

SÍNTSEDE ULTRARRÁPIDA E PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE NANOCOMPÓSITOS DE FERRITA DE COBALTO/FERRO COBALTO POR MOAGEM DE ALTA ENERGIA

ULTRAFAST SYNTHESIS AND MAGNETIC PROPERTIES OF COBALT FERRITE/COBALT IRON NANOCOMPOSITES BY HIGH-ENERGY MILLING

SÍNTESIS ULTRARRÁPIDA Y PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE NANOCOMPUESTOS DE FERRITA DE COBALTO/HIERRO COBALTO POR MOLIENDA DE ALTA ENERGÍA

Edson Silva Ferreira¹
Edson Ferreira Chagas²

RESUMO: Este artigo explora a síntese ultrarrápida de nanocompósitos de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) e ferro-cobalto (CoFe) através do método de moagem de alta energia. A abordagem envolveu a moagem da ferrita de cobalto precursora e sua mistura com diferentes concentrações (10%, 25% e 50% em peso) de ferro cobalto, utilizando um moinho de bolas Spex 8000 por um tempo de processamento extremamente curto de apenas 1 minuto. As propriedades magnéticas dos nanocompósitos resultantes foram investigadas por magnetometria de amostra vibrante (VSM). Os resultados demonstraram a formação de um acoplamento magnético (exchange-spring) entre as fases CoFe_2O_4 e CoFe, evidenciado por curvas de histerese contínuas, sem descontinuidades. Analisou-se a evolução da magnetização de saturação (M_s), remanência (M_r), coercividade (H_c) e produto energético máximo ($[\text{BH}]_{\text{max}}$) em função da concentração de CoFe. Observou-se que a M_s aumentou com a concentração de CoFe, enquanto M_r , H_c e $[\text{BH}]_{\text{max}}$ apresentaram um comportamento decrescente. A alta eficiência e velocidade deste método de síntese, sendo 60 vezes mais rápido que processos baseados em redução por hidrogênio, ressaltam seu potencial para a produção em larga escala de nanocompósitos com propriedades magnéticas ajustáveis para diversas aplicações tecnológicas.

2874

Palavras-chave: Nanocompósitos. Ferrita de Cobalto. Ferro Cobalto. Moagem de Alta Energia. Propriedades Magnéticas. Síntese Ultrarrápida.

ABSTRACT: This article explores the ultrafast synthesis of cobalt ferrite (CoFe_2O_4) and cobalt iron (CoFe) nanocomposites using the high-energy ball milling method. The approach involved milling precursor cobalt ferrite and mixing it with different concentrations (10%, 25%, and 50% by weight) of cobalt iron, using a Spex 8000 ball mill for an extremely short processing time of just 1 minute. The magnetic properties of the resulting nanocomposites were investigated by vibrating sample magnetometry (VSM). The results demonstrated the formation of a magnetic exchange coupling (exchange-spring) between the CoFe_2O_4 and CoFe phases, evidenced by continuous hysteresis loops without discontinuities. The evolution of saturation magnetization (M_s), remanence (M_r), coercivity (H_c), and maximum energy product ($[\text{BH}]_{\text{max}}$) was analyzed as a function of CoFe concentration. It was observed that M_s increased with CoFe concentration, while M_r , H_c , and $[\text{BH}]_{\text{max}}$ exhibited a decreasing trend. The high efficiency and speed of this synthesis method, being 60 times faster than hydrogen-based reduction processes, highlight its potential for large-scale production of nanocomposites with tunable magnetic properties for various technological applications.

Keywords: Nanocomposites. Cobalt Ferrite. Cobalt Iron. High-Energy Milling. Magnetic Properties. Ultrafast Synthesis.

¹Professor do Instituto Federal de Mato Grosso – IFMT.

²Professor da Universidade Federal de Mato Grosso. UFMT.

