

PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE NANOCOMPÓSITOS DE FERRITA DE COBALTO/FERRO COBALTO PRODUZIDOS POR REDUÇÃO RÁPIDA COM HIDROGÊNIO

MAGNETIC PROPERTIES OF COBALT FERRITE/COBALT IRON NANOCOMPOSITES PRODUCED BY RAPID HYDROGEN REDUCTION

PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE NANOCOMPUESTOS DE FERRITA DE COBALTO/HIERRO COBALTO PRODUCIDOS POR REDUCCIÓN RÁPIDA CON HIDRÓGENO

Edson Silva Ferreira¹
Edson Ferreira Chagas²

RESUMO: Este trabalho investiga as propriedades magnéticas de nanocompósitos de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) e ferro-cobalto (CoFe), sintetizados por um método rápido de redução com hidrogênio. Amostras de CoFe_2O_4 previamente moídas foram submetidas a tratamento térmico em forno tubular sob atmosfera de hidrogênio (99,99% de pureza) a 350°C , com tempos variando de 10 a 30 minutos. As medidas magnéticas, realizadas por magnetometria de amostra vibrante (VSM), revelaram a formação de uma interação de exchange-spring entre as fases magneticamente dura (CoFe_2O_4) e mole (CoFe), evidenciada por curvas de histerese suaves e contínuas. Observou-se um aumento notável na magnetização de saturação (M_s), de $64(3)$ emu/g para $176(20)$ emu/g em 30 minutos, atribuído à crescente formação de CoFe , que possui maior M_s . Em contraste, a magnetização remanente (M_r) e a coercividade (H_c) diminuíram significativamente com o tempo de redução, de $36(1,8)$ emu/g para $20(1)$ emu/g e de $3,4(2)$ kOe para $0,3(0,1)$ kOe, respectivamente. O produto energético máximo ($[BH]_{\text{max}}$) também reduziu de $9,6(5)$ kJ/m³ para $1,0(0,5)$ kJ/m³. Essas tendências confirmam a natureza magneticamente mole do CoFe formado e a transição do material de um caráter semi-duro para um mais mole. Os resultados demonstram a eficácia do método rápido de redução na modulação das propriedades magnéticas desses nanocompósitos, oferecendo uma abordagem promissora para materiais com propriedades ajustáveis para diversas aplicações tecnológicas.

2818

Palavras-chave: Nanocompósitos Magnéticos. Ferrita de Cobalto. Ferro Cobalto. Magnetização. Coercividade. Exchange-Spring.

¹Professor, IFMT.

²Professor, UFMT.

ABSTRACT: This work investigates the magnetic properties of cobalt ferrite (CoFe_2O_4) and cobalt iron (CoFe) nanocomposites, synthesized by a rapid hydrogen reduction method. Pre-milled CoFe_2O_4 samples were subjected to thermal treatment in a tubular furnace under a hydrogen atmosphere (99.99% purity) at 350°C , with times ranging from 10 to 30 minutes. Magnetic measurements, performed by vibrating sample magnetometry (VSM), revealed the formation of an exchange-spring interaction between the magnetically hard (CoFe_2O_4) and soft (CoFe) phases, evidenced by smooth and continuous hysteresis loops. A notable increase in saturation magnetization (M_s) was observed, from $64(3) \text{ emu/g}$ to $176(20) \text{ emu/g}$ in 30 minutes, attributed to the increasing formation of CoFe, which has a higher M_s . In contrast, remanent magnetization (M_r) and coercivity (H_c) significantly decreased with reduction time, from $36(1.8) \text{ emu/g}$ to $20(1) \text{ emu/g}$ and from $3.4(2) \text{ kOe}$ to $0.3(0.1) \text{ kOe}$, respectively. The maximum energy product ($[BH]_{\text{max}}$) also decreased from $9.6(5) \text{ kJ/m}^3$ to $1.0(0.5) \text{ kJ/m}^3$. These trends confirm the magnetically soft nature of the formed CoFe and the material's transition from a semi-hard to a softer character. The results demonstrate the effectiveness of the rapid reduction method in modulating the magnetic properties of these nanocomposites, offering a promising approach for materials with tunable properties for various technological applications.

Keywords: Magnetic Nanocomposites. Cobalt Ferrite. Cobalt Iron. Magnetization. Coercivity. Exchange-Spring.

