

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CURSO DE CIÊNCIAS NATURAIS QUÍMICA
CENTRO DE CIÊNCIAS DE SÃO BERNARDO

SILVANA ARAUJO RODRIGUES

**Síntese de CuFe_2O_4 tetragonal nanocristalino pelo método sol-gel de proteico e
caracterização das suas propriedades estruturais e magnéticas.**

São Bernardo – MA

2025

SILVANA ARAUJO RODRIGUES

Síntese de CuFe_2O_4 tetragonal nanocristalino pelo método sol-gel de proteico e caracterização das suas propriedades estruturais e magnéticas.

Artigo apresentado ao Curso de Ciências Naturais Química da Universidade Federal do Maranhão – Centro de Ciências de São Bernardo, para obtenção do grau de Licenciatura em Ciências Naturais – Química.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Targino Gurgel.

São Bernardo – MA

2025

SILVANA ARAUJO RODRIGUES

Síntese de CuFe_2O_4 tetragonal nanocristalino pelo método sol-gel de proteico e caracterização das suas propriedades estruturais e magnéticas.

Aprovado em: **07 / 08 / 2025**

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



THIAGO TARGINO GURGEL

Data: 08/08/2025 19:23:19-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Thiago Targino Gurgel (Orientador)

Doutor em Física

Universidade Federal do Maranhão – Centro de Ciências de São Bernardo

Documento assinado digitalmente



JEFFERSON ALMEIDA ROCHA

Data: 11/08/2025 11:28:21-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jefferson Almeida Rocha

Doutor em Biologia

Universidade Federal do Maranhão – Centro de Ciências de São Bernardo

Documento assinado digitalmente



BENEDICTO AUGUSTO VIEIRA LIMA

Data: 09/08/2025 15:36:24-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Benedicto Augusto Vieira Lima

Doutor em Química

Universidade Federal do Maranhão – Centro de Ciências de São Bernardo

Síntese de CuFe_2O_4 tetragonal nanocristalino pelo método sol-gel de proteico e caracterização das suas propriedades estruturais e magnéticas

Silvana Araújo Rodrigues¹ (UFMA)

E-mail: silvana.rodrigues@discente.ufma.br

Thiago Targino Gurgel² (UFMA) (Orientador)

E-mail: tt.gurgel@ufma.br

José Marcos Sasaki³ (UFC)(Colaborador)

E-mail: sasaki@fisica.ufc.br

RESUMO

Apresentamos a síntese pelo método sol-gel de proteínas e a caracterização das propriedades estruturais e magnéticas do CuFe_2O_4 ferromagnético. As medições TG-DTA mostram uma temperatura de cristalização de cerca de 815°C . A amostra foi caracterizada por difração de raios X (XRD), microscopia eletrônica de varredura (SEM), medições de magnetização e espectros Mössbauer, respectivamente. A fase de pureza do composto foi confirmada por experimento de difração de raios X e refinamento de Rietveld. Foi observada uma fase estrutural de espinélio tetragonal com grupo espacial $I41/amd$. As medições de difração de raios X mostram que o grão médio é de $62,8\text{ nm}$ para a amostra calcinada a 850°C . As imagens de microscopia eletrônica de varredura (SEM) exibem uma morfologia de forma irregular e confirmam a existência de uma diferença entre o tamanho das partículas observado por XRD. Os dados de magnetização da amostra tetragonal nanocristalina indicam ordem ferromagnética abaixo de $T_c = 188,2\text{ K}$. As curvas de histerese magnética das amostras indicaram uma natureza ferromagnética típica da amostra. Este composto apresenta um momento efetivo de $1,43\ \mu_B$, valor abaixo do esperado $\approx 3,5\ \mu_B$, por unidade de fórmula, e uma temperatura de Curie-Weiss de 183 K é característica da ordem ferromagnética. O momento magnético saturado (M_s) de $1,4\ \mu_B$ por unidade de fórmula a 15 K e campo coercitivo de cerca de $0,45\text{ kOe}$ do CuFe_2O_4 . Os espectros de Mössbauer registrados à temperatura ambiente apresentaram dois sextetos. O primeiro sexteto apresentou um deslocamento isomérico de $0,35\text{ mm/s}$, divisão quadripolar de $-0,34\text{ mm/s}$ e divisão do campo magnético de $50,7\text{ T}$. O segundo sexteto apresentou um deslocamento isomérico de $0,26\text{ mm/s}$, divisão quadripolar de $-0,031\text{ mm/s}$ e divisão do campo magnético de aproximadamente $47,9\text{ T}$.

Palavras-chave: Ferrita de Cobre, Sol-gel, nanocompósitos, propriedades magnéticas, espectros Mössbauer.

¹Licenciada do curso de Ciências Naturais Química da Universidade Federal do Maranhão. E-mail: silvana.rodrigues@discente.ufma.br

²Graduado em Física; Doutor em Física pela UFS; Professor Adjunto IV da UFMA no Centro de Ciências de São Bernardo. Coordenador do Grupo de Pesquisa e Ensino de Física - GPEF. E-mail: tt.gurgel@ufma.br

1 Introdução

Uma área em crescimento dentro da ciência dos materiais é o estudo dos nanomateriais. O interesse nesta área deve-se ao facto de os nanomateriais terem propriedades físicas e químicas diferentes em comparação com as suas macroestruturas, conhecidas como amostras a granel do material (G. and S.,2012).

