

MÉTODOS AVANÇADOS DE SÍNTSEDE FERRITA DE COBALTO E A MODULAÇÃO DE SUAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

ADVANCED METHODS FOR COBALT FERRITE SYNTHESIS AND THE MODULATION OF ITS MAGNETIC PROPERTIES

MÉTODOS AVANZADOS DE SÍNTESIS DE FERRITA DE COBALTO Y LA MODULACIÓN DE SUS PROPIEDADES MAGNÉTICAS

Edson Silva Ferreira¹

RESUMO: A ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) é um material magnético de considerável relevância tecnológica, cuja alta coercividade e anisotropia magnetocristalina a tornam ideal para diversas aplicações, incluindo armazenamento de dados de alta densidade, catalise e biomedicina. A demanda por propriedades específicas requer métodos de síntese avançados que permitam um controle refinado sobre as características microestruturais e magnéticas do material. Este artigo apresenta uma análise aprofundada de três métodos de síntese mais sofisticados: combustão em solução, precursor de ácido orgânico e microemulsão água-em-óleo. Serão explorados os princípios de cada técnica, os parâmetros críticos de processo, suas vantagens e desvantagens, e, crucialmente, a correlação direta entre o método de síntese e a modulação das propriedades estruturais, morfológicas e magnéticas da CoFe_2O_4 . O artigo também discute perspectivas futuras e desafios na área, fornecendo uma visão abrangente para a otimização e inovação com este material multifuncional.

925

Palavras-chave: Ferrita de Cobalto. CoFe_2O_4 . Síntese por Combustão. Precursor de Ácido Orgânico. Microemulsão. Nanopartículas. Propriedades Magnéticas.

ABSTRACT: Cobalt ferrite (CoFe_2O_4) is a magnetic material of considerable technological relevance, whose high coercivity and magnetocrystalline anisotropy make it ideal for various applications, including high-density data storage, catalysis, and biomedicine. The demand for specific properties requires advanced synthesis methods that allow for refined control over the material's microstructural and magnetic characteristics. This article presents an in-depth analysis of three more sophisticated synthesis methods: solution combustion, organic acid precursor, and water-in-oil microemulsion. The principles of each technique, critical process parameters, their advantages and disadvantages, and, crucially, the direct correlation between the synthesis method and the modulation of the structural, morphological, and magnetic properties of CoFe_2O_4 will be explored. The article also discusses future perspectives and challenges in the field, providing a comprehensive overview for the optimization and innovation of this multifunctional material.

Keywords: Cobalt Ferrite. CoFe_2O_4 . Combustion Synthesis. Organic Acid Precursor. Microemulsion. Nanoparticles. Magnetic Properties.

¹ Professor - Instituto Federal de Mato Grosso, IFMT.

RESUMEN: La ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) es un material magnético de considerable relevancia tecnológica, cuya alta coercividad y anisotropía magnetocristalina lo hacen ideal para diversas aplicaciones, incluyendo el almacenamiento de datos de alta densidad, la catálisis y la biomedicina. La demanda de propiedades específicas requiere métodos de síntesis avanzados que permitan un control refinado sobre las características microestructurales y magnéticas del material. Este artículo presenta un análisis exhaustivo de tres métodos de síntesis más sofisticados: combustión en solución, precursor de ácido orgánico y microemulsión de agua en aceite. Se explorarán los principios de cada técnica, los parámetros críticos del proceso, sus ventajas y desventajas, y, de manera crucial, la correlación directa entre el método de síntesis y la modulación de las propiedades estructurales, morfológicas y magnéticas del CoFe_2O_4 . El artículo también discute las perspectivas futuras y los desafíos en el campo, proporcionando una visión integral para la optimización e innovación con este material multifuncional.

Palabras clave: Ferrita de Cobalto. CoFe_2O_4 . Síntesis por Combustión. Precursor de Ácido Orgánico. Microemulsión. Nanopartículas. Propiedades Magnéticas.