RESUMEN: Este artículo explora la síntesis ultrarrápida de nanocomuestos de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) y hierro cobalto (CoFe) mediante el método de molienda de alta energía. El enfoque implicó la molienda de la ferrita de cobalto precursora y su mezcla con diferentes concentraciones (10%, 25% y 50% en peso) de hierro cobalto, utilizando un molino de bolas Spex 8000 durante un tiempo de procesamiento extremadamente corto de solo 1 minuto. Las propiedades magnéticas de los nanocomuestos resultantes se investigaron mediante magnetometría de muestra vibrante (VSM). Los resultados demostraron la formación de un acoplamiento magnético (exchange-spring) entre las fases CoFe_2O_4 y CoFe, evidenciado por curvas de histéresis continuas sin discontinuidades. Se analizó la evolución de la magnetización de saturación (M_s), la remanencia (M_r), la coercitividad (H_c) y el producto energético máximo ($[\text{BH}]_{\text{max}}$) en función de la concentración de CoFe. Se observó que la M_s aumentó con la concentración de CoFe, mientras que M_r , H_c y $[\text{BH}]_{\text{max}}$ mostraron una tendencia decreciente. La alta eficiencia y velocidad de este método de síntesis, siendo 60 veces más rápido que los procesos basados en reducción con hidrógeno, destacan su potencial para la producción a gran escala de nanocomuestos con propiedades magnéticas ajustables para diversas aplicaciones tecnológicas.

Palabras clave: Nanocomuestos. Ferrita de Cobalto. Hierro Cobalto. Molienda de Alta Energía. Propiedades Magnéticas. Síntesis Ultrarrápida.

I. INTRODUÇÃO

A vanguarda da ciência dos materiais magnéticos é impulsionada pela necessidade de desenvolver arquiteturas nanoestruturadas com propriedades aprimoradas, cruciais para inovações em áreas como diagnósticos médicos, monitoramento ambiental, tecnologias de imagem e sistemas de armazenamento de dados de alta densidade (Jauhar et al., 2016). Nesse cenário dinâmico, os nanocompositos magnéticos, que integram fases com características magnéticas complementares, representam uma abordagem estratégica para superar as limitações de materiais monofásicos. Essa sinergia é frequentemente alcançada através do acoplamento magnético intergranular (exchange-spring), que ocorre entre fases magneticamente "duras" e "moles" em escala nanométrica, resultando em propriedades magnéticas otimizadas para energia e armazenamento de dados (López-Ortega et al., 2015).

2875

A ferrita de cobalto (CoFe_2O_4), um composto cerâmico com estrutura espinela, é reconhecida por sua anisotropia magnetocristalina e coercividade elevadas, sendo classificada como um material "semi-duro" (Fullerton; Jiang; Bader, 1999). Em contrapartida, as ligas de ferro-cobalto (CoFe) destacam-se como materiais magneticamente "moles", notáveis por sua alta magnetização de saturação (Sundar; Deevi, 2005). A combinação estratégica dessas duas fases em um nanocompósito pode gerar uma sinergia de propriedades que leva a um produto de energia máximo ($[\text{BH}]_{\text{max}}$) significativamente superior ao de suas contrapartes isoladas, devido ao acoplamento efetivo entre as fases (Ahlburg et al., 2020).

Tradicionalmente, a síntese de nanocompositos de $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$ tem sido realizada por métodos como a redução de óxidos com hidrogênio, que, embora eficaz, pode demandar

tempos de processamento mais longos (DE ASSIS et al., 2008; KAHNES et al., 2019; FERREIRA; CHAGAS, 2025a). No entanto, para a produção em larga escala e a viabilidade industrial, a busca por métodos de síntese ultrarrápidos e eficientes é primordial. A moagem de alta energia emerge como uma técnica robusta e escalável, capaz de induzir transformações estruturais e químicas em tempos significativamente reduzidos, muitas vezes em questão de segundos a minutos, através da aplicação de energia mecânica intensa (CHAGAS; FERREIRA, 2023; EDELSTEIN, 2001). Essa técnica é particularmente atrativa para a síntese de nanocompósitos devido à sua capacidade de promover a mistura íntima e a nanoestruturação das fases.

