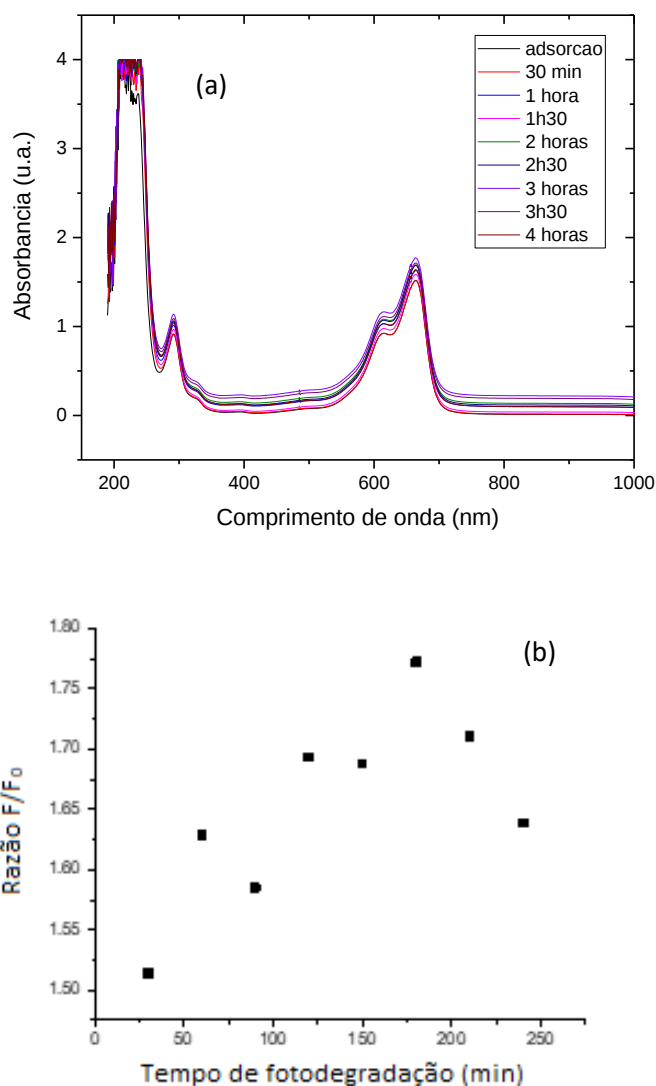
Fonte: A AUTORA, 2025.

Os espectros de absorção (Figura 23a) e as razões de intensidade de absorção no início e final do processo de fotocatalise (Figura 23b) permitem a rápida inspeção visual, verificando que o agente sililante não permite a transferência de carga ou adsorção na superfície do MoO_3 , diminuindo a eficiência do processo.

A performance do fotocatalisador $\text{MoO}_3\text{-APTS-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x=0,8$) para fotodegradação do azul de metileno é apresentada na Figura 24. Observa-se uma

linha de base muito alta, que indica turbidez do sistema, e que traz certa incerteza na quantificação da fotodegradação dos corantes. Entretanto, não se observa diminuições significativas de absorbância nas proximidades do comprimento de onda máximo do azul de metileno em aproximadamente 663 nm.

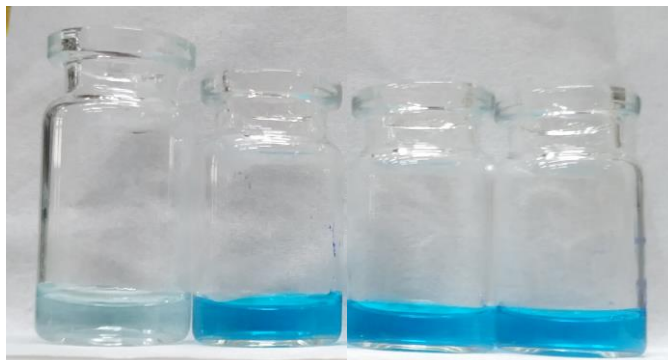
Figura 24 – Espectros de absorção e curvas de intensidade de absorção do Azul de metileno + MoO₃-APTS-CdZnTe.



Fonte: A AUTORA, 2023.

Visualmente estas tendências são apresentadas na Figura 25, por meio da comparação do aspecto visual das soluções dos corantes após os períodos de adsorção e fotocatalise.

