

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

**VICTÓRIA MARIA DA RÉ SILVA
YASMIN SANCHES PETRECA**

**OBTENÇÃO DE COMPÓSITOS ZnO: VIDRO PARA APLICAÇÃO EM
FOTOCATÁLISE**

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

**VICTÓRIA MARIA DA RÉ SILVA
YASMIN SANCHES PETRECA**

**OBTENÇÃO DE COMPÓSITOS ZnO: VIDRO PARA APLICAÇÃO EM
FOTOCATÁLISE**

Trabalho de conclusão do Programa Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão (PIEPEX) apresentado como um dos requisitos para conclusão do curso de Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas - MG.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tania Regina Giraldi
Coorientadora: Dr^a Gislene Batista

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Silva, Victória Maria Da Ré.

Obtenção de compósitos ZnO: vidro para aplicação em fotocatalise /
Victória Maria Da Ré Silva, Yasmin Sanches Petreca. - Poços de Caldas, MG,
2025.

37 f. : il. -

Orientador(a): Tania Regina Girdi.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal de Alfenas,
Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Fotocatalise. 2. ZnO. 3. Degradação. 4. Reuso. I. Petreca, Yasmin
Sanches. II. Girdi, Tania Regina, orient. III. Título.

**VICTÓRIA MARIA DA RÉ SILVA
YASMIN SANCHES PETRECA**

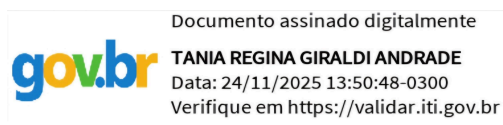
**OBTENÇÃO DE COMPÓSITOS ZnO: VIDRO PARA APLICAÇÃO EM
FOTOCATÁLISE**

Os membros da banca examinadora abaixo assina a aprovação o Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para a obtenção de Bacharel em Ciência e Tecnologia, pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovado em: 26/06/2025

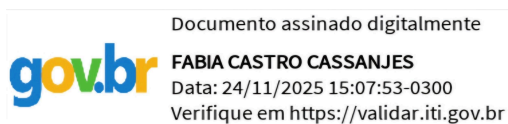
Profa. Dr^a. Tania Regina GiralDI (Presidente)

Universidade Federal de Alfenas



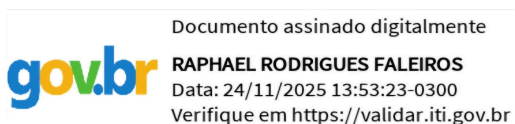
Profa. Dr^a. Fabia Castro Cassanjes

Universidade Federal de Alfenas



Me. Raphael Rodrigues Faleiros

Universidade Federal de Alfenas



AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, por nos conceder a vida, saúde e força para seguir em frente mesmo diante das dificuldades. Sua presença foi essencial para que percorrêssemos esse caminho com coragem e esperança.

Aos nossos familiares, que sempre estiveram ao nosso lado, oferecendo apoio incondicional, compreensão nos momentos difíceis e incentivo constante. Vocês são nossa base e nossa inspiração.

Aos nossos namorados, por toda paciência, carinho, incentivo e compreensão ao longo dessa jornada. Obrigado por estarem presentes mesmo nos momentos mais desafiadores, oferecendo apoio emocional e torcendo por cada conquista.

Agradecemos à professora doutora Tânia Regina Giraldi, orientadora desta pesquisa, por sua valiosa contribuição, apoio constante e disponibilidade em cada etapa do trabalho.

À nossa coorientadora, doutora Gislene Batista, por sua orientação cuidadosa, pelos conselhos valiosos e por nos guiar com profissionalismo, paciência e sensibilidade. Sua dedicação foi essencial para a realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL, pelo conhecimento compartilhado, pela estrutura oferecida e pelo acolhimento durante todos os anos de formação. Somos gratos por fazer parte dessa instituição.

Agradecemos, também, pelos investimentos realizados em pesquisa e pelos laboratórios da universidade, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. A infraestrutura disponível foi essencial para a execução de nossos experimentos.

Aos colegas e amigos que fizeram parte desta caminhada, pelo companheirismo, pelas trocas de experiências e por estarem presentes nos momentos bons e nos desafiadores. E a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, deixamos aqui o nosso mais sincero agradecimento.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver compósitos ZnO:vidro para uso em processos oxidativos avançados (POA), especialmente a fotocatalise voltada à degradação de corantes. Dois métodos diferentes de imobilização do ZnO em vidro, nomeados “Método do Amolecimento” e “Método do Recozimento”, foram realizados para analisar e comparar a eficiência fotocatalítica e a possibilidade de reutilização de ambos. Os ensaios fotocatalíticos foram efetuados em um reator de bancada e o registro da redução na concentração do corante se deu a partir de medidas de absorbância realizadas em espectrofotômetro. Os resultados demonstraram que ambos os compósitos apresentaram atividade fotocatalítica, com destaque para o material submetido ao recozimento, que exibiu a maior eficiência na degradação do corante. No entanto, nos testes de reuso sem tratamento intermediário, observou-se uma leve queda de desempenho, especialmente para o compósito obtido pelo método amolecimento, indicando que a estabilidade fotocatalítica ao longo dos ciclos varia conforme o tipo de método de obtenção aplicado.

Palavras-chave: fotocatalise; ZnO; degradação; reuso.

ABSTRACT

The aim of this work was to develop ZnO:glass composites for use in Advanced Oxidation Processes (AOPs), with a focus on photocatalysis for dye degradation. Two different methods for immobilizing ZnO onto glass, referred to as the "Softening Method" and the "Annealing Method," were employed to analyze and compare the photocatalytic efficiency and reusability of each material. Photocatalytic tests were conducted in a bench-scale reactor, and the decrease in dye concentration was monitored through absorbance measurements using a spectrophotometer. The results showed that both composites exhibited photocatalytic activity, with the annealed material standing out due to its higher efficiency in dye degradation. However, in reuse tests without intermediate treatment, a slight decrease in performance was observed, especially for the composite obtained by the softening method, indicating that photocatalytic stability over multiple cycles varies depending on the preparation method used.

Keywords: photocatalysis; ZnO; degradation; reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura molecular da Rodamina B	15
Figura 2 - Esquema representando o hiato energético em um (a) material condutor, (b) semicondutor e (c) isolante.....	16
Figura 3 - Esquema de excitação de elétrons da banda de valência (BV) para a banda de condução (BC) em um material semicondutor.....	17
Figura 4 - Célula unitária do ZnO.....	18
Figura 5 - Representação bidimensional: (A) do arranjo cristalino de um cristal de composição SiO ₂ e (B) da rede do vidro da mesma composição.....	20
Figura 6 - Resfriamento do fundido para obtenção de vidro – volume específico <i>versus</i> temperatura.....	21
Figura 7 - Preparação do vidro.....	23
Figura 8 - Fluxograma das sínteses dos compósitos.....	24
Figura 9 - Padronização dos compósitos.....	26
Figura 10 - Reator fotocatalítico utilizado no trabalho.....	27
Figura 11 - Teste de fotocatalise.....	28
Figura 12 - Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) do vidro.....	29
Figura 13 - Compósito obtido por recozimento.....	30
Figura 14 - Compósito obtido por amolecimento.....	30
Figura 15 - Degradação fotocatalítica da Rodamina B por diferentes compósitos ao longo do tempo.....	31
Figura 16 - Eficiência fotocatalítica dos compósitos ao longo dos ciclos de reuso.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros testados para a obtenção do compósito por amolecimento	25
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3 JUSTIFICATIVA.....	13
4 REVISÃO DA LITERATURA.....	14
4.1 CONTAMINAÇÃO POR CORANTES.....	14
4.2 RODAMINA B.....	14
4.3 FOTOCATÁLISE.....	15
4.4 ÓXIDO DE ZINCO.....	17
4.5 IMOBILIZAÇÃO DOS SEMICONDUTORES.....	18
4.6 VIDROS E COMPÓSITOS.....	19
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
5.1 OBTENÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	23
5.1.1 Preparação do vidro.....	23
5.1.2 Método do recozimento.....	25
5.1.3 Método do amolecimento.....	25
5.2 ENSAIOS DE FOTOCATÁLISE.....	27
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
6.1 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC).....	29
6.2 OBTENÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	30
6.3 EFICIÊNCIA FOTOCATALÍTICA.....	31
6.4 REUSO DOS COMPÓSITOS.....	32
7 CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

A contaminação hídrica é um dos principais problemas ambientais enfrentados atualmente. Essa questão tem implicações graves para a saúde pública, a biodiversidade e a qualidade de vida em geral. A poluição das águas afeta tanto a fauna e flora aquáticas quanto a disponibilidade de água potável para consumo humano e animal, agravando a escassez hídrica em diversas regiões do mundo. Além disso, a contaminação dos corpos d'água pode resultar na disseminação de doenças e na degradação dos ecossistemas, comprometendo a sobrevivência de espécies e a integridade dos habitats naturais.

