

APLICAÇÕES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX) E MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE TRANSMISSÃO (MET) NA CARACTERIZAÇÃO DE NANOCATALISADORES À BASE DE ÓXIDOS METÁLICOS PARA DEGRADAÇÃO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Eduardo Tarragó*
Cristiano Morita Barrado*
Alberthmeiry Teixeira de Figueiredo*

Resumo: A presença de contaminantes persistentes em águas, tais como corantes sintéticos, pesticidas e fármacos, consiste em um permanente desafio aos métodos convencionais de tratamento, o que vem sugerindo interesse por rotas de degradação baseadas em processos oxidativos avançados. Nesse contexto, nanocatalisadores à base de óxidos metálicos, especialmente em sistemas modificados e compósitos, vêm sendo investigados por seu potencial em degradar poluentes orgânicos. Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o emprego da difração de raios X (DRX) e da microscopia eletrônica de transmissão (MET) na caracterização desses nanocatalisadores aplicados ao tratamento de água e efluentes. A DRX é discutida como técnica central para identificação de fases cristalinas, avaliação de cristalinidade e parâmetros estruturais, enquanto a MET é abordada quanto à descrição morfológica em escala nanométrica, distribuição de tamanhos e aspectos microestruturais relevantes ao desempenho catalítico. A síntese da literatura evidencia que a correlação entre estrutura e morfologia, obtida pela combinação DRX–MET, é relevante técnica para interpretar resultados de degradação e orientar o desenho racional de materiais mais eficientes. A importância do estudo reside em apoiar a seleção e a otimização de nanocatalisadores voltados à mitigação de impactos associados a efluentes industriais.

Palavras-chave: Nanocatalisadores; Óxidos metálicos; Difração de raios X; Microscopia eletrônica de transmissão; Tratamento de efluentes.

1. INTRODUÇÃO

A persistência de contaminantes em corpos hídricos associados a efluentes industriais é um problema socioambiental porque parte dos compostos lançados em leitos fluviais apresenta elevada estabilidade química e baixa biodegradabilidade. Ademais, a ocorrência em baixas concentrações tende a reduzir a eficiência de alternativas convencionais de tratamento e a favorecer impactos ecotoxicológicos cumulativos. Nesse cenário, processos oxidativos avançados (POA), especialmente

* Instituto de Química – UFCAT: etarrag@gmail.com

* Instituto de Química – UFCAT: cristiano@ufcat.edu.br

* Instituto de Química – UFCAT: alberth@ufcat.edu.br

quando acoplados a materiais nanoestruturados, têm sido discutidos na literatura como alternativas promissoras para intensificar a degradação de poluentes orgânicos em águas, com possibilidade de operação mais sustentável e seletiva em comparação a abordagens tradicionais (CARDOSO; CARDOSO; SILVA, 2021; KRISHNA *et al.*, 2022).

Entre os nanomateriais empregados, nanocatalisadores à base de óxidos metálicos (por exemplo, TiO_2 e ZnO) e seus compósitos/nanocompósitos têm recebido atenção por combinarem estabilidade, custo relativamente acessível e potencial para geração de espécies reativas sob irradiação, favorecendo a mineralização ou transformação de moléculas orgânicas recalcitrantes. Revisões recentes destacam avanços em rotas de síntese, modificação (dopagens, heteroestruturas e compósitos) e aplicações em degradação de contaminantes emergentes e efluentes, incluindo abordagens com nanofibras e matrizes nanoestruturadas de ZnO/TiO_2 , com ênfase em desempenho e limitações em condições reais (ARAÚJO *et al.*, 2023; MAPUKATA *et al.*, 2023; MATEI *et al.*, 2023; BAIG; SIDDIQUE; PANCHAL, 2025).

Apesar do interesse aplicado, a compreensão e comparabilidade entre estudos dependem criticamente da caracterização estrutural e morfológica dos nanocatalisadores. A difração de raios X (DRX) é uma técnica central para identificar fases cristalinas, estimar parâmetros de rede, avaliar cristalinidade e inferir tamanho médio de cristalitos, fornecendo uma base para discutir como a estrutura de um sólido se relaciona com a atividade catalítica. Revisões metodológicas recentes em catálise reforçam que, embora a DRX seja majoritariamente sensível ao *bulk*, ela permanece fundamental para estabelecer a fundação estrutural do catalisador e deve ser combinada a técnicas complementares para ampliar a interpretação em escala nano (BULAVCHENKO; VINOKUROV, 2023).

De modo complementar, a microscopia eletrônica de transmissão (MET) permite acessar informações diretas de morfologia, distribuição de tamanhos, grau de aglomeração, interfaces e heterogeneidades em escala nanométrica, aspectos frequentemente determinantes para disponibilidade de sítios ativos e para trajetórias de transporte de carga em fotocatalise. Abordagens contemporâneas de MET também enfatizam a tendência de quantificação e integração com outras técnicas para sustentar correlações entre estrutura e propriedade com maior robustez, o que é particularmente útil em materiais cristalinos e nanoestruturados (LI, 2024).

Diante disso, o presente artigo desenvolve uma revisão bibliográfica sobre aplicações de DRX e MET na caracterização de nanocatalisadores, com foco em óxidos metálicos e sistemas compósitos, destinados à degradação de contaminantes persistentes em água e efluentes. A contribuição esperada consiste em sistematizar quais parâmetros estruturais e morfológicos são mais frequentemente reportados, como são interpretados (isoladamente e em conjunto) e de que maneira sustentam inferências sobre desempenho catalítico, apontando lacunas e oportunidades para desenho racional de materiais e para estudos futuros voltados à mitigação de impactos ambientais (ARAÚJO *et al.*, 2023; MAPUKATA *et al.*, 2023; MATEI *et al.*, 2023).

Basicamente, a difração de raios X (DRX) é uma técnica consolidada para investigar a estrutura cristalina de materiais, particularmente útil na caracterização de óxidos metálicos usados como fotocatalisadores. Em termos físicos, a técnica se baseia na interação elástica entre radiação X e planos cristalográficos, gerando padrões de difração que permitem identificar fases cristalinas por comparação com padrões de referência, além de estimar parâmetros estruturais.

