

AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DO COMPÓSITO PANI/ZnFe₂O₄ COMO SENSOR DE GÁS FOTOTERMICAMENTE ESTIMULADO

Israel da Luz Rodrigues¹; Leonardo Tadeu Boaes Mendonça²; Gricirene Sousa Correia³

RESUMO

Este estudo desenvolveu um sensor de gás compósito de ZnFe₂O₄/PANI ativado por infravermelho, visando superar a principal limitação dos sensores de óxidos metálicos: a alta temperatura de operação, que consome muita energia. O objetivo foi criar um material sinérgico que funcione em temperatura ambiente, utilizando luz como fonte de ativação. A síntese combinou ZnFe₂O₄ hidrotermal (partículas esféricas de ~679 nm) com PANI polimerizada *in situ*, formando um compósito homogêneo com encapsulamento da ferrita pelo polímero, confirmado por MEV. Análises estruturais (DRX, FTIR) validaram a formação do compósito, com interação interfacial evidenciada por deslocamentos espectrais. A redução do bandgap para 2,39 eV, comparado à PANI pura, indicou forte interação eletrônica. O ensaio fototérmico sob laser NIR (850 nm) demonstrou alta eficiência (90%), com aquecimento de 42°C, permitindo a ativação por LED infravermelho.

Palavras-chave: Ferrita de zinco; Polianilina; Compósito; Sensor de gás; Fototermia.

Financiamento: FAPEMA

1 INTRODUÇÃO

Atualmente é notável o crescimento da área de sensores para identificação e quantificação de gases e compostos voláteis e com isso cresce a demanda por novos materiais que sejam acessíveis, e possuam resposta elevada a essas substâncias. Define-se um sensor de gás como um dispositivo capaz de detectar determinados tipos de gases com base no princípio de interação por adsorção entre o gás alvo (analito) e o material usado como detector (elemento sensor), semelhante ao sistema olfativo humano (AISHWARYA; NIRMALA; NAVAMATHAVAN, 2021). A interação entre o analito e sensor provoca uma alteração nas propriedades físicas e/ou químicas deste, gerando um sinal que é captado, e então convertido em informação passível de interpretação pelo operador do dispositivo (KUMAR et al., 2020).

Os sensores de gases podem ser muito sensíveis, sendo capazes de detectar em concentrações extremamente baixas, chegando a níveis em partes por bilhão (ppb). No entanto, várias condições de operação podem influenciar sua sensibilidade e eficiência Além da composição da atmosfera, onde o equipamento está instalado, a temperatura de operação do sensor também é um fator de influência

¹Especialista, Curso de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: israeluz1103@gmail.com.

²Professor Dr. do Departamento de Tecnologia Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) Campus Bacanga; E-mail: leonardo.boaes@ufma.br

³Professora Dr.^a do Departamento de Mecânica e Materiais (DMM) do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: gricirene.correia@ifma.edu.br

importante. Temperaturas mais altas de operação são geralmente favoráveis para garantir que o sensor atinja níveis elevados de desempenho (KUMAR et al., 2020).

A ferrita de zinco ($ZnFe_2O_4$) pertence a uma classe de materiais de fórmula MFe_2O_4 (onde M representa cátions divalentes como Zn, Ni, Co, Mg, etc.) que têm atraído bastante interesse de pesquisadores devido às características únicas que sua estrutura do tipo espinélio exibe, como superparamagnetismo, elevada área superficial, boa estabilidade química e térmica, e uma ampla gama de aplicações (PARK et al., 2013). Com a descoberta de que as capacidades magnéticas, elétricas, mecânicas e ópticas da ferrita de zinco podem ser facilmente melhoradas, esse material se tornou promissor para aplicação em diversos tipos de sensores, como os de gases (RATURI et al., 2023).