De acordo com a ONU Água (2023), diversas legislações internacionais já foram estabelecidas para amenizar os impactos relacionados à contaminação e à gestão dos recursos hídricos. Políticas de preservação e proteção dos recursos hídricos estão sendo implementadas por governos e instituições com a intenção de garantir a sustentabilidade (Matos; Dias, 2023). No entanto, a eficácia dessas medidas depende não apenas da regulamentação, mas também da adoção de práticas responsáveis por parte das indústrias, agricultura e sociedade em geral. A educação ambiental e a participação comunitária desempenham um papel fundamental na promoção de comportamentos que reduzam a poluição hídrica.

Alguns dos processos de tratamento de resíduos e efluentes frequentemente utilizados são a incineração e o tratamento biológico, entretanto tais métodos possuem desvantagens relacionadas principalmente ao alto custo e ao longo tempo requerido (Pretel; Vasconcelos, 2021). A fotocatalise é um processo de descontaminação que vem sendo amplamente estudado e que apresenta potencial sustentável, uma vez que opera com baixo consumo de energia, gera poucos resíduos e permite a reutilização do catalisador. Esses fatores contribuem para a redução de custos e minimizam os impactos ambientais. Esse processo químico utiliza a radiação para ativar semicondutores e promover a degradação de moléculas orgânicas, tornando-se uma solução promissora para a purificação de águas contaminadas por corantes, pesticidas e fármacos.

Neste contexto, destaca-se a relevância do desenvolvimento de compósitos fotocatalíticos, nos quais o semicondutor é imobilizado em suportes sólidos, como o vidro. A imobilização do fotocatalisador visa contornar limitações operacionais

associadas ao uso de pós suspensos, como a difícil separação após o tratamento, lixiviação do pó, etc. Além de facilitar o reuso do catalisador, essa abordagem melhora a viabilidade do processo em aplicações contínuas. Deste modo, o presente trabalho apresenta um estudo da imobilização do fotocatalisador ZnO em uma matriz vítrea de fosfato de potássio com nióbio e zinco, visando especialmente facilitar a recuperação e reuso do material em ensaios de fotocatalise.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho teve como objetivo obter compósitos do semicondutor ZnO imobilizado em vidro para aplicação em fotocatalise, com a finalidade de avaliar a eficiência na degradação do poluente e a possibilidade de reuso do material.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Preparação do vidro no sistema $\text{KPO}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-ZnO}$.
- b) Caracterizar os vidros obtidos por meio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), visando analisar suas características térmicas.
- c) Obter compósitos ZnO: vidro pelos métodos nomeados “Amolecimento” e “Recozimento”.
- d) Utilizar os compósitos em processo fotocatalítico visando a degradação do corante Rodamina B;
- e) Avaliar a capacidade de reuso dos compósitos.

3 JUSTIFICATIVA

A escolha da imobilização do semicondutor para aplicação em fotocatalise como tema se deve aos seus benefícios ambientais e sociais. Esse processo utiliza luz para ativar catalisadores que degradam poluentes orgânicos de forma eficaz, sustentável e com baixo impacto ambiental. Diferentemente do tratamento biológico, que possui limitações ambientais e operacionais, a fotocatalise oferece uma abordagem mais sustentável e eficaz para a degradação de compostos orgânicos complexos.

No âmbito científico, este trabalho visou demonstrar a eficácia de compósitos de ZnO: vidro para aplicação em fotocatalise. Esses compósitos facilitam sua retirada do meio reacional e permitem o reuso em múltiplos ciclos de fotocatalise, tornando o tratamento de efluentes mais acessível e sustentável. A utilização de compósitos imobilizados permite simplificar o processo e reduzir custos operacionais, proporcionando uma solução prática e econômica para a indústria.

A escolha do ZnO se deve ao fato de ser um dos principais materiais atualmente utilizado em ensaios de fotocatalise, com excelentes resultados na degradação de poluentes, apresentar baixo custo, estabilidade química e facilidade de imobilização em suportes sólidos. Sua estrutura semicondutora permite a eficiente geração de espécies reativas para degradação de compostos orgânicos, como corantes (Feltrin, 2010).

A matriz vítrea escolhida consiste em vidro fosfato de potássio contendo óxido de nióbio e zinco. Essa matriz foi escolhida, entre outros, por possuir alta estabilidade térmica, química e mecânica (Silva, 2022), possuir relativamente baixa temperatura de fusão (quando comparada a matrizes tradicionais de silicatos, por exemplo); e principalmente, os materiais de partida possuem baixo custo, e, portanto, sendo economicamente viável para ser utilizado como suporte.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 CONTAMINAÇÃO POR CORANTES

A globalização e o crescimento das atividades industriais têm gerado inúmeras ameaças ambientais e prejuízos à saúde humana (Silva; Borges, 2023). Um ramo que tem destaque na economia mundial é o da indústria têxtil, entretanto, tal vertente ainda possui muitas incertezas no que diz respeito à sustentabilidade do processo (Mendes Junior, 2024). Isso porque uma enorme quantidade de efluentes é gerada nas atividades têxteis e, quando não tratados de maneira eficaz, trazem diversos prejuízos ambientais (Kunz *et al.*, 2002).

Os corantes representam os principais resíduos gerados no setor têxtil. Essas substâncias são os compostos químicos responsáveis pela presença de cor nos produtos, sendo, portanto, utilizados na tintura e tingimento dos tecidos (Guaratini; Zanoni, 2000) e são altamente tóxicos, além de apresentarem potencial mutagênico e cancerígeno (Mattar; Costa; Belisário, 2012).

Por possuírem a característica da coloração intensa, os corantes são facilmente percebidos a olho nu, mesmo em baixas concentrações. Sendo assim, quantidades mínimas de corantes são suficientes para alterar bruscamente a cor de corpos hídricos (Guaratini; Zanoni, 2000). Quando atingem corpos hídricos, os corantes alteram a atividade fotossintética de algas, o que prejudica a respiração de organismos aquáticos e ocasiona o desequilíbrio de todo o ecossistema.

Os principais processos utilizados no tratamento de corantes são: precipitação, adsorção, biodegradação, degradação química, eletroquímica e fotoquímica. Entretanto, apesar de serem eficientes, esses métodos apresentam desvantagens no que diz respeito à viabilidade financeira (Guaratini; Zanoni, 2000). Nesse sentido, a fotocatalise surge como uma alternativa que vem despertando muito interesse quanto à sua potencialidade na degradação de poluentes (Batista, 2022).

4.2 RODAMINA B

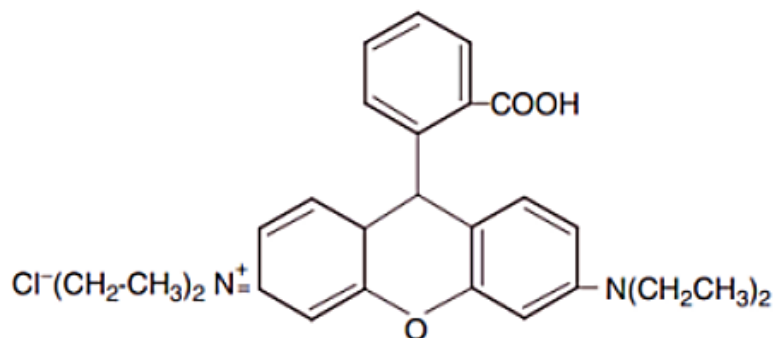
Os corantes são compostos orgânicos cuja aplicação está relacionada à presença de cor em materiais. Essa característica é possibilitada pelas

peculiaridades moleculares dos corantes, especialmente a parte insaturada da molécula (cromóforo), que é responsável pela existência da tonalidade. Segundo Bergamini (2007),

Os corantes possuem quatro propriedades principais: cor intensa, solubilidade (em água, na maioria dos casos), substantividade (capacidade de ser absorvido e retido pela fibra) e solidez (capacidade de resistir aos tratamentos aos quais as fibras são submetidas durante processos de fabricação e uso normal) (Bergamini, 2007, p. 7).

Os corantes do tipo Rodamina (fórmula molecular $C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$) são utilizados na fluorescência, manufatura de cartuchos, indústria têxtil e geralmente são tóxicos. Um tipo específico e de grande evidência nesse grupo de corantes é a Rodamina B (RB), composto de cor avermelhada cuja estrutura molecular está representada na Figura 1. Dentre suas principais características destaca-se o fato de ser resistente à degradação (Secco, 2015).

