

# **AValiação da Eficiência Fotocatalítica do Compósito La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@Cinza de Castanha de Caju na Degradação de Metronidazol**

## **EVALUATION OF THE PHOTOCATALYTIC EFFICIENCY OF THE La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@CASHEW NUT ASH COMPOSITE IN DEGRADATION OF METRONIDAZOLE**

Adilson José Felipe Neres Filho<sup>1</sup>  
Ramón Raudel Peña Garcia<sup>2</sup>

### **RESUMO**

Este estudo avaliou a eficiência fotocatalítica das razões estequiométricas 1:1, 1:2 e 1:3 do compósito La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@Cinza de castanha de caju, sintetizado por ultrasonicação, na degradação do metronidazol (MTZ). Os compósitos sintetizados apresentaram uma morfologia de aglomerados do semicondutor distribuídos de forma irregular sobre as camadas da cinza de castanha de caju. A análise do padrão de difração de raios X indicou que o material base La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sofreu hidratação antes da síntese, enquanto a cinza de castanha de caju não alterou a estrutura química do La(OH)<sub>3</sub>. A análise do bandgap do compósito revelou uma alta energia de banda proibida, indicando a necessidade de uma fonte de luz UV para os testes de fotocatalise. Os experimentos fotocatalíticos demonstraram que o compósito com razão 1:2 apresentou a maior eficiência na degradação do metronidazol (54,56%) após 180 minutos. Os testes com supressores indicaram que tanto os buracos (h<sup>+</sup>) quanto os radicais hidroxila (•OH) desempenham um papel fundamental no processo de degradação do metronidazol. Os testes de reuso mostraram uma redução de 12,96% na eficiência no primeiro ciclo, seguida por um aumento de 24,76% no segundo ciclo. Além disso, experimentos complementares após calcinação a 400°C revelaram a formação de uma nova fase de La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> no compósito. Testes fotocatalíticos subsequentes indicaram um aumento significativo na eficiência de degradação do metronidazol pelo compósito de razão 1:2 calcinado, atingindo 71,87%.

Palavras-chave: La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; metronidazol; fotocatalise heterogênea; La(OH)<sub>3</sub>; La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

### **ABSTRACT**

This study evaluated the photocatalytic efficiency of the stoichiometric ratios 1:1, 1:2, and 1:3 of the La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@cashew ash composite, synthesized by ultrasonication, in the degradation of metronidazole (MTZ). The synthesized composites exhibited a morphology of semiconductor agglomerates distributed irregularly over the layers of cashew ash. X-ray diffraction pattern analysis indicated that the base material La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> underwent hydration prior to synthesis, while cashew ash did not alter the chemical structure of La(OH)<sub>3</sub>. Bandgap analysis of the composite revealed a high bandgap energy, indicating the need for a UV light source for photocatalysis tests. Photocatalytic experiments demonstrated that the composite with a 1:2 ratio showed the highest efficiency in metronidazole degradation (54.56%) after 180 minutes. Quencher tests indicated that both holes (h<sup>+</sup>) and hydroxyl radicals (•OH) play a key role in the metronidazole degradation process. Reuse tests showed a 12.96% reduction in efficiency in the first cycle, followed by a 24.76% increase in the second cycle. Furthermore, complementary experiments

<sup>1</sup> Bacharelado em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2025

<sup>2</sup> Doutor em Ciência dos materiais pela Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

after calcination at 400°C revealed the formation of a new  $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$  phase in the composite. Subsequent photocatalytic tests indicated a significant increase in the degradation efficiency of metronidazole by the calcined 1:2 ratio composite, reaching 71.87%.

Keywords:  $\text{La}_2\text{O}_3$ ; metronidazole; heterogeneous photocatalysis;  $\text{La}(\text{OH})_3$ ;  $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ ;

