

Síntese por Combustão em Solução e Caracterização de Óxidos de ferro dopados com Co-Zn-Ni como Potenciais Catalisadores: Influência de Diferentes Combustíveis

Gabriela Yasmim Ferreira Targino^{1*}, Vitória Chris Souza Silva², Meirielle Marques de Góis², João Maria Soares², Salah Mohamed Yusef³

¹Departamento de Química da Faculdade de Ciências Exatas e Naturais, Campus Central, UERN, gabrielayasmim2002@gmail.com¹

²Departamento de Física da Faculdade de Ciências Exatas e Naturais, Campus Central, UERN.²

³Departamento de Química da Faculdade de Ciências Exatas e Naturais, Campus Central, UERN.³

Resumo/Abstract

RESUMO - Os materiais cerâmicos formados por óxidos metálicos, com destaque para a presença de óxido de ferro (Fe_2O_3) em sua composição são conhecidos por suas propriedades magnéticas. Neste trabalho, foram sintetizados óxidos de ferro dopados com cobalto, zinco e níquel (Co-Zn-Ni) por meio do método de combustão em solução, utilizando ureia e ácido cítrico como combustíveis, com o objetivo de avaliar seu potencial como catalisadores. As amostras obtidas foram caracterizadas por difração de raios X (DRX), espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX), magnetometria de amostra vibrante e análise de reflectância. Observou-se que o combustível influencia diretamente a cristalinidade, pureza, propriedades magnéticas e o bandgap óptico dos materiais. A presença de propriedades magnéticas e bandgap na faixa do UV torna esses óxidos candidatos promissores para aplicações catalíticas, com vantagens econômicas e ambientais.

Palavras-chave: Óxidos de ferro dopados, Síntese de combustão em solução, Recuperação magnética, Catalisadores heterogêneos.

ABSTRACT - Ceramic materials formed by metal oxides, with emphasis on the presence of iron oxide (Fe_2O_3) in their composition, are known for their magnetic properties. In this work, iron oxides doped with cobalt, zinc and nickel (Co-Zn-Ni) were synthesized by the solution combustion method, using urea and citric acid as fuels, with the aim of evaluating their potential as catalysts. The obtained samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), vibrating sample magnetometry and reflectance analysis. It was observed that the fuel directly influences the crystallinity, purity, magnetic properties and optical bandgap of the materials. The presence of magnetic properties and bandgap in the UV range makes these oxides promising candidates for catalytic applications, with economic and environmental advantages.

Keywords: Doped iron oxides, Solution combustion synthesis, Magnetic recovery, Heterogeneous catalysts.

Introdução

Os fotocatalisadores são extensivamente utilizados em inúmeras aplicações, entre elas, a remoção de contaminantes da água e do ar, produção do hidrogênio, controle de odores e inativação de bactérias. Eles exercem funções muito importantes por serem capazes de transformar a energia solar ou artificial (fótons) para serem utilizadas em processos de oxidação e redução.

A energia do band-gap do material determina qual comprimento de onda pode ser absorvido, sendo que a diferença entre a banda de valência e a banda de condução está inversamente relacionada ao comprimento de onda da luz.

Na atualidade, os óxidos bimetalícos, especialmente os compósitos formados por ferro e outros metais, têm atraído considerável interesse científico. Para que reações catalíticas voltadas à decomposição de moléculas orgânicas

ocorram de maneira eficaz, é fundamental contar com um catalisador que possua elevada atividade catalítica, além de alta estabilidade no ambiente reacional (1). Nesse contexto, as espécies com oxigênio reativo desempenham um papel fundamental na fotocatalise heterogênea, processo diretamente ligado à degradação de compostos orgânicos. Diversos semicondutores, bem como uma fração deles na forma de pó, demonstraram capacidade de atuar como fotocatalisadores, sendo utilizados em diversos desafios ambientais, notadamente na purificação de águas (2).

É nesse contexto que materiais magnéticos compostos por óxidos metálicos, emergem como alternativas promissoras. A combinação das características desses óxidos dopados com a capacidade fotocatalítica resulta em um sistema eficiente para a degradação de poluentes, facilitando a separação e reutilização dos catalisadores após o processo (3). Devido à sua habilidade de serem facilmente separadas

magneticamente, esses materiais podem ser reutilizados, aumentando a eficiência do processo de degradação.