Em nanomateriais, a DRX é empregada para confirmar a formação de polimorfos relevantes (por exemplo, anatásio e rutilo no TiO_2 ; wurtzita no ZnO), verificar a presença de fases secundárias e, quando aplicável, inferir cristalinidade e efeitos de modificação (dopagem/heteroestruturas) sobre a rede cristalina. Em revisões recentes sobre fibras e nanomateriais de TiO_2 e ZnO , observa-se que a fase do TiO_2 pode variar entre anatásio, mistura anatásio–rutilo ou rutilo, conforme as condições de síntese e calcinação, enquanto ZnO aparece predominantemente na fase wurtzita, associada à estabilidade termodinâmica do material (MAPUKATA *et al.*, 2023).

Por sua vez, a microscopia eletrônica de transmissão (MET) permite observar diretamente morfologia e organização estrutural em escala nanométrica. Ao registrar a interação de um feixe de elétrons transmitido pela amostra, a MET possibilita (i) estimar tamanho e distribuição de tamanho de partículas, (ii) identificar formas e arranjos (nanopartículas, nanofibras, nanoplacas etc.), e (iii) avaliar grau de agregação/heterogeneidade.

Em materiais fotocatalíticos, essas informações são decisivas porque propriedades como área superficial efetiva, densidade de sítios ativos e transporte de

carga são sensíveis à morfologia e ao tamanho característico. Assim, a MET é frequentemente usada em conjunto com a DRX para correlacionar fase cristalina (DRX) e morfologia/tamanho (MET), sustentando interpretações sobre desempenho catalítico em degradação de contaminantes.

Ressalta-se que, por se tratar de revisões com recortes e objetivos distintos, nem todos os trabalhos reportam de forma padronizada fases cristalinas específicas (DRX) e faixas numéricas de tamanho (MET); em vários casos, as técnicas são discutidas como instrumentos de correlação estrutura–atividade, e os detalhes quantitativos aparecem principalmente quando as revisões sintetizam estudos de caso específicos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tratamento de efluentes e a lógica dos Processos Oxidativos Avançados

A presença de contaminantes orgânicos persistentes em efluentes industriais (p. ex., corantes, pesticidas e fármacos) impõe dificuldades aos métodos convencionais por envolver moléculas recalcitrantes, em concentrações variáveis e sob matrizes aquosas complexas. Nesse cenário, os Processos Oxidativos Avançados (POA/AOP) consolidaram-se como família de rotas capazes de gerar espécies altamente reativas (em especial o radical hidroxila), promovendo oxidação não seletiva e, em condições favoráveis, mineralização parcial ou total de poluentes. A literatura clássica sistematiza os AOP justamente por essa característica comum: a geração de espécies oxidantes de alta reatividade; bem como por suas diferentes configurações (ozônio, peróxido, UV e combinações) (GLAZE; KANG; CHAPIN, 1987; ANDREOZZI *et al.*, 1999). Para contaminantes que respondem bem a rotas do tipo Fenton e variantes fotoassistidas, algumas revisões discutem mecanismos, limitações operacionais e desenho de processo, o que reforça a necessidade de integrar química reacional e caracterização de materiais na avaliação de desempenho (PIGNATELLO; OLIVEROS; MACKAY, 2006).

2.2 Fotocatálise heterogênea e nanocatalisadores à base de óxidos metálicos

Entre os AOP, a fotocatalise heterogênea com semicondutores óxidos (como TiO_2 e ZnO) ocupa posição central por combinar ativação luminosa, formação de pares elétron-lacuna e geração subsequente de espécies reativas capazes de atacar contaminantes orgânicos. Fujishima e Honda (1972) é frequentemente apontado como marco do campo ao demonstrar, em eletrodo semicondutor, a viabilidade de processos fotoeletroquímicos associados à água. A partir dessa base, revisões clássicas consolidaram o entendimento de mecanismos fotoinduzidos, rotas de recombinação e variáveis materiais/operacionais críticas para aplicações ambientais (HOFFMANN *et al.*, 1995).

No contexto de remediação, a tendência à nanoestruturação decorre do aumento de área superficial, encurtamento de distâncias de difusão de carga e maior densidade de sítios ativos, o que pode favorecer cinética aparente de degradação. Porém, a própria literatura de revisão enfatiza que desempenho não é função apenas de “tamanho”: depende de fase cristalina, defeitos, morfologia, composição (dopagens/heteroestruturas) e estabilidade em meios reais, o que reforça a exigência de caracterização estrutural e morfológica robusta como pré-requisito para interpretações confiáveis (HOFFMANN *et al.*, 1995; CHONG *et al.*, 2010).

2.3 O papel da caracterização: estrutura, morfologia e textura como variáveis explicativas

Em nanocatalisadores, resultados de degradação (remoção, mineralização, subprodutos) só se tornam interpretáveis quando correlacionados a propriedades físico-químicas do material. Para propriedades texturais, técnicas de adsorção física (N_2) embasam cálculos clássicos de área específica pelo método BET e distribuição de poros (BJH), amplamente empregados na descrição de catalisadores e adsorventes (BRUNAUER; EMMETT; TELLER, 1938; BARRETT; JOYNER; HALENDA, 1951). Recomendações técnicas posteriores padronizam terminologia e interpretação de isotermas para reduzir ambiguidades e melhorar comparabilidade entre estudos (THOMMES *et al.*, 2015). Entretanto, quando o objetivo é compreender por que um material é mais ativo do que outro, duas famílias de técnicas são recorrentes e complementares: difração de raios X (DRX), para estrutura cristalina e fases, e microscopia eletrônica de transmissão (MET/TEM), para morfologia em escala nanométrica e aspectos de microestrutura.