Figura 1 - Estrutura molecular da Rodamina B



Fonte: Secco (2015, p.19).

A RB é muito aplicada na indústria têxtil e nos setores de análises fotoquímicas, além de ser um marcador fluorescente de água. Apesar de ser um corante amplamente utilizado, é altamente tóxico e confirmado como um agente cancerígeno, podendo causar inúmeros prejuízos aos seres humanos e animais. Por isso, é de extrema importância que se encontrem maneiras eficazes de remoção de resíduos industriais que contêm a RB (Secco, 2015).

4.3 FOTOCATÁLISE

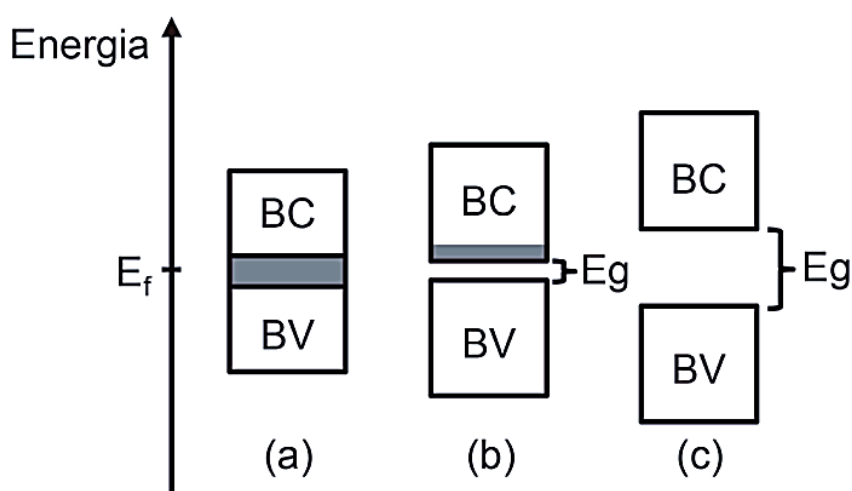
A fotocatalise é uma reação química induzida por meio da incidência de radiação visível ou ultravioleta sendo acelerada pela presença de um catalisador

(IUPAC, 2007), ou seja, é um processo no qual os fótons são utilizados para estimular reações catalisadas por sólidos, que normalmente são semicondutores (Mayrinck *et al.*, 2014).

Em geral, o catalisador utilizado em reações de fotocatalise é um semiconductor. Um material semiconductor, em nível atômico, é definido pela presença de propriedades distintas em duas bandas: a banda de condução (BC) e a banda de valência (BV). A banda de condução é caracterizada por orbitais moleculares incompletos ou vazios, enquanto a banda de valência é composta por orbitais preenchidos pelos elétrons de valência (Atkins; Jones, 2006).

A diferença entre materiais condutores, semicondutores e isolantes está justamente entre essas bandas. Nos materiais condutores não há uma separação clara entre as BV e BC. Por outro lado, os materiais isolantes possuem bandas bem definidas, com uma lacuna de energia significativa entre as duas bandas. Os semicondutores, por sua vez, apresentam um espaçamento intermediário entre os materiais condutores e isolantes (Callister, 2002). Este espaçamento é denominado *bandgap*, e corresponde à diferença de energia entre a BV e BC. A Figura 2 representa um esquema da diferença energética entre bandas de valência e condução em materiais isolantes, semicondutores e condutores.

Figura 2 - Esquema representando o hiato energético em um (a) material condutor (b) semiconductor e (c) isolante



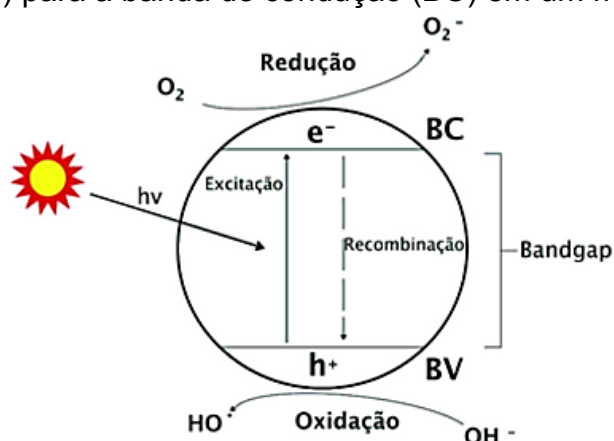
Fonte: Baccaro; Gutz (2018, p.328).

A fotocatalise envolve a irradiação na superfície de um material semiconductor com energia igual ou superior à energia do *bandgap*. Como resultado, ocorre a

excitação de um elétron da BV para a BC, bem como a formação de um buraco (h^+) na BV e um elétron na BC, formando-se o par elétron-buraco. Com isso, ocorrem reações de superfície, onde o elétron e buraco reagem com espécies adsorvidas (como água e O_2), produzindo radicais livres.

Esses radicais livres apresentam alta reatividade e atuam na degradação de moléculas orgânicas (Chen; Sivakumar; Ray, 2000). Além disso, a BC apresenta elétrons, o que promove a redução de outros tipos de moléculas presentes do meio hídrico. Essa redução gera também outros radicais livres, como o superóxido ($O_2^{\cdot-}$). Essa capacidade de gerar múltiplos radicais livres e promover a fotocatalise é essencial no processo, como demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Esquema de excitação de elétrons da banda de valência (BV) para a banda de condução (BC) em um material semiconductor



Fonte: Pandoli (2015, p. 859).

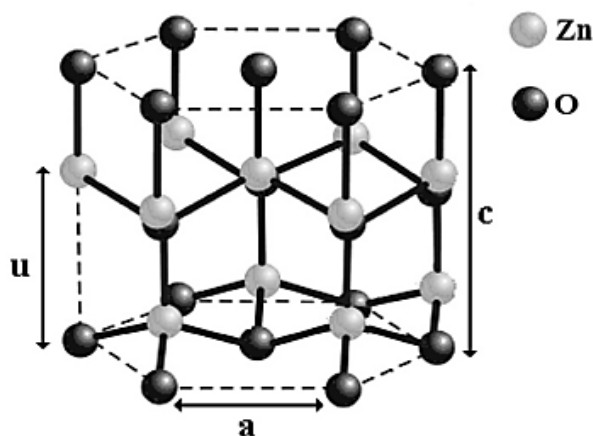
4.4 ÓXIDO DE ZINCO

O óxido de zinco é um semicondutor e apresenta *bandgap* de aproximadamente 3,37 eV. É utilizado em sensores solares, instrumentos de emissão de luz e em detectores de luz visível. Possui estabilidade química e física, é encontrado em abundância e tem baixa toxicidade. Essas particularidades fazem do ZnO um ótimo material para ser utilizado como fotocatalisador (Marana; Sambrano; Souza, 2010). Além disso, o ZnO foi escolhido neste trabalho por ser um material economicamente viável, apresentar excelente desempenho catalítico e, principalmente, por sua alta estabilidade térmica, o que o torna adequado para

aplicações que envolvem tratamento térmico, como nos métodos de obtenção de compósitos aplicados nesta pesquisa.

A célula unitária do óxido de zinco (ZnO) em sua estrutura wurtzita hexagonal é uma das formas cristalinas mais comuns desse material. A organização dos átomos segue uma rede hexagonal compacta, onde os átomos de zinco (Zn) e oxigênio (O) se alternam em uma disposição tridimensional (Marana; Sambrano; Souza, 2010). Cada átomo de zinco (Zn) está tetraedricamente coordenado a quatro átomos de oxigênio (O), conforme ilustrado na Figura 4. Essa organização influencia propriedades como condutividade elétrica, estabilidade térmica e atividade óptica (Duong, 2024).

Figura 4 - Célula unitária do ZnO



Fonte: Marana; Sambrano; Souza (2010, p.811).

4.5 IMOBILIZAÇÃO DOS SEMICONDUTORES

O semicondutor é um fotocatalisador necessário para que ocorra processo oxidativo na degradação de compostos orgânicos. A literatura reporta estudos que demonstraram a eficiência do ZnO imobilizado em filmes finos e peças.

O estudo desenvolvido por Peçanha (2018) obteve peças imobilizadas de ZnO prensadas e por colagem de barbotina e, a partir das amostras, foi realizada uma análise sobre qual se mostra mais efetiva em relação a degradação do corante Rodamina B. A partir desses dados, foi possível perceber que as peças feitas por colagem possuíam mais poros, apresentando maior reatividade, ou seja, demonstrava ter uma elevada eficiência em relação a degradação da Rodamina-B. Já as peças produzidas por meio de prensagem não apresentavam tantos poros,

pois houve um aumento de pressão entre as partículas, fazendo com que a sintetização fosse mais efetiva. Assim, observando as duas maneiras de se produzir um semicondutor imobilizado em peças ou filmes finos, foi possível concluir que a reatividade pode ser superior em materiais com mais porosidade (Peçanha, 2018).