Os óxidos de ferro dopados, (MFe_2O_4 , onde M representa um metal bivalente, como Co, Zn ou Ni) têm demonstrado propriedades fotocatalíticas promissoras. A combinação de diferentes íons metálicos em sua estrutura permite ajustar suas propriedades eletrônicas e magnéticas, otimizando sua atividade catalítica sob irradiação de luz visível. A combinação de íons metálicos, como cobalto (Co) e níquel (Ni), ajusta significativamente as propriedades desses óxidos (4). A substituição parcial dos íons ferro (Fe) por esses íons metálicos altera a distribuição catiônica na estrutura, resultando em mudanças nas propriedades magnéticas e ópticas.

O processo de síntese por combustão em solução (SCS) tem sido empregado com sucesso para a obtenção de diversos tipos de materiais, visto que possibilitam a obtenção de pós com partículas nanométricas, elevada área superficial e um alto grau de pureza. (5).

A SCS faz uso de sais como reagentes oxidantes e reagentes redutores, ou seja, o combustível para reação. Tem o princípio de que quando iniciada uma reação sob aquecimento, ocorre uma reação exotérmica, dando origem a um pó como produto final (6). Os pós obtidos por essa rota processual são finos, homogêneos e geralmente cristalinos (7).

Esse método é autossustentável, já que, após o início da reação ele atinge altas temperaturas, que garantem a cristalização e formação de óxidos em curto período de tempo, com liberação de grande quantidade de gases, o que dissipa energia para o meio, devido à reação ser exotérmica, minimizando a aglomeração das partículas que se formam. (8).

Vários combustíveis têm sido usados na síntese por combustão para obtenção de diferentes sistemas de óxidos de ferro, tais como a uréia (CH_4N_2O), triazina tetraformol (TFTA, $C_4H_{16}N_6O_2$), hidrazida maléica ($C_4H_4N_2O_2$), glicina (NH_2CH_2COOH), ácido cítrico ($C_6H_8O_7$), sacarose ($C_{12}H_{22}O_{11}$), entre outros. O tipo de combustível utilizado na síntese por combustão em solução desempenha um papel fundamental na formação, morfologia, área superficial e cristalinidade dos óxidos obtidos. Diferentes agentes combustíveis — como alanina, ácido cítrico e ureia — influenciam diretamente o comportamento térmico do gel, a temperatura de combustão, o tamanho das partículas e a porosidade do material final (9). Por exemplo, o ácido cítrico apresentou a menor temperatura de combustão e favoreceu a obtenção de pós nanocristalinos com maior área superficial e estrutura porosa bem desenvolvida. Já a ureia também contribuiu para partículas menores e estrutura porosa, enquanto a alanina gerou partículas com tamanhos mais variados e estrutura menos uniforme. Essas diferenças são atribuídas às distintas naturezas redox e características térmicas de cada combustível, que impactam na intensidade

das reações de combustão, na liberação de gases e na formação da rede porosa nos materiais resultantes.

Neste trabalho, foram sintetizados óxidos de ferro dopados de cobalto-zinco-níquel (Co-Zn-Ni) por meio do método de combustão em solução, utilizando ureia e ácido cítrico como combustíveis, com o objetivo de avaliar seu potencial como catalisadores. As amostras obtidas foram caracterizadas por difração de raios X (DRX), espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX), magnetometria de amostra vibrante e análise de reflectância.

Experimental

O trabalho teve início com cálculos estequiométricos com conceitos químicos dos propulentes, com o objetivo de determinar a quantidade exata de reagentes necessários para a produção de 3 g dos óxidos de ferro dopados com Cobalto, Zinco e Níquel.