2.4 Difração de raios X (DRX): fundamentos e informação extraível

A DRX se fundamenta na interação coerente de raios X com planos cristalinos, sendo a formulação de Bragg uma referência histórica para a interpretação de máximos de difração e espaçamentos interplanares (BRAGG; BRAGG, 1913). Em materiais nanoestruturados, alargamento de picos pode refletir redução do tamanho de cristalito e microdeformações; a relação proposta por Scherrer (1918) permanece como aproximação clássica para estimar tamanho de cristalito a partir do alargamento.

Do ponto de vista metodológico, a literatura consagrada em DRX organiza procedimentos de aquisição e análise para materiais policristalinos e amorfos, incluindo identificação de fases, parâmetros de rede e cuidados com instrumental e preparo de amostra (KLUG; ALEXANDER, 1974; CULLITY; STOCK, 2001). Quando se busca refinamento quantitativo, o método de Rietveld (1969) constitui marco na análise por perfis completos, permitindo refinar parâmetros estruturais a partir do padrão de pó, sob hipóteses e modelos apropriados. Em catalisadores, essas saídas são particularmente relevantes para: (i) distinguir polimorfos (por exemplo, em óxidos), (ii) detectar fases secundárias associadas a síntese/dopagem e (iii) acompanhar mudanças estruturais após uso/reuso.

2.5 Microscopia eletrônica de transmissão (MET/TEM): fundamentos e contribuição para nanocatalisadores

A MET fornece imagens e informações estruturais em escala nanométrica ao explorar o espalhamento de elétrons transmitidos por amostras finas, permitindo estimativas de tamanho de partícula, distribuição morfológica, grau de aglomeração e, quando aplicável, observações de defeitos e regiões cristalinas/amórficas. Textos de referência em microscopia eletrônica detalham princípios físicos e implicações práticas (interações elétron-matéria, formação de imagem, contraste e limitações instrumentais), com orientação direta para aplicações em ciência dos materiais (WILLIAMS; CARTER, 2009; EGERTON, 2005).

Em nanocatalisadores, a MET é particularmente útil para evitar inferências equivocadas baseadas apenas em DRX: dois materiais podem apresentar padrões de difração semelhantes e, ainda assim, exibir morfologias muito distintas (nanofibras, nanopartículas quase esféricas, placas/lamelas), o que afeta área exposta,

acessibilidade de sítios e transporte de massa em meio aquoso. Por outro lado, a MET também exige cautela metodológica: preparo de amostra, seleção de áreas e representatividade estatística podem influenciar a interpretação (WILLIAMS; CARTER, 2009; EGERTON, 2005).

2.6 Por que DRX e MET são tratadas como eixo central?

Na literatura clássica e em revisões de tecnologia aplicada, a combinação DRX + MET é frequentemente apresentada como “núcleo duro” para correlacionar fase/estrutura (DRX) e morfologia/microestrutura (MET), fornecendo o mínimo necessário para discutir relações estrutura–atividade com rigor (CULLITY; STOCK, 2001; WILLIAMS; CARTER, 2009; CHONG et al., 2010). Em paralelo, técnicas texturais (BET/BJH) e espectroscópicas podem ser mobilizadas como suporte para completar o quadro (BRUNAUER; EMMETT; TELLER, 1938; THOMMES *et al.*, 2015).

Compreende-se assim a necessidade metodológica de priorização de DRX e MET como eixo analítico, mantendo as demais técnicas como complementares: uma vez estabelecido o papel teórico das técnicas e os tipos de evidência que cada uma oferece, torna-se possível avaliar criticamente como os estudos recentes reportam (ou não) DRX e MET e como isso condiciona a solidez das conclusões sobre eficiência catalítica em efluentes.

3. METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido como pesquisa bibliográfica, portanto de natureza qualitativa, com objetivo voltado para identificação, organização e interpretação crítica de produções científicas já publicadas sobre a caracterização de nanocatalisadores aplicados ao tratamento de efluentes. A pesquisa bibliográfica foi adotada por permitir a sistematização de conhecimentos consolidados e a análise do estado do tema a partir de fontes secundárias (CERVO; BERVIAN; SILVA, 2007; GIL, 2022).

O procedimento metodológico consistiu nas etapas convencionais de pesquisas bibliográficas: (i) definição do problema e dos objetivos; (ii) delimitação conceitual do tema e construção dos descritores; (iii) levantamento das fontes; (iv) triagem e seleção do material; (v) leitura exploratória, seletiva e analítica; (vi) registro

sistemático por fichamento; e (vii) síntese interpretativa (SEVERINO, 2017; LAKATOS; MARCONI, 2021).

A busca bibliográfica foi conduzida com descritores em português e inglês, combinando termos ligados a: (a) nanocatalisadores e óxidos metálicos; (b) tratamento de efluentes/contaminantes persistentes; e (c) técnicas de caracterização DRX (XRD) e MET (TEM). As consultas foram realizadas nas bases e repositórios definidos pelo acesso disponível, priorizando filtros por recorte temporal (não mais do que 10 anos de publicação) e tipo de documento (artigos de revisão que tratam de nanocatalisadores com ênfase em óxidos metálicos e compósitos aplicados à degradação de contaminantes em água/efluentes e que discutem, de forma explícita, caracterização por DRX e/ou MET). Foram excluídos: (i) estudos fora do escopo ambiental (por exemplo, aplicações exclusivamente biomédicas sem interface com água/efluentes); (ii) textos sem relação com caracterização de nanomateriais; (iii) duplicatas; e (iv) documentos sem informação bibliográfica mínima para rastreabilidade.

A seleção do material bibliográfico ocorreu em duas fases: (1) triagem por título, resumo e palavras-chave; (2) leitura dos textos elegíveis. A extração de dados foi organizada em fichas contendo informações úteis: referência completa; tipo de material (revisão/ensaio/experimental); classes de nanocatalisadores discutidas (óxidos, compósitos, dopagens); contaminantes-alvo; contexto de aplicação (água, efluente industrial, matrizes complexas); e informações de caracterização associadas a DRX e MET (fases cristalinas, cristalinidade, tamanho de cristalito quando reportado; morfologia, distribuição de tamanhos, aglomeração/heterogeneidade quando reportado).