O trabalho conduzido por Baggio (2017) teve como objetivo a produção de filmes finos de ZnO, com o propósito de investigar uma modificação na imobilização de semicondutores, testando a eficiência dos mesmos pela maior quantidade de filmes de ZnO presente quanto à influência da reutilização dos mesmos filmes. Para a obtenção dos filmes, uma solução de Zn^{2+} foi depositada em substrato de vidro e foi realizado tratamento térmico para a formação do ZnO em sua superfície. Variou-se o número de camadas dos filmes. Verificou-se que os filmes obtidos apresentaram boa homogeneidade com grãos e poros de estrutura nanométrica, sendo capazes de degradar até 80% do corante Rodamina B ao longo de seis ciclos de reutilização, sem perda significativa de desempenho, indicando a viabilidade de sua reutilização em processos fotocatalíticos.

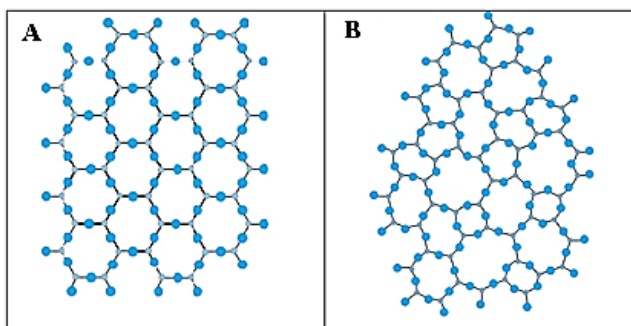
4.6 VIDROS E COMPÓSITOS

Os vidros ao longo dos anos apresentaram diversas definições, porém, uma definição amplamente aceita consiste em “vidro é um material sólido não cristalino que apresenta o fenômeno de transição vítrea” (Zarzycki, 1991). A transição vítrea (T_g) é um fenômeno que ocorre na passagem de um estado sólido rígido para um estado que pode ser descrito como “líquido congelado”, ocorrendo em uma faixa de temperatura específica, mas no qual a temperatura dentro dessa faixa pode variar dependendo da taxa de resfriamento do material utilizado (o resfriamento mais rápido desloca a T_g para maiores temperaturas).

Quando um material vítreo é resfriado rapidamente, os átomos não têm tempo suficiente para se reorganizarem em uma estrutura cristalina ordenada. Como resultado, o material retém uma estrutura desordenada a longo alcance. Esse estado confere ao vidro suas propriedades únicas, como a ausência de um ponto de fusão bem definido e a falta de separação em direções preferenciais. Assim os vidros têm uma faixa de transição vítrea, onde o material passa gradualmente de um estado rígido para um estado mais flexível (Alves; Gimenez; Mazali, 2001).

Conforme a Figura 5, que apresenta um esquema bidimensional para uma rede cristalina e para um “vidro” de sílica - SiO_2 , é possível verificar que a estrutura não cristalina do vidro não apresenta regularidade no seu arranjo atômico a longo alcance.

Figura 5 - Representação bidimensional: (A) do arranjo cristalino de um cristal de composição SiO_2 e (B) da rede do vidro da mesma composição

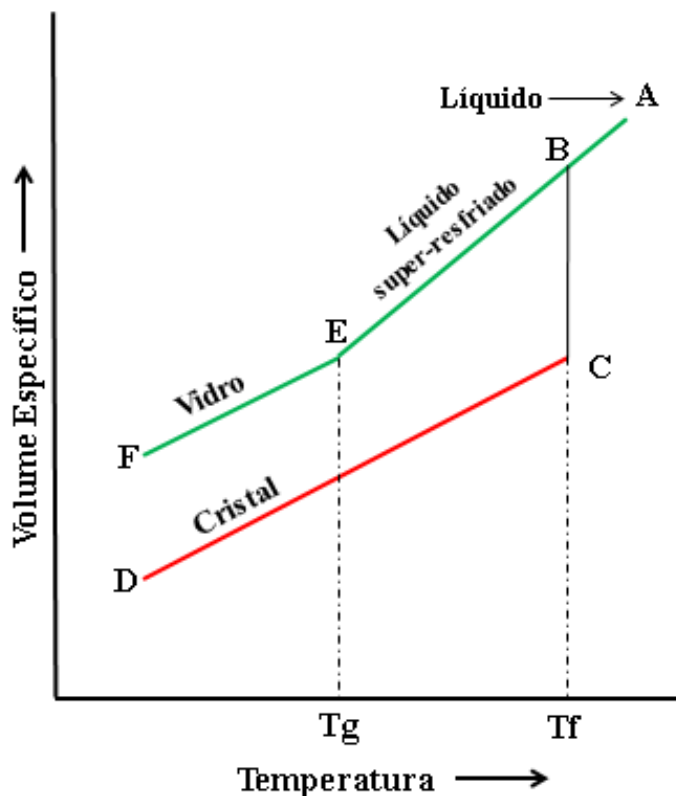


Fonte: Gonçalves (2014, p.25).

A preparação do vidro neste trabalho se baseia em uma metodologia mais tradicional, ou seja, pela fusão/resfriamento de uma seleção de matérias-primas, que necessitam de um cálculo de proporção relativa envolvendo seus componentes, em elevadas temperaturas. Depois do processo de fusão, o líquido deverá passar pelo resfriamento rápido para que seja alcançado o ponto de transição vítrea, assumindo assim a propriedade do sólido (Nardi, 2016).

Conforme Figura 6, iniciando o resfriamento do material fundido a uma temperatura elevada, ocorre uma contração no material, até que se atinja o ponto de fusão (T_f). A partir desse ponto, dependendo da taxa de resfriamento, podem ocorrer um destes dois fenômenos: i) Taxa de resfriamento baixa - os átomos têm tempo suficiente para se rearranjarem em uma estrutura organizada e o material atinge a cristalização, formando, então, cristais e reduzindo significativamente o seu volume específico ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$); ou ii) Taxa de resfriamento alta - o material se tornará cada vez mais viscoso, até que a mobilidade em nível atômico praticamente deixa de existir, fazendo com que os átomos se fixem espacialmente de forma aleatória e desordenada (mantendo a estrutura de líquido), encontrando-se num estado metaestável de líquido super-resfriado. O líquido super-resfriado passa então ao estado vítreo, pela temperatura de transição vítrea (T_g). Nesse caso, ocorre baixa redução no volume específico e o material não se cristaliza, mas se vitrifica ($A \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow F$).

Figura 6 – Resfriamento do fundido para obtenção de vidro - volume específico versus temperatura



Fonte: Batista; Vianna (2022 p.269).

Assim, o propósito deste trabalho foi imobilizar o semicondutor e fotocatalisador ZnO na superfície de um vidro. Deste modo, foi sintetizado um vidro pelo método de fusão e resfriamento e, durante este processo, o ZnO na forma de pó foi “impregnado” na superfície do vidro sintetizado. Para isso, foram estudadas variáveis como: a temperatura e o tempo de fusão, a taxa de resfriamento, a quantidade de ZnO a ser aplicado, além das condições de recozimento. É importante ressaltar que o recozimento se trata de um tratamento térmico realizado em vidros (abaixo da T_g) para que sejam aliviadas as tensões internas resultantes do resfriamento. E, por aliviar estas tensões, este processo aumenta a resistência mecânica do vidro. Esses fatores influenciam diretamente a aderência do ZnO à superfície do vidro. Ainda, uma das principais intenções deste estudo foi a possibilidade de reutilizar os fotocatalisadores, visto que os fotocatalisadores na forma de pó dificultam o processo de retirada do meio reacional e também seu reuso. Sendo assim, a imobilização de catalisadores em algum material compacto e estável é uma solução para tal problemática sendo pela fácil retirada do meio

reacional, como também a avaliação de seu reaproveitamento após seu uso no processo fotocatalítico (Dalponte, 2015).

