

Uso de gelatina como matriz orgânica na síntese de aluminatos MAI_2O_4 ($M = Co^{2+}$, Ni^{2+} , Cu^{2+} e Zn^{2+}) aplicados na remediação de águas contaminadas com azul de metileno

Nilson Machado Pontes do Nascimento^{1,2*}, Olacir Alves Araújo¹

¹Laboratório de Química de Materiais e Modelagem Molecular (QMMOL), Universidade Estadual de Goiás - Campus Central SEDE; Anápolis – CET, Goiás, Brasil.

²Departamento de Química Instituto Federal Goiano – Campus Morrinhos, Goiás, Brasil.

*Autor correspondente. E-mail: nilson.nas45@gmail.com

Resumo/Abstract

RESUMO - Este trabalho reporta a síntese de fotocatalisadores do tipo espinélio com fórmula geral MAI_2O_4 ($M = Co^{2+}$, Ni^{2+} , Cu^{2+} e Zn^{2+}) empregando o método *soft template* usando gelatina em pó. Para determinação da fase cristalina dos materiais produzidos utilizou-se a Difratometria de raios X (DRX), a formação da fase espinélio foi confirmada por Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), e a energia de *bandgap* foi determinada por Espectroscopia de reflectância difusa (DRS). As propriedades fotocatalíticas foram avaliadas a partir da degradação do corante azul de metileno sob luz solar natural, sendo a remoção do corante acompanhada por Espectroscopia de UV-vis. A amostra $CoAl_2O_4(G)$ foi a que apresentou maior taxa de remoção, chegando a 15,40% entre as amostras obtidas empregando a gelatina em pó como *soft template* comercial.

Palavras-chave: Aluminato, espinélio, fotocatálise, gelatina em pó.

ABSTRACT - This work reports the synthesis of spinel-type photocatalysts with the general formula MAI_2O_4 ($M = Co^{2+}$, Ni^{2+} , Cu^{2+} e Zn^{2+}) using the soft template method with powdered gelatin. The crystalline phase of the produced materials was determined by X-ray Diffraction (XRD), the formation of the spinel phase was confirmed by Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and the bandgap energy was determined by Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS). The photocatalytic properties were evaluated by the degradation of methylene blue dye under natural sunlight, with dye removal monitored by UV-Vis Spectroscopy. The $CoAl_2O_4(G)$ sample exhibited the highest removal rate, reaching 15.40% among the samples obtained using powdered gelatin as a commercial soft template.

Keywords: Aluminate, Spinel, Photocatalysis, Powdered Gelatin.

Introdução

Os materiais do tipo espinélio têm sido usados em uma diversidade de aplicações fotocatalíticas, as quais corroboram o interesse da comunidade científica em melhorar a performance desse material, o que se deve, além das suas propriedades físico-químicas, a sua viabilidade econômica. Entre as aplicações que receberam maior atenção são as realizadas para avaliar a fotodegradação de corantes orgânicos, dentre estes corantes, o alaranjado de metila (MO), o vermelho de metila (MR), a rodamina B (RhB) e o azul de metileno (MB) são amplamente investigados (1,2).

Os óxidos do tipo espinélio podem ser obtidos a partir das mais diferentes rotas de síntese, melhorando de forma significativa as propriedades estruturais dos espinélios, permitindo que sejam empregados para fins catalíticos com maior eficiência (3-5). Em geral, os óxidos do tipo espinélios podem ser obtidos pelos mais diversos métodos de síntese, tais como co-precipitação (6,7), reação no estado sólido (8), sol-gel (9), hidrotérmico (10), hidrotérmico por

micro-ondas (3), precursor polimérico (11), complexação metal-quitosana (12), entre outros. Considerando o que foi exposto, pretende-se obter o espinélio MAI_2O_4 ($M = Co^{2+}$, Ni^{2+} , Cu^{2+} e Zn^{2+}) empregando gelatina em pó como *soft template* e analisar a performance fotocatalítica dos materiais sintetizados na fotodegradação do corante azul de metileno (AM).

