



PBPC
ISSN 2674-9432



Qualis A3
CAPES 2021-2024



DOI - Crossref

Latindex

Indexado no
Google Acadêmico

SÍNTESE DE CARACTERIZAÇÃO DE NANOFERRITAS DE ZINCO VISANDO APLICAÇÃO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Juliana Maria McCartney da Fonseca ¹; Virgínia Turatti Coladetti; Eduardo Gavazzoni; Juliana Regina Kloss; Wellington Mazer



<https://doi.org/10.36557/2674-9432.2026v5n4p624-636>

Artigo recebido em 1 de Abril e publicado em 2 de Junho de 2026

ARTIGO ORIGINAL

RESUMO

Dentre as ferritas descritas na literatura, destaca-se a ferrita de zinco ($ZnFe_2O_4$), um óxido misto, com estrutura de espinélio e que, quando obtida na forma de nanopartículas, apresenta elevada área superficial, propriedades físico-químicas particulares e modificações no comportamento magnético. Devido a isso, esse material tem despertado interesse em diversas frentes tecnológicas para diferentes finalidades como processos catalíticos e fotocatalíticos, remediação ambiental, produção de sensores e dispositivos eletroquímicos, além do desenvolvimento de compósitos cimentícios. Entre as rotas de síntese possíveis para obtenção deste óxido, a coprecipitação destaca-se pela simplicidade operacional, escalabilidade e viabilidade econômica, sendo frequentemente apontada como uma alternativa promissora para a produção desse material em larga escala. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo sintetizar e caracterizar as nanoferritas de zinco, visando aplicações futuras em matrizes cimentícias. As nanopartículas foram obtidas por coprecipitação em meio aquoso, utilizando-se cloreto de zinco ($ZnCl_2$) e cloreto férrico ($FeCl_3$) como sais precursores e hidróxido de sódio ($NaOH$), como agente precipitante. As técnicas utilizadas inicialmente para avaliação do material foram difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). No que se refere à obtenção do material, a rota de coprecipitação mostrou viabilidade por combinar simplicidade operacional, possibilidade de escalonamento e menor exigência de infraestrutura, características que favorecem a inserção em processos industriais da construção civil, se comparada a rotas de síntese mais complexas. No DRX, a correspondência entre o pico principal em torno de 35° e a

reflexão característica da estrutura espinélio, associada ao ajuste obtido na análise restrita ao sistema Zn–Fe–O, fornece evidência favorável à presença de ZnFe₂O₄. As micrografias de MEV evidenciaram que o material apresenta morfologia heterogênea, com superfícies irregulares e aspecto compatível com agregação de partículas finas. Deste modo, conclui-se nesta etapa preliminar, que o método de síntese utilizado permitiu a obtenção de um produto estruturalmente compatível com a ferrita de zinco, com potencial de escalonamento produtivo e perspectiva de aplicação em futuras em matrizes cimentícias.

Palavras-chave: ZnFe₂O₄. Coprecipitação. Caracterização microestrutural.

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZINC NANOFERRITES AIMING AT APPLICATION IN CEMENTITIOUS MATRICES

ABSTRACT

Among the ferrites described in the literature, zinc ferrite (ZnFe₂O₄), stands out as a mixed oxide with a spinel structure. When synthesized as nanoparticles, it exhibits a high surface area, unique physicochemical properties, and modifications in magnetic behavior. Consequently, this material has garnered interest across various technological fronts for diverse purposes, such as catalytic and photocatalytic processes, environmental remediation, the production of sensors and electrochemical devices, and the development of cementitious composites. Among the possible synthesis routes for obtaining this oxide, co-precipitation is noteworthy for its operational simplicity, scalability, and economic viability; it is frequently identified as a promising alternative for large-scale production. Thus, this study aims to synthesize and characterize zinc nanoferrites for future applications in cementitious matrices. The nanoparticles were obtained via co-precipitation in an aqueous medium, using zinc chloride (ZnCl₂) and ferric chloride (FeCl₃) as precursor salts, and sodium hydroxide (NaOH) as the precipitating agent. The techniques initially employed for material evaluation were X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). Regarding the synthesis of the material, the coprecipitation route proved viable by combining operational simplicity, scalability, and lower infrastructure requirements—characteristics that favor its integration into industrial construction processes compared to more complex synthesis routes. In the XRD analysis, the correspondence between the main peak at approximately 35° and the characteristic reflection of the spinel structure, associated with the fit obtained in the analysis restricted to the Zn–Fe–O system, provides favorable evidence for the presence of (ZnFe₂O₄). SEM micrographs revealed that the material exhibits a heterogeneous morphology with irregular surfaces and an appearance consistent with the aggregation of fine particles. Therefore, it is concluded in this preliminary stage that the synthesis method utilized allowed for the attainment of a product structurally compatible with zinc ferrite, possessing potential for production scaling and prospects for future application in cementitious matrices.



SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE NANOFERRITAS DE ZINCO VISANDO APLICAÇÃO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Fonseca *et. al.*

Keywords: ZnFe₂O₄. Coprecipitation. Microstructural characterization.

Instituição afiliada – Universidade Tecnológica Federal do Paraná -UTFPR

Autor correspondente: *Juliana Maria McCartney da Fonseca*

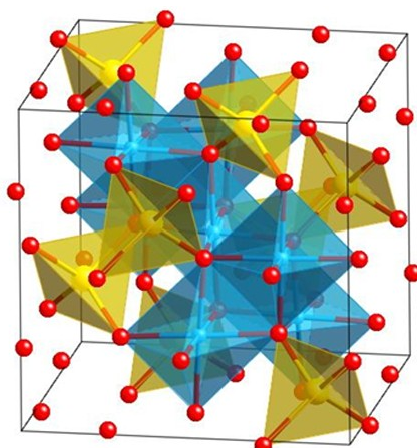
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



1 INTRODUÇÃO

A ferrita de zinco ($ZnFe_2O_4$) é definida como um óxido misto pertencente à família das ferritas de estrutura espinélio cúbica normal, de fórmula geral AB_2O_4 . Em sua forma *bulk*, cristaliza no grupo espacial $Fd\bar{3}m$ (nº 227), com parâmetro de rede em torno de 8,44 Å. Nesse arranjo, conforme ilustrado na Figura 1, os íons de zinco (Zn^{2+}) ocupam preferencialmente os sítios tetraédricos A, representados em amarelo, enquanto os íons de ferro (Fe^{3+}) se distribuem majoritariamente nos sítios octaédricos B, representados em azul; os átomos de oxigênio, por sua vez, aparecem em vermelho, compondo a rede aniônica que sustenta o arranjo cristalino do material (Kamazawa *et al.*, 2003; Granone *et al.*, 2018; Bohra *et al.*, 2021; Tabesh *et al.*, 2023).

Figura 1– Estrutura atômica da ferrita de zinco do tipo espinélio



Fonte: (Graef; Mchenry, 2012)

Contudo, em escala nanométrica, a estrutura sofre inversão catiônica parcial, redistribuindo as espécies divalentes e trivalentes em toda a extensão, aumentando a energia superficial. Essa nova redistribuição eletrônica altera as interações de troca Fe–O–Fe, especialmente entre os sub-retículos A e B, resultando em mudanças expressivas nas propriedades magnéticas, elétricas e superficiais do material. Assim, quanto menor a partícula, maior a influência dos efeitos de superfície e da organização catiônica sobre o comportamento funcional da ferrita. (Pradeep *et al.*, 2011).

Adicionalmente, a $ZnFe_2O_4$ é descrita como um semicondutor de *band gap* na faixa de 1,9 a 2,1 eV, o que significa que seus elétrons podem ser excitados rapidamente, com capacidade de absorção de luz, por radiação UV-Vis (<700 nm), para gerar pares elétrons-lacunas (elétrons móveis e vacâncias eletrônicas que favorecem os processos de transferência de carga), diversificando as aplicações funcionais do material (Granone *et al.*, 2018; Tabesh *et al.*, 2023; Cai *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2026). Os autores Bohra *et al.* (2021), Bhattu *et al.* (2024) relatam que partículas na faixa de 3–11 nm apresentam um maior *band gap*, implicando em uma maior inversão catiônica, com diferenças magnéticas marcantes em razão dos efeitos de confinamento quântico, alterando

também a resposta óptica do material. Ademais, Sanchez-Lievanos *et al.* (2021) reiteram a distribuição catiônica como um parâmetro central para a compreensão das propriedades eletrônicas, magnéticas e ópticas em nanocristais de ferritas espinélio.

Diversas rotas de síntese têm sido empregadas para obtenção de ferritas, como métodos hidrotérmicos, solvotérmicos, combustão, sol-gel e coprecipitação. Esta última, destaca-se devido à simplicidade de obtenção, menor custo relativo e possibilidade de uso de sais metálicos solúveis em meio aquoso (Bhattu *et al.*, 2024). Estudos comparativos demonstram que a obtenção de uma fase espinélio pura por essa via requer um controle rigoroso do pH, tipicamente na faixa de 7 a 12, uma vez que valores extremos podem levar à redissolução de intermediários ou à formação de fases secundárias como $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (Nguyen *et al.*, 2022; Hejazi *et al.*, 2024). A temperatura de calcinação posterior também é um fator crítico e variável, podendo oscilar entre 600 °C e 1000 °C, influenciando diretamente o tamanho de cristalito (30 a 85 nm) e o grau de inversão catiônica, que por sua vez modula as propriedades magnéticas do material, como a transição entre o comportamento superparamagnético e ferrimagnético (Nguyen *et al.*, 2016; Puspitasari *et al.*, 2021; Hejazi *et al.*, 2024).