RESUMEN: Este trabajo investiga las propiedades magnéticas de nanocompuestos de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) y hierro cobalto (CoFe), sintetizados mediante un método rápido de reducción con hidrógeno. Muestras de CoFe_2O_4 previamente molidas fueron sometidas a tratamiento térmico en un horno tubular bajo atmósfera de hidrógeno (99.99% de pureza) a 350°C , con tiempos variando de 10 a 30 minutos. Las mediciones magnéticas, realizadas por magnetometría de muestra vibrante (VSM), revelaron la formación de una interacción de exchange-spring entre las fases magnéticamente dura (CoFe_2O_4) y blanda (CoFe), evidenciada por curvas de histéresis suaves y continuas. Se observó un aumento notable en la magnetización de saturación (M_s), de $64(3) \text{ emu/g}$ a $176(20) \text{ emu/g}$ en 30 minutos, atribuido a la creciente formación de CoFe, que posee una M_s mayor. En contraste, la magnetización remanente (M_r) y la coercitividad (H_c) disminuyeron significativamente con el tiempo de reducción, de $36(1.8) \text{ emu/g}$ a $20(1) \text{ emu/g}$ y de $3.4(2) \text{ kOe}$ a $0.3(0.1) \text{ kOe}$, respectivamente. El producto energético máximo ($[BH]_{\text{max}}$) también se redujo de $9.6(5) \text{ kJ/m}^3$ a $1.0(0.5) \text{ kJ/m}^3$. Estas tendencias confirman la naturaleza magnéticamente blanda del CoFe formado y la transición del material de un carácter semi-duro a uno más blando. Los resultados demuestran la eficacia del método rápido de reducción en la modulación de las propiedades magnéticas de estos nanocompuestos, ofreciendo un enfoque prometedor para materiales con propiedades ajustables para diversas aplicaciones tecnológicas.

Palabras clave: Nanocompuestos Magnéticos. Ferrita de Cobalto. Hierro Cobalto. Magnetización. Coercitividad. Exchange-Spring.

I. INTRODUÇÃO

A contínua busca por materiais com propriedades magnéticas otimizadas impulsiona o desenvolvimento de novas arquiteturas nanoestruturadas para aplicações que vão desde

dispositivos de armazenamento de dados e componentes eletrônicos até sensores avançados e terapias biomédicas (KALIA et al., 2022). Nesse contexto, os nanocompósitos magnéticos, que integram múltiplas fases com características magnéticas complementares, representam uma estratégia promissora para superar as limitações de materiais de fase única, especialmente por meio da exploração do fenômeno de acoplamento de troca (exchange-spring) (BHATTI et al., 2017).

A ferrita de cobalto (CoFe_2O_4), um óxido com estrutura espinela, é amplamente reconhecida como uma fase magneticamente "dura" ou "semidura", devido à sua alta anisotropia magnetocristalina e considerável coercividade (BALDI et al., 2007). Por outro lado, as ligas de ferro-cobalto (CoFe) são classicamente conhecidas como materiais "moles" com alta magnetização de saturação (MARTÍNEZ GOMEZ, 2023). A combinação estratégica dessas duas fases em uma nanoestrutura pode gerar nanocompósitos com propriedades magnéticas sinérgicas, exibindo simultaneamente alta magnetização de saturação e coercividade controlável, características desejáveis para o aumento do produto energético máximo ($[\text{BH}]_{\text{max}}$) (DE ASSIS et al., 2008; KAHNES et al., 2019).

A síntese desses nanocompósitos envolve frequentemente a redução de óxidos com hidrogênio, um método eficaz para gerar fases metálicas. Um processo de redução rápida com hidrogênio recentemente desenvolvido (FERREIRA; CHAGAS, 2025a) demonstrou ser altamente eficiente na produção de nanocompósitos de $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$, com elevadas taxas de conversão em curtos períodos. Este método promove a formação de uma estrutura core-shell, onde o ferro-cobalto metálico se forma na superfície das partículas de ferrita, um arranjo crucial para a manifestação do acoplamento de troca e para o aprimoramento das propriedades magnéticas (CHITHRA et al., 2015).