I. INTRODUÇÃO

As ferritas de espinélio são uma categoria essencial de óxidos de metais compósitos, representadas pela fórmula geral $M^{2+}Fe^{3+}_2O_4$. Sua estrutura cristalina cúbica de espinélio, caracterizada pela ocupação de sítios tetraédricos e octaédricos por cátions metálicos, confere-lhes uma ampla gama de propriedades multifuncionais (SHARMA; KAITH; KUMAR, 2018).

Entre elas, a ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) se destaca por suas propriedades magnéticas intrínsecas e únicas, sendo classificada como um material magnético "duro" devido à sua elevada coercividade, magnetização de saturação moderada e alta anisotropia magnetocristalina (KASHID et al., 2022; SHARMA et al., 2018; TAHA; HASSAN; AL-HASSANY, 2018).

Essas características tornam a CoFe_2O_4 um material promissor para um espectro diversificado de aplicações de ponta. Sua utilização se estende da área biomédica (em sistemas de entrega direcionada de medicamentos, terapias de hipertermia por radiofrequência e como agente de contraste em ressonância magnética) (SHARMA; KAITH; KUMAR, 2018; SHARMA et al., 2023) à gravação magnética de alta densidade (KOMARNENI; LI, 1996), catálise (EL-SAIED; EL-SHABASY, 2010), e sensores (KASHID et al., 2022). Adicionalmente, tem sido explorada na purificação de água, para remoção de poluentes (ABDELTWAB; MOSTAFA, 2024).

A obtenção de CoFe_2O_4 com desempenho otimizado exige um controle meticuloso sobre os parâmetros de síntese. A rota de síntese é um fator determinante para a viabilidade do processo e seu custo, e exerce uma influência profunda e direta sobre as propriedades finais do material, incluindo tamanho de partícula, cristalinidade, morfologia e, consequentemente, as

propriedades magnéticas e catalíticas (KASHID et al., 2022; TAHA; HASSAN; AL-HASSANY, 2018; PRASAD et al., 2022).

Este artigo tem como objetivo apresentar uma análise aprofundada de métodos de síntese avançados – Combustão em Solução, Precursor de Ácido Orgânico e Microemulsão – que permitem um controle mais refinado sobre as propriedades da ferrita de cobalto. Serão detalhados seus princípios, vantagens, desvantagens e o impacto direto na modulação das características do material, além de discutir perspectivas futuras e desafios no campo.

2. MÉTODOS

Este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura, construída a partir de uma análise aprofundada e síntese de informações provenientes de um vasto corpo de artigos científicos publicados. A seleção dos estudos foi criteriosamente orientada para a exploração, caracterização e, sobretudo, a modulação das propriedades da ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) por meio de métodos de síntese avançados, incluindo combustão em solução, precursor de ácido orgânico e microemulsão água-em-óleo, a fim de proporcionar uma compreensão abrangente de como essas técnicas influenciam o desempenho do material.

A metodologia empregada seguiu as seguintes etapas:

927

1. Levantamento Bibliográfico: Foram realizadas buscas exaustivas em bases de dados científicas de renome, como Scopus, Web of Science e Google Scholar. Os termos-chave utilizados para otimizar a pesquisa incluíram "síntese de ferrita de cobalto por combustão", "precursor de ácido orgânico para CoFe_2O_4 ", "microemulsão de ferrita de cobalto", "modulação de propriedades magnéticas de CoFe_2O_4 " e "nanopartículas de ferrita de cobalto".

2. Seleção e Avaliação Crítica: Os artigos identificados foram submetidos a um processo de seleção rigoroso, com foco na relevância e na qualidade das informações sobre os diferentes métodos de síntese avançados da ferrita de cobalto e suas implicações diretas na modulação das propriedades do material. Foi realizada uma leitura aprofundada de cada estudo para identificar os princípios operacionais, os parâmetros críticos de processo, as vantagens e limitações inerentes a cada técnica, e, de forma crucial, a correlação entre o método de síntese avançado e a capacidade de ajustar as propriedades estruturais, morfológicas e magnéticas da CoFe_2O_4 resultante.