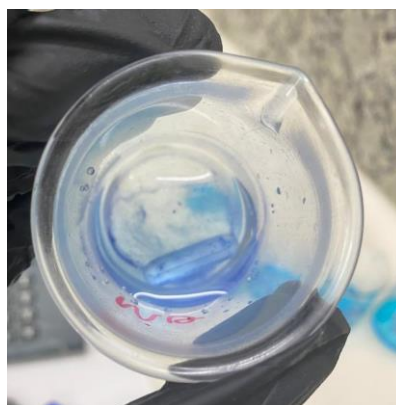
Figura 25 - Fotocatalisadores: MoO_3 , MoO_3 -APTS, MoO_3 -APTS-CdZnTe após o período de fotocatalise, e a solução estoque de MB.



Fonte: A AUTORA, 2025.

A Figura 26 mostra o MoO_3 após o período de 4 horas com a vista de cima, onde verifica-se o pó de cor azulada, associada ao procedimento de adsorção do corante na superfície e poros do MoO_3 . O óxido de molibdênio (MoO_3 , Figura 26) possui alta capacidade adsortiva do corante azul de metileno.

Figura 26 – MoO_3 após as 4 horas de fotocatalise.



Fonte: A AUTORA, 2025.

Investigações são necessárias para verificar todos os possíveis caminhos de fotocatalise do MB para o sistema $\text{MoO}_3/\text{CdZnTe}$, investigando o grau de modificação da superfície do MoO_3 com o agente sililante e a ancoragem dos pontos quânticos na superfície do agente sililante. O tamanho da cadeia de hidrocarbonetos do agente sililante também pode atuar com regra para hidrofbicidade do material e diminuir a performance em catálise heterogênea em sistemas aquosos.

6 CONCLUSÃO

A fotocatalise heterogênea vem se mostrando um método eficiente que, sozinho ou aliado a outros métodos convencionais, pode ajudar no tratamento dos efluentes industriais, que trazem tantos problemas ambientais quando não tratados de modo correto. E seu estudo é essencial para que possam haver aplicações e melhora do desempenho de estruturas fotocatalisadoras para a remoção de corantes nos efluentes.

A eletrossíntese da liga de $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ com o estabilizante ácido mercaptopropiônico, evidenciou a importância da concentração de Zn^{2+} na liga, para as propriedades fotoluminescentes. Com o aumento do zinco melhorou a dinâmica de transferência de carga, aumentando assim a intensidade de emissão. Além de que a substituição gradativa do cádmio pelo zinco, permitiu a obtenção de um nanomaterial com menor toxicidade associada.

A modificação de superfície e sensibilização do MoO_3 foi eficiente, possibilitando que ocorresse a ancoragem dos PQs na superfície, preservando a luminescência.

O MoO_3 mostrou uma alta capacidade adsorviva do corante azul de metileno, adsorvendo 90%, sendo a melhor alternativa dentro das condições estabelecidas para este projeto, permitindo que a solução que antes estava azul descolorisse tornando-se transparente. Fornecendo condições para que seja possível com mais análises verificar uma possível fotodegradação.

É necessário reestruturar a forma de interação entre os semicondutores para que a transferência de carga e ampliação da região de absorção da radiação solar sejam ampliadas. Alcançando assim melhores resultados.

7 PERSPECTIVAS

- Desenvolver um estudo sistemático da modificação de superfície do MoO_3 a fim de garantir a disponibilidade de grupos aminoorientados;
- Estudos por espectroscopias de infravermelho e Raman, para confirmar a modificação da superfície do MoO_3 ;
- Estudos de fotoluminescência como tempo de vida e rendimento quântico;
- Caracterizar os pontos quânticos de CdZnTe por técnicas estruturais, como difração de raios-X, e morfologicamente como microscopia eletrônica de transmissão;
- Estudar a cinética de deslocamento e fotodegradação dos corantes orgânicos sob irradiação solar simulada;
- Avaliar com TOC a possível fotodegradação dos corantes.

REFERÊNCIAS

ABIT - têxtil e confecção. Têxtil: alta na produção em 2024 animou empresários para 2025. Data de publicação: 18/02/2025. Disponível em: <http://abit.org.br/noticias/textil-alta-na-producao-em-2024-animou-empresarios-para-2025>. Acesso em: 28 ago. 2025.

BANAT, I. M. et al. Microbial Decolorization of Textile Dye-Containing Effluents: A Review. **Bioresour. Technol.**, 58, 217. 1996.

BENATTO, L., M. de Jesus Bassi, L. C. Wouk de Menezes, L. S. Roman and M. Koehler. Kinetic model for photoluminescence quenching by selective excitation of D/A blends: implications for charge separation in fullerene and non-fullerene organic solar cells. *J. Mater. Chem. C*, 2020,8, 8755-8769.