A moagem de alta energia oferece uma via direta para a preparação de nanocompósitos com acoplamento de troca, ao promover a interface entre as fases dura e mole. A compreensão de como as condições de moagem, como o tempo e a concentração dos constituintes, influenciam as propriedades magnéticas (magnetização de saturação, remanência, coercividade e produto energético máximo) é crucial para otimizar o desempenho desses materiais. O ajuste preciso desses parâmetros permite controlar a microestrutura e, consequentemente, modular o comportamento magnético do nanocompósito, adaptando-o para diversas aplicações específicas.

2876

Este trabalho tem como objetivo principal investigar as propriedades magnéticas de nanocompósitos de $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$ sintetizados por um método ultrarrápido de moagem de alta energia. Serão analisadas as curvas de histerese e a evolução dos parâmetros magnéticos em função de diferentes concentrações de CoFe, buscando demonstrar a eficácia e a rapidez dessa técnica na obtenção de materiais com acoplamento de troca e propriedades magnéticas controláveis. Acreditamos que os resultados obtidos fornecerão insights valiosos para o desenvolvimento de processos de fabricação mais eficientes e para a criação de nanocompósitos magnéticos avançados.

2. MÉTODOS

A preparação dos nanocompósitos de $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$ foi realizada utilizando o método de moagem de alta energia (MAE), uma abordagem mecânica direta para a síntese de materiais nanoestruturados. O material de partida consistiu em ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) previamente sintetizada por gel-combustão e submetida a um processo de moagem prévia para

aprimorar suas propriedades magnéticas iniciais e prepará-la para a mistura com a fase metálica (FERREIRA, 2023).

A CoFe_2O_4 moída foi então combinada com pó de ferro-cobalto (CoFe) em diferentes proporções. As concentrações estudadas de CoFe foram de 10%, 25% e 50% em peso em relação à massa total da mistura. As misturas foram processadas em um moinho de bolas de alta energia Spex 8000, um equipamento de bancada que opera com alta intensidade de impacto. O tempo de moagem foi fixado em 1 minuto, um período ultrarrápido que visa demonstrar a eficiência do método. Durante o processo, as colisões de alta energia entre as bolas e as partículas de pó promovem a fragmentação, a soldagem a frio e a mistura em escala nanométrica, facilitando a formação de interfaces íntimas entre as fases e o consequente acoplamento magnético.

As propriedades magnéticas dos nanocompósitos obtidos foram sistematicamente caracterizadas por magnetometria de amostra vibrante (VSM) do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). As medições foram conduzidas à temperatura ambiente (aproximadamente 300 K) para obter as curvas de histerese magnética (M-H). O campo magnético aplicado variou na faixa de 0 a 15 kOe. A partir dessas curvas, foram extraídos os seguintes parâmetros magnéticos: a magnetização de saturação (M_s), determinada pela extrapolação da curva de M-H para campos magnéticos elevados; a magnetização remanente (M_r), que corresponde ao valor da magnetização quando o campo aplicado é zero; a coercividade (H_c), definida como o campo magnético necessário para reduzir a magnetização a zero; e o produto energético máximo ($[BH]_{max}$), calculado como a área máxima do segundo quadrante da curva de histerese, representando a máxima energia que o material pode armazenar. A análise desses parâmetros em função da concentração de CoFe permitiu avaliar o impacto da composição nas propriedades magnéticas e confirmar a presença e a eficácia do acoplamento de troca.

2877

3. RESULTADOS

Os nanocompósitos de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) e ferro-cobalto (CoFe) foram sintetizados com sucesso através do método de moagem de alta energia, utilizando um tempo de processamento ultrarrápido de apenas 1 minuto e variando as concentrações de CoFe em 10%, 25% e 50% em peso. As propriedades magnéticas dos materiais resultantes foram avaliadas detalhadamente.