A síntese dos óxidos de ferro dopados com Cobalto-Zinco-Níquel (Co-Zn-Ni) foi realizada pelo método de combustão em solução, conforme proposto (10-11). Para a preparação, foram utilizados os sais metálicos $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ e $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ como fontes dos cátions metálicos e agentes oxidantes, e ácido cítrico foi adicionado como combustível na primeira amostra e uma segunda amostra criada com a adição de ureia como combustível. A escolha do ácido cítrico e da ureia como agentes combustíveis está diretamente relacionada às suas propriedades termoquímicas e aos efeitos observados nas características finais dos pós obtidos. O ácido cítrico possui uma entalpia de combustão elevada (-1986 kJ/mol) e uma razão combustível/oxidante (C/O) próxima a 1,3, o que favorece uma combustão altamente exotérmica e eficiente (12). Essa característica resulta em uma queima completa, com geração controlada de calor e gases, favorecendo a formação de estruturas cristalinas bem definidas mesmo em temperaturas mais baixas. O uso do ácido cítrico como combustível levou à formação de pós de $MFeO_3$ com maior cristalinidade, menor presença de fases secundárias e menor temperatura de combustão comparada à alanina e à ureia (9). Já a ureia, com entalpia de combustão moderada (-1173 kJ/mol) e C/O em torno de 0,8, promove uma combustão mais lenta e rica em liberação de gases como CO_2 e NH_3 . Isso favorece a formação de uma rede porosa nos materiais obtidos, que mostraram partículas menores e maior área superficial quando a ureia foi utilizada (9).

Inicialmente, os nitratos metálicos e o combustível foram dissolvidos em aproximadamente 10 mL de água destilada, sendo a mistura submetida ao aquecimento em uma chapa aquecedora a $100^\circ C$ por cerca de 15 minutos. Posteriormente, a temperatura foi elevada para $300^\circ C$, sendo mantida por 15 minutos. Em seguida, foi aumentada para $360^\circ C$, permanecendo nesse valor até a completa

evaporação da água e a ocorrência da combustão total, sendo que a combustão durou certa de 15 segundos para o óxido feito com ureia e cerca de 24 segundos para a amostra feita com ácido cítrico. Para a amostra um, a combustão total ocorreu a 260 °C, sendo observada a mesma temperatura de combustão para a amostra dois. As cinzas resultantes foram então maceradas e armazenadas para as etapas subsequentes.

A calcinação dos materiais obtidos foi realizada em forno mufla, com uma rampa de aquecimento de 5°C/min até atingir 700°C, onde o material foi mantido por duas horas nessa temperatura.

Após calcinação foi realizada a análise de espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) onde o espectômetro de fluorescência identifica as energias de raios-X secundários emitidos pelos elétrons das camadas mais externas do átomo, durante o preenchimento dos vazios deixados nas camadas mais próximas do núcleo do átomo ionizado, por raios-X primários. Isto permite a identificação dos elementos químicos presentes na amostra e também as suas quantidades, que são proporcionais às intensidades das energias emitidas (13). Sendo o equipamento utilizado o Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva, modelo EDX-7000 fabricado pela Shimadzu Corporation, utilizando vácuo.

As amostras também foram submetidas a análises de difração de raios X (DRX) que é uma técnica amplamente empregada na caracterização e análise de materiais, sendo uma ferramenta fundamental no estudo das suas propriedades estruturais destacam-se a identificação da composição química, a quantificação das fases cristalinas presentes, a detecção de fases amorfas, a determinação dos parâmetros de rede, as tensões residuais internas e o cálculo do tamanho dos cristalitos. Essa análise foi feita no equipamento Difratorômetro de raios X: AXRD Benchtop, marca PROTO utilizando um intervalo de varredura 2theta de 10-90°.

As curvas de magnetização em função do campo magnético aplicado ($M \times H$) à temperatura ambiente foram feitas em um magnetômetro de amostra vibrante (MAV), operando em um campo máximo de $\pm 1,2$ T.

As amostras também foram analisadas a partir de uma análise de reflectância que é a medição da luz refletida por uma amostra quando ela é irradiada com luz na faixa do ultravioleta ao visível. Em materiais particulados ou rugosos, a luz não é refletida de forma especular (como em um espelho), mas espalhada em várias direções, sendo elas analisadas através de Espectrofotômetro UV-Vis de reflectância difusa: Cary 4000 UV-Vis Spectrophotometer utilizando uma faixa de comprimento de onda de 200 - 800 nm e uma faixa de elétrons volts de 1,5 a 5,0.