3. Análise e Síntese de Dados: As informações extraídas foram meticulosamente compiladas, categorizadas e organizadas para permitir uma análise detalhada e comparativa entre os métodos avançados. Esta etapa envolveu a identificação de padrões, tendências e variações nos resultados obtidos por cada técnica, com especial atenção aos mecanismos pelos quais as condições de síntese influenciam a microestrutura e, consequentemente, as propriedades finais e o desempenho do material.

O propósito desta revisão é oferecer uma análise aprofundada e atualizada dos métodos de síntese avançados da ferrita de cobalto, destacando como cada técnica permite a modulação de suas propriedades. O objetivo é fornecer um panorama consolidado que auxilie pesquisadores na compreensão das complexidades e nuances envolvidas na obtenção e otimização deste material multifuncional para aplicações específicas.

3. MÉTODO DE COMBUSTÃO EM SOLUÇÃO (SOLUTION COMBUSTION SYNTHESIS - SCS)

O Método de Combustão em Solução (SCS) é uma técnica altamente energética e eficiente para a produção rápida de pós nanocristalinos de óxidos. Seu fundamento reside em uma reação exotérmica controlada que ocorre em um meio líquido, onde oxidantes (tipicamente sais metálicos, como nitratos) reagem vigorosamente com um combustível orgânico (como ureia, glicina, ácido cítrico, etc.).

928

A mistura homogênea dos precursores é aquecida, levando à evaporação do solvente e à ignição do gel formado. A combustão subsequente é rápida e autossustentável, gerando altas temperaturas (até ~1500 °C) em milissegundos, o que promove a decomposição dos precursores e a cristalização instantânea da fase ferrita. Essa natureza rápida e intensa da reação é fundamental para a formação de nanopartículas com alta área superficial (KASHID et al., 2022; AMAN, 2016; TAHA; HASSAN; AL-HASSANY, 2018).

Esquema do passo a passo do Método de Combustão em Solução é representada na figura 1.

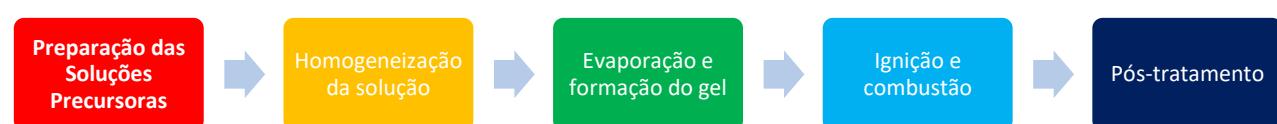


Figura 1 - Etapas do Método de Combustão em Solução.

1. Preparação da Solução Precursora: Os sais metálicos precursores (ex: nitrato de cobalto e nitrato de ferro) são dissolvidos em água deionizada. Um combustível orgânico (ex: ureia, glicina) é então adicionado em proporções estequiométricas calculadas para otimizar a reação de combustão (AMAN, 2016; TAHA; HASSAN; AL-HASSANY, 2018).

2. Homogeneização da Solução: A solução é vigorosamente agitada para garantir a completa dissolução e homogeneidade.

3. Evaporação e Formação do Gel: A solução homogênea é transferida para um recipiente e aquecida. A água evapora, e a solução se torna mais concentrada, formando um gel viscoso e altamente inflamável.

4. Ignição e Combustão: À medida que o aquecimento continua, a temperatura do gel aumenta até o ponto de ignição. Uma reação de combustão rápida e exotérmica ocorre, acompanhada pela liberação de gases e picos de temperatura elevados, que promovem a formação e cristalização instantânea da ferrita nanocristalina.

5. Pós-Tratamento (Opcional): O material "fofo" e poroso resultante pode ser subsequentemente calcinado em um forno a temperaturas específicas (ex: 550 °C para CoFe₂O₄ (KASHID et al., 2022)) para melhorar a cristalinidade e as propriedades magnéticas.