A Figura 1 apresenta as curvas de histerese magnética para os nanocompósitos de $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$ com as diferentes concentrações de ferro-cobalto.

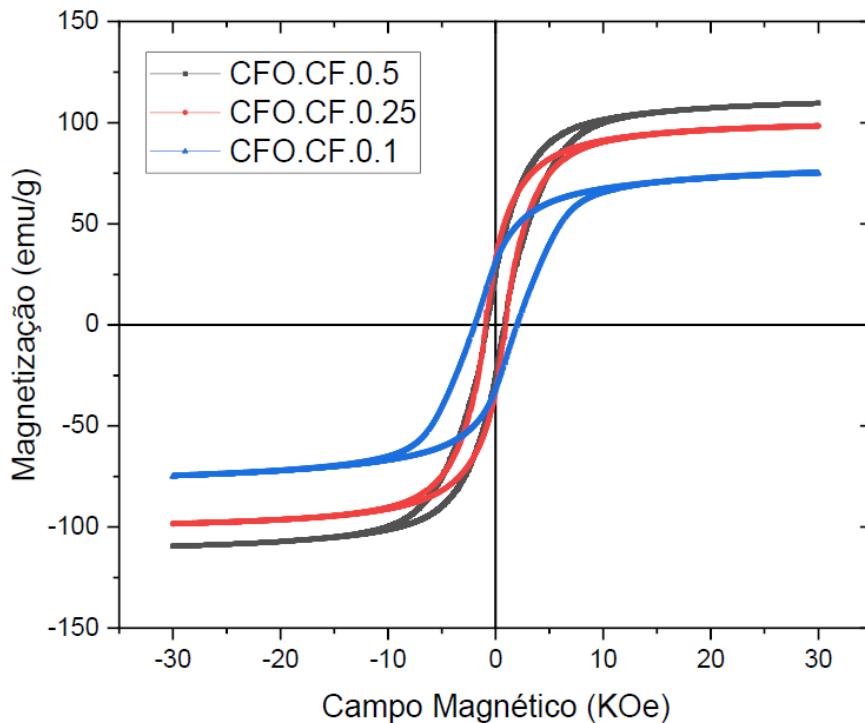


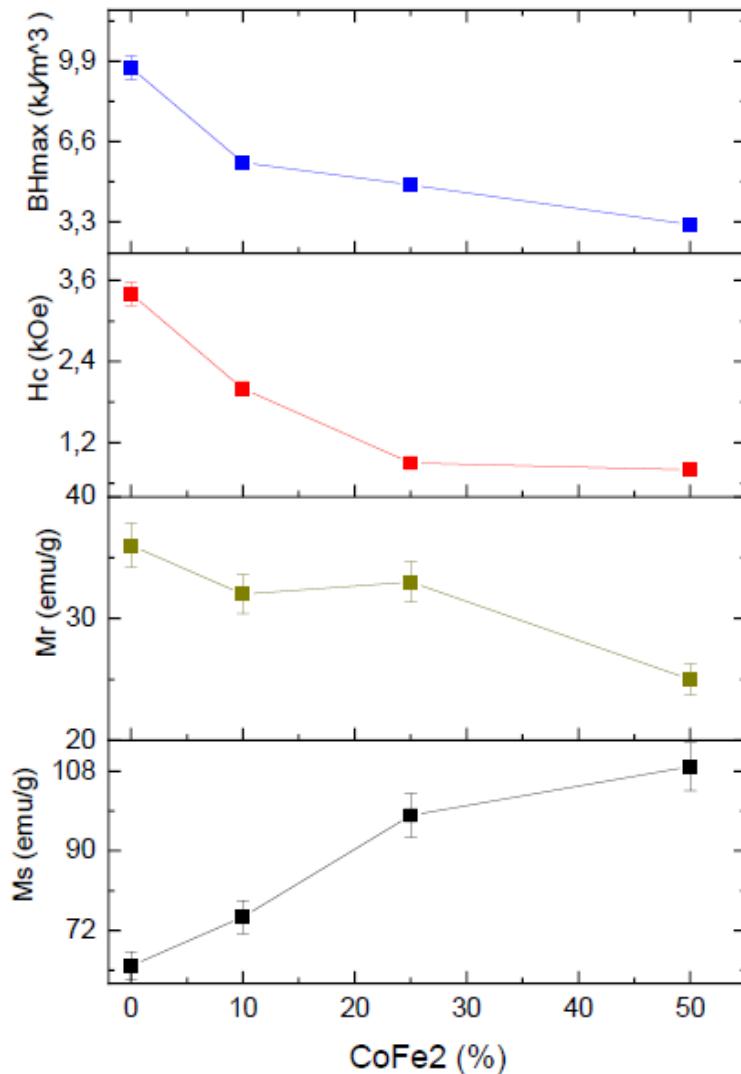
Figura 1 - Curva de histerese dos nanocompósito de $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$ com diferentes concentrações de ferro cobalto. **Fonte:** (FERREIRA, 2023).