Resultados e Discussão

Espectroscopia de fluorescência de raios-x (FRX)

A análise de espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) revelou a presença dos principais elementos constituintes do óxido de ferro dopados com Co-Zn-Ni sintetizado com ácido cítrico, juntamente com suas respectivas concentrações percentuais no material: Fe (69,211%), Co (9,950%), Zn (9,763%), Ni (8,829%), Al (0,936%), S (0,891%), Si (0,365%) e Cr (0,056%). Observa-se que aproximadamente 2,248% da composição corresponde a elementos não diretamente relacionados ao sistema ferrítico de interesse. No entanto, a elevada proporção dos metais desejados — Fe, Co, Zn e Ni — indica que a síntese foi bem-sucedida, com a formação predominante do óxido proposto.

De forma semelhante, o óxido de ferro dopados de Co-Zn-Ni sintetizada utilizando ureia como combustível apresentou os seguintes teores elementares, de acordo com a análise de FRX: Fe (69,785%), Co (9,719%), Zn (9,201%), Ni (8,066%), Al (1,784%), S (1,004%), Si (0,364%), Cr (0,053%) e Zr (0,024%). Nesse caso, os elementos que não fazem parte diretamente da composição desejada totalizaram aproximadamente 3,229% da amostra.

Comparando-se os resultados do óxido de ferro dopado de Co-Zn-Ni feito com ureia e com o óxido de ferro dopado de Co-Zn-Ni obtida com ácido cítrico, observa-se uma leve diminuição nas concentrações de Co, Zn e Ni, acompanhada de um aumento na presença de elementos indesejados, especialmente o alumínio na amostra de ureia. Essa variação pode estar relacionada à natureza do combustível utilizado, que influencia o ambiente reacional, a taxa de liberação de gases e a homogeneidade da mistura durante a combustão. A maior presença de impurezas na amostra obtida com ureia pode comprometer a pureza da fase ferrítica e afetar suas propriedades catalíticas, como a eficiência e a seletividade. Ainda assim, a composição majoritária continua sendo formada pelos metais de interesse, indicando que o óxido foi formado com sucesso, embora com menor pureza em comparação à síntese com ácido cítrico.

Difração de raios x (DRX)

O refinamento dos dados foi realizado por meio do programa MAUD, o qual forneceu informações sobre a porcentagem dos compostos formados e o tamanho dos cristalitos, conforme detalhado na Tabela 1. Esses resultados corroboram com os dados obtidos por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX), pois explicam as elevadas porcentagens de cada metal específico na formação dos óxidos de ferro dopados.

Tabela 1. Refinamento de Rietveld para óxido de ferro dopado com Co-Zn-Ni com diferentes combustíveis.

	Tamanho do cristalito em nm	% de ferrita	% de hematita	Parâmetro de rede cristalina em Å
Sintetiza do com ácido cítrico	123,60	91,63	8,37	8.389366
Sintetiza do com ureia	96,88	78,14	21,86	8.3927

A figura 1 e a figura 2 apresentam os difratogramas de raios X das duas amostras, uma sintetizada com ácido cítrico e outra com ureia, juntamente com os índices de Miller, sendo as cartas cristalográficas obtidas do site *Crystallography Open Database*, os parâmetros cristalográficos foram estimados via refinamento Rietveld utilizando o software MAUD (*Materials Analysis Using Diffraction*). As cartas utilizadas são as seguintes de acordo com seu código seguido por seu nome ou fórmula: 1011240 (hematita) e 1535820 (CoFe₂O₄). A análise revelou que ambos os óxidos de ferro dopado com Zn-Co-Ni apresentam um padrão de difração característico da fase espinélio, com os principais picos correspondendo aos planos cristalográficos (220), (311), (400) e (440).

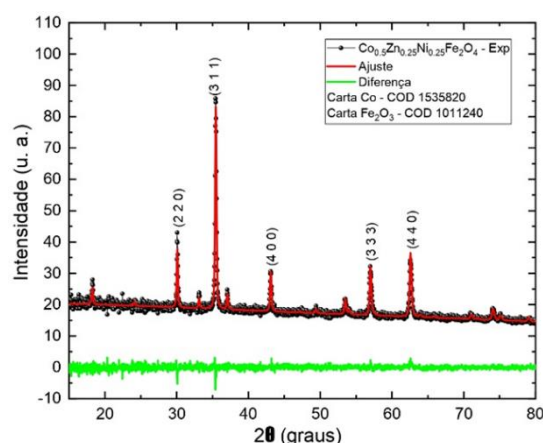


Figura 1. Difratoograma de raios-X do óxido de ferro dopado com Cobalto, Zinco e Níquel obtida a partir do método de combustão de solução com ácido cítrico.