929

Uma das grandes vantagens do SCS é sua velocidade e eficiência, o que o torna um método ideal para a produção em massa de nanopartículas (AMAN, 2016; TAHA; HASSAN; AL-HASSANY, 2018). O processo de combustão produz nanopartículas com uma alta área superficial específica (podendo atingir até 285.4 m²/g com nitrato de cobalto como precursor) (AMAN, 2016), ideal para aplicações como catálise e adsorção. As altas temperaturas geradas promovem a formação de fases puras e bem cristalinas (AMAN, 2016). No entanto, um desafio significativo é o controle preciso da temperatura da reação exotérmica; se não for bem gerenciada, pode levar à aglomeração das nanopartículas (AMAN, 2016).

O impacto nas propriedades finais da ferrita de cobalto sintetizada por SCS é notável. O precursor de cobalto e a proporção combustível/oxidante são fatores críticos que influenciam diretamente a área superficial, a magnetização de saturação e a coercividade do produto final (AMAN, 2016). O método pode resultar em um tamanho de partícula médio de aproximadamente 69.5 nm (TAHA; HASSAN; AL-HASSANY, 2018). Em termos de morfologia, as partículas tendem a ser aglomeradas e apresentar uma estrutura porosa (AMAN, 2016; TAHA; HASSAN; AL-HASSANY, 2018).

4. MÉTODO DO PRECURSOR DE ÁCIDO ORGÂNICO (ORGANIC ACID PRECURSOR ROUTE)

O Método do Precursor de Ácido Orgânico é uma estratégia de síntese que se baseia na formação de complexos ou sais orgânicos metálicos como intermediários para a obtenção de óxidos. O processo envolve a reação de sais metálicos (de cobalto e ferro) com ácidos orgânicos específicos (como ácido oxálico, benzoico ou tartárico) em solução.

Esses ácidos orgânicos atuam como agentes complexantes ou precipitantes, formando um precursor orgânico metálico que é subsequentemente submetido a um tratamento térmico. Durante a calcinação, o componente orgânico se decompõe, liberando gases e deixando para trás a fase oxidada, ou seja, a ferrita de cobalto (EL-SAIED; EL-SHABASY, 2010).

Representação do Passo a Passo do Método do Precursor de Ácido Orgânico na figura 2.



Figura 2 - Passo a passo do Método do Precursor de Ácido Orgânico.

930

1. Preparação das Soluções Precursoras Metálicas: Dissolver sais de cobalto (ex: nitrato de cobalto) e sais de ferro (ex: nitrato de ferro) em um solvente apropriado para obter as soluções estoque com as concentrações e estequiometrias desejadas.
2. Preparação da Solução do Ácido Orgânico: Dissolver o ácido orgânico selecionado (ex: ácido oxálico) em água deionizada ou solvente adequado.
3. Mistura e Reação de Complexação/Precipitação: As soluções dos sais metálicos são misturadas com a solução do ácido orgânico sob agitação. A reação de complexação ou precipitação ocorre, levando à formação do precursor orgânico-metálico. O pH da solução e a razão molar entre os metais e o ácido orgânico são parâmetros cruciais (EL-SAIED; EL-SHABASY, 2010).
4. Filtração e Lavagem: O precipitado do precursor orgânico é separado da solução por filtração e lavado extensivamente com água deionizada e/ou etanol para remover impurezas.
5. Secagem: O precursor é seco em estufa a uma temperatura moderada (ex: 80-100 °C) para remover o solvente residual.

6. Calcinação: O precursor seco é calcinado em temperaturas elevadas (ex: 400–1000 °C) por períodos de 0,5 a 2 horas (EL-SAIED; EL-SHABASY, 2010). Esta etapa é vital para a decomposição térmica do precursor orgânico e a formação da fase espinélio cristalina.

Uma das principais vantagens deste método é a capacidade de obter nanopartículas com tamanho de cristalito controlado, uma vez que a formação do precursor orgânico pode atuar como uma "matriz" que limita o crescimento excessivo das partículas durante a decomposição térmica (EL-SAIED; EL-SHABASY, 2010).

Além disso, é possível direcionar a formação de nanopartículas com morfologias específicas, como a morfologia octaédrica (EL-SAIED; EL-SHABASY, 2010). No entanto, o método do precursor de ácido orgânico é bastante sensível a diversos parâmetros, exigindo otimização cuidadosa (EL-SAIED; EL-SHABASY, 2010).