CHANG, J. Y.; SU, L. F.; LI, C. H.; CHANG, C. C.; LIN, J. M. Efficient “green” quantum dot-sensitized solar cells based on $\text{Cu}_2\text{S}-\text{CuInS}_2-\text{ZnSe}$ architecture. **Chemical Communications**, v. 48, p. 4848–4850, 2012.

CHEN, Season S.; GLEZAKOU, Vassiliki-Alexandra; HOLEWINSKI, Adam; LOPEZ-RUIZ, Juan; TESSONNIER, Jean-Philippe. Advances in electrosynthesis for a greener chemical industry. **Green Chemistry**, v. 26, n. 8, p. 4240-4241, 2024. DOI: 10.1039/D4GC90025A.

CHENAB, K. K.; SOHRABI, B.; ESRAFILI, M. pH-sensitive organic diimide materials-based superhydrophobic surface for oil-water separation applications. **Materials Research Express**, v. 6, n. 12, p. 125112, 2020. DOI: 10.1088/2053-1591/ab657b.

CONNOR, Nick. O que é CdTe e CdZnTe como semicondutor – Propriedades – Definição. **Dosimetria de Radiação**, 21 jul. 2020. Disponível em: <https://radiation-dosimetry.org/pt-br/o-que-e-cdte-e-cdzn-te-como-semicondutor-propriedades-definicao/>. Acesso em: 5 set. 2025.

COSTA, B. M. F. Fotocatalisadores heterogêneos baseados em pontos quânticos fluorescentes suportados em sílica modificada para a degradação de azul de metileno. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) — Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/53349/6/TCC%20Bianca%20Marques%20Figueiredo%20Costa.pdf>. Acesso em: 04 set. 2025.

COSTA, B. M. F.; FREITAS, D. V.; SOUSA, F. L. N.; SILVA, K. D.; DIAS, J. M. M.; ASSIS, A. M. L.; JESUS, A. C.; RIBEIRO, A. S.; NAVARRO, M. SATS@CdTe hierarchical structures emitting green to red colors developed for latent fingerprint applications. **Dyes and Pigments**, v. 180, p. 108483, 2020.

DIN, Muhammad Imran; KHALID, Rida; NAJEEB, Jawayria; HUSSAIN, Zaib. Fundamentals and Photocatalysis of Methylene blue dye using various nanocatalytic

assemblies – a Critical Review. **Journal of Cleaner Production**, v. 298, p. 126567, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126567.

FEYNMAN, Richard P. Nature uses only the longest threads to weave her patterns, so that each small piece of her fabric reveals the organization of the entire tapestry. **BrainyQuote**. Disponível em: https://www.brainyquote.com/quotes/richard_p_feynman_160463. Acesso em: 23 jan. 2025.

FRAGA, A. L. S. Nanoestruturas de Dissulfeto de Molibdênio: Síntese e Caracterização para produção de Hidrogênio. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

FREITAS, D. V.; Eletrossíntese, Caracterização e Aplicação de QDs do Tipo II-VI e V-VI. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

FUJITA, Renata Mayumi Lopes; JORENTE, Maria José. A Indústria Têxtil no Brasil: uma perspectiva histórica e cultural. **Revista ModaPalavra e-Periódico** vol.8, n.15, jan./ jul.2015.

GALAVOTTI, Joana Souza Oliveira; BIMA, Luís Felipe Bricks; CEBIM, Marco Aurélio. Modelos e eletronegatividade: uma proposta de sequência didática para o ensino de química. **Química Nova**, São Paulo, v. 47, n. 2, e-20230103, p. 1-8, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20230103>.

GOMES, Jaime I. N. Rocha. Química da cor e dos corantes. Braga, 2000. Disponível em: <https://www.academia.edu/11188605/Livrocorantes>. Acesso em: 06 set. 2025.

HERRMANN, Jean-Marie. Photocatalysis fundamentals revisited to avoid several misconceptions. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 99, n. 3, p.461-468, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.05.012>

HINES, M. A.; GUYOT-SIONNEST, P. Synthesis and characterization of strongly luminescing ZnS-capped CdSe nanocrystals. **The Journal of Physical Chemistry**, Washington, v. 100, n. 2, p. 468-471, 1996.

KIM, Sang-Hyuk; KIM, Jin-Young; KIM, Hyo-Jin; KIM, Woo-Sik; KIM, Jong-Nam. Key roles of solution pH and ligands in the synthesis of aqueous ZnTe nanoparticles. **Chemistry of Materials**, v. 22, n. 16, p. 4915-4920, 2010. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cm101844j>. Acesso em: 7 set. 2025.