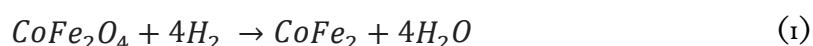
Apesar dos avanços na síntese, uma compreensão aprofundada de como as condições de processo (especialmente o tempo de tratamento térmico) afetam as propriedades magnéticas intrínsecas desses nanocompósitos é fundamental para a otimização de seu desempenho. A magnetização de saturação (M_s), a magnetização remanente (M_r), a coercividade (H_c) e o produto energético máximo ($[\text{BH}]_{\text{max}}$) são parâmetros críticos que governam o comportamento de um material magnético e sua adequação para aplicações específicas. Variações nesses parâmetros refletem diretamente as transformações microestruturais e a interação entre as fases "dura" e "mole".

Este artigo tem como objetivo principal investigar as propriedades magnéticas dos nanocompósitos de $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$ sintetizados pelo método de redução rápida com hidrogênio, por meio da análise de medidas magnéticas detalhadas. Buscaremos correlacionar as condições de tratamento térmico com a evolução da magnetização de saturação, remanência, coercividade e produto energético máximo, a fim de elucidar os mecanismos de controle das propriedades magnéticas e destacar o potencial desses materiais para o desenvolvimento de tecnologias avançadas.

2. MÉTODOS

A preparação dos nanocompósitos iniciou-se com a síntese da ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) precursora, empregando um método de gel-combustão, reconhecido por produzir nanopartículas com boa cristalinidade e homogeneidade. Após a síntese, o material foi submetido a um processo de moagem mecânica, uma etapa de pré-tratamento essencial para modificar a microestrutura da ferrita, resultando em um aprimoramento de suas propriedades magnéticas iniciais (CHAGAS; FERREIRA, 2023). A amostra que apresentou o maior incremento nas propriedades magnéticas após 9 minutos de moagem foi selecionada como material de partida para a etapa de redução.

A redução com hidrogênio foi conduzida em um forno tubular, um equipamento que permite controle preciso da temperatura e da atmosfera reacional, localizado no Laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas da UFMT (LAMUTA). A amostra de CoFe_2O_4 moída foi inserida no forno e exposta a uma atmosfera contínua de hidrogênio gasoso (H_2) com 99,99% de pureza, proveniente de um cilindro. O tratamento térmico foi conduzido a uma temperatura constante e otimizada de 350 °C. Para investigar a influência do tempo no processo de redução e, conseqüentemente, nas propriedades magnéticas, foram testados diferentes intervalos de tratamento: 10, 15, 20, 25 e 30 minutos. Durante o aquecimento, o hidrogênio reage com a ferrita de cobalto, promovendo a sua redução e a formação de fases metálicas de ferro-cobalto (CoFe), conforme a seguinte equação genérica de redução:



Este processo resulta na formação de uma estrutura tipo core-shell, onde o núcleo de ferrita é revestido por uma camada de liga metálica, fundamental para as interações magnéticas (FERREIRA; CHAGAS, 2025b).

As propriedades magnéticas dos nanocompósitos resultantes foram sistematicamente investigadas por magnetometria de amostra vibrante (VSM) do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). As medições foram realizadas à temperatura ambiente para obter as curvas de histerese magnética (M-H) em um campo magnético aplicado na faixa de ± 15 kOe. A partir dessas curvas, foram extraídos parâmetros magnéticos cruciais: a magnetização de saturação (M_s), que representa a magnetização máxima que o material pode atingir sob um campo aplicado suficientemente forte; a magnetização remanente (M_r), que é a magnetização residual após a remoção do campo aplicado; a coercividade (H_c), que indica a intensidade do campo magnético necessária para desmagnetizar o material; e o produto energético máximo ($[BH]_{max}$), que quantifica a energia magnética máxima que pode ser armazenada pelo material, sendo um indicador chave para a qualidade de ímãs permanentes. A análise desses parâmetros em função do tempo de tratamento térmico permitiu avaliar a eficácia do processo de redução na modulação das propriedades magnéticas dos nanocompósitos.

3. RESULTADOS

Após a etapa de moagem mecânica, a amostra de ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) com melhor desempenho magnético inicial (moagem por 9 minutos) foi selecionada como material precursor (FERREIRA, 2023). Essa amostra foi submetida a tratamentos térmicos controlados em atmosfera de hidrogênio puro a 350°C , com tempos de reação variando de 10 a 30 minutos, visando a formação dos nanocompósitos de $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$ e a investigação de suas propriedades magnéticas.