Os polímeros condutores são uma classe de material amplamente empregado como elemento de detecção sem a necessidade de elevação de temperatura, devido à sua alta afinidade com moléculas contendo oxigênio em condições ambiente. Entre esses materiais, a polianilina (PANI) se destaca por apresentar uma rota de síntese simples, além de boa capacidade de dopagem e estabilidade física e química, características que a tornam altamente atrativa para diversas aplicações. Atualmente, estão em curso pesquisas para desenvolver equipamentos sensoriais, capacitores e outros baseados na PANI, seja na sua forma pura ou como modificador em materiais compósitos, incluindo a ferrita de zinco (GHASEMI et al., 2022).

Nos últimos anos, uma abordagem inovadora tem despertado crescente interesse: a integração de fontes luminosas com sensores de gases (YANG; DOU, 2016). Estratégias baseadas em iluminação surgem como uma alternativa transformadora para superar as limitações das tecnologias convencionais de detecção gasosa, permitindo aproveitar a energia luminosa para modular e potencializar o desempenho desses dispositivos (SRINIVASAN et al., 2019). Pesquisadores têm contribuído significativamente para o avanço dessa tecnologia ao explorar diferentes regiões do espectro eletromagnético, incluindo radiação ultravioleta (UV) (ESPID; TAGHIPOUR, 2017), luz visível (SUN; HU; ZHANG, 2022) e radiação infravermelha (IR), com o objetivo de aprimorar a eficiência na detecção de gases. Esses sensores destacam-se pela capacidade de oferecer alta sensibilidade, tempos de resposta rápidos e consumo energético reduzido, além de ampliar sua aplicabilidade em diversos ambientes (GONZÁLEZ et al., 2021).

Baseado na necessidade de desenvolver novos materiais que atuem como sensores de gases estimulados por fontes luminosas, esta pesquisa buscou desenvolver um sensor de gás composto por polianilina e ferrita de zinco que será fototermicamente estimulado utilizando um LED (*Light Emitting Diode* – Diodo Emissor de Luz) infravermelho.

¹Especialista, Curso de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: israeluz1103@gmail.com.

²Professor Dr. do Departamento de Tecnologia Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) Campus Bacanga; E-mail: leonardo.boaes@ufma.br

³Professora Dr.^a do Departamento de Mecânica e Materiais (DMM) do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: gricirene.correia@ifma.edu.br

2 METODOLOGIA

Para este trabalho, foram utilizados os seguintes reagentes: acetato de zinco di-hidratado ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, grau analítico), acetato de sódio anidro (CH_3COONa , grau analítico), cloreto de ferro III anidro (FeCl_3 , grau analítico), etilenoglicol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$, grau analítico), ácido clorídrico (HCl , 37%, grau analítico), anilina ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$, grau analítico), persulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, grau analítico, Êxodo)

2.1 Síntese dos Materiais

2.1.1 Síntese Hidrotérmica da Ferrita de Zinco (ZnFe_2O_4)

A ZnFe_2O_4 foi sintetizada pelo método hidrotérmico a $180\text{ }^\circ\text{C}$, utilizando acetato de zinco e cloreto férrico como precursores dissolvidos em etilenoglicol, com acetato de sódio como agente mineralizador. O tempo de reação, estabelecido em 24 horas, foi um parâmetro crítico para avaliar seu impacto no controle do tamanho e na cristalinidade das partículas. Após o tratamento térmico, o produto foi centrifugado, lavado com água deionizada para eliminar impurezas e seco a $100\text{ }^\circ\text{C}$, resultando em um pó fino após a maceração, pronto para ser utilizado na preparação do compósito.

2.1.2 Preparação do Compósito PANI/ ZnFe_2O_4 e da PANI Pura

O compósito de polianilina (PANI) com partículas de ZnFe_2O_4 foi preparado através da polimerização oxidativa *in situ* da anilina. O processo iniciou-se com a dispersão das partículas de ferrita em meio ácido, seguida pela adsorção do monômero de anilina em sua superfície. A polimerização foi então iniciada em baixa temperatura ($5\text{ }^\circ\text{C}$) pela adição lenta de persulfato de amônio como agente oxidante, permitindo que o polímero se formasse encapsulando as partículas. Após 24 horas de reação, o material resultante foi purificado por centrifugação, lavagem com etanol e água, e subsequentemente seco a $90\text{ }^\circ\text{C}$. Para comparação, a polianilina pura (PANI) também foi sintetizada seguindo exatamente o mesmo protocolo, porém na ausência das partículas de ZnFe_2O_4 .