Diante desse panorama, evidencia-se que as propriedades estruturais e morfológicas da ferrita de zinco são fortemente influenciadas, não apenas pelos parâmetros de síntese, mas também pela eventual realização de etapas posteriores de tratamento térmico. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi sintetizar e caracterizar as nanoferritas de zinco obtidas pelo método de coprecipitação, visando aplicações futuras em matrizes cimentícia

2 METODOLOGIA

As nanopartículas de ferrita de zinco foram sintetizadas por coprecipitação em meio aquoso, utilizando-se cloreto de zinco (ZnCl_2) e cloreto férrico (FeCl_3) como sais precursores e hidróxido de sódio (NaOH) como agente precipitante, metodologia amplamente relatada na literatura e descrita por Gavazzoni (2024).

Inicialmente, preparou-se a solução alcalina precipitante por meio da dissolução de 4 g de NaOH em 200 mL de água destilada, sob agitação manual, seguida de transferência para balão volumétrico de 1 L e complementação do volume com água destilada até a marca de aferição, obtendo-se solução de concentração 0,1 mol/L. Em paralelo, 1,36 g de ZnCl_2 e 3,24 g de FeCl_3 foram pesados em balança analítica Shimadzu, modelo ATX224R, com capacidade máxima de 220 g e resolução de 0,1 mg e dissolvidos simultaneamente em 100 mL de água destilada. A solução contendo os sais metálicos foi mantida sob aquecimento a 60 °C e agitação mecânica constante de 900 rpm. Após a estabilização da temperatura, o sistema permaneceu em isoterma por 1 h. Na sequência, a solução de NaOH foi adicionada gradualmente, em alíquotas de 100 mL, com intervalo de 5 min entre as adições, até o meio reacional atingir pH 11, monitorado com fita indicadora. Nessas condições, o volume adicionado da solução alcalina foi de aproximadamente 813 mL.

Concluída a etapa reacional, o aquecimento foi interrompido e a suspensão resultante permaneceu em repouso por 12 h, a fim de favorecer a decantação do precipitado. O sobrenadante alcalino foi removido e o material sólido foi filtrado e lavado com água destilada até pH 7. Em seguida, o precipitado foi seco em estufa a 65 °C por 72 h. Nas condições adotadas, cada batelada foi produzida a partir de 1,36 g de ZnCl₂ e 3,24 g de FeCl₃, resultando em rendimento médio de aproximadamente 72,6%.

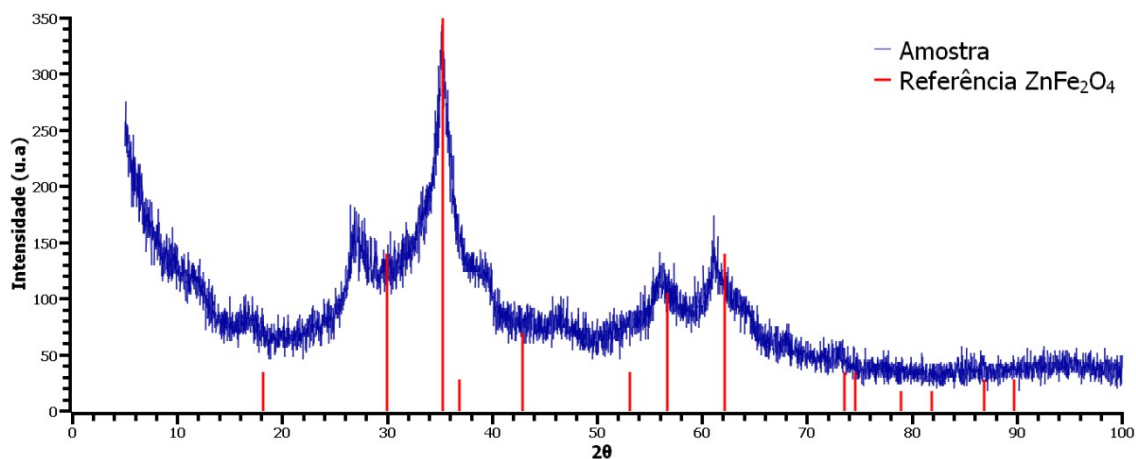
A caracterização estrutural do material sintetizado foi realizada por difração de raios X. Utilizou-se difratômetro Shimadzu, modelo XRD-7000, operando sob tensão de 60 kV e potência de 3 kW, com tubo gerador de raios X de cobre para análise de fases. Os difratogramas obtidos foram tratados e analisados com auxílio do *software Profex versão 5.6.1*, empregado como interface gráfica para processamento dos dados.