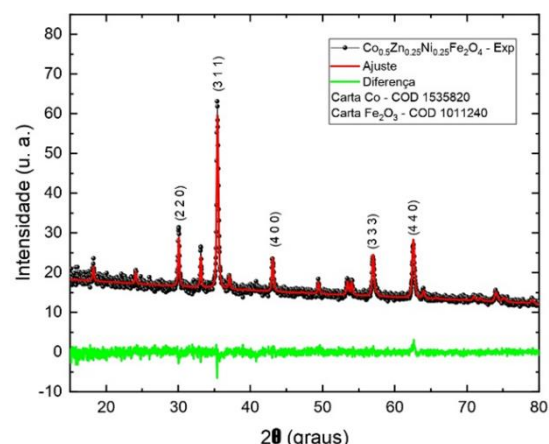


Figura 2. Difratoograma de raios-X do óxido de ferro dopado com Cobalto, Zinco e Níquel obtida a partir do método de combustão de solução com ureia.

A partir dos resultados apresentados, é possível avaliar o grau de cristalinidade dos óxidos com base na intensidade do pico fundamental (14). A comparação dos difratogramas (Figura 1 e Figura 2) mostram que ambos apresentam os mesmos picos característicos da fase espinélio, mas a amostra sintetizada com ureia exibiu picos mais largos e menos intensos, sugerindo menor cristalinidade. Essa diferença sugere que o uso do ácido cítrico como combustível favorece uma estrutura mais cristalina e homogênea, enquanto a ureia pode induzir maior formação de impurezas.

Caracterização magnética

A Figura 3 apresenta as curvas de histerese magnética das amostras de óxido de ferro dopado com cobalto, zinco e níquel feitos com combustíveis distintos. Os dados de propriedades magnéticas extraídos das curvas estão dispostos na Tabela 2.

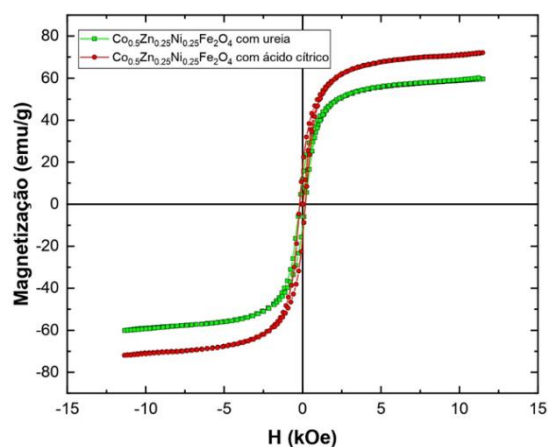


Figura 3. Curva de histerese magnética das amostras de óxido de ferro dopado com cobalto, zinco e níquel.

Tabela 2. Dados das curvas de histerese magnética do óxido de ferro dopado com cobalto, zinco e níquel sintetizados com diferentes combustíveis.

Amostra	Coercividade de (Oe)	Magnetização Remanente (emu.g ⁻¹)	Ms (emu.g ⁻¹)	Squareness
Co _{0,5} Zn _{0,25} Ni _{0,25} Fe ₂ O ₄ feita com ureia	175,00	16,61	69,00	0,241
Co _{0,5} Zn _{0,25} Ni _{0,25} Fe ₂ O ₄ feita com ácido cítrico	180,00	19,32	55,79	0,346

A amostra sintetizada com ureia apresentou uma coercividade mais baixa em comparação à sintetizada com ácido cítrico. Essa baixa coercividade indica que a amostra com ureia é um material magnético mais mole, o que favorece a recuperação magnética rápida e eficiente após o uso em sistemas fotocatalíticos (15). Isso é desejável quando se busca a reutilização do catalisador sem a necessidade de etapas complexas de separação.

Além disso, a amostra com ureia exibiu uma magnetização de saturação maior em relação à amostra com ácido cítrico. Essa diferença implica que a amostra com ureia pode ser mais facilmente separada de soluções aquosas por campo magnético externo, o que é vantajoso em aplicações contínuas ou em ciclos sucessivos de uso.