O impacto nas propriedades finais da ferrita de cobalto sintetizada por este método é significativo. O tamanho de cristalito do material pode ser ajustado e variar na faixa de 38,0 a 92,6 nm, dependendo das condições de síntese (EL-SAIED; EL-SHABASY, 2010).

A microestrutura e, consequentemente, as propriedades magnéticas são fortemente influenciadas pela temperatura de calcinação e pela razão $\text{Fe}^{3+}/\text{Co}^{2+}$ na solução precursora. 931 Uma magnetização de saturação máxima de 76,1 emu/g foi observada para uma fase única de ferrita de cobalto com uma razão molar $\text{Fe}^{3+}/\text{Co}^{2+}$ de 1,818 e recozimento a 600 °C (EL-SAIED; EL-SHABASY, 2010).

5. SÍNTSE POR MICROEMULSÃO ÁGUA-EM-ÓLEO (WATER-IN-OIL MICROEMULSIONS)

A síntese por Microemulsão Água-em-Óleo é uma técnica avançada que permite um controle excepcional sobre o tamanho e a morfologia de nanopartículas. Este método emprega microemulsões de água em óleo como "nanoreatores" confinados. Gotículas nanométricas de água são dispersas em uma fase contínua de óleo, estabilizadas por um surfactante. A precipitação dos hidróxidos precursores dos íons metálicos ocorre dentro dessas nanogotículas de água, que atuam como compartimentos isolados, limitando o crescimento das partículas e promovendo a uniformidade. Após a reação, os precursores são separados da microemulsão e submetidos à calcinação para formar o óxido magnético desejado (KOMARNENI; LI, 1996).

Os passos adotados na síntese por Microemulsão Água-em-Óleo são demonstrados na figura 3.



Figura 3 - Representação dos passos adotados na síntese por Microemulsão Água-em-Óleo.

1. Preparação da Microemulsão Base: Uma microemulsão de água-em-óleo é preparada misturando-se os componentes: óleo (ex: n-octano), surfactante (ex: CTAB) e, opcionalmente, cossurfactante (ex: n-butanol) (KOMARNENI; LI, 1996).

2. Preparação das Soluções Precursoras nos Nanoreatores: Sais metálicos de cobalto e ferro são dissolvidos separadamente em diferentes microemulsões aquosas (dentro das nanogotículas de água).

3. Mistura das Microemulsões: As microemulsões contendo os precursores metálicos são misturadas sob agitação vigorosa. Dentro das nanogotículas, ocorre a colisão e fusão temporária das gotículas, permitindo que os íons reajam e precipitem hidróxidos metálicos (KOMARNENI; LI, 1996).

4. Adição do Agente Precipitante: Uma microemulsão separada, contendo um agente precipitante (ex: NaOH), é adicionada à mistura. A precipitação controlada ocorre dentro das nanogotículas, limitando o tamanho das partículas.

5. Coagulação/Quebra da Microemulsão: A microemulsão é "quebrada", geralmente pela adição de um álcool polar (ex: etanol), para precipitar as nanopartículas de hidróxido formadas.

6. Filtração e Lavagem: As nanopartículas precipitadas são separadas por filtração e lavadas exaustivamente para remover resíduos do surfactante.

7. Secagem: O precipitado é seco em estufa a uma temperatura moderada.

8. Calcinação: O material seco é calcinado em um forno a temperaturas específicas (ex: 600-800 °C) para promover a cristalização da fase ferrita (KOMARNENI; LI, 1996).

A principal vantagem deste método é o controle excepcionalmente preciso que ele oferece sobre o tamanho e a morfologia das partículas, resultando em nanopartículas muito finas e uniformes (KOMARNENI; LI, 1996).

Essa capacidade de controle fino é vantajosa para a obtenção de nanopartículas de ferrita de cobalto com alta coercividade intrínseca (por exemplo, 1440 Oe), ideais para gravação magnética de alta densidade (KOMARNENI; LI, 1996).

No entanto, o método de microemulsão é consideravelmente mais complexo e, consequentemente, mais caro, devido à necessidade de utilizar surfactantes específicos e ao desafio da remoção completa de resíduos (KOMARNENI; LI, 1996).