As ferritas espinélio têm uma estrutura complexa com um total de 56 íons por célula unitária, o que significa que existem 8 fórmulas químicas (ou conjuntos de átomos) MFe_2O_4 por célula unitária. Existem 8 íons M^{+2} , 16 íons Fe^{+3} e 32 íons O^{-2} . Os 32 íons de oxigénio formam 96 locais (ou interstícios), 64 dos quais são locais tetraédricos, também conhecidos como locais A, e 32 locais octaédricos, também conhecidos como locais B. Apenas 8 locais A e 16 locais B são ocupados por cátions, permanecendo os restantes locais vazios. Os íons de oxigénio são os maiores ($r \approx 0,14$ nm) e estão empacotados numa disposição FCC cúbica densa, com os íons metálicos M^{+2} ($r \approx 0,07$ nm) e Fe^{+3} ($r \approx 0,06$ nm) nos centros dos sítios A e B. Os íons de oxigénio ocupam os cantos e os centros das faces da célula unitária, bem como os vértices de todos os sítios. Cada cátion metálico divalente num sítio A é coordenado por quatro íons de oxigénio, enquanto no sítio B são coordenados por seis íons de oxigénio. Cada aresta de um sítio B é partilhada por outro sítio B, e cada vértice de um sítio A é partilhado com um sítio B (YITZHAK,2012; GOLDMAN,2005; e VALENZUELA;1994). A Figura 1 representa a célula unitária de uma estrutura espinélio de $CuFe_2O_4$.

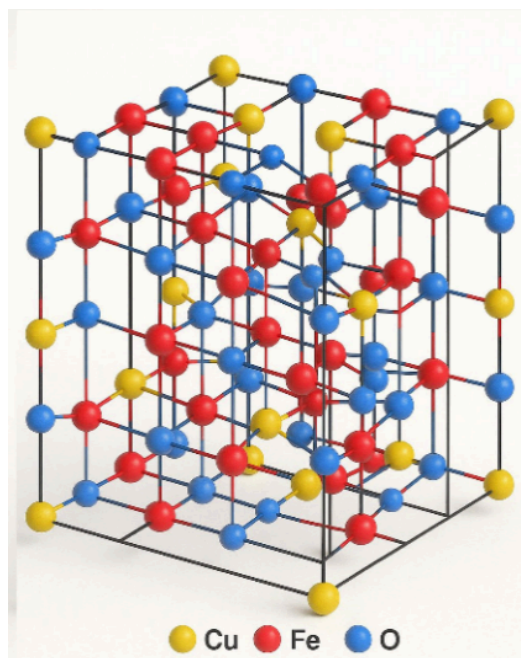


Figura 1: (Cor ilustrativa) Estrutura do modelo atômico: as esferas azuis são O, as esferas vermelhas representam Fe e as amarelas representam Cu.

Nosso grupo de pesquisa tem ampla experiência na síntese de nanopartículas de Ferrita (LIMA, 2019; Girão et al.,2021). Por esse motivo, escolhemos as NPs de CuFe_2O_4 , devido ser um material fascinante e versátil, com notáveis propriedades magnéticas intrínsecas (Park,2008). É amplamente utilizado para uma variedade de aplicações, tais como micro-ondas; dispositivos eletrônicos de baixa a alta permeabilidade, incluindo ferrofluidos, bobinas de carga, dispositivos de micro-ondas, administração magnética de medicamentos, sensores de gás, imagem a cores, hastes de antenas, cabeças de gravação e armazenamento de informação de alta densidade; detecção de gás GPL; e aplicações fotocatalíticas (Haija et al.,2017; Zaharieva et al.,2015).As ferritas de cobre existem em duas simetrias modificadas de $Fd3m$ cúbico e $I41/amd$ tetragonal a uma temperatura (T) > 700 K (427 °C). As mudanças de simetria foram bem explicadas pelo efeito *Jahn-Teller*, segundo o qual, durante a transição de fase, o ambiente de oxigênio coberto pelos íons de cobre vizinhos fica distorcido, e o processo de degeneração orbital padrão e a energia total do sistema são reduzidos (Amir et al.,2019). Investigamos a ferrita CuFe_2O_4 na sua simetria cúbica.

O objetivo desta pesquisa é produzir ferrita de cobre usando o método sol-gel de proteínas e realizar sua caracterização estrutural e magnética, obtendo propriedades aceitáveis para aplicações de ferrita.

2 Detalhes experimentais

Inicialmente, 1,241 g de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (nitrato de cobre II hidratado) foi dissolvido em 10 ml de água destilada em um béquer à temperatura ambiente, com agitação magnética constante (600 rpm). Em outro béquer, 0,620 g de gelatina hidrolisada foi dissolvido em 10ml de água destilada, também em temperatura ambiente, com agitação magnética constante (600 rpm). As duas soluções foram combinadas sob agitação magnética (600 rpm) por 20 minutos, e essa solução foi chamada de solução A. Um terceiro béquer foi retirado e 3,447 g de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (nitrato de ferro III não-hidratado) foram dissolvidos em 10 ml de água destilada, em temperatura ambiente, com agitação magnética constante (600 rpm). Em um quarto béquer, 1,724 g de gelatina hidrolisada foi dissolvida em 10 ml de água destilada em temperatura ambiente e sob agitação magnética constante (600 rpm). Essas duas últimas soluções foram combinadas sob agitação magnética (600 rpm) por 20 minutos e essa solução foi chamada de solução B. Finalmente, as soluções A e B foram misturadas em um único béquer sob agitação magnética (600 rpm) por 2 horas. Após esse período, a solução final A + B foi seca em uma estufa a 100°C por 24 horas. Após esse período, o xerogel ou puff foi formado. Nessa amostra, o tempo de calcinação foi fixado em 240 minutos e a temperatura de calcinação em 850°C. Durante as calcinações, a taxa de aquecimento do forno foi de 10 °C/min. Ao final desse procedimento, obtivemos uma massa de aproximadamente 1.000 g de ferrita de cobre (CuFe_2O_4) em pó e nanopartículas.

As curvas de termogravimetria (TG) e de análise térmica diferencial (DTA) dos precipitados secos foram obtidas com o uso de um Jupiter NETZSCH STA TG DTA 449F3.