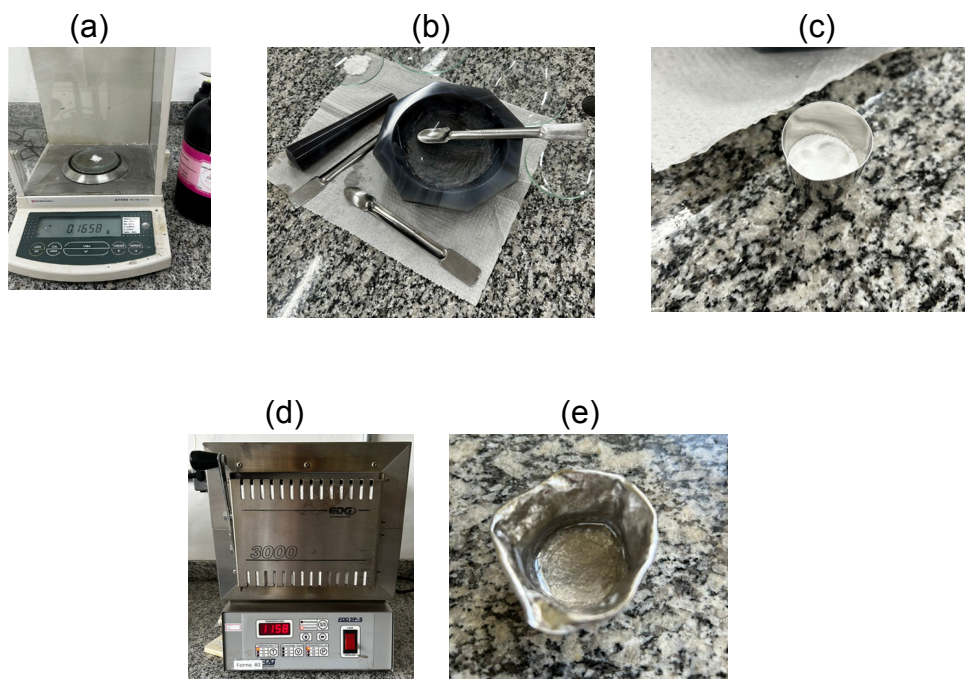
5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 OBTENÇÃO DOS COMPÓSITOS

5.1.1 Preparação do vidro

O vidro, de composição molar nominal $65\text{KPO}_3\text{-}30\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-}5\text{ZnO}$, foi preparado pelo método tradicional de fusão e resfriamento (Silva, 2022). Os reagentes de partida utilizados consistiram em: Nb_2O_5 (CBMM, grau ótico), KH_2PO_4 (Vetec Química Final LTDA, 99%) e ZnO (LabSynth, PA). Para isso, foram realizados os cálculos estequiométricos para obtenção da massa de todos os reagentes, que posteriormente foram pesados (Figura 7a), misturados e homogeneizados por 30 minutos em um almofariz de ágata com pistilo (Figura 7b). Em seguida, a mistura foi colocada em um cadinho de platina (Figura 7c) e levada a uma mufla EDG1800 para fusão à 1150°C por 30 minutos (Figura 7d). Após a fusão, por meio do choque térmico realizado diretamente no cadinho em contato com o ar, foi obtido o vidro (Figura 7e), que posteriormente foi retirado do interior do cadinho.

Figura 7 - Preparação do vidro



Fonte: Dos autores (2025).

Legenda: a) Pesagem dos reagentes.

b) Mistura dos reagentes.

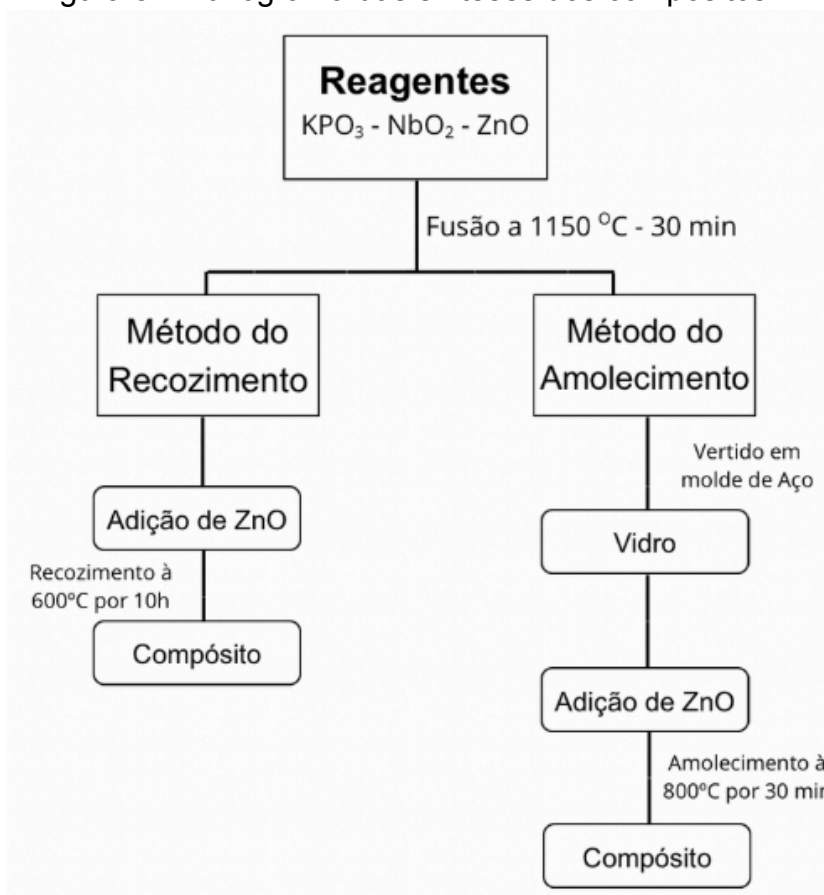
c) Adição dos reagentes homogeneizados no cadinho.

- d) Forno utilizado no processo de fusão.
- e) Vidro obtido no interior do cadinho.

Para obter e identificar as temperaturas características do vidro, foi realizada análise térmica utilizando a técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC, do inglês, *Differential Scanning Calorimetry*) utilizando o equipamento STA 449 Júpiter F3 (Netzsch), situado no Laboratório de Materiais da Unifal campus Poços de Caldas (Labmat). A medida foi realizada na amostra na forma de *bulk* em um cadinho de Pt/Rh tampado, entre 100 e 1000°C, taxa de aquecimento de 10°C/min, fluxo de gás N₂ de purga de 100mL/min e de proteção de 20mL/min.

A partir do vidro dessa composição, foram preparados os compósitos de ZnO:vidro por dois diferentes métodos, que foram denominados como: o Método do Recozimento e o Método do Amolecimento. A Figura 8 apresenta o fluxograma das etapas envolvidas na síntese dos compósitos, destacando os dois métodos utilizados: recozimento e amolecimento, com suas respectivas condições de processamento e adições de ZnO.

Figura 8 - Fluxograma das sínteses dos compósitos



Fonte: Dos autores (2025).

5.1.2 Método do recozimento

Neste método, a adição de ZnO foi realizada imediatamente após a fusão do vidro, durante a etapa de resfriamento. Para isso, o vidro foi preparado seguindo o procedimento descrito no item 5.1.1. Após a retirada do cadinho da mufla (forno) após os 30 minutos de fusão, cerca de 1g de ZnO foi adicionado na superfície do material fundido, antes de seu completo resfriamento e formação do vidro.

Imediatamente após a adição do ZnO, o cadinho foi levado a mufla EDG 1800 para recozimento na temperatura de 600°C por 10 horas, que conforme descrito anteriormente, foi utilizado para que fossem aliviadas as tensões geradas durante o resfriamento do material, e assim o vidro não quebrasse e pudesse ser obtida uma peça. A temperatura de 600°C foi escolhida pois corresponde a 40°C abaixo da T_g que foi obtida pela curva de DSC. Após esse último processo, o compósito foi retirado do cadinho e obtido com sucesso. Devido a utilização da etapa de recozimento diretamente no preparo do compósito, o nome do método foi dado como “Método do recozimento”.

5.1.3 Método do amolecimento

Neste método, inicialmente pequenos pedaços do vidro produzidos diretamente no cadinho foram adicionados a uma placa de platina já contendo o pó de ZnO e, em seguida, cobertos com uma nova camada de pó de ZnO. A placa de platina foi levada a um forno EDG 1800, com parâmetros específicos de temperatura e tempo, a fim de que a maior quantidade possível de ZnO ficasse aderida à superfície do vidro. Este método foi denominado de “método de amolecimento” pois, foi realizado com a finalidade de escolher temperaturas acima da T_g , de modo a “amolecer” o vidro para que fosse possível “aderir” o pó de ZnO na superfície do vidro, mas sem que este perdesse sua forma. Assim, o intervalo de temperatura para testes foi escolhido dentro dessa faixa, e de modo que não ocorresse qualquer processo de cristalização. Após muitos testes, detalhados na Tabela 1, foram definidos os melhores parâmetros para a obtenção do compósito: 800°C por 30 minutos. Após a finalização de todas essas etapas, o compósito foi obtido com sucesso.