2878

A partir da análise da Figura 1, é possível observar claramente a ocorrência de um acoplamento magnético (exchange-spring) entre a ferrita de cobalto (fase magneticamente dura) e o ferro-cobalto (fase magneticamente mole). Esse acoplamento é evidenciado pela curva de histerese contínua e suave, sem a presença de descontinuidades abruptas ou "degraus", que seriam indicativos de fases magneticamente separadas (CHITHRA et al., 2015). A forma unificada da curva de histerese confirma a eficácia do método de moagem de alta energia em promover uma interação interfacial íntima entre as nanopartículas das duas fases.

A Figura 2 ilustra a variação das principais propriedades magnéticas dos nanocompósitos — magnetização de saturação (M_s), coercividade (H_c), remanência (M_r) e produto energético

máximo ($[BH]_{\max}$) — em função do aumento da concentração de ferro-cobalto.



2879

Figura 2 - Propriedades magnéticas do nanocompósito de *CoFe204/CoFe2* em função da concentração de ferro-cobalto. **Fonte:** (FERREIRA, 2023).

Ao analisar a Figura 2, verifica-se que a magnetização de saturação (M_s) foi a única propriedade magnética que apresentou um aumento consistente à medida que a concentração de ferro-cobalto aumentou no nanocompósito. Esse incremento na M_s é diretamente relacionado à maior quantidade de fase magnética mole (CoFe), que possui uma magnetização intrínseca mais elevada, resultando em uma maior resposta magnética geral do material sob um campo saturante (EDELSTEIN, 2001).

Por outro lado, a remanência (M_r), a coercividade (H_c) e o produto energético máximo ($[BH]_{\max}$) apresentaram um comportamento decrescente com o aumento da concentração de ferro-cobalto. A diminuição da remanência e da coercividade indica uma redução na

estabilidade e na capacidade de retenção da magnetização após a remoção de um campo magnético externo. Essa tendência é esperada, visto que o CoFe é um material magneticamente mole e sua maior proporção no nanocompósito tende a suavizar as propriedades magnéticas gerais do material.

Esses efeitos podem ser atribuídos a diferentes fatores microestruturais induzidos pela moagem de alta energia e pela variação na composição. Embora o acoplamento exchange-spring seja formado, o aumento da fase mole pode levar a (i) formação de fases secundárias ou aglomerados com menor resposta magnética (CHITHRA et al., 2015; SAFI et al., 2016), (ii) a presença de defeitos ou impurezas na estrutura cristalina que atuam como centros de nucleação e reversão de domínios magnéticos, reduzindo a coercividade (OU-YANG et al., 2015), ou (iii) a modificação da interação entre os átomos de ferro e cobalto devido ao aumento da concentração da fase metálica (SUN et al., 2015).