A síntese por microemulsão é capaz de produzir nanopartículas de ferrita de cobalto com tamanho nanométrico (geralmente menos de 50 nm) e distribuição de tamanho estreita (KOMARNENI; LI, 1996). A alta coercividade é uma característica marcante das partículas sintetizadas por este método, tornando-as altamente adequadas para aplicações que exigem resistência à desmagnetização (KOMARNENI; LI, 1996). Além disso, este método pode atingir uma magnetização de saturação de até 65 emu/g (KOMARNENI; LI, 1996).

6. IMPACTO DOS MÉTODOS NAS PROPRIEDADES FINAIS DA FERRITA DE COBALTO

A escolha do método de síntese exerce uma influência direta e profunda sobre as propriedades estruturais, morfológicas e, consequentemente, magnéticas da ferrita de cobalto. 933

O Tamanho de Partícula é um dos atributos mais críticos. Técnicas como a síntese por microemulsão são conhecidas por gerar nanopartículas menores e mais uniformes, devido ao ambiente de reação confinado (KOMARNENI; LI, 1996). Em contraste, a combustão em solução pode resultar em maior aglomeração se não controlada (AMAN, 2016). O controle preciso do tamanho de partícula é fundamental, pois afeta diretamente as propriedades magnéticas, especialmente a coercividade (SHARMA et al., 2018).

A Cristalinidade e Morfologia das partículas são outros aspectos cruciais. O tratamento térmico, em particular a temperatura de calcinação, e as condições específicas de reação de cada método influenciam diretamente a formação da fase espinélio cúbica e a morfologia das partículas (esférica, octaédrica, aglomerada, porosa) (SHARMA et al., 2018; AMAN, 2016; EL-SAIED; EL-SHABASY, 2010). Uma boa cristalinidade é indispensável para otimizar as propriedades magnéticas (SHARMA et al., 2018).

As Propriedades Magnéticas, como a magnetização de saturação (M_s), a coercividade (H_c) e a magnetização remanente (M_r), são altamente dependentes do método de síntese. A M_s geralmente tende a aumentar com o tamanho de partícula e o grau de cristalinidade (SHARMA et al., 2018). A H_c , por sua vez, é fortemente influenciada pelo tamanho de partícula e pela anisotropia magnetocristalina. Métodos que permitem um controle preciso do tamanho, como a microemulsão, podem levar a valores de coercividade muito elevados (KOMARNENI; LI, 1996).

A Distribuição Catiônica, ou seja, a forma como os íons de cobalto e ferro se distribuem entre os sítios tetraédricos (A) e octaédricos (B) na estrutura espinélio, é um fator crucial para as propriedades magnéticas e é diretamente influenciada pelo método e pelos parâmetros de síntese (NOBRE; LANFREDI, 2014).

Finalmente, a Pureza e Estequiometria do material são também afetadas pelo método de síntese. A formação de fases secundárias e o controle da estequiometria geral do material são aspectos críticos que variam conforme a rota de síntese empregada (MELO; NOBRE; LANFREDI, 2020; NOBRE; LANFREDI, 2014).

7. PERSPECTIVAS FUTURAS E DESAFIOS

934

A pesquisa em métodos de síntese de ferrita de cobalto é um campo dinâmico e em constante evolução, impulsionada pela busca contínua por materiais com propriedades cada vez mais otimizadas e por processos de produção mais eficientes e sustentáveis.

Uma tendência proeminente é a Síntese Verde, com a demanda por métodos que minimizem ou eliminem o uso de solventes tóxicos e reagentes agressivos, substituindo-os por alternativas menos nocivas, como extratos vegetais ou microrganismos.

O Controle Preciso sobre as características das nanopartículas é outro foco contínuo. A busca por métodos que permitam um controle ainda mais refinado sobre o tamanho, a forma, a distribuição de tamanho e a estrutura superficial é incessante, crucial para a customização das propriedades e o desempenho otimizado.

A Funcionalização e Aplicações Específicas representam uma área vital. O desenvolvimento de estratégias de síntese que facilitem a funcionalização da superfície das nanopartículas é de suma importância para expandir significativamente suas aplicações em campos como a biomedicina e catálise.