A Figura 1 apresenta as curvas de histerese magnética para a ferrita de cobalto pura e para os nanocompósitos obtidos em diferentes intervalos de tempo de tratamento térmico. É possível observar claramente a formação de uma interação de exchange-spring entre as fases magneticamente dura (CoFe_2O_4) e mole (CoFe). Essa interação é evidenciada pelo contorno suave e contínuo das curvas de histerese, sem a presença de "degraus" ou rupturas, o que confirma não apenas a formação dos nanocompósitos, mas também um acoplamento magnético eficaz entre as suas fases (CHITHRA et al., 2015).

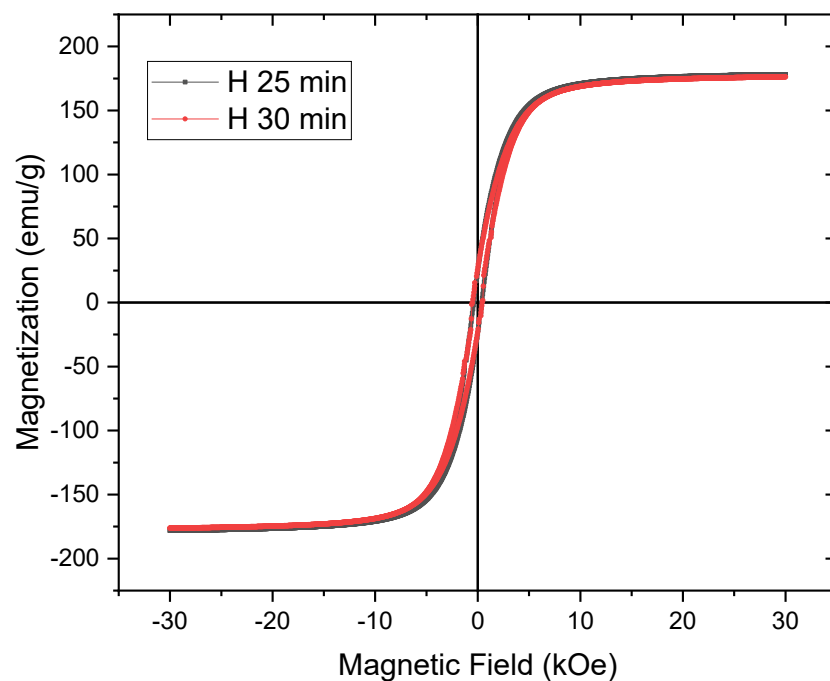
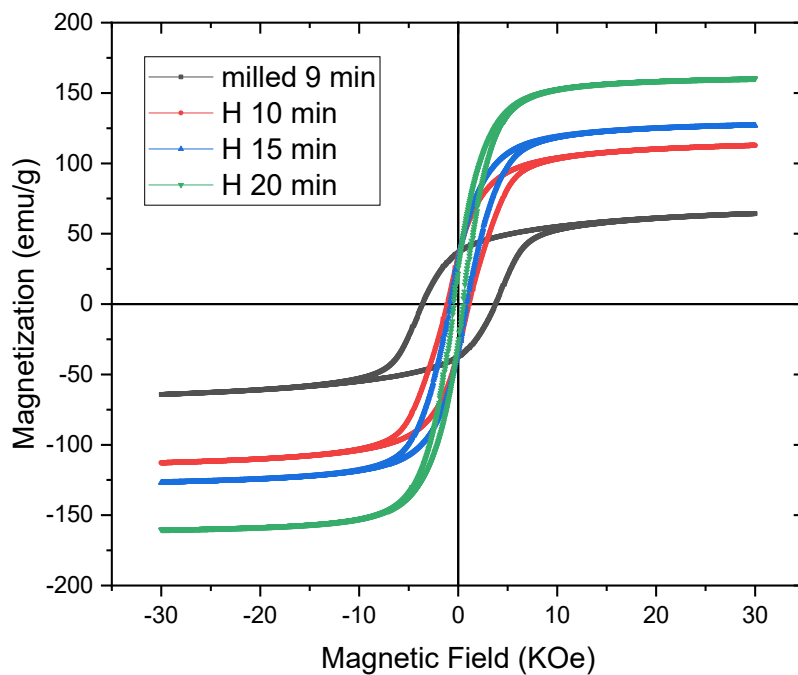


Figura 1 - Curvas de histerese da ferrita de cobalto pura e dos nanocompósitos tratados termicamente em uma atmosfera de hidrogênio em diferentes intervalos de tempo. **Fonte:** (FERREIRA, 2023).