Uma das principais vantagens deste método de síntese é a sua alta eficiência e velocidade. O processo de moagem de alta energia, com apenas 1 minuto de duração, é aproximadamente 60 vezes mais rápido quando comparado aos métodos de redução com gás hidrogênio (HIEN et al., 2020; FERREIRA; CHAGAS, 2025a). Ao utilizar a moagem de alta energia, é possível obter uma mistura uniforme e um acoplamento magnético entre as diferentes fases, resultando em melhorias significativas nas propriedades magnéticas do nanocompósito.

2880

Esses resultados demonstram que o método de moagem de alta energia é uma alternativa viável e eficiente para a síntese de nanocompósitos de $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$. Além disso, a possibilidade de ajustar a concentração de ferro-cobalto oferece a flexibilidade de controlar as propriedades magnéticas do material conforme necessário para aplicações específicas.

4. DISCUSSÃO

A síntese ultrarrápida de nanocompósitos de $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$ por moagem de alta energia, com apenas 1 minuto de processamento, representa um avanço significativo em relação aos métodos convencionais. A Figura 1 evidencia a formação de um acoplamento magnético tipo exchange-spring, caracterizado pela continuidade das curvas de histerese. Este fenômeno é crucial para o desempenho de ímãs permanentes e indica que as interfaces entre as fases dura (CoFe_2O_4) e mole (CoFe) são bem estabelecidas, permitindo uma interação magnética coerente entre elas (CHITHRA et al., 2015). A moagem de alta energia, ao induzir a

nanoestruturação e a mistura íntima das partículas, é particularmente eficaz na criação dessas interfaces.

A análise da Figura 2 revela um comportamento distinto das propriedades magnéticas em função da concentração de CoFe. O aumento da magnetização de saturação (M_s) com a adição de CoFe é um resultado esperado e altamente desejável. A fase CoFe possui uma M_s intrínseca significativamente maior do que a CoFe_2O_4 . Portanto, quanto maior a proporção da fase metálica, maior a magnetização total do nanocompósito. Essa capacidade de elevar a M_s em um processo tão rápido abre portas para aplicações que demandam alta densidade de energia magnética (MARTÍNEZ GOMEZ, 2023).

Por outro lado, a diminuição da remanência (M_r), coercividade (H_c) e do produto energético máximo ($[\text{BH}]_{\max}$) com o aumento da concentração de CoFe é também um comportamento compreensível. A coercividade de um nanocompósito exchange-spring é determinada por um balanço complexo entre as propriedades da fase dura e da fase mole, além da microestrutura (tamanho de grão, distribuição de fases). O CoFe é um material magneticamente mole, o que significa que ele tem baixa H_c . A medida que sua proporção aumenta, o caráter mole do nanocompósito se torna mais dominante, resultando na queda da coercividade geral do sistema (OU-YANG et al., 2015). A diminuição da M_r e do $[\text{BH}]_{\max}$ está diretamente ligada à redução da H_c , já que o $[\text{BH}]_{\max}$ é o produto de M_r e H_c . Para aplicações em ímãs permanentes de alta performance, é fundamental otimizar a H_c sem comprometer drasticamente a M_s e M_r .

2881

Os fatores que podem contribuir para a queda na coercividade e remanência, conforme sugerido pelos dados, incluem a formação de fases secundárias ou aglomerados, que podem atuar como sítios de nucleação de domínios magnéticos e facilitar a reversão da magnetização (SAFI et al., 2016). Além disso, a intensa energia mecânica durante a moagem de alta energia pode gerar defeitos na estrutura cristalina ou induzir estresses que afetam as interações magnéticas (SUN et al., 2015). Embora o acoplamento exchange-spring seja presente, o controle preciso da microestrutura em tempos de moagem tão curtos é um desafio que precisa ser investigado mais a fundo.