Tabela 1 - Parâmetros testados para a obtenção do compósito por amolecimento

Temperatura (°C)	Tempo (min)	Adequação para aplicação
775	25	Inadequado
780	25	Inadequado
785	25	Inadequado
790	25	Inadequado
800	30	Adequado

Fonte: Dos autores (2025).

É importante ressaltar que durante a etapa de preparação dos compósitos pelo método do amolecimento, observou-se que o resultado desejado (aderência eficaz entre o pó de ZnO e o vidro, sem deformações excessivas) só foi obtido quando se utilizou uma única peça de vidro na placa de platina. Ensaios realizados com mais de uma peça simultaneamente, mesmo sob os mesmos parâmetros de temperatura (800 °C) e tempo (30 minutos), não apresentaram resultados satisfatórios.

Para a melhor padronização dos compósitos preparados por este método, após a etapa de fusão do vidro, ao invés do vidro ser obtido resfriando o fundido diretamente no cadinho, ele foi vertido em um molde pré-aquecido e levado a outro forno, na temperatura de 500°C onde permaneceu por 10 horas. Neste caso, foi realizado o recozimento apenas do vidro para que fossem obtidas peças. A temperatura de 500°C se deu devido a limitação do molde. Após esse tempo, obteve-se uma peça de vidro em formato retangular (Figura 9a) e com aproximadamente 2mm de espessura. Essa peça foi cortada com uma cortadeira (Figura 9b) e dividida em peças de mesmas dimensões (Figura 9c), que prosseguiram para a mesma metodologia já mencionada acima para a obtenção do compósito.

Figura 9 - Padronização dos compósitos

(a)

(b)

(c)



Fonte: Dos autores (2025).

Legenda: a) Vidro em formato retangular após recozimento em molde de aço.

b) Cortadeira de vidros.

c) Vidros com mesmas dimensões.

5.2 ENSAIOS DE FOTOCATÁLISE

Os ensaios de fotocatalise foram realizados em um reator bancada, constituído por uma caixa de madeira com duas lâmpadas (Philips TUV 15W/G15T8 – Long Life – UV-C) conectadas à tampa e por um sistema de resfriamento constituído por serpentinas de cobre. O reator é ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Reator fotocatalítico utilizado no trabalho



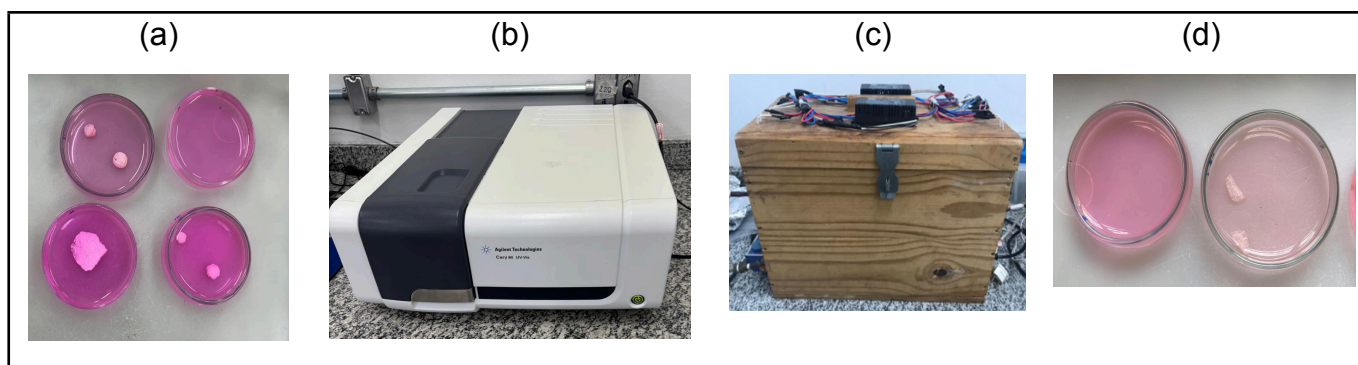
Fonte: Dos autores (2025).

Para a realização dos ensaios fotocatalíticos, os compósitos foram previamente submetidos a um tratamento térmico a 300 °C por 2 horas em uma mufla EDG 1800, com o objetivo de remover umidade e Rodamina B remanescentes da síntese. Em seguida, 15 mL de uma solução de concentração 5 mg/L de Rodamina B (Ruellas *et al.*, 2019) foram adicionados em placas de Petri com diâmetro aproximado de 50 mm e altura de 15 mm. Os compósitos foram então inseridos nas placas de Petri, sendo que uma delas permaneceu apenas com o corante, servindo como referência para a comparação dos resultados (Figura 11a).

Posteriormente, foram realizadas medidas de absorvância das amostras por meio do espectrofotômetro Cary 60 UV-Vis (Figura 11b) antes de iniciar a reação. Para a leitura no espectrofotômetro, as amostras foram inseridas em uma cubeta de vidro com o auxílio de pipetas Pasteur. Com as primeiras leituras concluídas e registradas, as amostras foram adicionadas ao reator contendo lâmpadas que emitem na região UV (Figura 11c). Novas leituras de absorvância foram realizadas a cada 20 minutos de reação até completar 120 minutos, a fim de se analisar a progressão de descoloração das soluções (Figura 11d).

Para os testes de reuso, ao final de cada ciclo de fotocatalise, os compósitos foram removidos das placas de Petri e deixados secar em temperatura ambiente, sem qualquer tipo de tratamento prévio. Para os ciclos posteriores, os compósitos foram reposicionados nas placas de Petri com nova solução de Rodamina B (5 mg/L), repetindo-se o procedimento fotocatalítico descrito anteriormente. Esse processo foi realizado por cinco ciclos, com medições de absorvância sendo feitas antes do início da reação e após 120 minutos de irradiação UV, a fim de avaliar a manutenção da eficiência fotocatalítica ao longo dos reusos.

Figura 11 - Teste de fotocatalise



Fonte: Dos autores (2025).

Legenda: a) Compósitos inseridos nas placas de Petri contendo Rodamina B.

b) Espectrofotômetro Cary 60 UV-Vis

c) Reator fotocatalítico.

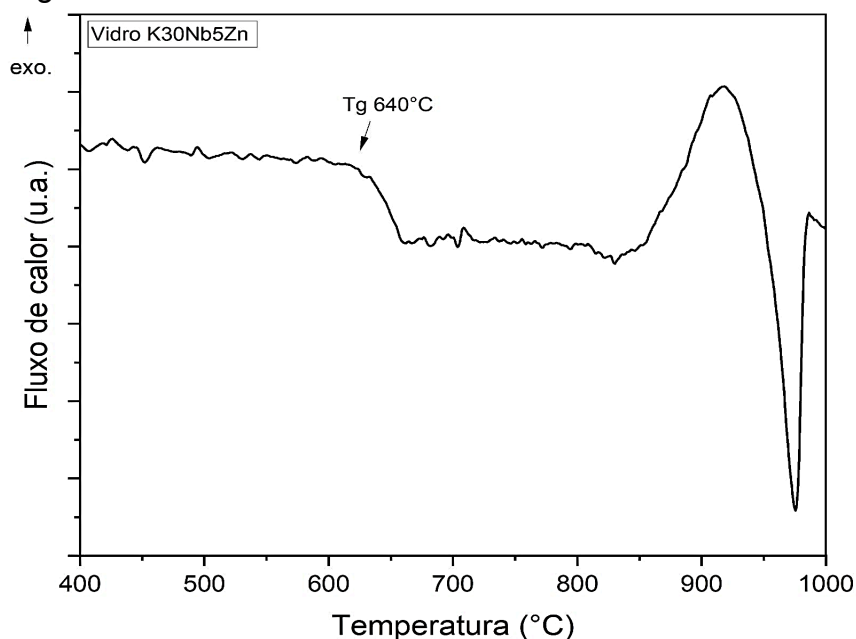
d) Resultado visual observado nas Placas de Petri após 2 horas de fotocatalise.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

Para determinar as temperaturas características do vidro para que fosse definida as temperaturas na preparação dos compósitos, foi realizada a análise térmica do vidro por meio da técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). O resultado obtido encontra-se na curva de DSC disposta na Figura 12.

Figura 12 – Curva de DSC do vidro



Fonte: Dos autores (2025).

Na análise por DSC, a temperatura de transição vítrea é identificada pela primeira queda acentuada na linha base do gráfico. Assim, observa-se que a temperatura de transição vítrea do vidro utilizado na preparação dos compósitos é de aproximadamente 640°C. Essa temperatura marca a passagem do estado vítreo do material para um estado mais maleável e flexível, pois a energia fornecida torna-se suficiente para que suas estruturas internas ganhem mobilidade.