Experimental

Síntese pelo método *soft template*

A síntese dos óxidos do tipo espinélio empregando a gelatina em pó como *soft template* baseou-se na metodologia descrita por Battiston *et al.* (13), a qual empregou o método de co-precipitação. No entanto, neste trabalho, foi realizada uma modificação no método ao adicionar gelatina em pó como *soft template*, visando obter a estrutura do espinélio com propriedades texturais aprimoradas. Para a preparação de 2,0 g de uma amostra do óxido do tipo espinélio, o $ZnAl_2O_4$ por exemplo, foram dispersos 2,5 g de gelatina em pó em 100 mL de água

destilada a 70 °C (Dispersão 01), a qual ficou sob agitação magnética por 30 min até a mistura apresentar um aspecto homogêneo a olho nu. Em outros dois bêqueres foram dissolvidos 3,02 g de $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ em 7,0 mL de água destilada (Solução 02) e 8,0 g de $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ em 8,0 mL de água destilada (Solução 03). Após a solubilização, as soluções 02 e 03 foram misturadas sob agitação. E, posteriormente, a solução resultante foi adicionada sob agitação constante, na Dispersão 01 contendo o gel formado com a gelatina, ficando em agitação por uma hora para completa homogeneização formando a Solução 04. Após o período de agitação, o gel (Solução 04) formado (Zn – agente complexante – Al) foi adicionado, gota a gota em 50 mL de uma solução de NH_4OH (50% v/v) ajustando-se o pH da solução para que permaneça acima de 9,0. O precipitado formado ficou sob agitação por três horas. Em seguida, foi filtrado e lavado com água destilada em excesso para remoção dos resíduos, e posteriormente seco à temperatura ambiente por 48 h, sendo calcinado em seguida por 4 h a 800 °C (12,13).

Caracterização do fotocatalisador

As estruturas dos compostos do tipo espinélio foram investigadas por espectroscopia de difração de raios X (DRX) com um difratômetro de raios X D6 PHASER - Bruker. O equipamento funcionou nas condições de 40 kV e 15 mA, utilizando radiação $CuK\alpha$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). A taxa de varredura aplicada foi de 2,5°/min, cobrindo um intervalo de 20° de 20 a 80° no Centro de Análises, Inovação e Tecnologia em Ciências Naturais e Aplicadas da UEG – CAITEC.

A espectroscopia vibracional de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) foi realizada em um espectrômetro Perkin Elmer no Centro de Análises, Inovação e Tecnologia em Ciências Naturais e Aplicadas da UEG – CAITEC. As amostras foram dispersas em brometo de potássio (KBr) e prensadas na forma de pastilhas. Os espectros foram obtidos por transmitância no intervalo correspondente a região do infravermelho médio ($4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$).

As aquisições dos espectros de reflectância difusa no UV-Vis e energia do fóton (*bandgap*) foram realizadas no equipamento da marca Thermo Scientific, modelo Evolution Pro, as quais foram realizadas no Centro de Análises, Inovação e Tecnologia em Ciências Naturais e Aplicadas da Universidade Estadual de Goiás (UEG) – CAITEC.

Teste de Adsorção

O teste de adsorção foi realizado com a finalidade de verificar o grau de contribuição que a adsorção possui na taxa de remoção do azul de metileno (AM). Neste teste 50 mL de solução de AM com concentração de 10 mg/L foi adicionado em um bêquer de 100 mL e 0,1 g do

fotocatalisado foi adicionado, correspondendo ao teor de 2 g por litro. A mistura foi agitada no escuro por 150 min. E foram realizadas duas coletas da fase líquida para posterior análise, uma antes da adição do catalisador, e outra ao final do teste.

Performance fotocatalítica

Os ensaios de fotodegradação do corante orgânico azul de metileno foram realizados sob luz solar natural, medida entre 11h e 13h em um dia ensolarado, a intensidade da radiação foi monitorada com o uso de um fotoradiômetro portátil (Marca: Delta Ohm; Modelo: HD2302.01). Durante esse período, a potência média da luz solar foi registrada em $551,2 \text{ W.m}^{-2}$ para o intervalo de comprimento de onda de 400 a 1.040 nm, e em $1,3 \text{ W.m}^{-2}$ para a faixa de comprimento de onda de 250 a 400 nm. O teste sob luz solar foi realizado no terraço do Centro de Pesquisa e Educação Científica (CEPEC/UEG) - Anápolis - GO, coordenadas: $16^{\circ}22'48''S$ $48^{\circ}56'48''W$ (14).