As informações extraídas foram agrupadas por eixos temáticos (por exemplo: classes de óxidos/compósitos; tipos de contaminantes; padrões recorrentes de caracterização; limitações metodológicas reportadas). A interpretação buscou evidenciar convergências, divergências e lacunas, mantendo a distinção entre evidência reportada e as inferências destes autores.

4. RESULTADOS

4.1. Composição e implicações do recorte

O conjunto selecionado de textos combina (i) revisões amplas sobre nanomateriais e processos avançados para tratamento de água/efluentes (CARDOSO; CARDOSO; SILVA, 2021; ARAÚJO *et al.*, 2023); (ii) revisões temáticas centradas em famílias de materiais e arquiteturas específicas, com destaque para ZnO visível-ativo e nanofibras de TiO_2/ZnO (BAIG; SIDDIQUE; PANCHAL, 2025; MAPUKATA *et al.*, 2023; MATEI *et al.*, 2023); e (iii) revisões sobre rotas de síntese “verdes” e caracterização de nanopartículas, úteis para compreender como a literatura descreve e valida nanomateriais por múltiplas técnicas, incluindo DRX e MET (KRISHNA *et al.*, 2022; VIJAYARAM *et al.*, 2024; YOSRI *et al.*, 2021; SHIRAZ *et al.*, 2024). Além dessas revisões, há um artigo experimental que exemplifica como compósitos/heteroestruturas são testados em degradação e desinfecção sob luz visível (AKINTUNDE *et al.*, 2023).

Do ponto de vista de “estado da arte”, essa seleção de artigos favorece uma leitura integrada: as revisões oferecem o mapa das estratégias (o que está sendo proposto para aumentar eficiência, estabilidade e aplicabilidade), enquanto o estudo experimental ilustra como essas estratégias são operacionalizadas e avaliadas em um recorte de poluente e matriz (AKINTUNDE *et al.*, 2023). Por outro lado, também impõe um limite: nem todos os textos são instrumento-centrados em DRX e MET; em muitos casos, essas técnicas aparecem como parte de um conjunto de caracterização e validação de desempenho, e não como objeto principal de discussão (KRISHNA *et al.*, 2022; YOSRI *et al.*, 2021).

4.2. Tendências consolidadas: óxidos metálicos e compósitos

As revisões apontam que o avanço recente no tratamento de água/efluentes por fotocatalise e POA tem sido impulsionado pela busca de materiais mais eficientes e sustentáveis, com ênfase em rotas que consigam responder à persistência de contaminantes orgânicos e à necessidade de tecnologias melhoradas (CARDOSO; CARDOSO; SILVA, 2021). Nesse cenário, os óxidos metálicos permanecem centrais, seja como semicondutores clássicos (TiO_2 , ZnO), seja como base para nanocompósitos e arquiteturas híbridas, pois combinam estabilidade e propriedades relevantes à geração de espécies oxidantes em condições fotoativadas, o que justifica

o foco das revisões em estratégias de modificação e desempenho (ARAÚJO *et al.*, 2023; MATEI *et al.*, 2023).

Araújo *et al.* (2023) enquadram esse movimento como um campo em expansão, ao revisar avanços no uso de nanocompósitos baseados em óxidos metálicos para descontaminação de água por fotocatalise e incluir uma abordagem bibliométrica para caracterizar a evolução do tema. Isso é particularmente útil para situar o leitor: a literatura não evolui apenas por “novos materiais”, mas por uma consolidação de linhas de pesquisa e por comparações cumulativas sobre quais arranjos tendem a ser mais promissores.

4.3. ZnO como plataforma: visível-ativo e “engenharia” de desempenho

Dentro do corpus, o ZnO aparece como um eixo estruturante. Duas revisões se complementam: enquanto Baig, Siddique e Panchal (2025) centram-se em ZnO visível-ativo e em estratégias para ampliar absorção e eficiência sob luz visível (dopagens metálicas e não metálicas, sensibilização e acoplamento semiconductor), Matei *et al.* (2023) fazem uma revisão extensa da aplicação de nanopartículas fotocatalíticas de ZnO para remoção de poluentes emergentes em água e efluentes.

A contribuição específica do texto de Baig, Siddique e Panchal (2025) é organizar o elenco de estratégias que procuram reduzir limitações práticas dos semicondutores e discutir aplicações em remediação ambiental (incluindo tratamento de água e desinfecção). Isso conversa diretamente com a exigência de aplicabilidade: ao priorizar luz visível como condição mais próxima de cenários operacionais, o que reforça uma direção dominante do campo (BAIG; SIDDIQUE; PANCHAL, 2025).

Matei *et al.* (2023), por sua vez, ampliam o foco para avaliação de ZnO como fotocatalisador. O texto explicita que se trata de uma revisão extensa sobre ZnO para remoção de poluentes emergentes, o que é relevante para estabelecer, no artigo, que a “promessa” do material é discutida não apenas em laboratório idealizado, mas em termos de aplicabilidade ao contexto de poluição hídrica contemporânea (MATEI *et al.*, 2023).

Do ponto de vista estrutural, o artigo reforça que a confirmação de fase cristalina por DRX é central para inferir pureza e cristalinidade do ZnO, destacando

picos típicos em $2\theta \approx 31,8^\circ$, $34,4^\circ$ e $36,3^\circ$, associados à estrutura hexagonal wurtzita (BAIG; SIDDIQUE; PANCHAL, 2025).

No recorte morfológico, os autores indicam que a faixa de tamanho em ZnO varia conforme dopante/condições de síntese, citando ordens de grandeza como 10–50 nm (ZnO dopado com V), 20–80 nm (ZnO dopado com S) e 15–40 nm (ZnO dopado com Dy), com MET evidenciando morfologias como nanobastões, nanopartículas ou nanosheets (BAIG; SIDDIQUE; PANCHAL, 2025).