O tamanho e a morfologia do composto CuFe_2O_4 foram caracterizados usando a Microscopia Eletrônica de Varredura de Emissão de Campo de Alta Resolução (FEG-SEM), modelo TESCAN Mira3 FEG-SEM, acoplado a um detector de Espectrômetro de Dispersão de Energia (EDS) da Oxford Instruments, modelo PENTAFET PRECISION, amostra metalizada com Au.

Para confirmar a pureza da fase do composto, foram realizados experimentos de difração de raios X usando um difratômetro Rigaku com radiação Cu K α .

Medimos a suscetibilidade magnética e a magnetização em função da temperatura e do campo magnético usando um *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM).

Todas as medições de espectroscopia Mössbauer realizadas neste trabalho foram feitas com um espectrômetro SEE Co modelo W302, que usa o modo de transmissão com uma fonte radioativa de ^{57}Co em uma matriz de ródio.

3 Resultados e Discursão

A análise de DTA foi realizada para estudar a perda sistemática de peso e as transformações subsequentes durante o tratamento térmico da amostra calcinada. A curva de DTA é mostrada na figura 2. O primeiro estágio é atingido a 30-127°C, o que é atribuído à perda de água fisicamente absorvida. O segundo estágio corresponde à perda total de cerca de 22% do peso entre 127 e 489,3°C, o que se deve à saída do resíduo de nitrato. Depois de 489,3°C, não foi observada nenhuma perda de peso significativa e o pico exotérmico nas temperaturas de - 815,5 a + 886,4°C, a temperatura atribuída de 850°C foi selecionada como cristalização da amostra.

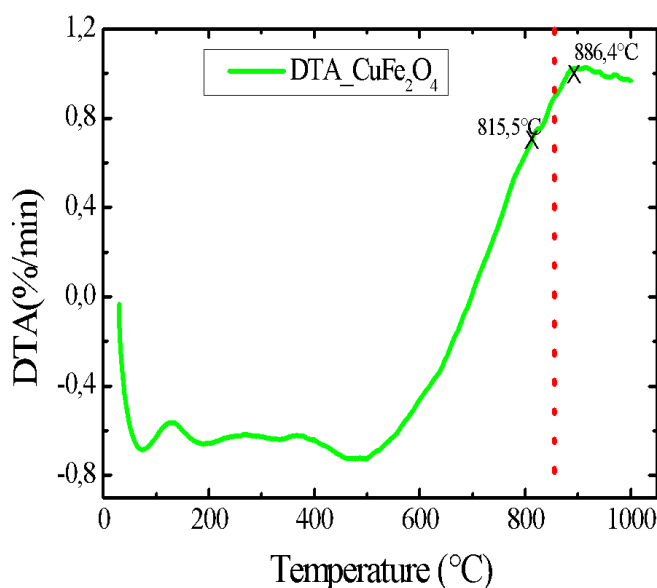


Figura 2: Curva DTA para a amostra CuFe_2O_4 .

Outra caracterização realizada, a presença de elementos precursores nas NPs CuFe_2O_4 foi confirmada com a ajuda da técnica EDX e do mapeamento

elementar (Fig. 3, Tabela 1). As imagens do mapeamento elementar espectral de EDX indicam que as nanopartículas são compostas de Cu, Fe, O e um pouco de C, sem nenhum outro elemento extra, o que confirma a pureza da amostra. A presença de carbono residual está relacionada à síntese pelo método sol-gel proteico, que pode deixar resíduos de carbono na estrutura da ferrita (Silva et al.,2018).

TABELA 1- COMPOSIÇÃO ELEMENTAR E PERCENTUAL DOS CONSTITUINTES DA FERRITA CuFe_2O_4 .