2.2 Caracterizações Realizadas

A caracterização estrutural e morfológica dos materiais foi realizada utilizando um conjunto de técnicas analíticas. A análise de difração de raios-X (DRX) foi empregada para identificar as fases cristalinas e estimar o tamanho de cristalito pela equação de Scherrer. A composição molecular foi investigada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), enquanto as propriedades ópticas foram estudadas por espectroscopia UV-Vis. A morfologia superficial e a composição elementar foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada a

3

¹Especialista, Curso de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: israeluz1103@gmail.com.

²Professor Dr. do Departamento de Tecnologia Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) Campus Bacanga; E-mail: leonardo.boaes@ufma.br

³Professora Dr.^a do Departamento de Mecânica e Materiais (DMM) do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: gricirene.correia@ifma.edu.br

espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Todos os dados obtidos foram processados com softwares específicos para permitir uma análise detalhada das propriedades dos materiais sintetizados.

2.3 Ensaio Fototérmico

A eficiência de conversão de energia luminosa em calor (efeito fototérmico) foi avaliada usando um laser de 850 nm. Foram testadas dispersões das amostras em diferentes concentrações. A temperatura foi monitorada com uma câmera térmica durante ciclos de aquecimento (20 min) e resfriamento (10 min). A eficiência de conversão fototérmica (η) foi calculada por uma equação que considera parâmetros como a temperatura máxima atingida, o calor dissipado pelo sistema e a absorvância da amostra no comprimento de onda do laser.

3 Resultados e Discussão:

3.1 Difração de Raios-X (DRX)

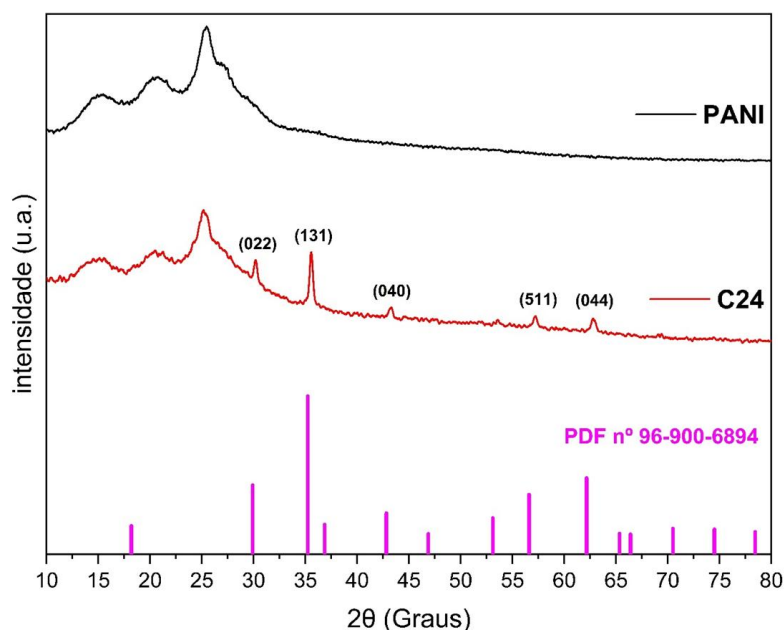
A análise de DRX (Fig. 1) revelou características estruturais distintas da PANI, da $ZnFe_2O_4$ e do seu compósito. A PANI exibiu picos alargados em $20,5^\circ$ e $25,39^\circ$, confirmando a sua natureza amorfa (XIAO et al., 2012). A $ZnFe_2O_4$ (Fe24) apresentou picos bem definidos ($18,30^\circ$, $30,16^\circ$, $35,51^\circ$) correspondentes a uma estrutura cúbica de espinélio (PDF #96-900-6894) (IVANOVA et al., 2021), com cristalitos de 54,2 nm. O compósito (C24) exibiu características combinadas: picos da $ZnFe_2O_4$ atenuados e os sinais alargados da PANI persistentes, verificando a integração bem-sucedida, mantendo o caráter amorfo da PANI. Notavelmente, o tamanho de cristalito no compósito reduziu para 36,6 nm, sugerindo que a PANI restringe o crescimento dos cristais de $ZnFe_2O_4$. O alargamento dos picos indicou domínios cristalinos imperfeitos, o que é típico em compósitos poliméricos onde fases amorfas influenciam a organização cristalina (WANG, Z. et al., 2023). Os resultados confirmam que a $ZnFe_2O_4$ mantém a sua estrutura de espinélio no compósito, embora com cristalinidade reduzida devido às interações com a PANI, enquanto a matriz polimérica permanece amorfa. Esses achados estão alinhados com os comportamentos conhecidos de compósitos, nos quais as interações orgânico-inorgânicas modificam as propriedades estruturais (RACHNA; AGARWAL; SINGH, 2018).