A razão de *squareness* foi de 0,241 para a amostra com ureia e 0,346 para a com ácido cítrico. Valores mais baixos indicam uma estrutura de domínios magnéticos mais complexa, típica de materiais com múltiplos domínios magnéticos (16). Essa característica pode influenciar a estabilidade magnética e, consequentemente, a eficiência na recuperação dos catalisadores. No entanto, a amostra com ácido cítrico mostrou uma razão de *squareness* mais elevada comparada à da ureia, o que pode indicar domínios magnéticos mais estáveis e potencialmente uma estrutura mais ordenada. A magnetização remanente mais alta de 19,32 emu/g também pode contribuir para uma recuperação magnética eficaz, mesmo após a retirada do campo magnético. Essa propriedade é vantajosa para a recuperação dos catalisadores após o uso, utilizando campos magnéticos externos.

Essas variações podem estar associadas aos diferentes agentes de combustão utilizados no processo de síntese. A ureia pode ter promovido uma combustão mais energética, gerando partículas mais cristalinas e menores, o que favorece uma maior magnetização de saturação e menor coercividade. Já o ácido cítrico pode ter levado à formação

de estruturas mais rígidas ou com mais defeitos estruturais magnéticos, resultando em maior coercividade.

Espectroscopia de reflectância difusa uv-vis (UV-VIS DRS)

Os espectros de reflectância difusa UV-Vis foram obtidos e analisados com base na função de Kubelka-Munk, sendo representados em função do comprimento de onda (nm) e da energia (eV), com o objetivo de determinar a energia de band gap dos óxidos de ferro sintetizados com ácido cítrico e com ureia.

Os óxidos descritos apresentaram comportamentos ópticos típicos de semicondutores, conforme evidenciado pelos espectros de absorção UV-Vis e pelas análises dos gráficos de Tauc, indicando transições eletrônicas diretas. A energia de bandgap (E_g) estimada foi de 3,68 eV para a amostra sintetizada com ácido cítrico e 3,82 eV para a amostra obtida com ureia. Essa diferença pode ser atribuída à substituição parcial dos íons Fe^{3+} e Co^{2+} por Zn^{2+} e Ni^{2+} , o que altera a distribuição catiônica nos sítios cristalográficos da estrutura espinélio (17). Essa modificação na estrutura é sensível às condições de síntese, uma vez que diferentes rotas sintéticas impactam na morfologia, no tamanho das partículas e nos defeitos estruturais — todos fatores que influenciam diretamente a energia de bandgap (18).

O aumento da energia de bandgap resulta em menor capacidade de absorção na faixa da luz visível, o que pode limitar a eficiência em processos de fotodegradação sob essa faixa de radiação. Nesse contexto, entre os dois materiais analisados, a amostra feita com ácido cítrico ($E_g = 3,68$ eV) apresenta uma vantagem em relação à feita com ureia ($E_g = 3,82$ eV), por possuir um bandgap ligeiramente menor, permitindo melhor aproveitamento da radiação ultravioleta e, potencialmente, parte da borda do visível. Para aplicações em fotodegradação de contaminantes, especialmente sob iluminação UV ou solar, um menor bandgap favorece a geração de pares elétron-buraco com menor energia de excitação, aumentando a eficiência do processo (19).

A escolha do combustível na síntese exerce uma influência significativa sobre as propriedades estruturais, morfológicas, magnéticas e ópticas dos óxidos dopados. A amostra sintetizada com ácido cítrico apresentou maior cristalinidade, com 91,63% de fase ferrita e picos de difração mais intensos e definidos, além de menor presença de impurezas e bandgap óptico reduzido (3,68 eV), favorecendo sua eficiência em processos fotocatalíticos sob radiação UV. Em contraste, o uso da ureia resultou em uma formação mais porosa, com partículas menores, maior área superficial, porém menor cristalinidade (78,14% de óxido de ferro dopado) e maior presença de hematita e impurezas, como o alumínio. Do ponto de vista magnético, a amostra com ureia apresentou maior magnetização de saturação (69,00 emu/g) e menor coercividade, indicando um comportamento magnético mais “suave”, o que facilita sua

recuperação por campo magnético externo. Portanto, o ácido cítrico se destaca por favorecer a formação de materiais mais cristalinos e puros, enquanto a ureia promove uma microestrutura mais porosa e com melhor desempenho magnético para aplicações em reciclagem catalítica.