Elementos	Wt%	σ
Fe	48.2	0.4
O	23.2	0.2
Cu	22.7	0.2
C	5.8	0.2

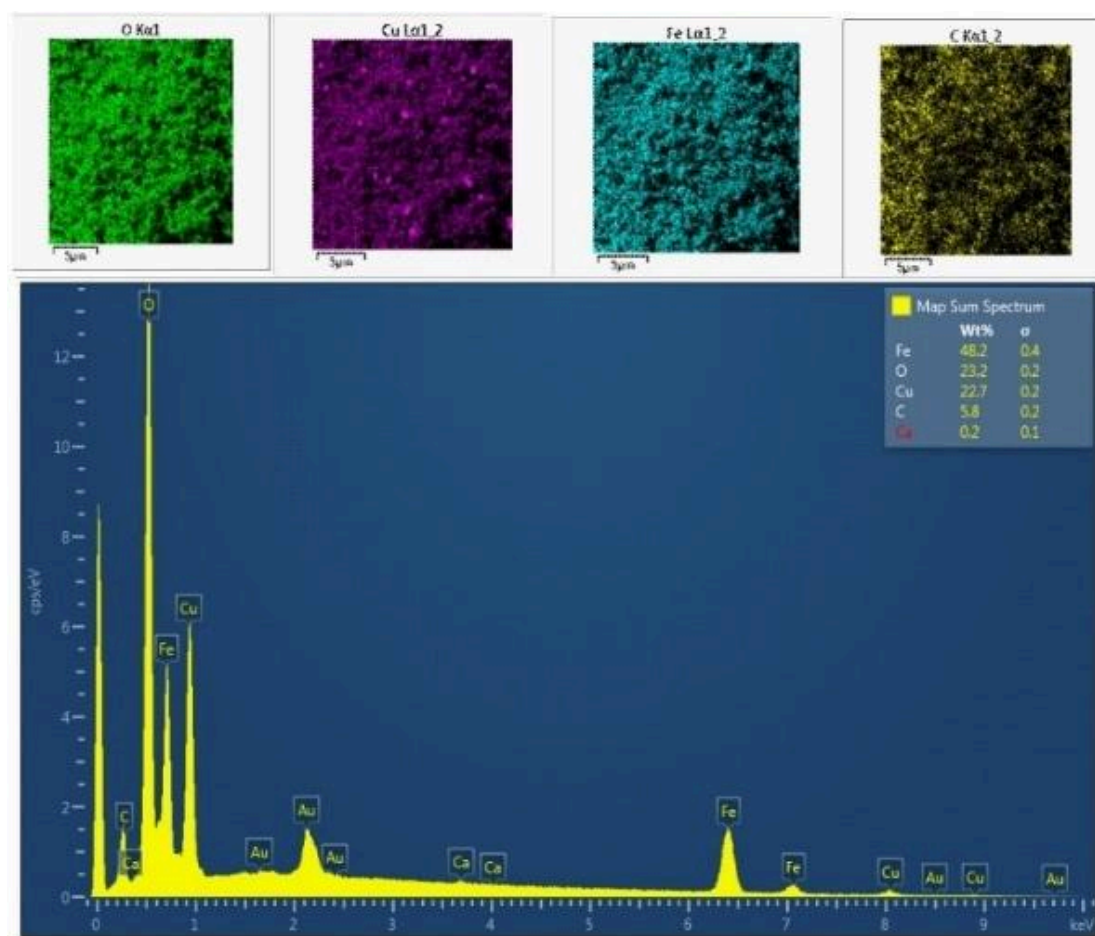


Figura 3: Espectrometria de fluorescência de raios X para a amostra sintetizada pelo método sol-gel de proteico.

A Figura 4 apresenta a imagem de MEV e o histograma de distribuição de tamanho correspondente é apresentado em seguida, dos compósitos CuFe_2O_4 calcinados a 850 °C. A imagem de MEV revelou que há partículas irregulares de tamanhos pequenos (70-100 nm) e grandes (200-400 nm) nas amostras, com tamanho médio e dispersão de $\mu^{\text{AS}} = 228,35 \text{ nm}$ e $\sigma^{\text{AS}} = 47,26 \text{ nm}$, respectivamente. De modo geral, pode-se observar a presença de partículas pequenas e coalescidas em todas as imagens, o que está de acordo com nossos dados de difração de raios X e magnetização (Gurgel et al.,2013).

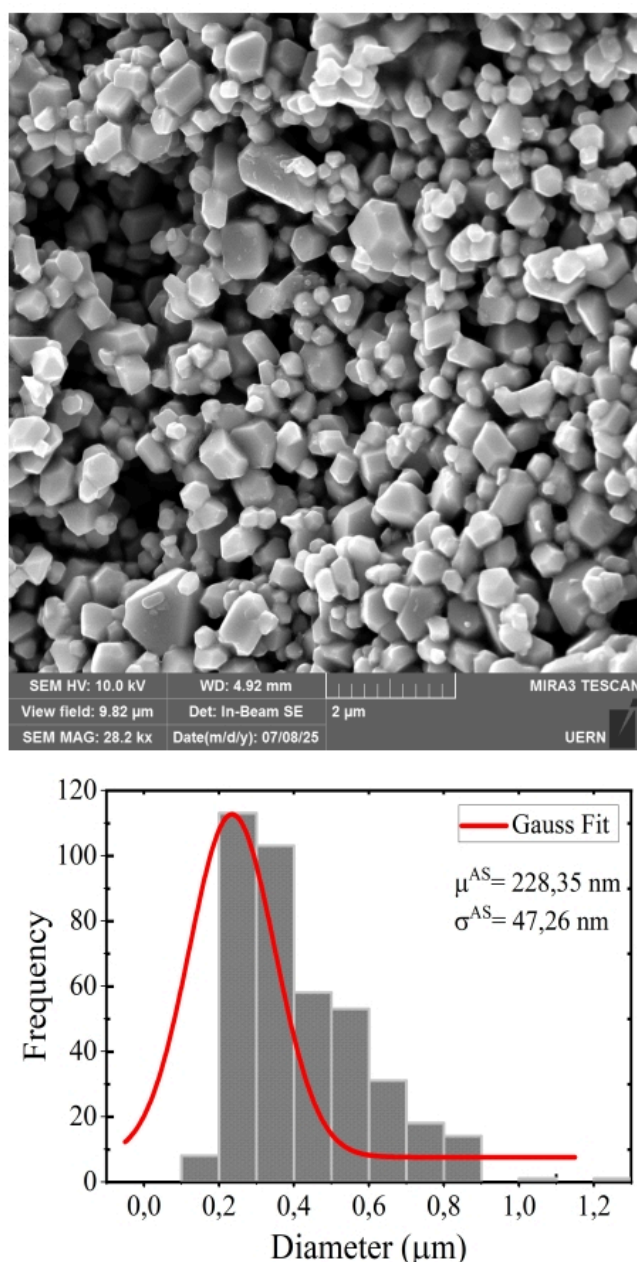


Figura 4: (a) Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da amostra sintetizada (b) Distribuição do tamanho dos grãos após aproximações estatísticas. O diâmetro médio μ^{AS} e a distribuição de tamanho σ^{AS} estão indicados no gráfico.

Foi observada a fase de pureza dos compostos formados, que se cristaliza na forma de uma estrutura de espinélio tetragonal com grupo espacial $I41/amd$. O padrão de difração de raios X do composto é mostrado na Figura 5. Os parâmetros de rede para $CuFe_2O_4$ assim obtidos são $a = b = 5,812\text{\AA}$ e $c = 8,7141\text{\AA}$, e volume celular ($\text{\AA}^3$) = 294,346, que são consistentes com os já relatados em (Abu-Elsaad et al.,2024).

O tamanho do cristalito foi determinado usando a fórmula de Scherrer e os métodos gráficos Williamson-Hall Plot (WHP), Size-Strain Plot (SSP) e Halder-Wagner Plot (HWP). Conforme mostrado na Tabela 2. O efeito de coalescência é o principal fator que causa a diferença no tamanho médio obtido por imagens de SEM e difratogramas.