KIRANKUMAR, V. S.; SUMATHI, S. A review on photodegradation of organic pollutants using spinel oxide. **Materials Today Chemistry**, v. 18, p. 100355, dez. 2020. DOI: 10.1016/j.mtchem.2020.100355. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100355>. Acesso em: 6 set. 2025.

KUMAR, Pawan; KUMAR, Ravinder; ILIEV, Iliya K.; BELOEV, Hristo I.; PRAVEENKUMAR, Seepana; NAGARAJU, Sunnam; BHATIA, Amit. Engineered Quantum Dot Solar Cells: From Fundamentals to Applications. **Plasmonics**, 2025.

DOI: 10.1007/s11468-025-02915-7. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/390237545_Engineered_Quantum_Dot_Solar_Cells_From_Fundamentals_to_Applications. Acesso em: 7 set. 2025.

LARSEN, Delmar. Band Theory of Semiconductors. **LibreTexts**. Disponível em: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_\(Materials_Science\)/Semiconductors/Band_Theory_of_Semiconductors](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Semiconductors/Band_Theory_of_Semiconductors). Acesso em: 7 set. 2025.

LIMA, H. S. As lavanderias de jeans de Toritama: Uma contribuição para a gestão das águas. Recife, UFPE, 2006 Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Gestão e Pública p/ o Desenvolvimento do Nordeste). Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/7762>. Acesso em: 20 fev. 2025.

LOVRIĆ, J; BAZZI, H. S; CUIE, Y; FORTIN, G. R. A; WINNIK, F, M. Differences in subcellular distribution and toxicity of green and red emitting CdTe quantum dots. **Journal of Molecular Medicine**, 83, 377-385, 2005.

MACEDO, Keyliane Rocha; LIMA, Cristian Kelly Moraes de; SILVA FILHO, Luiz Ferreira da. Métodos de tratamento de efluentes gerados pela indústria têxtil. **Tratamento de Água**, 3 jun. 2020. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/tratamento-efluentes-industria-textil/>. Acesso em: 4 set. 2025.

MASHINCHIAN, O.; JOHARI-AHAR, M; GHAEMI, B.; RASHIDI, M.-R.; BARAR, J; OMIDI, Y. Impacts of Quantum Dots in Molecular Detection and Bioimaging of Câncer. **BiolImpacts** 4(3):149-66, 2014.

MATOS, Charlene Regina Santos. Síntese e caracterização de nanopartículas de semicondutores metálicos do tipo II-VI. 2012. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2012.

MOHAMADPOUR, Farzaneh; AMANI, Ali Mohammad. Photocatalytic systems: reactions, mechanism, and applications. **RSC Advances**, v. 14, p. 20609–20645, 2024. DOI: 10.1039/D4RA03259D. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/ra/d4ra03259d>. Acesso em: 6 set. 2025.

MULTIÁGUA. O tratamento de efluentes na indústria têxtil. **MultiÁgua**, [S. l.], 2022. Disponível em: <https://multiagua.com.br/solucoes-industriais/tratamento-de-efluentes/o-tratamento-de-efluentes-na-industria-textil/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

NOHARA, Nicolý Milhardo Lourenço. Estudo da mistura e dispersão de TiO₂ e ZnO em matriz polimérica para aplicação em fotocatalise heterogênea solar de lixiviado de aterro sanitário. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://sites.usp.br/ppgeq/wp-content/uploads/sites/537/2023/08/Dissertacao-Final-Nicolý-Nohara.pdf>. Acesso em: 5 set. 2025.

NOSSOL, Arlene B. S.; ROSA, Suzamar M. C.; NOSSOL, Edson; ZARBIN, Aldo J. G.; PERALTA-ZAMORA, Patricio. Degradação fotocatalítica de corante utilizando-se nanocompósito tio₂/óxido de grafeno, **Quim. Nova**, Vol. 39, No. 6, 686-690, 2016, <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20160081>

NUNES, Giovanna Ribeiro. Geração e tratamento de efluentes da indústria têxtil, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

PASSOS, Sérgio Gonçalves Batista. Síntese eletroquímica e modificações de pontos quânticos de calcogenetos de zinco aquosos em célula de cavidade. 2020. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

PASSOS, Sérgio G.B.; FREITAS, Denilson V.; DIAS, Jéssica M.M.; NETO, Erico Teixeira; NAVARRO, Marcelo. One-pot electrochemical synthesis of CdTe quantum dots in cavity cell. **Electrochimica Acta**, v. 190, n. March, p. 689–694, fev. 2016. DOI 10.1016/j.electacta.2016.01.016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2016.01.016>.