Para a análise fotocatalítica foi preparada uma solução de 50 mL de azul de metileno com concentração de 10 mg/L, e, a essa solução, foram adicionados 50 mg do fotocatalisador. A suspensão formada foi aerada e agitada, primeiramente, no escuro por 30 min. para alcançar o equilíbrio de adsorção/dessorção, e em seguida a mistura foi irradiada com a luz solar. As coletas deram-se a cada 30 min. com duração total do teste de 120 min. Posteriormente, as soluções coletadas foram analisadas por Espectroscopia UV-Vis.

Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta os DRX das amostras sintetizadas. Pode-se observar que todos os picos de difração podem ser indexados na estrutura cúbica de face centrada do espinélio. Os ângulos 2θ para as amostras são correspondentes aos seguintes planos cristalográficos (220), (311), (400), (331), (422), (511), (440), (620) e (533). Todos os materiais apresentaram uma única fase detectada.

O pico (311) exibiu a maior intensidade em todos os casos e foi utilizado para determinar o valor d_{hkl} , o parâmetro de rede a , e o tamanho do cristalito, que foram calculados a partir da equação de Scherrer empregando o softwear EVA. Além disso, foram determinados o volume da célula unitária, a densidade teórica e a área superficial, cujos valores estão disponíveis na Tabela 1.

Os valores para o parâmetro de rede, a , variam entre os estudos revisados. Anand *et al.* (15) e Souza *et al.* (16) encontraram valores próximos para o $ZnAl_2O_4$, com $8,081 \text{ \AA}$ e $8,05 \text{ \AA}$, respectivamente. Kapse *et al.* (17) obtiveram um valor de $8,0747 \text{ \AA}$ para o mesmo composto. Esses resultados corroboram com os obtidos neste estudo, em que o parâmetro de rede determinado para o $ZnAl_2O_4(G)$ foi de $8,902 \text{ \AA}$. Para o $CoAl_2O_4$, Kapse *et al.* (17) relataram um parâmetro de rede de $8,1011 \text{ \AA}$. Rahnamaeiyani *et al.* (18) e

Souza *et al.* (16) encontraram valores de 8,1040 Å e 8,106 Å, respectivamente, para o mesmo composto. No presente trabalho, o valor obtido para o $\text{CoAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ foi de 8,965 Å. Também foram determinados os parâmetros de rede para os demais aluminatos sintetizados: 8,933 Å para $\text{NiAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ e 8,872 Å para $\text{CuAl}_2\text{O}_4(\text{G})$, evidenciando variações atribuídas à natureza do cátion M^{2+} presente na estrutura tipo espinélio.

Figura 1 - Difratogramas dos photocatalisadores sintetizados: (a) $\text{CoAl}_2\text{O}_4(\text{G})$; (b) $\text{NiAl}_2\text{O}_4(\text{G})$; (c) $\text{CuAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ e (d) $\text{ZnAl}_2\text{O}_4(\text{G})$.

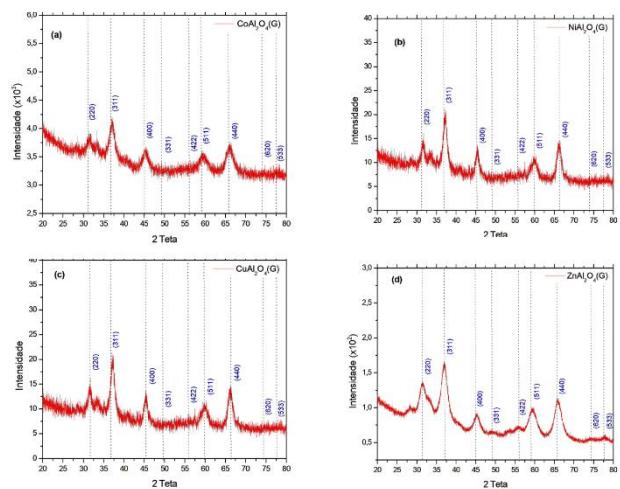


Tabela 1 - d_{hkl} , parâmetro de rede, tamanho do cristalito, volume de cela unitária, densidade teórica, área superficial e *bandgap* dos materiais