Figura 1 - Difractogramas das amostras de PANI, compósito C24 e padrão da difração da ferrita de zinco #PDF 96-000-6894.

¹Especialista, Curso de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: israeluz1103@gmail.com.

²Professor Dr. do Departamento de Tecnologia Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) Campus Bacanga; E-mail: leonardo.boaes@ufma.br

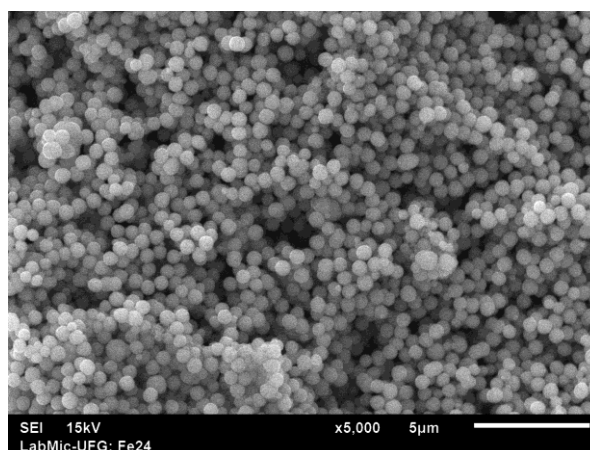
³Professora Dr.^a do Departamento de Mecânica e Materiais (DMM) do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: grirene.correia@ifma.edu.br



3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A imagem de MEV da ferrita de zinco ($ZnFe_2O_4$) (Figura 2) revela agregados esféricos bem definidos com diâmetro médio de 679 nm, exibindo uma distribuição de tamanho uniforme e baixa coesão entre partículas. Essas características resultam do duplo papel do acetato de sódio como estabilizante eletrostático e agente controlador de tamanho durante a síntese (SINTHIYA; MANIMOZHI; NATESAN, 2014). A morfologia esférica surgiu através de um processo de amadurecimento de Ostwald, no qual o acetato de sódio modulou a cinética de agregação para produzir partículas discretas.

Figura 2 – Micrografias das amostras de ferrita de zinco em tempos de síntese de 24 horas.



Em contraste, a polianilina (PANI) (Figura 3a) exibiu uma morfologia mista caracterizada por: (1) estruturas predominantes em forma de placas interconectadas e orientadas verticalmente, típicas da

¹Especialista, Curso de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: israeluz1103@gmail.com.

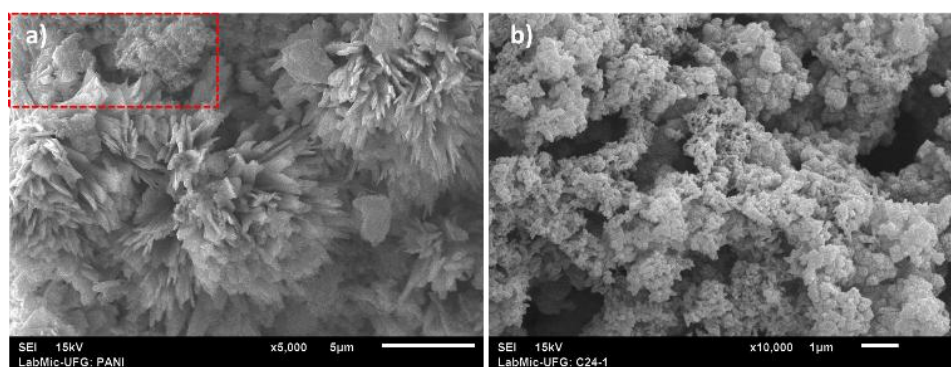
²Professor Dr. do Departamento de Tecnologia Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) Campus Bacanga; E-mail: leonardo.boaes@ufma.br