A Figura 2 ilustra a evolução das principais propriedades magnéticas dos nanocompósitos — magnetização de saturação (M_s), coercividade (H_c), magnetização remanente (M_r) e produto energético máximo ($[BH]_{max}$) — em função do tempo de tratamento térmico. Esses parâmetros são cruciais para compreender como a redução da ferrita de cobalto em ferro-cobalto afeta o desempenho magnético do material.

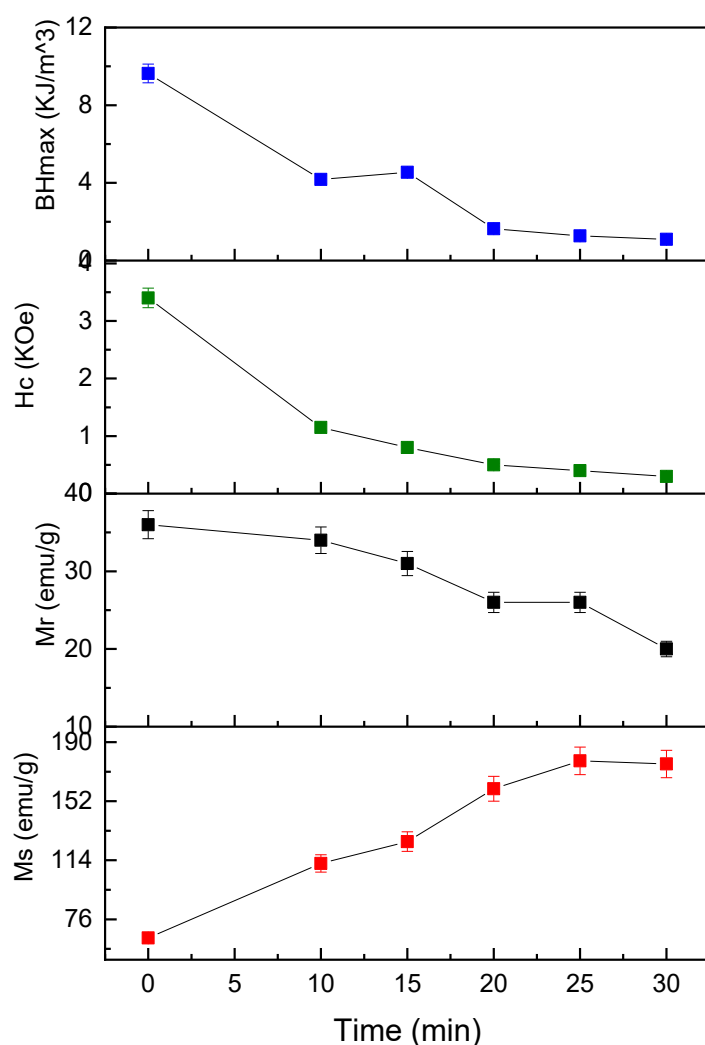


Figura 2 - Curvas evolução das propriedades magnéticas dos nanocompósitos em função do tempo de tratamento térmico. **Fonte:** (FERREIRA, 2023).

Os resultados revelam que, à medida que o tempo de tratamento térmico na atmosfera de hidrogênio aumenta, a magnetização de saturação (M_s) dos nanocompósitos cresce consistentemente. Inicialmente, a M_s da ferrita de cobalto pura é de 64(3) emu/g. Após 30 minutos de tratamento, observa-se um significativo incremento, atingindo o valor de 176(20) emu/g. Esse comportamento é diretamente atribuído ao processo de redução da ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) em ferro-cobalto (CoFe), visto que a liga metálica CoFe possui uma magnetização de saturação intrinsecamente maior (aproximadamente 200 emu/g) (FERREIRA; CHAGAS, 2025a). Esse aumento na M_s é altamente desejável para aplicações que requerem materiais com alta capacidade magnética, como em dispositivos eletrônicos e equipamentos de energia (MARTÍNEZ GOMEZ, 2023).