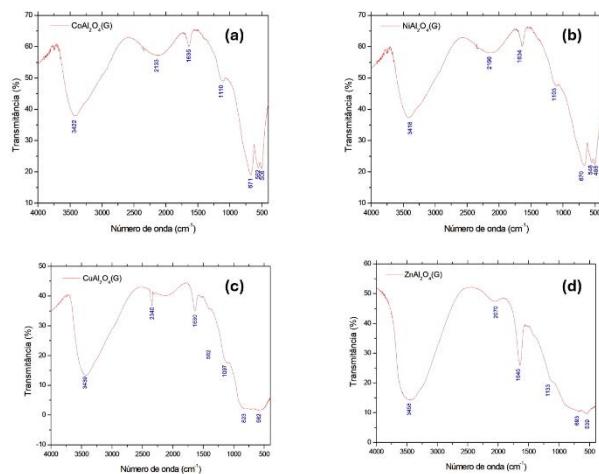
Amostras	d_{hkl} (Å)	Parâmetro de rede, a (Å)	D (Å)	Volume de cela unitária, a^3	Densidade, ρ , (g/cm ³)	SSA, (m ² /g)	Bandgap (eV)
$\text{CoAl}_2\text{O}_4(\text{G})$	2,703	8,965	88,7	720,5	3,262	20,74	2,85
$\text{NiAl}_2\text{O}_4(\text{G})$	2,693	8,933	48,3	712,8	3,292	37,73	3,18
$\text{CuAl}_2\text{O}_4(\text{G})$	2,675	8,872	60,5	698,3	3,453	28,72	3,55
$\text{ZnAl}_2\text{O}_4(\text{G})$	2,684	8,902	50,2	705,4	3,453	34,61	3,48

A Figura 2 apresenta os espectros vibracionais de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier dos aluminatos de cobalto, níquel, cobre e zinco. A absorção na região de 2.000 a 900 cm⁻¹ corresponde ao modo de deformação da ligação $\text{Al}^{3+}\text{--OH}$ e $\text{M}^{2+}\text{--OH}$, que é típico para MAl_2O_4 (19).

As vibrações de estiramento de OH, aparecem em torno de 3.422 cm⁻¹ na amostra $\text{CoAl}_2\text{O}_4(\text{G})$, 3.418 cm⁻¹ na amostra $\text{NiAl}_2\text{O}_4(\text{G})$, 3.439 cm⁻¹ na amostra $\text{CuAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ e

3.458 cm⁻¹ na amostra $\text{ZnAl}_2\text{O}_4(\text{G})$, sendo essas vibrações acompanhadas pelas seguintes absorções 1.635, 1.634, 1.630 e 1.645 cm⁻¹, respectivamente. Portanto essas vibrações podem ser atribuídas à água adsorvida durante o preparo das amostras. A confirmação da fase espinélio pode ser realizada com as vibrações 671, 562 e 506 cm⁻¹ para o $\text{CoAl}_2\text{O}_4(\text{G})$, sendo que as vibrações em 670, 548, 498 cm⁻¹ confirmam a fase espinélio para o $\text{NiAl}_2\text{O}_4(\text{G})$, entretanto os espinélios $\text{CuAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ e $\text{ZnAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ não apresentaram as três bandas que confirmam a fase espinélio, apresentando somente duas delas, podendo a terceira ter sido sobreposta, como pode ser visualizado nas Figura 2. Sendo as vibrações em 823 e 562 cm⁻¹ para o $\text{CuAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ e 693 e 539 cm⁻¹ para o $\text{ZnAl}_2\text{O}_4(\text{G})$.