³Professora Dr.^a do Departamento de Mecânica e Materias (DMM) do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: gricirene.correia@ifma.edu.br

polimerização oxidada por persulfato de amônio, e (2) regiões amorfas não-fibrilares induzidas pelas condições de reação fortemente ácidas (ZARE et al., 2020).

O compósito ZnFe₂O₄/PANI (Figura 3b) exibiu o encapsulamento completo das partículas de ferrita dentro de uma matriz contínua de PANI, mantendo o caráter amorfo do polímero. Esta estrutura *core-shell* (núcleo-casca) formou-se através de um mecanismo de polimerização interfacial, no qual os oligômeros de anilina adsorveram-se preferencialmente nas superfícies da ferrita, criando sítios de nucleação para o crescimento acelerado do polímero (HASSAN et al., 2020). A cinética de polimerização autocatalítica, combinada com a alta área superficial das partículas de ferrita dispersas, facilitou um revestimento polimérico uniforme, resultando em uma arquitetura híbrida orgânico-inorgânica bem definida.

Figura 3 – Micrografias da (a) polianilina e (b) compósito C24.



A análise por FT-IR (Figura 4) confirmou a formação bem-sucedida da polianilina (PANI) na forma de sal esmeraldina, evidenciada por bandas características em 1115 cm⁻¹ (deformação C-H), 1285 cm⁻¹ (estiramento C-N) e 1620 cm⁻¹ (estiramento C=C), além de uma banda larga entre 3200-3600 cm⁻¹ referente aos grupos N-H e O-H (WANG, X. et al., 2020). Para a ferrita de zinco (ZnFe₂O₄), os modos vibracionais típicos da estrutura espinélio foram identificados nas bandas em 441 cm⁻¹ (estiramento Zn-O em sítios tetraédricos) e 594 cm⁻¹ (estiramento Fe-O em sítios octaédricos) (WASEDA et al., 1992).

O espectro do compósito PANI/ZnFe₂O₄ (C24) demonstrou a integração eficiente dos dois materiais, exibindo a sobreposição de suas bandas características. A ocorrência de deslocamentos e modificações nas intensidades das bandas indica interações interfaciais, como ligações de hidrogênio e forças eletrostáticas entre os grupos funcionais da PANI (ex.: -NH) e os sítios ativos da superfície da ferrita (WANG, X. et al., 2020). Essas interações confirmam o encapsulamento das partículas

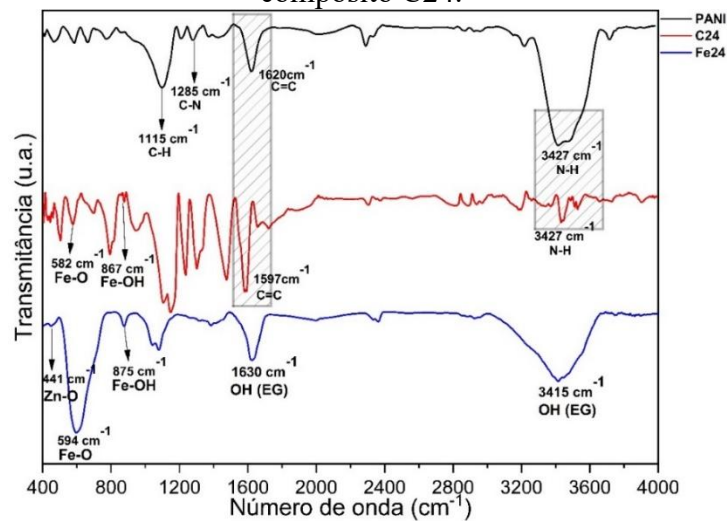
¹Especialista, Curso de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: israeluz1103@gmail.com.