As análises de microscopia eletrônica de varredura da nanoferrita de zinco foram realizadas no microscópio Zeiss modelo EVO MA15, com filamento de tungstênio, detectores de elétrons secundários em alto vácuo, pressão variável e elétrons retroespalhados, detectores EDS X-Max de 20 mm² e WDS IncaWave 500 com cristais LiF (200), PET, TAP, LSM80N e LSM80E. As micrografias foram obtidas em diferentes ampliações 1.000×, 5.000× e 10.000×, de modo a permitir a análise visual em distintas escalas.

3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

O padrão difratométrico da amostra mostrou um pico dominante em torno de 35° e feições amplas nas regiões de 27°, 56° e 61° em 2θ, conforme se observa na Figura 2. Em conjunto, essas características são compatíveis com domínios cristalinos nanométricos e possível sobreposição entre contribuições difratométricas de mais de uma fase (Volkov *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2023; Sassi *et al.*, 2024). Observou-se que a melhor concordância ocorre na região de aproximadamente 35°, compatível com a reflexão (311), enquanto as bandas largas em torno de 56° e 61° apresentaram apenas correspondência parcial com as reflexões (511) e (440). Por outro lado, a feição observada em torno de 27°, a princípio, não coincidiu diretamente com a reflexão (220), reportada para ZnFe₂O₄ em aproximadamente 30°, o que reforça a necessidade de interpretar o padrão com cautela e de considerar a possibilidade de coexistência de fases secundárias.

Figura 2 – Difratograma de raios X da amostra



Do ponto de vista cristalográfico, os resultados permitem sugerir, em caráter preliminar, a formação de $ZnFe_2O_4$. Na literatura, a ferrita de zinco com estrutura espinélio cúbica é usualmente associada à presença de reflexões características em torno de $29,9-30,1^\circ$, $35,2-35,4^\circ$, $42,8-43,0^\circ$, $53,0-53,7^\circ$, $56,6-57,3^\circ$ e $62,2-62,9^\circ$, atribuídas aos planos (220), (311), (400), (422), (511) e (440), respectivamente (Mo et al., 2023; Cai et al., 2025; Abdel-Azim et al., 2024). Nesse contexto, o pico observado na região de 35° é compatível com a reflexão (311), usualmente a mais intensa para $ZnFe_2O_4$, enquanto os picos entre aproximadamente 53° e 62° podem ser associadas às reflexões (422), (511) e (440) da fase espinélio (Mo et al., 2023; Cai et al., 2025).

De forma complementar, aplicou-se o procedimento de *Search-Match* no software *Profex*, com emprego sucessivo de restrições químicas compatíveis com a composição esperada do sistema. Tal abordagem mostrou-se metodologicamente relevante, pois o programa classificou as fases candidatas com base em um *Figure of Merit* (FoM), derivado de um ajuste preliminar, além de possibilitar o refinamento da busca por composição elementar por meio dos filtros *mandatory*, *at least one*, *optional* e *discarded* (Döbelin, 2021). Desse modo, a interpretação passou a considerar não apenas a coincidência visual entre picos e padrões de referência, mas também a coerência composicional das fases sugeridas pelo algoritmo.

Em uma etapa inicial, a busca foi restringida ao sistema Zn-Fe-O, com Zn, Fe e O definidos como elementos obrigatórios, condição em que o *Search-Match* apontou $ZnFe_2O_4$ como fase candidata única, o que reforçou a compatibilidade do padrão experimental com a ferrita de zinco. Sabendo-se que no software livre *Profex*, o *Figure of Merit* (FoM) tem caráter comparativo, e o campo *Fraction = 100%* não corresponde a uma quantificação real das fases presentes na amostra, de modo que tal evidência, isoladamente, não permite afirmar monofasicidade (Döbelin, 2021). Em seguida, a análise foi ampliada para incluir outros óxidos possíveis do sistema, mantendo-se o oxigênio como elemento obrigatório, Zn e Fe como *at least one* e excluindo H, Cl e Na. Nessa condição, fases do tipo ferrihidrita passaram a apresentar FoM ligeiramente superior ao de $ZnFe_2O_4$, sugerindo que o difratograma global não é descrito de forma inequívoca por uma única fase espinélio bem cristalina. Esse resultado é coerente com a literatura, segundo a qual a ferrihidrita *2-line* exibe bandas largas próximas de 35° e 62° , nos quais o alargamento das reflexões dificulta a distinção entre fases estruturalmente próximas (Wang et al., 2023; Chen et al., 2024).