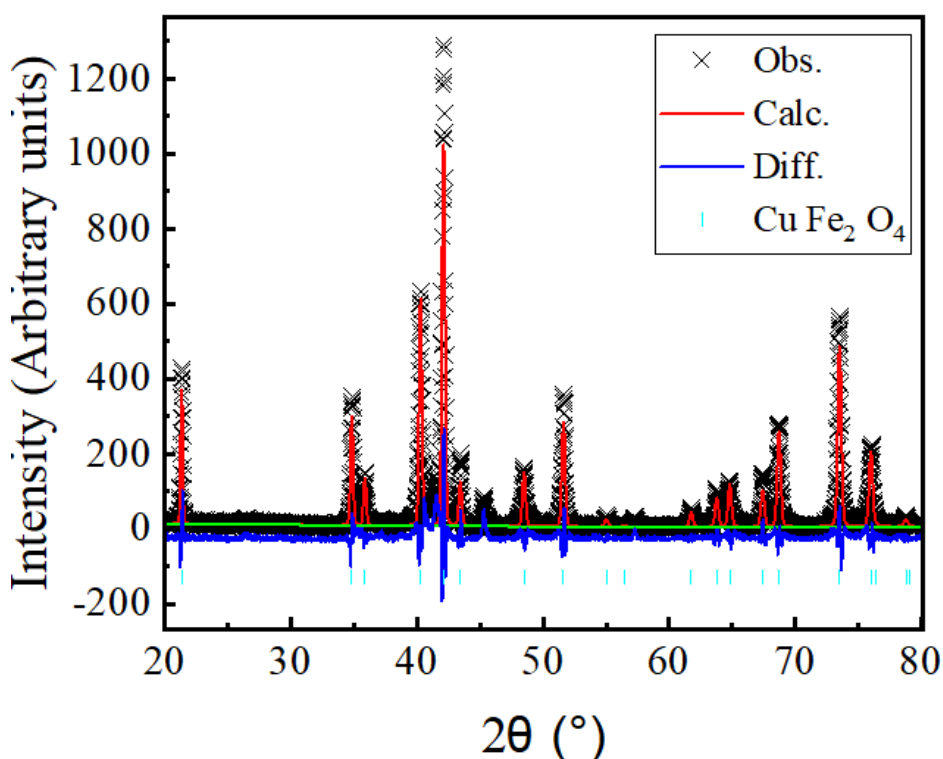


Figura 5: padrão de difração de raios X e refinamento Rietveld da $CuFe_2O_4$ tetragonal nanocristalina à temperatura ambiente.

TABELA 2- TAMANHO MÉDIO DE CRISTALITOS DA $CuFe_2O_4$.

Linear Fits	$\langle D \rangle$	R^2
WHP	59.82 nm	0.9883
SSP	57.31 nm	0.9692
HWP	71.53 nm	0.9616

Os resultados das medições de suscetibilidade magnética do CuFe_2O_4 são exibidos na Figura 06, onde temos as curvas FC e ZFC da amostra. Essas medições foram realizadas entre as temperaturas de 15 K e 320 K com um campo fixo de 500 Oe. No presente caso, a amostra de nanopartículas mostra uma transição em $T_C \sim 188,2$ K. Além disso, nota-se uma bifurcação entre as curvas ZFC e FC para nosso composto. A diferença entre os valores de magnetização ZFC e FC (gap), ou seja, a irreversibilidade da ZFC-FC abaixo da temperatura de transição (especialmente em baixa temperatura) para nanomateriais, foi relatada na literatura (Saha et al.,2021; Saha et al.,2018).

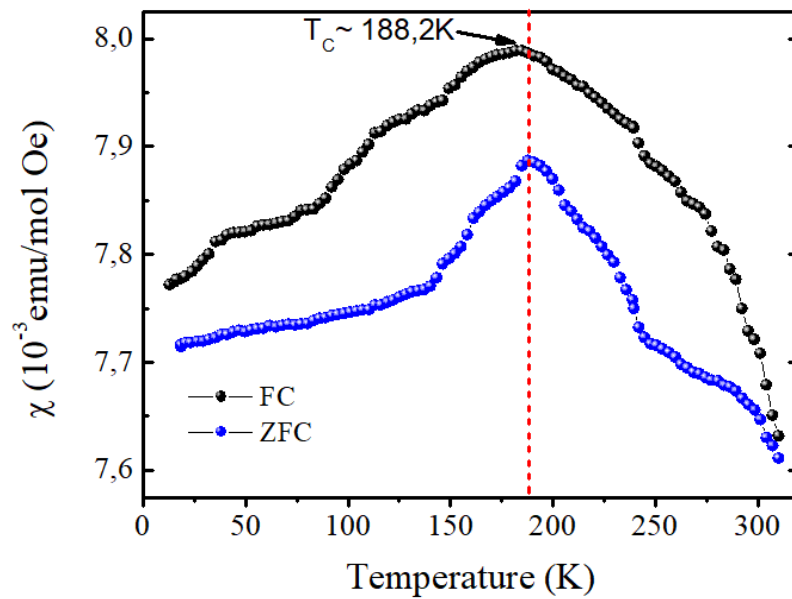


Figura 6: Suscetibilidade magnética de CuFe_2O_4 para um campo magnético fixo de 500 Oe.

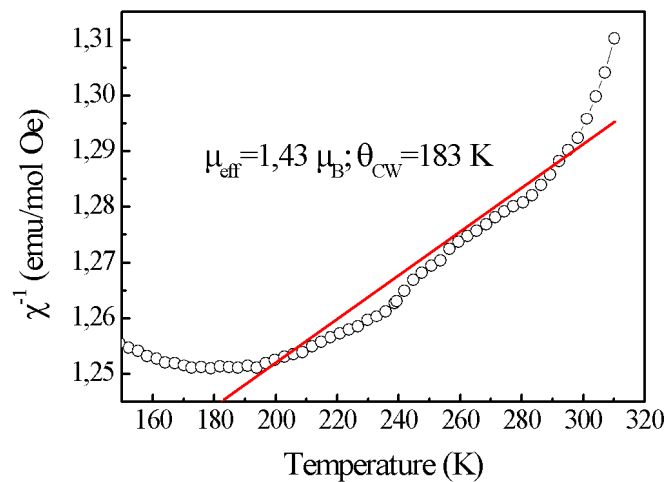


Figura 7: Inverso da Suscetibilidade magnética da CuFe_2O_4 .