A temperatura selecionada para recozimento na preparação dos compósitos é 40°C abaixo da temperatura de transição vítrea (600°C para recozimento) no caso da amostra preparada diretamente no cadinho – método do recozimento, garantindo o início do alívio das tensões internas do material. Além disso, as estruturas internas do material começam a ganhar maior mobilidade, reduzindo os riscos de quebra ou trincas no vidro. Essa escolha visou preservar a integridade estrutural do vidro,

evitando que ele se deformasse ou perdesse sua forma original. Ainda, conforme pode ser observado, a temperatura escolhida para o método de amolecimento, 800°C, encontra-se acima da T_g , e ainda abaixo do pico de cristalização. Essa temperatura foi cuidadosamente selecionada para permitir o amolecimento do vidro, condição necessária para a imobilização do ZnO, sem ultrapassar limites que pudessem induzir a cristalização da matriz vítrea.

6.2 OBTENÇÃO DOS COMPÓSITOS

A obtenção dos compósitos foi realizada com sucesso empregando as duas metodologias distintas: recozimento e amolecimento. As amostras obtidas por cada método estão representadas nas Figuras 13 e 14.

Figura 13 - Compósito obtido por recozimento



Fonte: Dos autores (2025).

Legenda: a) Vista superior do compósito obtido por recozimento.
b) Vista lateral do compósito obtido por recozimento.

Figura 14 - Compósito obtido por amolecimento



Fonte: Dos autores (2025).

Legenda: a) Vista superior do compósito obtido por amolecimento.
b) Vista lateral do compósito obtido por amolecimento.

No processo de recozimento, observou-se a formação de compósitos com aparência sólida e estrutura compacta. Esse resultado indica uma boa interação entre as fases do material, favorecida pelo tratamento térmico aplicado.

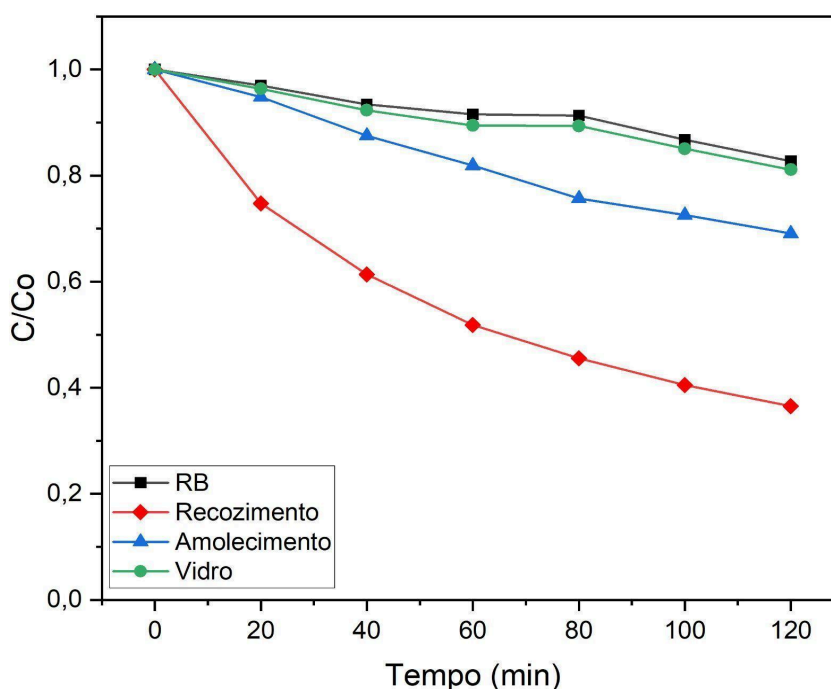
No método do amolecimento, os compósitos obtidos também apresentaram estabilidade estrutural. Por outro lado, observou-se uma menor aderência de ZnO à superfície do compósito, o que pode estar relacionado à ausência de uma etapa subsequente de tratamento térmico, como ocorre no método do recozimento, em que o material, ainda aquecido logo após a fusão, é submetido a uma permanência controlada a 600°C.

Ambas as rotas de síntese se demonstraram eficientes na formação dos compósitos, permitindo a continuidade dos testes de fotocatalise e de reuso.

6.3 EFICIÊNCIA FOTOCATALÍTICA

A Figura 15 apresenta os resultados do ensaio fotocatalítico conduzido com amostras dos dois diferentes compósitos, além do vidro sem ZnO. Para esse estudo, os compósitos foram submetidos a um tratamento térmico (300°C por 2 horas) para remover umidade e resíduos orgânicos.

Figura 15 - Degradação fotocatalítica da Rodamina B por diferentes compósitos ao longo do tempo



Fonte: Dos autores (2025).

Observa-se que a amostra submetida ao recozimento apresentou o melhor desempenho fotocatalítico neste caso, com significativa redução na concentração do corante ao longo do tempo, atingindo mais de 60% de degradação após 120 minutos de reação. Esse comportamento sugere que a preparação utilizando o método de recozimento favoreceu propriedades estruturais e/ou superficiais, como aumento da porosidade e melhor exposição dos sítios ativos, que aumentaram a eficiência do material como fotocatalisador. Além disso, visualmente uma maior massa de ZnO foi fixada na superfície do material, o que também pode ter contribuído para essa maior eficiência.

A amostra submetida ao amolecimento também demonstrou atividade fotocatalítica, porém com menor eficiência, atingindo 30% de degradação da RB ao final do experimento. Esse resultado indica que, embora o amolecimento tenha contribuído para alguma atividade fotocatalítica, seu efeito foi menos expressivo do que o observado com o recozimento. Novamente, isto também pode ser associado a massa de ZnO aderida à superfície por este método quando comparada ao anterior.

Já a amostra de vidro apresentou comportamento muito semelhante à RB pura, com pouca variação na razão C/Co, permanecendo próximas a 0,85 ao longo dos 120 minutos. Isso demonstra que o vidro não contribuiu para a fotodegradação do corante, e que toda a redução observada pode ser atribuída ao ZnO aderido.

6.4 REUSO DOS COMPÓSITOS

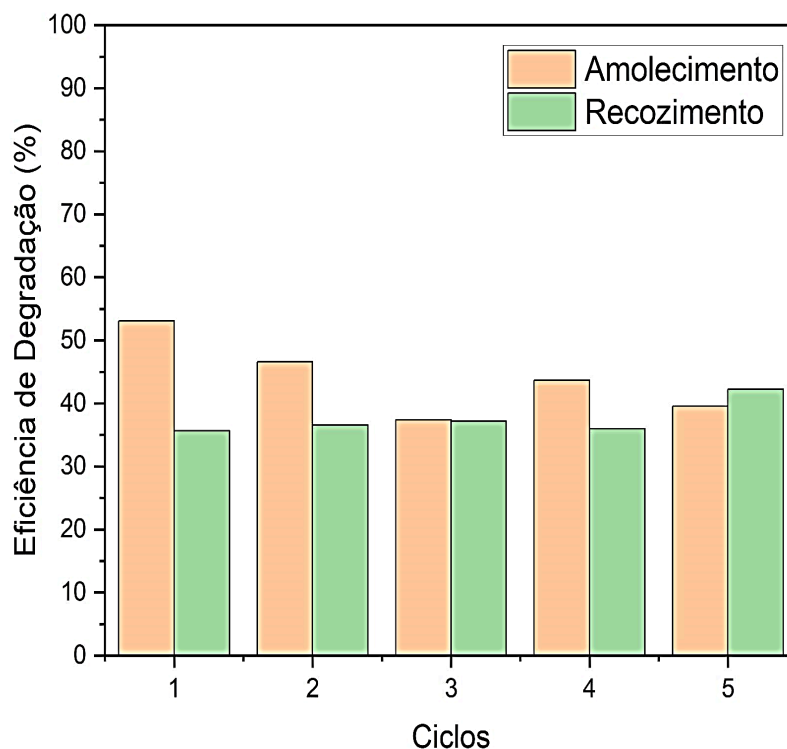
A Figura 16 apresenta a eficiência de degradação dos compósitos ao longo de cinco ciclos de reuso, sem aplicação de tratamentos prévios entre os ciclos.

No primeiro ciclo, neste caso, observa-se que a amostra obtida por amolecimento apresentou maior eficiência de degradação (aproximadamente 53%) em comparação à amostra recozida (aproximadamente 35%). Entretanto, ao longo dos ciclos seguintes, nota-se uma queda na eficiência, especialmente para a amostra obtida por amolecimento. Neste caso, a eficiência de degradação reduziu para cerca de 47% no segundo ciclo, 38% no terceiro, e se estabilizou em torno de 40% nos ciclos seguintes. Já a amostra obtida por recozimento, embora tenha iniciado com uma eficiência inferior em comparação a amostra obtida por amolecimento, manteve valores mais constantes ao longo dos ciclos.