Possíveis fases secundárias ou precursoras ricas em ferro também foram investigadas, em consonância com o histórico químico e térmico da amostra, obtida em meio alcalino, com precursores clorados, sem calcinação e submetida apenas à secagem branda. Nessa condição, ferrihidrita e akaganeíta figuraram entre as fases mais compatíveis com o padrão difratométrico. Tal resultado mostra que a ferrihidrita está associada a precipitados de baixa cristalinidade ou insuficientemente transformados (Wang *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2024), enquanto a akaganeíta é favorecida em ambientes com presença de cloreto, devido à estabilização estrutural promovida por esse ânion (Scheck *et al.*, 2015; Xiao *et al.*, 2025).

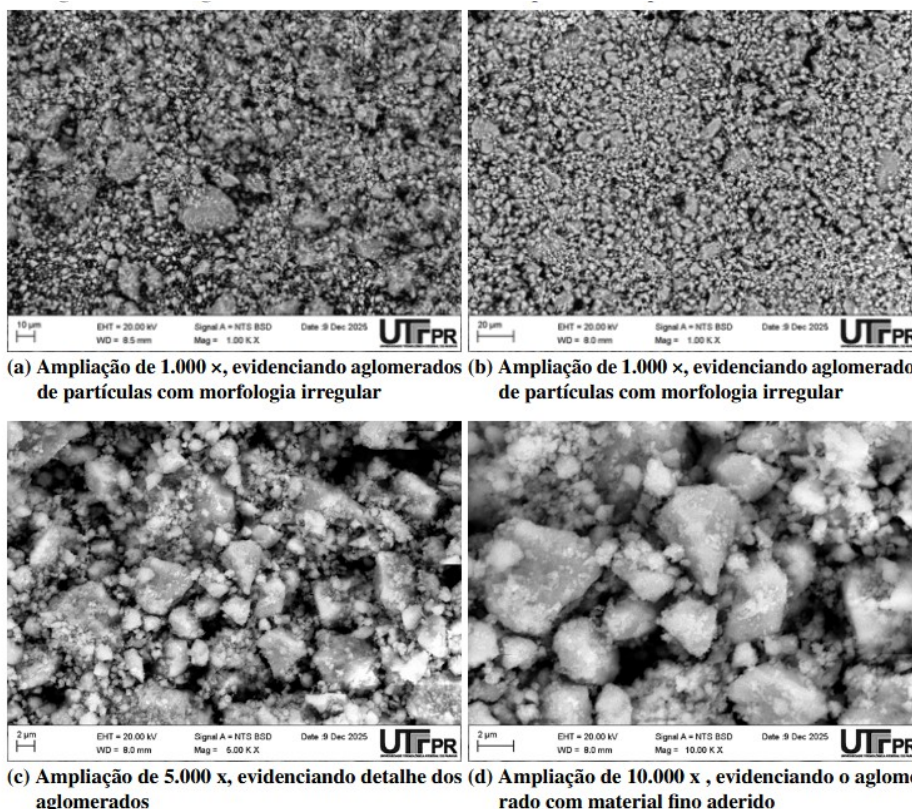
A análise conjunta das diferentes etapas de *Search-Match* indicou que os resultados são complementares. Quando a busca foi restrita ao sistema Zn–Fe–O, observou-se compatibilidade com a formação de ZnFe₂O₄; contudo, ao se ampliarem os critérios para contemplar fases secundárias quimicamente viáveis, emergiram também a ferrihidrita, além da possibilidade de akaganeíta. Essa interpretação está de acordo com a literatura sobre a síntese de ferrita de zinco por coprecipitação, segundo a qual a fase espinélio pode se formar já na condição *as-synthesized*, embora a nitidez das reflexões, o aumento da cristalinidade e a consolidação estrutural possam ser favorecidos por tratamentos térmicos posteriores (Nitika *et al.*, 2021; Nguyen *et al.*, 2022; Volkov *et al.*, 2024).