A Figura 7 representa as curvas C-W ajustadas χ^{-1} (T) do CuFe_2O_4 . O ajuste linear da porção paramagnética de alta temperatura ($T > T_C$) foi feito com a conhecida lei C-W, que tem a seguinte forma $\chi = C/(T-\theta_{CW})$. Aqui, C é a constante de Curie ($= \mu_{\text{eff}}/3kB$), μ_{eff} é o momento magnético efetivo (em μ_B) e θ_{CW} é a Temperatura C-W (Kittel,1976). A curva é ajustada completamente acima de uma determinada temperatura ($T^* \sim 160$ K) e, nesse regime, ela segue a lei C-W apropriada. Deve-se observar que, para nossa amostra, θ_{CW} e a constante de campo molecular λ_{CW} ($=\theta_{CW}/C$) são positivas e $\theta_{CW} > T_C$. Além disso, os momentos magnéticos efetivos observados [$\mu_{\text{eff}}^{\text{obs}}$] para o composto é menor do que o momento magnético efetivo teórico [$\mu_{\text{eff}}^{\text{theo}}$] calculado usando a seguinte relação, $(\mu_{\text{eff}})^{\text{theo}} = [(\mu_{\text{eff}}^{\text{Cu}^{2+}})^2 + (\mu_{\text{eff}}^{\text{Fe}^{3+}})^2]^{1/2}$ (Liu et al.,2014). Durante o cálculo, o estado de alto spin e o estado de baixo spin dos íons Cu e Fe foram levados em consideração, obtivemos uma temperatura paramagnética de Curie-Weiss θ_w e um momento efetivo μ_{eff} igual a 183K e $1,43\mu_B$. Podemos observar a interseção das curvas $\chi^{-1}(T)$ ajustadas que a ferrita de cobre exibe ordem ferromagnética (Kittel,1976). Os valores obtidos para o momento efetivo correspondente a CuFe_2O_4 são menores do que o esperado $(\mu_{\text{eff}})_{\text{obs}} < (\mu_{\text{eff}})_{\text{theo}}$, consideramos que essa redução no momento efetivo pode ser causada por predominantemente governada pela interação FM de curto alcance entre os clusters FM adjacentes (como mencionado anteriormente) e, recentemente, foi relatada em compostos semelhantes (Saber et al.,2010; He et al.,2007; Lin et al.,2015).

A dependência do campo dos dados de magnetização a 15 K, 180 e 300 K é mostrada na Fig. 8. É possível observar que, em todos esses casos, o material exibe um comportamento ferromagnético típica. A 15 K, o CuFe_2O_4 tem um campo coercitivo de cerca de 0,45 kOe e um momento de saturação de $1,4 \mu_B/\text{f.u.}$ por unidade de fórmula. Os valores teóricos do momento magnético e M_s do CuFe_2O_4 são iguais a $1 \mu_B$ e 25 emu/g, respectivamente (Yadav et al.,2017; Satheeshkumar et al,2019). No entanto, nosso produto CuFe_2O_4 tem um valor de momento magnético experimental um pouco maior, porém próximo ao que foi relatado por Saha et al. (2025).

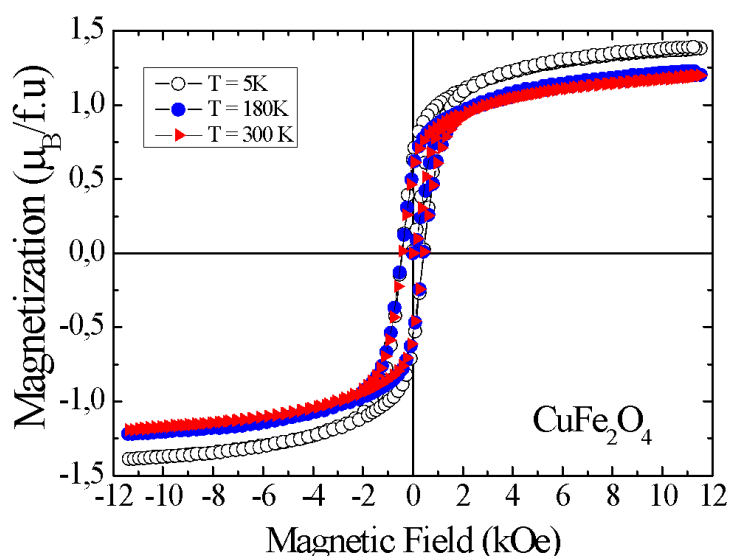


Figura 8: Dependência do campo magnético da magnetização para CuFe_2O_4 a 5, 180 e 300 K.

Os espectros Mössbauer em temperatura ambiente do CuFe_2O_4 são apresentados na Fig. 9. Os espectros Mössbauer registrados à temperatura ambiente apresentaram dois sextetos. O primeiro sexteto apresentou um deslocamento isomérico de 0,35 mm/s, divisão quadrupolar de -0,34 mm/s e divisão de campo magnético de 50,7 T. O segundo sexteto apresentou um deslocamento isomérico de 0,26 mm/s, divisão quadrupolar de -0,031 mm/s e divisão de campo magnético de aproximadamente 47,9 T. A ferrita pura apresenta dois sextetos, que ocorrem devido à presença de dois locais onde os átomos de ferro estão localizados. Local A (Fe^{3+} tetraédrico), com um deslocamento isomérico de 0,26 mm/s, divisão quadrupolar de $\leq |0,02|$ e divisão de campo de 49,2 T. Local B (Fe^{2+} e Fe^{3+} octaédricos), com um deslocamento isomérico de 0,67 mm/s, divisão quadrupolar de $\leq |0,02|$ e divisão de campo de 46,1 T. A dopagem com íons de cobre gera uma modificação dos parâmetros hiperfinos, quando comparados aos parâmetros da magnetita pura.