Em relação à magnetização remanente (M_r), os dados mostraram um comportamento interessante. A M_r inicial da ferrita de cobalto foi de 36(1,8) emu/g, mas, após 30 minutos de tratamento, observou-se uma queda significativa para 20(1) emu/g. Essa redução na M_r pode ser explicada por dois fatores principais: (i) a mudança na estrutura cristalina do material devido à transformação da fase ferrita em fase metálica, que altera o arranjo dos momentos magnéticos (SAFI et al., 2016); e (ii) a alteração das interações magnéticas entre os átomos, que afetam diretamente a capacidade do material de reter sua magnetização após a remoção do campo externo (OU-YANG et al., 2015).

2825

Uma queda significativa na coercividade magnética (H_c) também foi observada. Inicialmente, a H_c é de 3,4(2) kOe (FERREIRA, 2023) e, após 30 minutos de tratamento térmico, esse valor diminui drasticamente para 0,3(0,1) kOe. Esse resultado é esperado, uma vez que o ferro-cobalto é um material classicamente magneticamente mole, caracterizado por sua baixa coercividade.

Consequentemente, o produto energético máximo ($[BH]_{\text{max}}$) também sofreu uma diminuição considerável. O $[BH]_{\text{max}}$ inicial da ferrita de cobalto era de 9,6(5) kJ/m³, e após 30 minutos de tratamento térmico, esse valor reduziu para 1,0(0,5) kJ/m³. Essa diminuição corrobora a natureza magneticamente mole da fase CoFe predominante em tempos de redução mais longos.

Esses resultados demonstram que o método de síntese do nanocompósito de ferrita de cobalto e ferro-cobalto, utilizando a ferrita moída e a redução rápida com hidrogênio, é efetivo e eficiente. Além de sua rapidez, o método permite um controle preciso da proporção de cada componente, o que é crucial para diversas aplicações tecnológicas. A capacidade de ajustar a

concentração de ferro-cobalto no nanocompósito pode ser benéfica para modular suas propriedades magnéticas e, conseqüentemente, otimizar o desempenho em dispositivos magnéticos, como memórias de armazenamento e sensores (KALIA et al., 2022). Esse método oferece uma abordagem promissora para a obtenção de nanocompósitos magnéticos personalizados com propriedades ajustáveis, ampliando o leque de aplicações tecnológicas.

4. DISCUSSÃO

A análise das propriedades magnéticas dos nanocompósitos de $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$ sintetizados via redução rápida com hidrogênio revela uma complexa inter-relação entre o tempo de tratamento térmico e o comportamento magnético final. A formação de uma interação de exchange-spring, evidenciada pelas curvas de histerese suaves e contínuas (Figura 1), é um achado crucial. Isso indica que, apesar da coexistência de fases magneticamente dura (CoFe_2O_4) e mole (CoFe), há um acoplamento eficaz entre elas, permitindo que a fase mole seja "arrastada" pela fase dura, resultando em um comportamento magnético que não é simplesmente a soma das propriedades individuais das fases. Esse acoplamento é fundamental para o potencial de aplicação desses materiais em ímãs permanentes de alto desempenho (CHITHRA et al., 2015).

2826

O aumento progressivo da magnetização de saturação (M_s) com o tempo de redução (Figura 2) é diretamente atribuído à conversão da CoFe_2O_4 (que possui M_s de 64 emu/g) na fase metálica de CoFe (com M_s intrínseca de ~200 emu/g). Quanto maior o tempo de exposição ao hidrogênio, maior a proporção de CoFe formada, o que eleva a M_s global do nanocompósito. Esse resultado é consistente com o objetivo de obter materiais com alta densidade de energia, crucial para aplicações em motores elétricos e dispositivos de gravação magnética de alta densidade (MARTÍNEZ GOMEZ, 2023).

Em contrapartida, a magnetização remanente (M_r) e, mais acentuadamente, a coercividade (H_c) diminuíram significativamente com o aumento do tempo de redução. A queda da M_r , de 36 emu/g para 20 emu/g, sugere que, à medida que a fase CoFe se torna mais predominante, a capacidade do material de reter sua magnetização após a remoção do campo externo é comprometida. A redução drástica da H_c , de 3,4 kOe para 0,3 kOe, é um indicativo claro da transição do nanocompósito de um caráter predominantemente "semiduro" para um caráter mais "mole". O ferro-cobalto é, por definição, um material magneticamente mole, e seu aumento percentual na composição final dilui o efeito coercitivo da ferrita de cobalto. Isso é

corroborado por estudos que apontam que a alteração da estrutura cristalina e das interações atômicas durante a redução pode levar a uma diminuição da M_r e H_c (SAFI et al., 2016; OU-YANG et al., 2015).