Assim, os resultados fornecem evidência favorável à formação de ZnFe₂O₄, particularmente pela correspondência do pico principal em torno de 35° com a reflexão (311) e pela compatibilidade observada na análise restrita ao sistema Zn–Fe–O, sendo importante adicionar outras técnicas para uma caracterização mais vasta (Dobelin, 2021; Nitika *et al.*, 2021; Nguyen *et al.*, 2022b; Volkov *et al.*, 2024).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) torna-se um método adequado para uma avaliação morfológica inicial e para a observação da organização hierárquica dos aglomerados, devendo ser complementada por técnicas de maior resolução, como microscopia eletrônica de transmissão (MET), microscopia eletrônica de transmissão de alta resolução (HRTEM), difração de raios X (DRX) e técnicas espectroscópicas, a fim de obter uma caracterização estrutural e morfológica mais ampla (Ramshankar *et al.*, 2025). Ainda assim, a técnica fornece informações relevantes sobre morfologia aproximada, grau de aglomeração, presença de fragmentos micrométricos e aspecto superficial dos aglomerados, permitindo inferências sobre o comportamento do pó no estado seco (Abdulhamid *et al.*, 2023).

Nas micrografias analisadas, conforme Figura 3, predominam partículas em faixa submicrométrica a micrométrica, com morfologia heterogênea e agregada. Foram observados aglomerados irregulares, parcialmente tendentes à esfericidade, organizados em camadas descontínuas e compostos por partículas de diferentes tamanhos. Em maiores ampliações, esses aglomerados exibiram superfície rugosa e granular.

Figura 3 – Microscopia eletrônica de varredura da síntese de ferrita de zinco



A rugosidade superficial observada, somada à ausência de facetas cristalinas bem definidas, foi compatível com um material obtido por coprecipitação. Embora essa relação nem sempre seja afirmada de modo direto, estudos indicam que tratamentos térmicos mais elevados favorecem a formação de $ZnFe_2O_4$ monofásica, maior desenvolvimento morfológico, partículas mais individualizadas e menor tendência ao agrupamento (NGUYEN *et al.*, 2016; DIPPONG *et al.*, 2025). Assim, a ausência de calcinação elevada parece ter limitado o desenvolvimento estrutural do material, contribuindo para a permanência de agregados irregulares.

Em conjunto, esses resultados indicaram que a rota adotada foi capaz de gerar um material compatível com a formação de ferrita de zinco, apresentando características estruturais promissoras para uma etapa preliminar de síntese sem calcinação. A presença de aglomerados e de possíveis frações pouco cristalinas deve ser compreendida como aspecto típico de rotas brandas de processamento, especialmente quando não há tratamento térmico posterior. Desse modo, o estudo evidencia que a síntese por coprecipitação constitui uma alternativa operacionalmente simples e potencialmente escalonável, com perspectivas de otimização estrutural e morfológica por meio do controle das condições de síntese, lavagem, secagem e pós-tratamento.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos por difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) confirmaram que a rota de coprecipitação empregada eficaz na síntese de um material quimicamente compatível com a ferrita de zinco.

No DRX, a presença marcante do pico principal em torno de 35° , correspondente à

reflexão característica da estrutura espinélio, validou o sucesso na formação da fase de interesse dentro do sistema Zn–Fe–O. A natureza das reflexões obtidas sugeriu a formação de um material com características nanoestruturadas, o que é desejável para aplicações que exigem elevada reatividade química.

As observações por MEV revelaram uma morfologia rica em aglomerados granulares e rugosos, característica típica de materiais sintetizados por rotas de baixo custo energético. A ausência de calcinação em alta temperatura simplificou o fluxo produtivo e preserva uma estrutura de partículas finas que favorece a integração em matrizes diversas.

Em conjunto, os resultados preliminares apontaram para a síntese como um método promissor e eficiente para a obtenção de ferrita de zinco. A técnica destaca-se pela sua simplicidade operacional e viabilidade econômica, gerando um produto estruturalmente apto para aplicações tecnológicas imediatas, indiciando uma alternativa sustentável e escalável, ideal para o desenvolvimento pleno de novos materiais na indústria da construção civil e áreas afins.

AGRADECIMENTOS

CNPq, Polymere Materials Laboratory (LaMaPo)/UTFPR, Multi-User Materials Characterization Center (CMCM)/UTFPR.

5 REFERÊNCIAS

ABDEL-AZIM, S M.; EL-DESOUKI, Doaa S.; MADY, Amr H.; AMAN, Delvin. Construction of novel Z-scheme heterojunction in ZnFe₂O₄/p25 @ mof-5 nanocomposite from plastic waste for efficient photodegradation of aqueous BTX under visible light. **Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials**, v. 34, p. 1776–1791, 2024. DOI: 10.1007/s10904-023-02917-0.

ABDULHAMID, Zeyad M.; DABBAWALA, Aasif A.; DELCLOS, Thomas; STRAUBINGER, Rainer; RUEPING, Magnus; POLYCHRONOPOULOU, Kyriaki; ANJUM, Dalaver H. Synthesis, characterization, and preliminary insights of ZnFe₂O₄ nanoparticles into potential applications, with a focus on gas sensing. **Scientific Reports**, v. 13, p. 19705, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-46960-w.