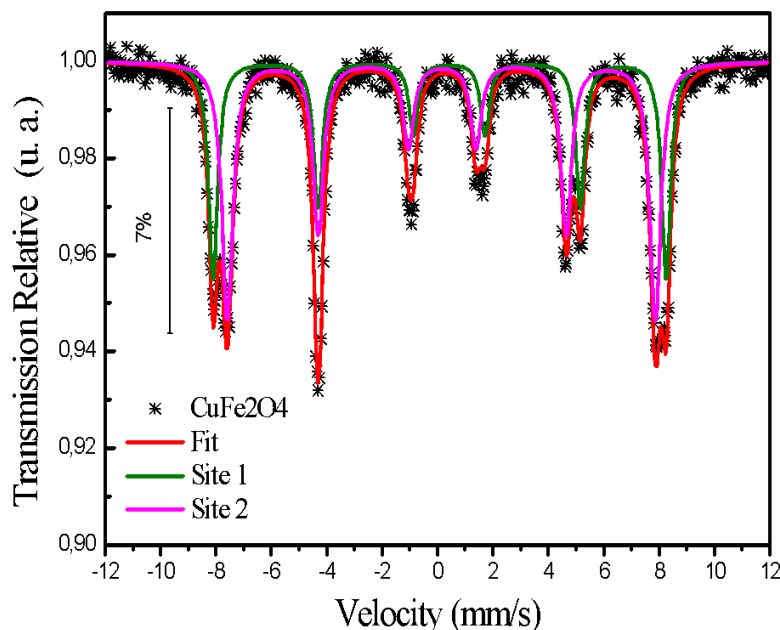


Figura 9: Espectros Mössbauer registrados à temperatura ambiente para a CuFe_2O_4 calcinado a 850°C .

A amostra CuFe_2O_4 tem uma estrutura de hausmannita, que é uma distorção tetragonal do arranjo de espinélio. Seus átomos de metal estão em uma distribuição inversa (Wyckoff, 1965; Janicki et al., 1982), em que metade dos átomos de ferro está no local A e a outra metade, mais os íons de cobre, está no local B: $\text{Fe}_A[\text{FeCu}]_B\text{O}_4$, conforme relatado por (Oak et al, 1998; Amir et al., 2019).

4 Conclusão

Neste trabalho, nanopartículas de ferrita de cobre foram sintetizadas usando um método sol-gel de proteína. A amostra foi calcinada a 850°C por 4 h. Realizamos o estudo das propriedades estruturais e magnéticas das amostras usando técnicas de caracterização complementares. O XRD confirmou que a estrutura é tetragonal monofásica, com um parâmetro de rede de $a = b = 5,812\text{\AA}$ e $c = 8,7141\text{\AA}$, e volume celular ($\text{\AA}^3$) = 294,346 e tamanho de cristal de cerca de 63 nm. Parte do trabalho envolveu o estudo da forma, do tamanho e da composição elementar da ferrita usando SEM e EDS. Uma ordem ferromagnética é observada abaixo de $T_C \sim 188,2\text{ K}$. A partir de um ajuste linear à suscetibilidade inversa para $T >$

160K pela lei de Curie-Weiss, obtivemos uma temperatura paramagnética de Curie-Weiss $\theta_w = 183\text{K}$ e um momento efetivo $\mu_{\text{eff}} = 1,43\mu_B/\text{fórmula unitária}$. As curvas de histerese mostram uma natureza ferromagnética para todas as temperaturas estudadas de 15K, 180K e 300K. Os espectros Mössbauer registrados à temperatura ambiente apresentaram dois sextetos. O primeiro sexteto apresentou um deslocamento isomérico de 0,35 mm/s, divisão quadrupolar de -0,34 mm/s e divisão de campo magnético de 50,7 T. O segundo sexteto apresentou um deslocamento isomérico de 0,26 mm/s, divisão quadrupolar de -0,031 mm/s e divisão de campo magnético de aproximadamente 47,9 T. Um sexteto com maior largura de linha, se dado na forma nanométrica das partículas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a contribuição do Laboratório de Química, CCSB, UFMA; Laboratório de Raios X (LRX), UFC.; Laboratório de Materiais Avançados, UFC e Laboratório de Análises Magnética e Óptica (LAMOp), UERN.

REFERÊNCIAS

- Abu-Elsaad, N., Mazen, S., and Kumar, E. R. (2024). Structural, vibrational and magnetic properties of heat treated CuFe_2O_4 nanoparticles prepared by two different synthesis routes. *Ceramics International*, 50:3693 – 3700.
- Amir, M., Gungunes, H., Slimani, Y., Tashkandi, N., Sayed, H. S. E., Aldakheel, F., M. Sertkol, H. S., Manikandan, A., Ercan, I., and Baykal., A. (2019). Mossbauer studies and magnetic properties of cubic CuFe_2O_4 nanoparticles. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32:557 – 564.
- de Oliveira Girão Maia, A., Oliveira, F. G. S., Cordeiro, C. H. N., Teixeira, E. S., da Silva, E. B., Soares, J. M., de Vasconcelos, I. F., Sasaki, J. M., and Dumelow, T. (2021). Synthesis of CoFe_2O_4 superparamagnetic nanoparticles using a rapid thermal processing furnace with halogen lamps. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 99:527–533.
- G., C. R. and S., P. (2012). Core/shell nanoparticles: Classes, properties, synthesis mechanisms, characterization, and applications. *Chemical Reviews*, 112(4):2373–2433.