QUEIROZ, Marluce T. A.; QUEIROZ, Carolina A.; ALVIM, Lucas B.; SABARÁ, Millor G.; LEÃO, Mônica M. D.; AMORIM, Camila C. Reestruturação na forma do tratamento de efluentes têxteis: uma proposta embasada em fundamentos teóricos. **Gest. Prod.** 26 (1), 2019, <https://doi.org/10.1590/0104-530X1149-19>

RABOUW, Freddy T.; DONEGÁ, Celso Mello. Excited-State Dynamics in Colloidal Semiconductor Nanocrystals. **Top Curr Chem (Z)** 374, 58 (2016). <https://doi.org/10.1007/s41061-016-0060-0>

RAJABI, H. R.; FARSI, M. Effect of transition metal ion doping on the photocatalytic activity of ZnS quantum dots: synthesis, characterization, and application for dye decolorization. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical**, v. 399, p. 53–61, 2015.

RAMOS, Natália S. M. Pontos quânticos de CdTe-CA sintetizados eletroquimicamente e via irradiação micro-ondas utilizados como sensores fluorescentes para determinação de resveratrol e glutamina. 2018. Tese (Doutorado em Química) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

RITTER, Magali Teresinha. Influência do pH no processo de eletrocoagulação aplicado a efluentes têxteis tratados biologicamente. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental) – Centro de Tecnologia. Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/176191>>. Acesso em: 04 set. 2025.

SAM. Telureto de cádmio (CdTe) (CAS No. 1306-25-8). Disponível em: https://www.samaterials.pt/tellurium/1267-cadmium-telluride-cdte.html?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 7 set. 2025.

SANTOS, F. L. Degradação do Corante Têxtil RB5 em Efluente Modelo via processo de fotocatalise heterogênea e foto-fenton visando o reuso de água. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SATTLE, Klaus D. Handbook of Nanophysics: Nanoparticles and Quantum Dots. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

SEBRAE. Estudo Econômico das Indústrias de Confecções de Toritama/PE. Recife, abril/2019. Disponível em: <https://sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/PE/Anexos/RELATORIOTORITAMA-FINAL.pdf>. Acesso em: 4 set. 2025.

SHAHMORADI, Behzad; NEGAHDARY, Mahin; MALEKI, Afshin. Hydrothermal synthesis of surface-modified, manganese-doped TiO₂ nanoparticles for photodegradation of methylene blue. **Environmental Engineering Science**, v. 29, n. 11, p. 1032–1037, 2012. DOI: 10.1089/ees.2011.0519.

SILVA, Anielle Christine Almeida. Pontos quânticos semicondutores sintetizados via soluções coloidais aquosas: estudos e aplicações nanobiotecnológicas. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

SILVA, É. F. M. da; XIMENES, É. R. B.; SALES, L. B. V. de; DANTAS, E. J. M.; OLIVEIRA, E. D. C.; SIMÕES, T. B.; RIBEIRO, A. T. S.; SANZ, O.; MACHADO, G.; ALMEIDA, L. C. Photocatalytic degradation of RB5 textile dye using immobilized TiO₂ on novel structured metal monoliths. **Catalysis Today**, v. 383, p. 173–182, 2022.

SILVA, Fernanda Oliveira; VIOL, Livia Cristina de Souza; FERREIRA, Diego Lourençoni; ALVES, José Luiz Aarestrup; SCHIAVON, Marco Antônio. O estado da arte da síntese de semicondutores nanocristalinos coloidais. **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 9, p. 1933-1939, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/7XHkmBxHQC3tKQnn67YfTgD/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 9 set. 2025.

SILVA, Joanna Cysneiros. Degradação de mistura de corantes têxteis empregando processos oxidativos avançados. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, 2018. Disponível em: repositório digital da UFPE. Acesso em: 04 set. 2025.

SINGH, A. K.; SHARMA, R. C. Phase equilibria calculation of Zn-Cd-Te system. *Calphad*, [S. l.], p. 161-172, 1992. DOI: 10.1016/0364-5916(92)90004-H.

SOUSA, F. L. N.; Eletrossíntese De Nanocristais De Calcogenetos (S, Se E Te) De Prata Índio: Caracterização E Aplicação. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2021.

Swart, Jacobus Willibrordus. Semicondutores: fundamentos, técnicas e aplicações. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008 (1.^a reimpressão 2013). ISBN 978-85-268-0818-8.

TAFAREL, Gabriel Paolo Gnoatto. Síntese e Caracterização de Catalisadores Óxidos Metálicos para Oxidação de Benzeno e Tolueno. 2018. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Departamento de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

ZANONI, M. V. B.; CARNEIRO, P. A. O descarte dos corantes têxteis. **Ciência Hoje**, v. 29, n. 174, p. 61-64, 2001.