BHATTU, Monika; ACEVEDO, Roberto; SHNAIN, A. A comprehensive review on the synthesis routes, properties and potential applications of znfe₂o₄ ferrites. **E3S Web of Conferences**, v. 588, p. 02014, 2024. DOI: 10.1051/e3sconf/202458802014.

BOHRA, Murtaza; ALMAN, Vidya; ARRAS, Rémi. Nanostructured znfe₂o₄: An exotic energy material. **Nanomaterials**, v. 11, n. 5, p. 1286, 2021. DOI: 10.3390/nano11051286.

CAI, Congyu; SUN, Yufeng; XIAO, Yulan; ZHENG, Weiye; PAN, Minhui; WANG, Weiwei. Interface engineering of ZnO-decorated ZnFe₂O₄ for enhanced CO₂ reduction performance. **Molecules**, v. 30, n. 19, p. 3980, 2025. DOI: 10.3390/molecules30193980.

CHEN, Qian; ZHANG, Xin. Nanoparticle self-assemblies with modern complexity. **MRS Bulletin**, Springer, v. 49, n. 4, p. 307–314, 2024. DOI: 10.1557/s43577-024-00687-9.

CHEN, Xue; LIU, Yifan; ZHANG, Hong; ZHAO, Rui; WANG, Jiawei. Transformation and spectral characteristics of poorly crystalline ferrihydrite in aqueous systems: Implications for phase identification. **Minerals**, v. 14, n. 6, p. 618, 2024. DOI: 10.3390/min14060618.

DIPPONG, Thomas; SAVOLSZKI-MADARAS, Anamaria-Magdalena; REIZ, Raul Marius; PETEAN, Ioan; CADAR, Oana. Thermal, structural, and morphological analysis of znfe₂o₄ embedded and non-embedded in a sio₂ matrix for magnetic and photocatalytic applications. **Nanomaterials**, v. 15, p. 1644, 2025. DOI:10.3390/nano15211644. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano15211644>.

DÖBELIN, Nicola. **Profex User Manual Version 4.3: Part 2 — Using Profex**. 2021. Acesso em: 16 mar. 2026. Disponível em: <https://www.profex-xrd.org/wp-content/uploads/2022/04/Profex-BGMN-Part-2-Application-EN.pdf>.

GAVAZZONI, Eduardo. **Modificação e caracterização das fibras de Luffa cylindrica com nanoferritas de zinco**. 2024. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Química)) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024.

GRAEF, M. DE; MCHENRY, M. E. **Structure of Materials: An Introduction to Crystallography, Diffraction and Symmetry**. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

GRANONE, L. I.; ULPE, A. C.; ROBBEN, L.; KLIMKE, S.; JAHNS, M.; RENZ, F.; GESING, T. M.; BREDOW, T.; DILLERT, R.; BAHNEMANN, D. W. Effect of the degree of inversion on optical properties of spinel znfe₂o₄. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 20, n. 44, p. 28267–28278, 2018. DOI: 10.1039/C8CP05061A.

HEJAZI, Afnan S.; AL-HUNAITI, Afnan; BSOU, Ibrahim; MOHAIDAT, Qusai; MAHMOOD, S. Optimizing the synthesis of znfe₂o₄ through chemical and physical methods: effects of the synthesis route on the phase purity, inversion, and magnetic properties of spinel zinc ferrite. **Physica Scripta**, v. 99, n. 6, p. 065029, 2024. DOI: 10.1088/1402-4896/ad4746.

KAMAZAWA, K.; TSUNODA, Y.; KADOWAKI, H.; KOHN, K. Magnetic neutron scattering measurements on a single crystal of frustrated znfe₂o₄. **Physical Review B**, v. 68, n. 2, p. 024412, 2003. DOI:10.1103/PhysRevB.68.024412.

MO, Xiaoyao; XU, Guangxu; KANG, Xiaochan; YIN, Hang; CUI, Xiaochen; ZHAO, Yuling; ZHANG, Jianmin; TANG, Jie; WANG, Fengyun. A facile microwave hydrothermal synthesis of ZnFe₂O₄/rgo nanocomposites for supercapacitor electrodes. **Nanomaterials**, v. 13, n. 6, p. 1034, 2023. DOI: 10.3390/nano13061034.

NGUYEN, A. T.; PHAN, Ph. H. Nh.; MITTOVA, I. Ya.; KNUROVA, M. V.; MITTOVA, V. O. The characterization of nanosized znfe₂o₄ material prepared by coprecipitation. **Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics**, v. 7, n. 3, p. 459–463, 2016. DOI: 10.17586/2220-8054-2016-7-3-459-463.