²Professor Dr. do Departamento de Tecnologia Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) Campus Bacanga; E-mail: leonardo.boaes@ufma.br

³Professora Dr.^a do Departamento de Mecânica e Materiais (DMM) do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: gricirene.correia@ifma.edu.br

inorgânicas pela matriz polimérica, validando a formação de uma estrutura compósito orgânico-inorgânica com propriedades sinérgicas.

Figura 4 – Espectros infravermelho amostras de polianilina (PANI), ferrita de zinco (Fe24) e compósito C24.



O estudo avaliou a resposta fototérmica da PANI, $ZnFe_2O_4$ e do seu compósito sob irradiação com laser NIR (850 nm, 1 W/cm²). A PANI pura apresentou o maior aumento de temperatura ($\Delta T > 50^\circ C$) devido às suas propriedades condutoras, enquanto a $ZnFe_2O_4$ exibiu aquecimento mínimo ($\Delta T < 30^\circ C$). O compósito demonstrou um desempenho intermediário ($\Delta T \sim 45^\circ C$), indicando efeitos sinérgicos entre os dois materiais (BAO; LIU, 2020). Testes de estabilidade confirmaram excelente fotostabilidade ao longo de múltiplos ciclos de aquecimento/resfriamento.

Estudos dependentes da concentração revelaram uma correlação direta entre a concentração do compósito (0,25-1,0 mg/mL) e a resposta térmica, com concentrações mais altas atingindo maiores elevações de temperatura ($> 45^\circ C$). A resposta rápida ao NIR e a dissipação eficiente de calor do compósito destacam o seu potencial para aplicações térmicas controladas.

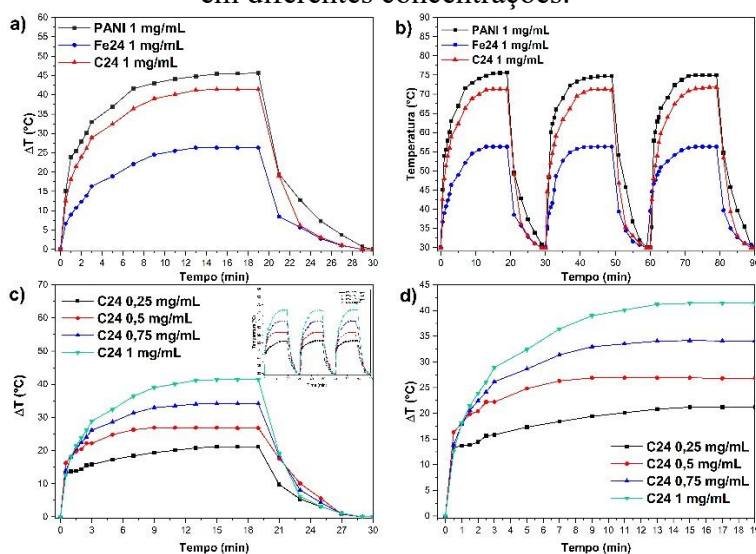
Figura 5 – (a) Curvas de aquecimento de PANI, $ZnFe_2O_4$ e compósito (1 mg/mL) sob laser NIR, (b) ciclos de aquecimento/resfriamento das amostras, (c) variação de temperatura do compósito em

¹Especialista, Curso de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: israeluz1103@gmail.com.

²Professor Dr. do Departamento de Tecnologia Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) Campus Bacanga; E-mail: leonardo.boaes@ufma.br

³Professora Dr.^a do Departamento de Mecânica e Materiais (DMM) do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: gricirene.correia@ifma.edu.br

diferentes concentrações sob laser (Inset: Ciclos térmicos) e (d) curvas de aquecimento do compósito em diferentes concentrações.