A principal vantagem deste método é sua velocidade excepcional. Ser 60 vezes mais rápido que os métodos de redução com hidrogênio (HIEN et al., 2020) torna a moagem de alta energia extremamente atraente para a produção industrial. Essa rapidez não apenas reduz os custos de energia e tempo de processamento, mas também minimiza a degradação de algumas

propriedades que podem ocorrer em tratamentos térmicos prolongados. A flexibilidade em ajustar a composição (concentração de CoFe) permite a "engenharia" das propriedades magnéticas para atender a diferentes requisitos, desde materiais para sensores que podem se beneficiar da menor coercividade, até a otimização para ímãs permanentes de alto desempenho, onde um balanço entre alta Ms e Hc ainda precisa ser alcançado (KALIA et al., 2022). Estudos futuros poderiam explorar a variação do tempo de moagem em segundos, a otimização da relação bolas/pó e a atmosfera de moagem para um controle mais refinado da microestrutura e, consequentemente, das propriedades magnéticas desses nanocompósitos ultrarrápidos.

CONCLUSÃO

A síntese de nanocompósitos de ferrita de cobalto/ferro cobalto através do método de moagem de alta energia demonstrou ser uma rota ultrarrápida e eficaz, com um tempo de processamento de apenas 1 minuto. As medidas magnéticas confirmaram a formação de um acoplamento magnético tipo exchange-spring entre as fases dura (CoFe_2O_4) e mole (CoFe), evidenciada pelas curvas de histerese contínuas.

Observou-se que a magnetização de saturação (Ms) aumentou consistentemente com o incremento da concentração de ferro-cobalto, um resultado promissor para aplicações que exigem alta capacidade magnética. Contudo, a remanência (Mr), a coercividade (Hc) e o produto energético máximo ($[\text{BH}]_{\text{max}}$) apresentaram uma diminuição com o aumento da fase mole, refletindo a transição do caráter magnético do nanocompósito para um comportamento mais mole.

2882

Este trabalho destaca a viabilidade e a eficiência do método de moagem de alta energia para a obtenção de nanocompósitos magnéticos em tempo recorde. A capacidade de modular as propriedades magnéticas através da variação da composição oferece grande flexibilidade para o design de materiais sob medida para aplicações tecnológicas específicas. Pesquisas futuras devem focar na otimização dos parâmetros de moagem para alcançar um balanço ideal entre a alta magnetização e a coercividade necessária para ímãs permanentes de alto desempenho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos aos técnicos e à infraestrutura do Laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas da UFMT (LAMUTA) e o Centro Brasileiro

de Pesquisas Físicas (CBPF) pelo suporte na realização das medições magnéticas e na manutenção dos equipamentos de moagem.

REFERÊNCIAS

AHLBURG, Jakob Voldum *et al.* Exploring the direct synthesis of exchange-spring nanocomposites by reduction of CoFe_2O_4 spinel nanoparticles using: In situ neutron diffraction. **Nanoscale**, v. 12, n. 17, p. 9440–9451, 7 maio 2020.

BALDI, Giovanni *et al.* Cobalt ferrite nanoparticles: The control of the particle size and surface state and their effects on magnetic properties. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 311, n. 1, p. 10–16, 1 abr. 2007.

BHATTI, K. A. *et al.* Synthesis and characterization of cobalt ferrite (CoFe_2O_4) nanoparticles via sol-gel auto-combustion method. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 423, p. 1–6, 2017.

CHAGAS, E. F.; FERREIRA, E. S. Mechanical milling of ferrite nanoparticles. In: **Ferrite Nanostructured Magnetic Materials: Technologies and Applications**, p. 85–102, 1 jan. 2023.

CHITHRA, M. J. *et al.* In situ formation of $\text{FeCo}-\text{CoFe}_2\text{O}_4$ nanocomposite by hydrogen reduction of CoFe_2O_4 for magnetic applications. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 378, p. 121–126, 2015.