- GOLDMAN, A. (2005). *Modern Ferrite Technology*. 2a Edição.
- Gurgel, T., Moreno, N. O., and Soares, J. M. (2013). Magnetization properties study of ZnCr_2O_4 spinel normal. *IEEE Transactions on Magnetics.*, 49:4565 – 4567.
- Haija, M., Abu-Hani, A., Hamdan, N., Stephen, S., and Ayesh, A. (2017). Characterization of H_2S gas sensor based on CuFe_2O_4 nanoparticles. *J. Alloy Compd*, 690:461 – 468.
- He, C., Torija, M., Wu, J., Lynn, J., Zheng, H., Mitchell, J., and Leighton, C. (2007). Non-griffiths-like 8/9 clustered phase above the curie temperature of the doped perovskite cobaltite $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$. *Phys. Rev. B*, 76:014401.
- Janicki, J., Pietrzaka, J., Porkebska, A., and Suwalski, J. (1982). Mossbauer study of copper ferrites. *Phys. stat. sol. (a)*, 72:95–98.
- Kittel, C., e. a. (1976). *Introduction to solid state physics*. Wiley: New York, Vol. 8.
- LIMA, E. S. (2019). *Nanopartículas de ferrita de zinco via modificação do método de coprecipitação: estudo do glicerol como direcionador estrutural e morfológico*. PhD thesis, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Lin, J., Tong, P., Cui, D., Yang, C., Yang, J., Lin, S., Wang, B., Tong, W., Zhang, L., Zou, Y., and et al. (2015). Unusual ferromagnetic critical behavior owing to short-range antiferromagnetic correlations in antiperovskite $\text{Cu}_{1-x}\text{NMn}^{3+}_x$ ($0.1 \leq x \leq 0.4$). *Scientific Reports*, 5:7933 - 7939.
- Liu, W., Shi, L., Zhou, S., Zhao, J., Li, Y., and Guo, Y. (2014). Griffiths phase, spin-phonon coupling, and exchange bias effect in double perovskite $\text{Pr}_2\text{CoMnO}_6$. *J. Appl. Phys.*, 116:193901.
- Oak, H. N., Baek, K. S., and Kim, S. J. (1998). Mossbauer studies of superexchange interaction in tetragonal CuFe_2O_4 . *Basic Solid State Physics*, 208::249–255.
- Park, J.-H., von Maltzahn, G., Zhang, L., Schwartz, M. P., Ruoslahti, E., Bhatia, S. N., and Sailor, M. J.(2008). Magnetic iron oxide nanoworms for tumor targeting and imaging. *Adv Mater*, 20(9):1630 – 1635.
- Saber, M., Egilmez, M., Mansour, A., Fan, I., Chow, K., and Jung, J. (2010). Evolution of curie-weiss behavior and cluster formation temperatures in ru-doped $\text{Sm}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{MnO}_3$ manganites. *Physical Review B-Condensed Matter and Materials. Physics*, 82:172401.

- Saha, S., Bandyopadhyay, S., and Das, I. (2021). Role of short-range magnetic interaction between core and surface spins in exchange bias and memory effect in nanocrystalline doped manganite. *J. Alloy. Compd.*, 870:159465.
- Saha, S., Banik, S., Dutta, A., Paramanik, T., Pakhira, S., Dey, S., Bandyopadhyay, S., Mazumdar, C., and Das, I. (2025). Role of co/mn interaction in developing griffiths phase with reducing particle size in $\text{La}_2\text{CoMnO}_6$. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17:20060 – 20074.
- Saha, S., Das, K., Bandyopadhyay, S., and Das, I. (2018). Magnetic and magnetocaloric properties in polycrystalline $\text{La}_{0.2}\text{Gd}_{0.5}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ compound. *J. Magn. Magn. Mater.*, 460:165–170.
- Satheeshkumar, M., Kumar, E. R., Srinivas, C., Prasad, G., Meena, S. S., Pradeep, I., Suriyanarayanan, N., and Sastry, D. (2019). Structural, magnetic and electrical properties of CuFe_2O_4 nanoparticles prepared by sol–gel auto-combustion method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 484:120 – 125.
- Silva, C. A. D., Macêdo, d. A., and Lima, a. S. (2018). Síntese e caracterização de Ferritas de cobre obtidas pelo método sol-gel proteico. *Revista Matéria.*, 23: e11844.
- VALENZUELA, R. (1994). *Chemistry of Solid State Materials: Magnetic Ceramics*. 1a Edição.
- Wyckoff, W. G. (1965). *Crystal Structures*, volume 3. Interscience, New York.
- Yadav, R. S., Kuritka, I., Vilcakova, J., Havlica, J., Masilko, J., Kalina, L., Tkacz, J., Hajdúchová, M., and Enev, V. (2017). Structural, dielectric, electrical and magnetic properties of CuFe_2O_4 nanoparticles synthesized by honey mediated sol–gel combustion method and annealing effect. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28:6245 – 6261.
- YITZHAK, M. (2012). *Advances in Crystallization Process*. 1a Edição.
- Zaharieva, K., Rives, V., Tsvetkov, M., Z., C.-Z., Kunev, B., Trujillano, R., Mitov, I., and Milanova, M. (2015). Preparation, characterization and application of nanosized copper ferrite photocatalysts for dye degradation under uv irradiation. *Chem. Phys.*, 160:271 – 278.

Anexo



Journal of Sol-Gel Science and Technology  Journal of Sol-Gel Science and Technology



[Account](#)

Submission received

Thank you for submitting to Journal of Sol-Gel Science and Technology

Your submission is now at our Technical Check stage. If there are any points that need to be addressed we will send you a detailed email. Otherwise, your submission will proceed into peer review.

You can check the status of your submission by using the link below. Please note it may take a couple of minutes for your submission to appear.

[Track submission progress](#)

- [Your privacy choices/Manage cookies](#)
- [Help and support](#)
- [Privacy policy](#)
- [Terms and conditions](#)
- [Accessibility statement](#)

© 2025 Springer Nature