4.4. Arquiteturas fibrosas e ganhos de aplicabilidade: eletrofição TiO_2 e ZnO

Um ponto em que os textos revisados adicionam densidade tecnológica é o recorte de nanofibras eletrofiadas. Mapukata *et al.* (2023) revisam a fabricação, modificação e aplicação de nanofibras de TiO_2 e ZnO para degradação de poluentes orgânicos emergentes, com destaque para classes como corantes e fármacos. A relevância desse enfoque, para o tema, é que ele desloca a discussão de “quais nanopartículas” para “quais arquiteturas e processos de fabricação podem melhorar desempenho e viabilidade”, uma vez que a eletrofição permite materiais com elevada área específica e propriedades semicondutoras em uma forma potencialmente mais adequada à integração em dispositivos e ao manuseio (MAPUKATA *et al.*, 2023).

Esse eixo também ajuda a explicar lacunas recorrentes em aplicações ambientais: mesmo quando um material é altamente ativo, o desafio passa a ser como estabilizá-lo, reaproveitá-lo e aplicá-lo em matrizes reais. Ainda que a revisão de Mapukata *et al.* (2023) seja focada em desempenho e progresso da literatura, o fato de priorizar uma forma (nanofibras) já sinaliza uma busca por soluções mais tecnológicas.

Para TiO_2 e ZnO eletrofiados, o artigo enfatiza a função do DRX em discriminar polimorfos/fases e comprovar a cristalização após calcinação, citando que, em exemplos compilados, o ZnO se apresenta como fase wurtzita, enquanto nanofibras de TiO_2 podem surgir como mistura anatásio/rutilo, com proporções reportadas como 90/10 e 80/20, a depender do protocolo térmico (MAPUKATA *et al.*, 2023).

Do ponto de vista do MET, o trabalho exemplifica a leitura cristalográfica via difração eletrônica (SAED), reportando, em caso discutido, padrão compatível com

estrutura hexagonal e indexação do plano [101], o que complementa a interpretação de cristalinidade e orientação cristalográfica obtida por DRX (MAPUKATA et al., 2023).

4.5. Integração com POA: quando o processo é tão importante quanto o material

Cardoso, Cardoso e Silva (2021) fornecem o enquadramento mais abrangente ao revisar processos oxidativos avançados (p. ex., persulfato, processos baseados em cloro/ NH_2Cl , UV/ H_2O_2 , Fenton, ozônio e fotocatalise heterogênea) e discutir o acoplamento de nanomateriais a esses processos. Para a discussão do estado da arte, esse texto é essencial porque reforça que o desempenho observado na degradação de contaminantes depende do arranjo processo + material + condições operacionais, e não apenas do catalisador isolado (CARDOSO; CARDOSO; SILVA, 2021). Isso é particularmente relevante para o contexto de efluentes industriais e matrizes complexas, em que efeitos de interferentes, pH, carga orgânica e espécies competidoras podem alterar a eficiência do processo.

Em termos de complementaridade, Araújo *et al.* (2023) e Cardoso, Cardoso e Silva (2021) convergem em uma mensagem: há pressão por tecnologias de tratamento mais eficientes e sustentáveis, e os nanomateriais aparecem como parte de uma estratégia de intensificação de processos (ARAÚJO et al., 2023; CARDOSO; CARDOSO; SILVA, 2021).

4.6. Evidência aplicada: compósitos g- C_3N_4 /ZnO–Cu e avaliação sob luz visível

O artigo de Akintunde *et al.* (2023) é útil para ancorar a discussão em um exemplo de aplicação e avaliação experimental. O estudo reporta um compósito envolvendo carbono nitreto grafítico (g- C_3N_4) e ZnO com Cu, avaliando desempenho na degradação de um contaminante orgânico (4-clorofenol) e na desinfecção de afluente de esgoto sob fonte de luz visível (LED ~450 nm), com desempenho destacado para uma formulação específica do compósito (AKINTUNDE *et al.*, 2023). Esse tipo de trabalho cumpre duas funções na revisão: (i) mostra o vínculo entre a tendência “visível-ativo” discutida em revisões (BAIG; SIDDIQUE; PANCHAL, 2025) e a prática experimental; (ii) reforça a lógica de que arquiteturas híbridas/compósitos

são investigadas para responder simultaneamente a degradação e desinfecção, ampliando a relevância ambiental do nanocatalisador (AKINTUNDE *et al.*, 2023).

4.7. Síntese “verde” e caracterização: DRX e MET

Embora o foco desta pesquisa seja DRX e MET na caracterização de nanocatalisadores para tratamento de água/efluentes, uma evidência importante dos textos selecionados é que, em revisões sobre síntese e aplicação de nanopartículas, DRX e MET aparecem explicitamente como técnicas recorrentes de caracterização.

Krishna, Chandra Mishra e Naika *et al.* (2022) revisam nanopartículas metálicas obtidas por abordagens sustentáveis e, de forma direta, listam DRX e MET entre técnicas empregadas para caracterização, ao lado de UV-Vis, MEV e FTIR, conectando esse conjunto de técnicas à avaliação de atividade catalítica para remoção de poluentes (KRISHNA *et al.*, 2022). De modo convergente, Yosri *et al.* (2021) discutem síntese verde a partir de organismos marinhos e explicitam a caracterização por técnicas incluindo MET e DRX, além de outras metodologias espectroscópicas e microscópicas. Essas duas revisões sustentam, com verificabilidade, uma afirmação central para o objetivo desta revisão: DRX e MET são parte do núcleo de técnicas usadas para validar nanopartículas produzidas por rotas “verdes” e relacionar propriedades físico-químicas com aplicação (KRISHNA *et al.*, 2022; YOSRI *et al.*, 2021).

Vijayaram *et al.* (2024) reforçam esse quadro ao revisar síntese verde e caracterização de nanopartículas metálicas, com um discurso abrangente sobre métodos/condições de síntese e técnicas de caracterização, conectando o tema a aplicações ambientais e biomédicas (VIJAYARAM *et al.*, 2024). Já Shiraz *et al.* (2024) abordam “nanopartículas fitogênicas”, com ênfase em vias de síntese, caracterização e funções em plantas. Ainda que não seja um texto centrado em efluentes, não deixa de demonstrar como revisões recentes tratam a caracterização de nanopartículas como etapa indispensável do campo (SHIRAZ *et al.*, 2024). O uso desses textos, na discussão, precisa ser criterioso: eles sustentam o argumento metodológico e instrumental (como DRX/MET são mobilizadas), mas nem sempre sustentam, por si só, inferências específicas sobre degradação de efluentes.