EDELSTEIN, A. S. Nanomaterials. **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**, p. 2883
5916–5927, 2001.

DE ASSIS, D. J. *et al.* CoFe_2O_4 nanoparticles reduced in hydrogen atmosphere. **Materials Research Bulletin**, v. 43, n. 7, p. 1762–1770, 2008.

Hien, N. T. *et al.* Preparation of exchange coupled $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}_2$ nanopowders. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 511, 1 out. 2020.

FERREIRA, Edson Silva. **Preparação, análise microestrutural e propriedades magnéticas de nanocompósitos de $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$.** Orientador: Edson Ferreira Chagas. 2023. Tese (Doutorado em Física) – Programa de Pós-graduação em Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2023. Disponível em: <http://ri.ufmt.br/handle/1/5613>. Acesso em: 21 jul. 2025.

FERREIRA, E. S.; CHAGAS, E. F. PREPARAÇÃO RÁPIDA DE NANOCOMPÓSITOS DE FERRITA DE COBALTO/FERRO COBALTO POR REDUÇÃO COM HIDROGÊNIO. **Revista Ibero-Americana De Humanidades, Ciências E Educação**, v. 11, n. 7, p. 276–283, 2025a. Disponível em: <https://doi.org/10.51891/rease.v11i7.20155>. Acesso em: 24 jul. 2025.

FERREIRA, E. S.; CHAGAS, E. F. PROPRIEDADES ESTRUTURAIS DE NANOCOMPÓSITOS DE FERRITA DE COBALTO/FERRO COBALTO PRODUZIDOS POR REDUÇÃO RÁPIDA COM HIDROGÊNIO: UMA ANÁLISE POR

DIFRAÇÃO DE RAIOS-X. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 12, n. 8, 2025b.

FULLERTON, Eric E.; JIANG, J. S.; BADER, S. D. Hard/soft magnetic heterostructures: model exchange-spring magnets. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 200, p. 392–404, 1999.

JAUHAR, Sheenu et al. Tuning the properties of cobalt ferrite: A road towards diverse applications. **RSC Advances**, 2016.

KALIA, S. et al. Properties, applications, and synthesis of first transition series substituted cobalt ferrite: A mini review. In: **Journal of Physics: Conference Series**. [S. l.]: Institute of Physics, 3 jun. 2022. v. 2267, n. 1, p. 012015.

KAHNES, E. et al. Fabrication and characterization of $\text{CoFe}_{2-\delta}\text{O}_{4+\delta}/\text{CoFe}$ hard/soft magnetic nanocomposites by chemical reduction. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 473, p. 1–7, 2019.

LÓPEZ-ORTEGA, Alberto et al. Applications of exchange coupled bi-magnetic hard/soft and soft/hard magnetic core/shell nanoparticles. **Physics Reports** Elsevier B.V., 1 fev. 2015.

MARTÍNEZ GOMEZ, María. Permanent Magnets. **Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering**, p. 219–228, 2023.

OU-YANG, Jun et al. Composition dependence of the magnetic properties of $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}_2$ composite nano-ceramics. **Ceramics International**, v. 41, n. 3, p. 3896–3900, 1 abr. 2015. 2884

SAFI, Rohollah et al. Development of novel exchange spring magnet by employing nanocomposites of CoFe_2O_4 and CoFe_2 . In: **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. [S. l.]: Elsevier, 2016. v. 407, p. 238–245.

SUN, X. et al. Improved magnetic performance at low and high temperatures in non-exchange-coupling $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}_2$ nanocomposites. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 645, p. 51–56, 8 maio 2015.

SUNDAR, R. S.; DEEVI, S. C. Soft magnetic FeCo alloys: Alloy development, processing, and properties. **International Materials Reviews** IOM Communications Ltd., 2005.