NGUYEN, Linh T. Tr.; NGUYEN, Khanh D. M.; NGUYEN, Tien A.; NO, Kwangsoo. The synthesis of zinc ferrite spinel: Determination of ph value in the co-precipitation step. **Ceramics International**, v. 48, n. 3, p. 4090–4095, 2022. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.10.199.

NITIKA; RANA, Anu; KUMAR, Vinod. Investigation on anneal-tuned properties of ZnFe₂O₄ nanoparticles for use in humidity sensors. **Applied Physics A**, v. 127, n. 8, p. 609, 2021. DOI: 10.1007/s00339-021-04755-8.

PRADEEP, A.; PRIYADHARSINI, P.; CHANDRASEKARAN, G. Structural, magnetic and electrical properties of nanocrystalline zinc ferrite. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 509, p. 3917–3923, 2011. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.12.168.

PUSPITASARI, Poppy; RIZKIA, Ufsarah Anugrah; SUKARNI; PERMANASARI, Avita Ayu; TAUFIQ, Ahmad; PUTRA, Andika Bagus Nur Rahma. Effects of various sintering conditions on the structural and magnetic properties of zinc ferrite (ZnFe₂O₄). **Materials Research**, v. 24, n. 1, p. e20200300, 2021. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2020-0300.

RAMSHANKAR, P.; HOWARD, Eric; SRINIVASAN, Vellayan; PRABU, D.; DHANRAJ, Joshuva Arockia; KUMAR, M. Jogendra; RAJENDIRAN, M. Nanoscale characterization and imaging techniques for material analysis. In: **ICMSA24: Proceedings of the 5th International Conference on Material Science and Applications**. [S.l.]: AIP Publishing, 2025. v. 3300, n. 1, p. 020023–1–020023–5.

SANCHEZ-LIEVANOS, Karla R.; STAIR, James L.; KNOWLES, Kathryn E. Cation distribution in spinel ferrite nanocrystals: Characterization, impact on their physical properties, and opportunities for synthetic control. **Inorganic Chemistry**, v. 60, n. 7, p. 4291–4305, 2021. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.1c00040.

SASSI, Mehdi; KHATTECH, Ikbai; MOUSSA, Nader et al. Structural evolution of iron oxyhydroxide precursors and their diffraction signatures in low-temperature syntheses. **Journal**

of Molecular Structure, v. 1308, p. 138157, 2024. DOI: 10.1016/j.molstruc.2024.138157. WANG, Lili; HU, Changchao; YANG, Ze; GUO, Songding; ZHANG, Tingting; LI, Shangyi.

Simple co-precipitation of iron minerals for the removal of phenylarsonic acid: Insights into the adsorption performance and mechanism. **Molecules**, v. 28, n. 8, p. 3448, 2023. DOI: 10.3390/molecules28083448.

SCHECK, Johanna; LEMKE, Tobias; GEBAUER, Denis. The role of chloride ions during the formation of akaganéite revisited. **Minerals**, v. 5, n. 4, p. 778–787, 2015. DOI: 10.3390/min5040524.

TABESH, Farbod; MALLAKPOUR, Shadpour; HUSSAIN, Chaudhery Mustansar. Recent advances in magnetic semiconductor znfe2o4 nanoceramics: History, properties, synthesis, characterization, and applications. **Journal of Solid State Chemistry**, v. 322, p. 123940, 2023. DOI: 10.1016/j.jssc.2023.123940.

VOLKOV, F. S.; KAMENSKII, M. A.; VOSKANYAN, L. A.; BOBRY SHEVA, N. P.; OSMOLOVSKAYA, O. M.; ELISEEVA, S. N. Impact of ZnFe2O4 nanoparticles parameters on magnetic and electrochemical performance. **Materialia**, v. 34, p. 102046, 2024. DOI: 10.1016/j.mtla.2024.102046.

WANG, Jin; YANG, Xian; KLEMES, Jiri Jaromir; TIAN, Ke; MA, Ting; SUNDEN, Bengt. A review on nanofluid stability: preparation and application. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 188, p. 113854, 2023. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113854.

XIAO, Haigang; ZHANG, Hongbo; GUO, Yan; HAO, Hongduo; CHANG, Hao; LI, Ying. Formation of akaganeite in atmospheric corrosion of carbon steel induced by NaCl particles in an 85% RH environment. **Materials**, v. 18, n. 19, p. 4462, 2025. DOI: 10.3390/ma18194462.

ZHANG, M. et al. The preparation of znfe2o4 from coal gangue for use as a photocatalytic reagent in the purification of dye wastewater via the pms reaction. **Materials**, v. 19, n. 1, p. 169, 2026. DOI: 10.3390/ma19010169.