4.8. Recorte por contaminante e matriz: estrona como exemplo

O artigo de Sánchez-Barboza, Villagran-Sánchez e Armenise-Gil (2019) é o único da seleção feita que se apresenta explicitamente como revisão sistemática focada em um contaminante (estrona). Ele agrega valor por: (i) representar um padrão metodológico de revisão (triagem e síntese de condições experimentais) e (ii) discutir como condições (carga de catalisador, pH e matriz) influenciam remoção por fotocatalise, incluindo observações de que taxas/removibilidade variam entre água ultrapura e águas residuárias (SANCHEZ-BARBOZA; VILLAGRAN-SANCHEZ; ARMENISE-GIL, 2019). Ao que importa para esta pesquisa, isso deve ser tratado como um “bloco” complementar: um exemplo de como a literatura pode sistematizar condições operacionais para um contaminante específico, sem extrapolar indevidamente conclusões para todos os poluentes.

4.9. Expansão de fronteira: MOF modificados com TiO_2 e integração CO_2

Zango et al. (2024) revisam estruturas de MOF modificados com nanopartículas de TiO_2 visando conversão de CO_2 e remediação de águas residuárias. Esse texto amplia o horizonte das leituras ao inserir os nanomateriais em arquiteturas porosas/híbridas e em agendas contemporâneas de captura/conversão de CO_2 articuladas a remediação ambiental (ZANGO *et al.*, 2024). Para os propósitos deste trabalho, a utilidade reside em reforçar que o “estado da arte” inclui também materiais de fronteira (MOF-baseados) que demandam caracterização estrutural/morfológica para sustentar alegações de desempenho, embora a profundidade específica em DRX e MET varie de texto para texto (ZANGO *et al.*, 2024).

4.10. Síntese interpretativa geral

De acordo com a revisão bibliográfica realizada, alguns pontos de convergência técnica puderam ser mais bem compreendidos: (1) Macrovisão de processos e necessidade ambiental: Cardoso, Cardoso e Silva (2021) e Araújo *et al.* (2023) fornecem o enquadramento de por que há busca por tecnologias mais eficientes e sustentáveis, e por que nanomateriais são investigados nessa rota (CARDOSO; CARDOSO; SILVA, 2021; ARAÚJO *et al.*, 2023); (2) Plataforma ZnO e visível-ativo: Baig, Siddique e Panchal (2025) e Matei *et al.* (2023) dão densidade ao eixo ZnO, articulando estratégias de modificação e a agenda de poluentes emergentes (BAIG;

SIDDIQUE; PANCHAL, 2025; MATEI *et al.*, 2023); (3) Arquiteturas para aplicabilidade: Mapukata *et al.* (2023) introduzem nanofibras eletrofiadas (TiO_2/ZnO) como rota que conversa com escalabilidade e integração em dispositivos, ainda que o campo permaneça desafiador (MAPUKATA *et al.*, 2023); (4) Evidência aplicada: Akintunde *et al.* (2023) exemplificam avaliação sob luz visível e aplicação combinada (degradação + desinfecção) (AKINTUNDE *et al.*, 2023); e (5) Caracterização e validação instrumental: Revisões sobre síntese verde explicitam DRX e MET como técnicas recorrentes, ajudando a sustentar o foco instrumental do artigo (KRISHNA *et al.*, 2022; YOSRI *et al.*, 2021; VIJAYARAM *et al.*, 2024).

Entretanto, algumas lacunas permanecem e podem ser exploradas em futuras pesquisas, particularmente no que se refere à (1) pouca centralidade exclusiva em DRX+MET: vários textos citam DRX e MET como técnicas importantes, mas nem todos organizam a discussão em torno delas (KRISHNA *et al.*, 2022; YOSRI *et al.*, 2021); (2) heterogeneidade de matrizes e contaminantes: a literatura revisada trabalha com diferentes classes de poluentes e matrizes, e a revisão sistemática de estrona chama atenção para dependência de condições e matriz, reforçando que generalizações devem ser cautelosas (SANCHEZ-BARBOZA; VILLAGRAN-SANCHEZ; ARMENISE-GIL, 2019); (3) transição entre “performance” e “prova estrutural/morfológica”: o tem vem avançando em desempenho e arquiteturas, mas um desafio recorrente é padronizar o quanto DRX e MET são reportadas e correlacionadas de forma consistente com desempenho, especialmente em matrizes reais (CARDOSO; CARDOSO; SILVA, 2021; ARAÚJO *et al.*, 2023).

Como esta revisão bibliográfica abordou principalmente nanocatalisadores à base de TiO_2 e ZnO , bem como nanocompósitos e rotas de modificação, a comparação de eficiência entre ambos depende de variáveis que variam amplamente entre os trabalhos revisados (matriz aquosa, contaminante, pH, carga catalítica, irradiância e espectro), além de diferenças intrínsecas do material (fase cristalina e morfologia). As evidências apontaram que a interpretação mais consistente não se dá por *ranking* entre óxidos, mas pela análise de adequação ao cenário de aplicação e pela correlação estrutura–propriedade, em que DRX e MET são fundamentais para sustentar comparações entre rotas de síntese, dopagens e arquiteturas (BAIG; SIDDIQUE; PANCHAL, 2025; MATEI *et al.*, 2023; MAPUKATA *et al.*, 2023). Em termos práticos, estudos sob condições padronizadas e com avaliação de

estabilidade/reuso tendem a produzir comparações mais robustas, o que reforça as lacunas e direções de pesquisa discutidas na próxima seção deste artigo (CARDOSO; CARDOSO; SILVA, 2021).

CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica desenvolvida indica que o uso de nanomateriais - com ênfase em óxidos metálicos e sistemas híbridos/compósitos - permanece como uma das frentes mais consolidadas e, ao mesmo tempo, mais dinâmicas para enfrentar a persistência de contaminantes orgânicos em água e efluentes, sobretudo quando articulada a processos oxidativos avançados. Os resultados apontam para a ideia de que ganhos de desempenho têm sido buscados principalmente por engenharia de material (dopagens, heteroestruturas, compósitos e matrizes) e por engenharia de forma (por exemplo, nanofibras), com atenção crescente ao objetivo de viabilizar atividade sob luz visível e de aproximar o desempenho de condições mais realistas de aplicação.

No que se refere ao foco específico deste trabalho, a literatura analisada sustenta que DRX e MET permanecem técnicas centrais para estabelecer relações estrutura-propriedade em nanocatalisadores, por fornecerem evidências complementares: a DRX contribui para a identificação de fases cristalinas e parâmetros estruturais, enquanto a MET permite observar morfologia em escala nanométrica, distribuição de tamanhos, heterogeneidades e, em alguns casos, interfaces relevantes em compósitos.

As revisões voltadas à síntese e caracterização de nanopartículas, particularmente aquelas que discutem rotas sustentáveis (“verdes”), reforçam a recorrência de DRX e MET como parte do núcleo de técnicas empregadas na validação de nanomateriais e na sustentação de inferências sobre desempenho. Ainda assim, uma conclusão crítica é que muitos trabalhos, mesmo quando altamente relevantes para o tratamento ambiental, não organizam a discussão de maneira instrumento-centrada em DRX e MET; em diversos casos, essas técnicas aparecem como componentes de um conjunto maior de caracterização, o que limita a profundidade comparativa quando o objetivo é revisar especificamente como DRX e MET são usadas.

Do ponto de vista aplicado, observa-se que estudos e revisões recentes enfatizam a transição para materiais visível-ativos e a expansão de sistemas híbridos, como exemplificado por trabalhos que combinam degradação de contaminantes e desinfecção sob luz visível, reforçando a busca por soluções mais integradas e ambientalmente relevantes. Em paralelo, a revisão sistemática voltada a um contaminante específico evidenciou a importância de considerar matriz e condições operacionais, sinalizando que generalizações devem ser feitas com cautela e que a comparabilidade entre estudos pode ser limitada quando há grande variabilidade de condições experimentais.

Como agenda de trabalhos futuros, esta pesquisa sugere a necessidade de: (i) maior padronização no reporte de resultados de DRX e MET (incluindo informações mínimas comparáveis), (ii) avaliação mais frequente em matrizes reais de efluentes industriais e sistemas aquosos complexos, e (iii) aprofundamento das correlações entre parâmetros estruturais/morfológicos e métricas ambientais (eficiência de remoção, mineralização, estabilidade e possibilidade de reuso).

Em síntese, os resultados sugerem que avanços significativos dependem não apenas de novas formulações de materiais, mas também de caracterização consistente e de critérios de aplicabilidade ambiental que permitam transpor resultados laboratoriais para cenários de tratamento de efluentes com maior confiabilidade.

REFERÊNCIAS

- AKINTUNDE, O. O.; HU, J.; KIBRIA, M. G.; POGOSIAN, S.; ACHARI, G. A facile synthesis process of GCN/ZnO-Cu nanocomposite and the evaluation of the performance for the photocatalytic degradation of organic pollutants and the disinfection of wastewater under visible light. **Chemosphere**, v. 344, p. 140287, 2023. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653523025572>
- ANDREOZZI, R.; CAPRIO, V.; INSOLA, A.; MAROTTA, R. Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. **Catalysis Today**, v. 53, p. 51-59, 1999. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920586199001029>
- ARAÚJO, E. S. et al. A Review on the Use of Metal Oxide-Based Nanocomposites for the Remediation of Organics-Contaminated Water via Photocatalysis: Fundamentals, Bibliometric Study and Recent Advances. **Toxics**, v. 11, n. 8, p. 658, 2023. Disponível em <https://www.mdpi.com/2305-6304/11/8/658>

- BAIG, A.; SIDDIQUE, M.; PANCHAL, S. A Review of Visible-Light-Active Zinc Oxide Photocatalysts for Environmental Application. **Catalysts**, v. 15, n. 2, p. 100, 2025. DOI: 10.3390/catal15020100. Disponível em <https://www.mdpi.com/2073-4344/15/2/100>
- BARRETT, E. P.; JOYNER, L. G.; HALENDA, P. P. The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. **Journal of the American Chemical Society**, v. 73, n. 1, p. 373-380, 1951. Disponível em <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja01145a126>
- BRAGG, W. H.; BRAGG, W. L. The reflection of X-rays by crystals. **Proceedings of the Royal Society A**, v. 88, n. 605, p. 428-438, 1913. Disponível em <https://royalsocietypublishing.org/rspa/article/88/605/428/4492/The-reflection-of-X-rays-by-crystals>
- BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938. Disponível em <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja01269a023>
- BULAVCHENKO, O. A.; VINOKUROV, Z. S. In Situ X-ray Diffraction as a Basic Tool to Study Oxide and Metal Oxide Catalysts. **Catalysts**, v. 13, n. 11, art. 1421, 2023. Disponível em <https://www.mdpi.com/2073-4344/13/11/1421>
- CARDOSO, I. M. F.; CARDOSO, R. M. F.; SILVA, J. C. G. E. Advanced Oxidation Processes Coupled with Nanomaterials for Water Treatment. **Nanomaterials**, v. 11, n. 8, p. 2045, 2021. Disponível em <https://www.mdpi.com/2079-4991/11/8/2045>
- CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. da. **Metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007. Disponível em <https://pt.scribd.com/document/463411302/CERVO-BERVIAN-DA-SILVA-METODOLOGIA-CIENTIFICA-pdf>
- CHONG, M. N. et al. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. **Water Research**, v. 44, n. 10, p. 2997-3027, 2010. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135410001739>
- CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-Ray Diffraction**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2014. Disponível em [https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/B.D.%20Cullity,%20S.R.%20Stock%20-%20Elements%20of%20X-Ray%20Diffraction-Pearson%20Education%20Limited%20\(2014\).pdf](https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/B.D.%20Cullity,%20S.R.%20Stock%20-%20Elements%20of%20X-Ray%20Diffraction-Pearson%20Education%20Limited%20(2014).pdf)
- EGERTON, R. F. **Physical Principles of Electron Microscopy**: An Introduction to TEM, SEM, and AEM. New York: Springer, 2005. Disponível em <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-39877-8>
- FUJISHIMA, A.; HONDA, K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. **Nature**, v. 238, p. 37-38, 1972. Disponível em <https://www.nature.com/articles/238037a0>
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022. Disponível em

https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/150/o/Anexo_C1_como_elaborar_projeto_de_pesquisa_-_antonio_carlos_gil.pdf