Um aspecto importante a ser destacado é que, nos testes de reuso, as amostras não foram submetidas a nenhum tipo de tratamento térmico entre os

ciclos, o que possivelmente contribuiu para o acúmulo de resíduos orgânicos na superfície dos compósitos, resultando na diminuição da atividade fotocatalítica. Por outro lado, para os ensaios de eficiência fotocatalítica, cujos resultados estão descritos no item 6.3, as amostras foram previamente tratadas termicamente o que permitiu avaliar seu desempenho inicial de forma isolada e controlada.

Figura 16 - Eficiência fotocatalítica dos compósitos ao longo de ciclos de reuso



Fonte: Dos autores (2025).

Nesses testes iniciais, a amostra obtida por reozimento apresentou maior eficiência na degradação da Rodamina B. Entretanto, o comportamento observado nos testes de reuso foi distinto: embora a amostra obtida por reozimento tenha mantido uma eficiência praticamente constante ao longo dos ciclos, a amostra por amolecimento demonstrou um desempenho superior já a partir do primeiro ciclo de reutilização, mantendo-se mais eficiente na maioria dos ciclos seguintes. Em contrapartida, o compósito obtido pelo método de reozimento, apesar de gerar um bom desempenho inicial e relativamente estável, pode ter tornado os compósitos mais vulneráveis à degradação física, à perda de material ativo ou à aglomeração de partículas, comprometendo sua eficiência com o passar dos ciclos.

7 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que ambos os métodos de imobilização do ZnO em vidro, recozimento e amolecimento, foram eficazes na formação de compósitos com atividade fotocatalítica. O compósito obtido pelo método denominado de recozimento destacou-se quanto à eficiência na degradação do corante Rodamina B, atingindo níveis superiores de descoloração.

Por outro lado, embora o compósito obtido pelo método do amolecimento tenha apresentado desempenho inicial inferior, demonstrou maior estabilidade ao longo dos ciclos de reuso. Isso indica que, mesmo com menor eficiência inicial, sua performance mais constante pode ser vantajosa em aplicações que demandam reutilização contínua do catalisador.

A utilização do vidro como suporte se mostrou adequada, proporcionando uma base estável e facilitando a manipulação dos materiais após o uso. Além disso, o uso de pequenas quantidades de ZnO evidencia o potencial desses compósitos como alternativa viável, econômica e sustentável para o tratamento de efluentes contendo contaminantes orgânicos.

Como perspectiva para estudos futuros, destaca-se a possibilidade de investigar outros semicondutores, bem como avaliar a eficiência dos compósitos na degradação de diferentes corantes ou contaminantes orgânicos. Além disso, testes de fotocatalise utilizando luz solar como fonte de radiação podem contribuir para uma aplicação mais próxima das condições reais e com maior apelo ambiental.

REFERÊNCIAS

ALVES, O. L.; GIMENEZ, I. F.; MAZALI, I. O. Vidros. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**, Campinas, 2001.

ATKINS, P; JONES, L. **Princípios de Química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 1048 p.

BACCARO, Alexandre; GUTZ, Ivano. Fotoeletrocatalise em semicondutores: dos princípios básicos até sua conformação à nanoescala. **Química Nova**, [S.L.], p. 326-339, 2018. Sociedade Brasileira de Química (SBQ).
<http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170174>.

BAGGIO, C. M. **Obtenção de filmes finos de ZnO e sua aplicação e reutilização em fotocatalise**. 2017. 35f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2017.

BATISTA, Isabela dos Reis et al. **Processos Oxidativos Avançados (POAS): Uma Revisão da Importância de Fotocatalise na descoloração de Corantes Têxteis como o Verde Malaquita**. 2022.

BATISTA, Gislene; VIANNA, Carlos A.F.J. Conhecimentos sobre vidros e abordagem temática: uma proposta pra contextualização do ensino de química em Poços de Caldas, MG. **Revista Ciências & Ideias**, Rio de Janeiro, v.13, n.01, p.259-284, 2022.

BERGAMINI, Raphael Borges Magalhães. **Degradação de corantes têxteis ácidos e reativos por fotocatalise heterogênea, usando TiO₂ como fotocatalisador**. 2007. 81f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro de Tecnologias e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CHEN, D.; SIVAKUMAR, M.; RAY, A. K. Heterogeneous photocatalysis in environmental remediation. **Dev. Chem. eng. Mineral Process**, v. 8, n. 5/6, p. 505-550, 2000.

DALPONTE, Ithiara. **Degradação Fotocatalítica de Tartrazina com TiO₂ Imobilizado em Esferas de Alginato**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meio Ambiente Urbano e Industrial, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

DUONG, Q.V. Investigation of structural and electronic properties of ZnO using first principle calculations. **HPU2 Journal of Science: Natural Sciences and Technology**, v. 3, n. 1, p. 78–87, 26 abr. 2024.

FELTRIN, Carlos Willian. **Síntese e propriedades do ZnO: correlação entre propriedades estruturais e atividade fotocatalítica**. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

GONÇALVES, T. S. **Caracterização estrutural e espectroscópica de vidros fluorofosfatos dopados e co-dopados com Er³⁺ Yb³⁺**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M.V.B. Corantes têxteis. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 71-78, jan. 2000.

IUPAC. Glossary of terms used in photochemistry. **Pure Appl. Chem.**, v. 79, n. 3, p. 293-465, 2007.

KUNZ, A. *et al.* Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002.

MARANA, Naiara Letícia; SAMBRANO, Julio Ricardo; SOUZA, Aguinaldo Robinson de. Propriedades eletrônicas, estruturais e constantes elásticas do ZnO. **Química Nova**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 810-815, 2010.

MATOS, Fernanda; DIAS, Reinaldo. Desafios e oportunidades na gestão ambiental: o papel dos municípios e parcerias na preservação dos recursos hídricos. **Ciências E Tecnologia Das Águas: Inovações E Avanços Em Pesquisa**, v. 1, p. 1, 2023.

MATTAR, Maurício da Silva; COSTA, Helber Barcellos da; BELISÁRIO, Marciela. Emprego de bioadsorventes na remoção de corantes de efluentes provenientes de indústrias têxteis. **Analytica**, São Paulo, p. 2-7, set. 2012.

MAYRINCK, Caroline *et al.* Synthesis, Properties and Applications of Nanostructured Zinc Oxide. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 1185-1204, out. 2014.

MENDES JUNIOR, Biagio de Oliveira. TÊXTIL: v. 8 n. 304 (2023). **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza, v. 8, 2024. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/2645>. Acesso em: 24 mar. 2025.

NARDI, R. P. R. D. **Vidros E Vitrocerâmicas Luminescentes De Fluorofosfatos De Chumbo E Tungstênio**. 2016. 121f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2016.

ONU ÁGUA. Global Water Cooperation and Governance, 2023. Disponível em: <https://www.unwater.org/>. Acesso em: 18 maio 2025.

PANDOLI, Omar et al. Prototipagem de microrreatores fotocatalíticos e testes de fotodegradação de corantes orgânicos. **Química Nova**, v. 38, n. 06, p. 859-863, 2015.

PEÇANHA, L. O. O. **Obtenção de ZnO na forma de peças para aplicação em fotocatalise**. 2018. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2018.

PRETEL, Ariel Fernandes; VASCONCELOS, Priscila Elise Alves. O aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbano: uma forma de descarte adequado e sustentável. **UNIFESO-Humanas e Sociais**, v. 7, n. 1, p. 53-62, 2021.

RUELLAS, T. M. O. *et al.* Zinc oxide pieces obtained by pressing and slip casting: physical, structural and photocatalytic properties. **Environmental Technology**, v. 42, n. 12, p. 1861-1873, 2019.

SECCO, Morgana Rafaela. **Descoloração de solução aquosa contendo Rodamina B via processos oxidativos (UV, H₂O₂, H₂O₂/UV, Fenton e Foto-Fenton)**. 2015. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SILVA, Ricardo; BORGES, Fernanda de Freitas. ASPECTOS E CONSEQUÊNCIAS DA GLOBALIZAÇÃO NA SUSTENTABILIDADE. **Simpósio de Tecnologia Fatec Jaboticabal**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. e13111, 2023. DOI: 10.52138/sitec.v13i1.304. Disponível em: <https://publicacoes.fatecjaboticabal.edu.br/sitec/article/view/304>. Acesso em: 12 jun. 2025.

SILVA, Roni Alisson. **Estudo das propriedades mecânicas e químicas de vidros fosfatos com adição de óxido de nióbio**. 2022. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Alfenas Campus Poços de Caldas, Poços de Caldas, 2022.

ZARZYCKI, J. **Glasses and the vitreous state**. New York: University Press, 1991.