Um desafio significativo é a transição da síntese em escala laboratorial para a Produção em Larga Escala em nível industrial. É imprescindível desenvolver processos que não apenas mantenham as propriedades desejadas do material, mas que também garantam a reproduzibilidade em grandes volumes de produção, de forma economicamente viável.

Por fim, a Inovação em Parâmetros de Síntese é um motor contínuo. A exploração de novas combinações de precursores, o uso de aditivos inovadores e a manipulação das condições de reação são essenciais para descobrir rotas de síntese inéditas que possam otimizar ainda mais as propriedades da ferrita de cobalto para novas e emergentes aplicações tecnológicas.

CONCLUSÃO

Os métodos avançados de síntese da ferrita de cobalto, como a combustão em solução, o precursor de ácido orgânico e a microemulsão, demonstram a capacidade de modular de forma precisa as propriedades estruturais, morfológicas e magnéticas deste material. Cada técnica oferece um conjunto único de vantagens e desafios, permitindo a personalização das características da CoFe_2O_4 para aplicações específicas e de alto desempenho, como gravação magnética de alta densidade e sistemas biomédicos.

935

A escolha do método ideal é intrinsecamente ligada aos requisitos da aplicação final e aos recursos disponíveis, demandando uma compreensão aprofundada de como cada parâmetro de síntese influencia o produto. O avanço contínuo nesta área, com foco em escalabilidade e sustentabilidade, pavimentará o caminho para a exploração de todo o potencial da ferrita de cobalto em tecnologias emergentes.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar seus agradecimentos a todos os pesquisadores e instituições cujos trabalhos contribuíram para a base de conhecimento consolidada neste artigo.

REFERÊNCIAS

ABDELTWAB, A. A.; MOSTAFA, A. M. Preparation and characterization of magnetic CaFe_2O_4 nanoparticles for efficient adsorption of toxic Congo Red dye from aqueous solution: predictive modeling by artificial neural network. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, v. 40, p. 101036, 2024.

AMAN, M. S. Synthesis of CoFe_2O_4 powders with high surface area by solution combustion method: Effect of fuel content and cobalt precursor. *Journal of Rare Earths*, v. 34, n. 12, p. 1185-1191, 2016.

EL-SAIED, F. A.; EL-SHABASY, S. M. Structure and magnetic properties of nanocrystalline cobalt ferrite powders synthesized using organic acid precursor method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 322, n. 3, p. 304–308, 2010.

JAIN, K.; SHARMA, K. Structural and magnetic properties of Mg doped cobalt ferrite nanoparticles prepared by sol-gel method. *Materials Today: Proceedings*, v. 3, n. 6, p. 1957–1962, 2016.

KASHID, P. et al. A Review on Synthesis, Properties and Applications on Cobalt Ferrite. *International Journal of Advanced Science and Engineering*, v. 2, n. 4, p. 1-12, 2022.

KOMARNENI, S.; LI, R. Synthesis of high-coercivity cobalt ferrite particles using water-in-oil microemulsions. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 159, n. 1-2, p. L11-L14, 1996.

PRASAD, T. R. et al. A comparative study on synthesis techniques of Nanoferrites and its applications. *International Journal of Scientific Research in Physics and Applied Sciences*, v. 8, n. 6, p. 136–141, 2022.

SHARMA, D.; KAITH, B. S.; KUMAR, V. Magnetic nanocarriers: Evolution of spinel ferrites for medical applications. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 762, p. 1-15, 2018.

SHARMA, K. et al. Crystal structure, synthesis, properties and potential applications of cobalt spinel ferrite: A brief review. *Materials Science for Energy Technologies*, v. 6, p. 102–108, 2023.

TAHA, M. O.; HASSAN, A. A.; AL-HASSANY, K. G. Synthesis of cobalt ferrite (CoFe_2O_4) nanoparticles using combustion, coprecipitation, and precipitation methods: A comparison study of size, structural, and magnetic properties. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 9, p. 17336–17342, 2018. 936