- GLAZE, W. H.; KANG, J.-W.; CHAPIN, D. H. The Chemistry of Water Treatment Processes Involving Ozone, Hydrogen Peroxide and Ultraviolet Radiation. **Ozone: Science & Engineering**, v. 9, n. 4, p. 335-352, 1987. Disponível em <http://tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01919518708552148>
- HOFFMANN, M. R. et al. Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis. **Chemical Reviews**, v. 95, n. 1, p. 69-96, 1995. Disponível em <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/cr00033a004>
- LI, S. Transmission electron microscopy: quantification and integration of knowledge for materials science and nanotechnology. **Materials**, v. 17, n. 12, art. 2894, 2024. Disponível em <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10856096/>
- KLUG, H. P.; ALEXANDER, L. E. **X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1974. Disponível em <https://archive.org/details/xraydiffractionp00klug/page/n5/mode/2up>
- KRISHNA, P. G. et al. Photocatalytic activity induced by metal nanoparticles synthesized by sustainable approaches: a comprehensive review. **Frontiers in Chemistry**, v. 10, art. 917831, 2022. DOI: 10.3389/fchem.2022.917831. Disponível em <https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2022.917831/full>
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de metodologia científica**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021. Disponível em https://cursosextensao.usp.br/pluginfile.php/300164/mod_resource/content/1/MC2019%20Marconi%20Lakatos-met%20cient.pdf
- MAPUKATA, S. et al. Review of the recent advances on the fabrication, modification and application of electrospun TiO₂ and ZnO nanofibers for the degradation of emerging organic pollutants. **Frontiers in Chemical Engineering**, 2023. Disponível em <https://www.frontiersin.org/journals/chemical-engineering/articles/10.3389/fceng.2023.1304128/full>
- MATEI, E. et al. ZnO nanostructured matrix as nexus catalysts for the removal of emerging pollutants from water and wastewater: an extensive review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 54, p. 114779-114821, 2023. Disponível em <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-30713-3>
- PIGNATELLO, J. J.; OLIVEROS, E.; MACKAY, A. Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 36, n. 1, p. 1-84, 2006. Disponível em <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643380500326564>
- RIETVELD, H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. **Journal of Applied Crystallography**, v. 2, n. 2, p. 65-71, 1969. Disponível em <https://journals.iucr.org/paper?pii=S0021889869006558>

- SANCHEZ-BARBOZA, L.; VILLAGRAN-SANCHEZ, P. S.; ARMENISE-GIL, S. A. Removal of estrone in water and wastewater by photocatalysis: a systematic review. **Producción + Limpia (Rev. P+L)**, Caldas, v. 14, n. 1, p. 18-32, jun. 2019. Disponível em <https://pdfs.semanticscholar.org/8f71/57a5518b79d5ae2db553a1b3158118a7142f.pdf>
- SCHERRER, P. Bestimmung der Größe und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen. **Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse**, p. 387-409, 1918. Disponível em https://ia600607.us.archive.org/view_archive.php?archive=/8/items/crossref-pre-1923-scholarly-works/10.1007%252F978-1-4684-2661-8_7.zip&file=10.1007%252F978-3-662-33915-2_7.pdf
- SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. São Paulo: Cortez, 2017. Disponível em [https://www.ufrb.edu.br/ccaab/images/AEPE/Divulga%C3%A7%C3%A3o/LIVROS/Metodologia do Trabalho Cient%C3%ADfico - 1%C2%AA Edi%C3%A7%C3%A3o - Antonio Joaquim Severino - 2014.pdf](https://www.ufrb.edu.br/ccaab/images/AEPE/Divulga%C3%A7%C3%A3o/LIVROS/Metodologia%20do%20Trabalho%20Cient%C3%ADfico%20-%20Antonio%20Joaquim%20Severino%20-%202014.pdf)
- SHIRAZ, M.; IMTIAZ, H.; AZAM, A.; HAYAT, S. Phytogenic nanoparticles: synthesis, characterization, and their roles in physiology and biochemistry of plants. **Biomaterials**, v. 37, n. 1, p. 23-70, 2024. Disponível em <https://link.springer.com/article/10.1007/s10534-023-00542-5>
- THOMMES, M. et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2015. Disponível em <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/pac-2014-1117/html>
- VIJAYARAM, S. et al. Applications of green synthesized metal nanoparticles: a review. **Biological Trace Element Research**, v. 202, n. 1, p. 360-386, 2024. Disponível em <https://link.springer.com/article/10.1007/S12011-023-03645-9>
- WILLIAMS, D. B.; CARTER, C. B. **Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science**. 2. ed. New York: Springer, 2009. Disponível em https://www.cur.ac.rw/mis/main/library/documents/book_file/digital-66630b222e2283.91709642.pdf
- YOSRI, N.; KHALIFA, S. A. M.; GUO, Z.; XU, B.; ZOU, X.; EL-SEEDI, H. R. Marine organisms: Pioneer natural sources of polysaccharides/proteins for green synthesis of nanoparticles and their potential applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 193, pt. B, p. 1767-1798, 2021. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.10.229. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813021024107>
- ZANGO, Z. U. et al. A review on titanium oxide nanoparticles modified metal-organic frameworks for effective CO₂ conversion and efficient wastewater remediation. **Environmental Research**, v. 252, pt. 3, p. 119024, 2024. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935124009289>