Figura 2 - Espectro vibracional de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) das amostras: (a) $\text{CoAl}_2\text{O}_4(\text{G})$; (b) $\text{NiAl}_2\text{O}_4(\text{G})$; (c) $\text{CuAl}_2\text{O}_4(\text{G})$; (d) $\text{ZnAl}_2\text{O}_4(\text{G})$

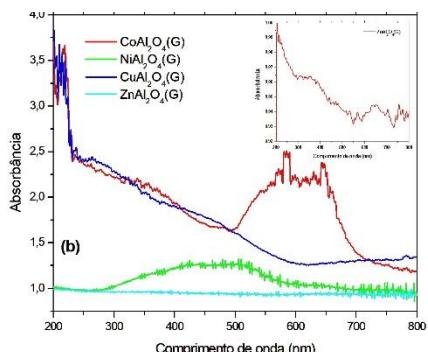


A Figura 3 apresenta os espectros de absorbância dos materiais MAl_2O_4 ($\text{M} = \text{Co}^{2+}, \text{Ni}^{2+}, \text{Cu}^{2+}$ e Zn^{2+}), obtidos por reflectância difusa. Pode-se perceber que à medida que houve o aumento do comprimento de onda (λ), ocorreu a diminuição da absorbância de todos os materiais obtidos. E a região de maior absorção na região do UV-Vis não foi uniforme para os materiais.

A amostra $\text{CoAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ apresentou um comportamento espectral característico de espinélios normais, evidenciando um tripleto de bandas na região de 550 a 700 nm, que aparece aproximadamente em 573, 614 e 644 nm. Essas bandas são atribuídas às transições $4\text{A}_2(\text{F}) \rightarrow 4\text{T}_1(\text{P})$ e indicam que o cátion Co^{2+} está ocupando o sítio tetraédrico na estrutura espinélio. A análise foi realizada por espectroscopia de absorção UV-Vis em modo de reflectância difusa (15). Essa conclusão é corroborada pelo espectro de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), mostrado na Figura 2(a) e 2(b). A ausência da vibração característica em torno de 730 cm⁻¹, que está associada à interação (AlO_4) no sítio tetraédrico, sugere que

a estrutura do espinélio é normal. Esse comportamento no FTIR indica que os sítios tetraédricos estão exclusivamente ocupados por íons Co^{2+} .

Figura 3 - Espectros de absorção no Ultravioleta visível



A absorção, principalmente na região de 590 a 650 nm, é característica das cores vermelho e amarelo, o que significa que o material absorve estas cores e emite a coloração azul, devido a transições d-d intensas que justificam sua contribuição na região visível (11,16,20).

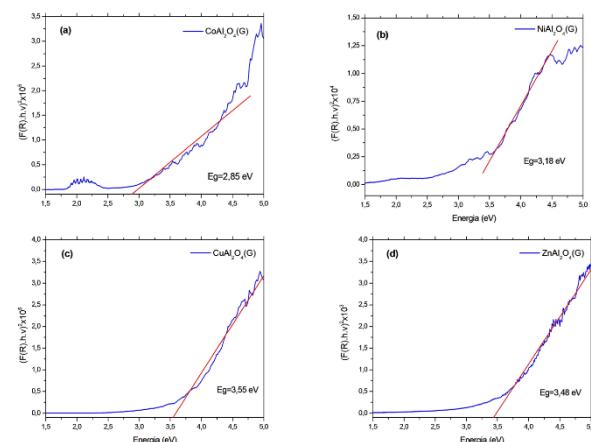
A amostra $\text{CuAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ apresentou alta absorção na região do ultravioleta, com diminuição à medida que houve o aumento do comprimento de onda. O $\text{NiAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ apresenta características ópticas relacionadas às transições eletrônicas internas dos cátions Ni^{2+} . Os íons Ni^{2+} , com configuração eletrônica $3d^8$, podem ocupar tanto sítios tetraédricos quanto octaédricos. A distribuição desses íons entre os sítios depende das condições de calcinação, em especial da temperatura aplicada e da taxa de resfriamento, que influenciam a ordem catiônica e a estabilidade estrutural do material. Neste caso, ocorrem cinco transições permitidas, além de outras transições proibidas por spin (21). O $\text{ZnAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ apresenta uma absorção discreta na região de 550 a 700 nm, ou seja, na região do amarelo para o vermelho, como pode ser visualizado na ampliação do espetro do $\text{ZnAl}_2\text{O}_4(\text{G})$.