Conclusão:

A síntese do compósito C24 (PANI/ZnFe₂O₄) por rota hidrotérmica (24 h), seguida de polimerização oxidativa in situ, resultou em um material com propriedades estruturais e morfológicas superiores, destacando interações sinérgicas entre a matriz condutora de polianilina e partículas de ferrita de zinco. As análises por DRX, FTIR e UV-Vis confirmaram a formação do compósito, revelando um tamanho cristalino médio de 36,6 nm e evidenciando interações eletrônicas na interface dos componentes. Essas interações provocaram uma redução significativa no bandgap óptico para 2,39 eV, o que influencia diretamente o comportamento fototérmico do material.

Ensaio fototérmico demonstraram uma eficiência de conversão luminosa-térmica de 90% sob irradiação com laser NIR (850 nm, 660 mW), destacando o C24 como um dos compósitos mais promissores da categoria para aplicações em terapias fototérmicas ou dispositivos térmicos inteligentes. Estudos futuros focarão na avaliação da sensibilidade do compósito como elemento ativo em sensores optoeletrônicos, visando explorar seu potencial para aplicações em detecção térmica e monitoramento ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro proporcionado pela Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico do Maranhão (FAPEMA). Também expressamos nossa gratidão ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA) e à Universidade Federal do Maranhão (UFMA) pelo suporte infraestrutural e técnico.

¹Especialista, Curso de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: israeluz1103@gmail.com.

²Professor Dr. do Departamento de Tecnologia Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) Campus Bacanga; E-mail: leonardo.boaes@ufma.br

³Professora Dr.^a do Departamento de Mecânica e Materiais (DMM) do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: gricirene.correia@ifma.edu.br

Referências

AISHWARYA, K.; NIRMALA, R.; NAVAMATHAVAN, R. **Recent advancements in liquefied petroleum gas sensors: A topical review.** *Sensors International*. [S.l.]: KeAi Communications Co. , 1 jan. 2021

ASHA; GOYAL, S. L.; KISHORE, N. Synthesis and X-ray diffraction study of polyaniline doped with chromium oxide. 2013, [S.l: s.n.], 2013. p. 617–618.

BAO, L.; LIU, X. Study on the Synthesis and Photothermal Conversion Property of Polyaniline. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 772, n. 1, p. 12048, set. 2020.

CHEN, R. et al. Near infrared light enhanced room-temperature NO₂ gas sensing by hierarchical ZnO nanorods functionalized with PbS quantum dots. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 255, p. 2538–2545, fev. 2018.

ESPID, E.; TAGHIPOUR, F. UV-LED Photo-activated Chemical Gas Sensors: A Review. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**, v. 42, n. 5, p. 416–432, 3 set. 2017.

GAO, R. et al. Highly selective detection of saturated vapors of abused drugs by ZnO nanorod bundles gas sensor. **Applied Surface Science**, v. 485, p. 266–273, 15 ago. 2019.

GHASEMI, A. K. et al. Controllable synthesis of zinc ferrite nanostructure with tunable morphology on polyaniline nanocomposite for supercapacitor application. **Journal of Energy Storage**, v. 51, 1 jul. 2022.

GONZÁLEZ, E. et al. On the Use of Pulsed UV or Visible Light Activated Gas Sensing of Reducing and Oxidising Species with WO₃ and WS₂ Nanomaterials. **Sensors**, v. 21, n. 11, p. 3736, 27 maio 2021.

HASSAN, S. et al. CuFe₂O₄/Polyaniline (PANI) Nanocomposite for the Hazard Mercuric Ion Removal: Synthesis, Characterization, and Adsorption Properties Study. **Molecules**, v. 25, n. 12, p. 2721, set. 2020.

IVANOVA, N. M. et al. Thermal and electrochemical reduction of zinc ferrite doped with polymer. **Electrochemistry Communications**, v. 128, p. 107070, jul. 2021.

KUMAR, R. et al. **Transition metal dichalcogenides-based flexible gas sensors.** *Sensors and Actuators, A: Physical*. [S.l.]: Elsevier B.V. , 1 mar. 2020

¹Especialista, Curso de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: israeluz1103@gmail.com.