A diminuição do produto energético máximo ($[BH]_{max}$) de $9,6 \text{ kJ/m}^3$ para $1,0 \text{ kJ/m}^3$ acompanha a tendência da coercividade. O $[BH]_{max}$ é o principal parâmetro para ímãs permanentes e é o produto da remanência e coercividade. Embora a M_s tenha aumentado, a queda acentuada da H_c dominou o comportamento do $[BH]_{max}$, indicando que, para atingir um produto energético máximo elevado, é necessário um balanço delicado entre as proporções das fases dura e mole, e, principalmente, um controle sobre a coercividade. Isso sugere que o tempo de 30 minutos, embora promova alta M_s , leva a um material muito mole para certas aplicações de ímãs permanentes.

A rapidez e a eficiência do método de síntese por redução com hidrogênio são notáveis, permitindo uma modulação das propriedades magnéticas em uma escala de tempo de minutos. Isso é um diferencial significativo para a produção industrial. A capacidade de ajustar a proporção de CoFe formada, variando o tempo de tratamento, oferece um caminho promissor para "customizar" as propriedades magnéticas dos nanocompósitos para atender a requisitos específicos de diferentes aplicações, desde memórias e sensores que podem se beneficiar da coercividade mais baixa em certos cenários, até futuras otimizações para ímãs permanentes que demandam maior H_c (KALIA et al., 2022). Estudos futuros poderiam focar em tempos intermediários ou em variações da temperatura de redução para encontrar a janela ideal de processamento que maximize tanto a M_s quanto uma H_c aceitável para aplicações que dependem do efeito exchange-spring para alto $[BH]_{max}$.

2827

CONCLUSÃO

A investigação das propriedades magnéticas de nanocompósitos de ferrita de cobalto/ferro cobalto, sintetizados por um método rápido de redução com hidrogênio, demonstrou a formação de uma interação de exchange-spring entre as fases magneticamente dura e mole. As curvas de histerese revelaram um acoplamento magnético eficaz, crucial para o desempenho desses materiais.

Os resultados evidenciaram que o tempo de tratamento térmico é um fator determinante para o controle das propriedades magnéticas. Houve um aumento significativo na magnetização de saturação (M_s) com o aumento do tempo de redução, confirmando a alta

eficiência da formação da fase ferro-cobalto. No entanto, observou-se uma diminuição da magnetização remanente (M_r) e, de forma mais acentuada, da coercividade (H_c) e do produto energético máximo ($[BH]_{\max}$), indicando uma transição do material para um caráter mais magneticamente mole em tempos de redução mais longos.

Este estudo ressalta a viabilidade do método de síntese rápida para modular as propriedades magnéticas dos nanocompósitos. A capacidade de ajustar a M_s , M_r , H_c e $[BH]_{\max}$ simplesmente variando o tempo de tratamento oferece um controle preciso sobre o comportamento magnético, permitindo o desenvolvimento de materiais personalizados para diversas aplicações tecnológicas. Pesquisas futuras poderiam explorar o ajuste de outros parâmetros de síntese para otimizar o balanço entre as propriedades magnéticas desejadas.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas da UFMT (LAMUTA) e o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) pelo suporte técnico e acesso aos equipamentos de medição magnética.

REFERÊNCIAS

- 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 $\text{FeCo-CoFe}_2\text{O}_4$ nanocomposite by hydrogen reduction of CoFe_2O_4 for magnetic applications. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 378, p. 121–126, 2015.
- 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.
- 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.viii7.20155>. 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.

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 $\text{CoFe}_{2}\text{O}_{4}/\text{CoFe}$ hard/soft magnetic nanocomposites by chemical reduction. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 473, p. 1–7, 2019.

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.

SAFI, Rohollah et al. Development of novel exchange spring magnet by employing nanocomposites of $\text{CoFe}_{2}\text{O}_{4}$ and CoFe_{2} . In: **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. [S. l.]: Elsevier, 2016. v. 407, p. 238–245.