A Figura 4 apresenta o gráfico de $(F(R)h\nu)^2$ versus $h\nu$ das amostras sintetizadas. A função transformada de Kubelka-Munk foi empregada em função da energia da luz absorvida para calcular os valores de *bandgap* das amostras: (a) $\text{CoAl}_2\text{O}_4(\text{G})$, (b) $\text{NiAl}_2\text{O}_4(\text{G})$, (c) $\text{CuAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ e (d) $\text{ZnAl}_2\text{O}_4(\text{G})$.

Os valores de *bandgap* observados para essas amostras foram, respectivamente, 2,85 eV, 3,18 eV, 3,55 eV e 3,48 eV, os quais estão listados na Tabela 1. Os materiais sintetizados apresentaram uma energia de *bandgap* na faixa do ultravioleta. Valores comparáveis foram reportados por Nascimento, N.M.P. e colaboradores (12), que obtiveram energias de *bandgap* que corroboraram os resultados obtidos. Em seu estudo, o ZnAl_2O_4 apresentou *bandgap* na faixa de 3,04 a 3,30 eV, enquanto para o NiAl_2O_4 calcinado

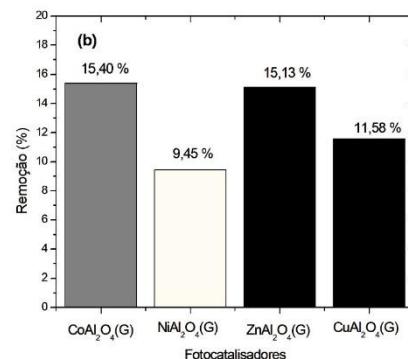
a 950°C, foram determinados valores ligeiramente superiores, atingindo 3,12 eV. Já para o CoAl_2O_4 , os autores reportaram um *bandgap* mais elevado, de 3,90 eV. Hosseini, S.A (23) obteve para o CuAl_2O_4 um *bandgap* de 3,07 eV. Esta concordância entre os valores de *bandgap* obtidos em diferentes estudos corrobora a confiabilidade de nossos resultados e confirma as propriedades semicondutoras características destes aluminatos tipo espinélio sintetizados via template de gelatina.

Figura 4 - Gráfico de $(F(R)h\nu)^2$ versus $h\nu$ das amostras: (a) $\text{CoAl}_2\text{O}_4(\text{G})$, (b) $\text{NiAl}_2\text{O}_4(\text{G})$, (c) $\text{CuAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ e (d) $\text{ZnAl}_2\text{O}_4(\text{G})$



Os testes de adsorção mostraram que o corante foi removido nas seguintes porcentagens: 0,6% para o $\text{CoAl}_2\text{O}_4(\text{G})$, 2,1% para o $\text{NiAl}_2\text{O}_4(\text{G})$, 1,4% para o $\text{CuAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ e 3,0% para o $\text{ZnAl}_2\text{O}_4(\text{G})$. E, o desempenho photocatalítico foi realizada sob luz solar natural para as amostras sintetizadas os resultados mostraram uma remoção do azul de metileno, com variações entre 9,45 a 15,40 %, dependendo do photocatalisador utilizado.

Figura 5 - Taxa de remoção do azul de metileno após o teste photocatalítico sob luz solar natural, espinélios obtidos empregando gelatina em pó.



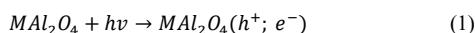
O $\text{CoAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ apresentou a maior eficiência, com 15,40%, seguido pelo $\text{ZnAl}_2\text{O}_4(\text{G})$, que alcançou 15,13%. O $\text{CuAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ obteve desempenho intermediário, com 11,58%, enquanto o $\text{NiAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ mostrou o menor resultado, com 9,45% de remoção. Nascimento et al. (12) investigaram a atividade fotocatalítica de diferentes espinélios na degradação da rodamina B sob luz visível e observaram eficiências distintas: 14,7% para ZnAl_2O_4 , 35,2% para CoAl_2O_4 e 66,4% para NiAl_2O_4 . Os resultados obtidos por Nascimento et al. (12) para o ZnAl_2O_4 foi semelhante ao observado neste trabalho, no entanto, para os demais materiais, os comportamentos fotocatalíticos foram distintos. Essa divergência pode estar relacionada às diferenças no arranjo experimental adotado nos testes, como tipo de radiação, intensidade luminosa, tempo de exposição ou concentração do corante.