²Professor Dr. do Departamento de Tecnologia Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) Campus Bacanga; E-mail: leonardo.boaes@ufma.br

³Professora Dr.^a do Departamento de Mecânica e Materias (DMM) do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: gricirene.correia@ifma.edu.br

PARK, J. W. et al. Electronic Structure of Zn Doped Fe₃O₄ Thin Films. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 13, n. 3, p. 1895–1898, 1 mar. 2013.

RACHNA, K.; AGARWAL, A.; SINGH, N. B. Preparation and characterization of zinc ferrite—Polyaniline nanocomposite for removal of rhodamine B dye from aqueous solution. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 9, p. 154–163, maio 2018.

RATURI, P. et al. Ferrite Nanoparticles for Sensing Applications. [S.l.: s.n.], 2023. p. 151–187. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-981-99-2583-4_9>.

SINTHIYA, M. A.; MANIMOZHI, T.; NATESAN, K. **Synthesis of Zinc ferrite (ZnFe₂O₄) nanoparticles with different capping agents. Article in International Journal of ChemTech Research.** [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/288079871>>.

SRINIVASAN, P. et al. Room temperature chemiresistive gas sensors: challenges and strategies—a mini review. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 30, n. 17, p. 15825–15847, 19 set. 2019.

SUN, Y.; HU, J.; ZHANG, Y. Visible light assisted trace gaseous NO₂ sensor with anti-humidity ability via LSPR enhancement effect. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 367, p. 132032, set. 2022.

WANG, X. et al. Room temperature ammonia gas sensor based on polyaniline/copper ferrite binary nanocomposites. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, v. 322, set. 2020.

WANG, Z. et al. A Roadmap Review of Thermally Conductive Polymer Composites: Critical Factors, Progress, and Prospects. **Advanced Functional Materials**, v. 33, n. 36, 15 set. 2023.

WASEDA, Y. et al. Structural study of amorphous zinc-ferrite film by the anomalous X-ray scattering method. **Journal of Physics: Condensed Matter**, v. 4, n. 30, p. 6355–6366, set. 1992.

XIA, Y. et al. **3D Architected Graphene/Metal oxide hybrids for gas sensors: A review. Sensors (Switzerland).** [S.l.]: MDPI AG. , 7 maio 2018

XIAO, L. et al. A soft approach to encapsulate sulfur: Polyaniline nanotubes for lithium-sulfur batteries with long cycle life. **Advanced Materials**, v. 24, n. 9, p. 1176–1181, 2 mar. 2012.

YAN, Y. et al. **Conducting polymer-inorganic nanocomposite-based gas sensors: a review. Science and Technology of Advanced Materials.** [S.l.]: Taylor and Francis Ltd. , 2020

YANG, Z.; DOU, X. Emerging and Future Possible Strategies for Enhancing 1D Inorganic Nanomaterials-Based Electrical Sensors towards Explosives Vapors Detection. **Advanced Functional Materials**, v. 26, n. 15, p. 2406–2425, 16 abr. 2016.

ZARE, E. N. et al. **Progress in Conductive Polyaniline-Based Nanocomposites for Biomedical Applications: A Review. Journal of Medicinal Chemistry.** [S.l.]: American Chemical Society. , set. 2020

¹Especialista, Curso de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: israeluz1103@gmail.com.

²Professor Dr. do Departamento de Tecnologia Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) Campus Bacanga; E-mail: leonardo.boaes@ufma.br

³Professora Dr.^a do Departamento de Mecânica e Materiais (DMM) do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: gricirene.correia@ifma.edu.br

ZHANG, R. et al. **Recent Progress in Spinel Ferrite (MFe₂O₄) Chemiresistive Based Gas Sensors. Nanomaterials.** [S.l.]: Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). , 1 ago. 2023

¹Especialista, Curso de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: israeluz1103@gmail.com.

²Professor Dr. do Departamento de Tecnologia Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) Campus Bacanga; E-mail: leonardo.boaes@ufma.br

³Professora Dr.^a do Departamento de Mecânica e Materias (DMM) do IFMA Campus Monte Castelo; E-mail: gricirene.correia@ifma.edu.br