Conclusões

As análises realizadas confirmaram que o tipo de combustível empregado na síntese por combustão em solução exerce influência decisiva sobre as propriedades estruturais, magnéticas e ópticas dos óxidos de ferro dopados obtidos. O óxido sintetizado com ácido cítrico apresentou maior cristalinidade, menor conteúdo de impurezas e bandgap óptico mais baixo (3,68 eV), características que favorecem sua aplicação em processos fotocatalíticos sob radiação UV. Em contrapartida, a amostra produzida com ureia revelou maior magnetização de saturação (69,00 emu/g) e menor coercividade, atributos que indicam maior eficiência na recuperação magnética, sendo particularmente vantajosos para aplicações cíclicas em sistemas catalíticos.

Esses resultados evidenciam que a escolha do combustível atua como um parâmetro estratégico de síntese, permitindo o ajuste das características finais dos materiais conforme a aplicação desejada — seja para maximizar a eficiência fotocatalítica ou otimizar a separabilidade magnética. Ambas as rotas sintéticas mostraram-se eficazes na produção de ferritas com potencial catalítico, mas com perfis distintos de desempenho.

Agradecimentos

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN); Centro de Síntese e Análise de Materiais Avançados (CSAMA); Laboratório de Catálise Ambiente e Materiais (LACAM); Laboratório de Eletroquímica e Química Analítica (LEQA).

Referências

1. C. Orbeci; L. Untea; G. Nechifor; A. E. Segneanu; M. E. Craciun, Sep. Purif. Technol. 2014, 122, 290–296.
2. M. A. Valenzuela; P. Bosch; J. Jiménez-Becerril; O. Quiroz; A. L. Páez, J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 2002, 148, 177–182.
3. B. F. Troque et al., Cerâmica 2018, 64(370), 248–253.
4. P. A. M. Vitor, Nanoferritas mistas ($\text{Co}_{1-\gamma}\text{Ni}_\gamma$) Fe_2O_4 : síntese via sol-gel e sua caracterização microestrutural e de propriedades magnéticas e ópticas em função da distribuição catiônica, [s.n.], [s.l.], 2020.

5. A. N. Simões et al., Rev. Eletrôn. Mater. Process. 2009, 4(2), 26–31.
6. J. C. Toniolo, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.
7. V. C. Sousa, Varistores de ZnO obtidos por reação em combustão, Blucher Acadêmico, São Paulo, 2008.
8. T. S. Barros et al., Influência do combustível na síntese por reação de combustão de ferritas Ni-Zn, [s.n.], [s.l.], 2008.
9. P. Chen; L. Jiang; S. Yang; H. Chen; J. He; Y. Wang; J. An, Inorg. Chem. Commun. 2019, 101, 164–171.
10. V. D. Sudheesh et al., Ceram. Int. 2017, 43(17), 15002–15009.
11. V. D. Sudheesh et al., J. Alloys Compd. 2018, 742, 577–586.
12. S.R. Jain; K.C. Adiga; V.R. Pai Verneker, Combustion and Flame 1993, 94(1–2), 1–21.
13. E. G. Paulo, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
14. A. S. Neto, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, 2016.
15. R. W. Chantrell in Magnetic Materials Background 10: Soft Magnets, University of Birmingham, Birmingham, s.d., 1–13.
16. H. Joshi; A. R. Kumar, J. Supercond. Nov. Magn. 2022, 35, 2435–2451.
17. N. Jahan; M. N. I. Khan; M. R. Hasan; M. S. Bashar; A. Islam; M. K. Alam; M. A. Hakim; J. I. Khandaker, RSC Adv., 2022, 12, 15167–15179.
18. M. A. Wahab; M. S. Hossain; M. A. A. Hamid, Sci. Rep., 2022, 12, 18102.
19. N. S. S. Ravikumar; S. M. S. Raja; V. V. C. S. Chandra; G. D. A. R. M. Devan, Nanoscale Adv., 2023, 5, 3177–3187.