A baixa taxa de remoção do corante neste estudo pode ser atribuída a dois fatores principais. Primeiramente, os elevados valores de *bandgap* dos aluminatos dificultam sua ativação como fotocatalisadores sob radiação solar natural, uma vez que requerem fótons de maior energia para promover elétrons da banda de valência para a banda de condução. Simultaneamente, a concentração do corante empregada pode ter criado um efeito de filtro, reduzindo a penetração da luz no meio reacional e, consequentemente, limitando a ativação dos fotocatalisadores. Em trabalhos futuros, sugere-se investigar o efeito da dopagem com metais de transição ou não metais na energia de *bandgap* dos aluminatos, visando reduzir seu valor e otimizar a absorção de luz no espectro visível.

Mecanismo Fotocatalítico

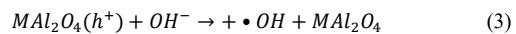
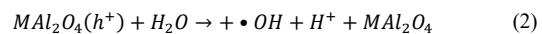
Os processos fotocatalíticos podem ser divididos, de acordo com Jean-Marie Herrmann (23), em cinco etapas independentes, que são: (a) Transferência dos reagentes na fase fluida para a superfície; (b) Adsorção de pelo menos um dos reagentes; (c) Reação na fase adsorvida; (d) Dessorção do(s) produto(s) e (e) Remoção dos produtos da região interfacial.

Para exemplificar as reações que acontecem na superfície de um semicondutor sólido empregado em fotocatalise heterogênea, tem-se que: ao ser irradiado pela luz, o fotocatalisador será ativado, gerando pares elétrons/buraco, tomando MAl_2O_4 ($\text{M} = \text{Co}^{2+}$, Ni^{2+} , Cu^{2+} e Zn^{2+}) como exemplo, tem-se que, de acordo com Campos, W.E.O et al. (24), após a ativação do fotocatalisador ocorre a formação das espécies negativas e positivas que são responsáveis pelas reações de oxirredução fotoinduzidas que acontecem na superfície do fotocatalisador, Equação (1).

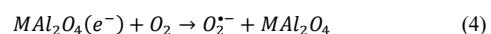


Em seguida, o par elétron-buraco formado reage com as espécies presentes no sistema. A região com deficiência de

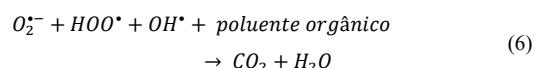
elétrons, devido a migração de elétrons da BV para a BC, age como agente de redução, formando o radical hidroxila, Equação (2) e (3).



Os elétrons que estão na banda de condução, agem como agente oxidante e promovem as seguintes reações de redução, Equação (4) e (5)



Os radicais fotogerados podem seguir dois caminhos diferentes, um reagir entre eles dando fim as reações, ou reagir com o poluente orgânico, promovendo a fotodegradação do composto, Equação (6).



Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvido uma modificação simples no processo de síntese de óxidos do tipo espinélio, MAl_2O_4 ($\text{M} = \text{Co}^{2+}$, Ni^{2+} , Cu^{2+} e Zn^{2+}) empregando gelatina em pó como *soft template*. Todos os materiais obtidos tiveram sua estrutura cristalina confirmada por Difratometria de raios X (DRX), e a fase do espinélio foi confirmada por Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Assim os dados de DRX e os espectros de infravermelho confirmaram a formação da fase espinélio, para todas as amostras sintetizadas

O desempenho fotocatalítico foi investigado a partir da degradação do corante azul de metileno sob luz solar. As amostras $\text{CoAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ e a amostras $\text{NiAl}_2\text{O}_4(\text{G})$ apresentaram a maior (15,4%) e menor (9,45%) taxa de degradação do corante, respectivamente. E a fotodegradação do azul de metileno seguiu uma cinética de pseudoprimeira ordem. Os testes realizados sob luz solar natural demonstraram que o material sintetizado apresenta atividade fotocatalítica, ainda que com desempenho discreto. Esse comportamento pode estar relacionado ao tempo de exposição à radiação solar, que foi de 150 minutos, o que pode ter limitado a fotodegradação do corante. Embora não tenham sido realizadas análises de área superficial (BET) nesta etapa, a alteração proposta fundamenta-se em abordagens relatadas na literatura que destacam o uso de agentes estruturantes naturais para a obtenção de materiais com maior porosidade e desempenho aprimorado. Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de ensaios sob

condições controladas de irradiação, bem como a ampliação do tempo de exposição. Além disso, análises complementares, como determinação da área superficial específica (BET-BJH), podem fornecer informações mais detalhadas sobre a relação entre a estrutura do material e seu desempenho fotocatalítico.

Agradecimentos

Os autores expressam sua sincera gratidão à FAPEG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás) e ao Universidade Estadual de Goiás/Pró-Projetos pelo suporte institucional fundamental para a realização deste trabalho. Ao Laboratório de Química de Materiais e Modelagem Molecular (QMMOL), onde todas as atividades experimentais foram desenvolvidas, e ao Centro de Análises, Inovação e Tecnologia em Ciências Naturais e Aplicadas da UEG (CAiTec), responsável pela realização das caracterizações. E ao Instituto Federal Goiano – Campus Morrinhos.

Referências

1. KHADEMOLHOSEINI, S.; TALEBI, R. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, **3**, 2938–2943.
2. RAFIEE, E.; HAMZAH, M. H.; EAVANI, S. *Optik*, 2020, **163915**, 1-10.
3. FOLETTTO, Edson Luiz *et al.* *Microporous And Mesoporous Materials*, 2012, **163**, 29-33.
4. MORO, C. C.; LANSARIN, M. A., BAGNARA, M. *Quim. Nova*, 2012, **8**, 1560-1565.
5. LIU, Guanglong *et al.* *Nanotechnology*, 2012, **29**, 294003- 294007.
6. ZHANG, L. *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 2014, **3**, 743–749.
7. SUMATHI, S.; KAVIPRIYA, A. *Solid State Sciences*, 2017, **65**, 52–60, 2017.
8. GÓMEZ-SOLÍS, C. *et al.* *Fuel*, 2017, **188**, 197–204.
9. TABELI, R; KHADEMOLHOSEINI, S; RAHNAMAEIYAN, S. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 2016, **2**, 1427-1432.
10. VENKATARAMANA, C. *et al.* *Chemosphere*, 2021, **129021**, 1-8.
11. QUEIROZ, Renan M. *et al.* *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, 2016, **2**, 1023-1028.
12. NASCIMENTO, N. M. P do, *et. al.* *Materials*, 2020, **13**, p. 2150–2170.
13. BATTISTON, S. *et al.* *Materials Research*, 2014, **3**, 734-738.
14. Google Inc. (2025). *Google Earth*. Recuperado de <https://earth.google.com>.
15. ANAND, G. T. *et al.* *Ceramics International*, 2013, **1**, 603-615.
16. SOUZA, L. K. C. *et al.* *Dyes and Pigments*, 2009, **3**, 187-192.
17. KAPSE, S.D. *et al.* *Current Applied Physics*, 2012, **1**, 307- 312.
18. RAHNAMAEIYAN, S. *et al.* *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, **11**, 8720–8725.
19. RAGUPATHI C, *et al.* *Mater Sci Semicond Process.*, 2014, **1**, 146-156.
20. JITIANU, Mihaela *et al.* *Vibrational Spectroscopy*, 2000, **1-2**, 75-86.
21. RAGUPATHI, C.; VIJAYA, J. Judith; KENNEDY, L. John. *Journal Of Saudi Chemical Society*, 2017, **21**, 231-239.
22. HOSSEINI, S. A. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, **4**, 3762–3767.
23. HERRMANN, Jean-Marie. *Catalysis Today*, 1999, **1**, 115–129.
24. Campos, W.E.O *et al.* *Catalysts*, 2019, **667**, 1-11.