## INTRODUÇÃO

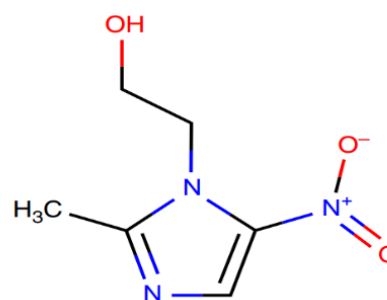
A utilização de fármacos proporcionou avanços significativos no bem-estar das civilizações contemporâneas, melhorando a qualidade de vida e contribuindo para o aumento da longevidade da população. Dentre os mais utilizados, destacam-se os antibióticos, descobertos em 1928 e amplamente difundidos a partir da segunda metade do século XX. Esses compostos, que podem ser naturais, sintéticos ou semissintéticos, atuam inibindo o crescimento de microrganismos, como fungos e bactérias. O uso de antimicrobianos tem sido essencial no controle de enfermidades, levando a um crescimento expressivo no consumo desses fármacos. No Brasil, entre 2014 e 2019, observou-se um aumento de pelo menos 30% no uso de antibióticos por mil habitantes em todas as regiões. Atualmente, é improvável que um indivíduo passe toda a vida sem ter contato com algum tipo de antibiótico.<sup>1-4</sup>

Apesar do aumento na expectativa de vida, a presença de antibióticos no meio ambiente tornou-se uma preocupação. Esses compostos são encontrados principalmente em efluentes, sendo liberados pelo processamento industrial, pela excreção do organismo após o uso e pelo descarte inadequado de medicamentos vencidos, o que os classifica como poluentes emergentes. Mesmo em baixas concentrações, esses fármacos podem causar impactos negativos tanto no ecossistema quanto na saúde humana, uma vez que contribuem para o aumento da resistência microbiana.<sup>2,5</sup>

O Metronidazol (MTZ) é uma antibiótico de fórmula molecular  $\text{C}_6\text{H}_9\text{N}_3\text{O}_3$  e estrutura química contendo um anel

imidazólico contendo três átomos de carbono e dois átomos de nitrogênio, ligados a um grupo nitro(-NO<sub>2</sub>) e um grupo metila(-CH<sub>3</sub>) como mostra a figura 1. O MTZ é utilizado principalmente no tratamento de tricomoníase, giardíase, vaginose bacteriana, infecções causadas por bactérias anaeróbias obrigatórias etc. Seu principal método de utilização é por via oral.<sup>6</sup>

Figura 1 – Estrutura química do Metronidazol.



Fonte: BUCKLIN, M. H.; GROTH, C. M.; HENRIKSEN, 2014.

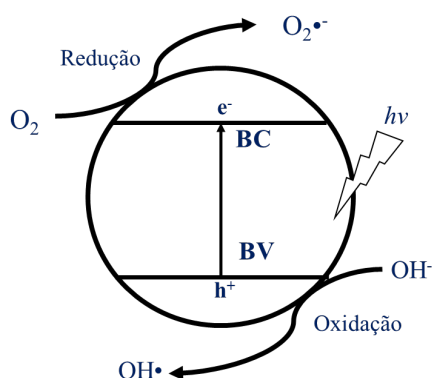
Os métodos utilizados para o tratamento e remoção de antibióticos em efluentes incluem o tratamento biológico, cloração, tratamento eletroquímico, efeito de cavitação ultrassônica, adsorção e processos de oxidação avançada (POA).<sup>7</sup>

Os processos de oxidação avançada (POA) são métodos de decomposição de poluentes por meio de espécies de oxigênio altamente reativas, geradas quando expostas à luz. Um dos POA mais promissores é a fotocatalise heterogênea, que tem demonstrado potencial para a degradação de diversos poluentes. Esse processo funciona pela ativação de um semicondutor, seja por luz solar ou artificial, excitando elétrons ( $e^-$ ) da banda de valência (BV) para a banda de condução (BC), o que resulta na formação de lacunas de elétrons ( $h^+$ ) na banda de

valência e excesso de elétrons na banda de condução. Tanto os elétrons ( $e^-$ ) quanto as lacunas ( $h^+$ ) reagem com o sistema, gerando radicais como o superóxido ( $\bullet O_2^-$ ) e o hidróxido ( $\bullet OH$ ), que atacam o poluente, degradando-o ou mineralizando-o. A eficiência fotocatalítica de diversos semicondutores, como  $TiO_2$ ,  $La_2O_3$  e  $ZnO$ , tem sido alvo de intensos estudos. Além disso, estratégias para melhorar a eficiência dos semicondutores, assim como viabilizar seu uso em termos de custo, também estão sendo investigadas. Entre os métodos mais estudados estão a dopagem do semicondutor, com o objetivo de alterar sua estrutura e melhorar sua performance fotocatalítica, e a formação de compósitos, nos quais um substrato atua como suporte para as partículas do semicondutor, aumentando a área superficial ativa do material e permitindo a redução do uso do semicondutor sem comprometer significativamente sua eficiência.<sup>8,9,13</sup>

O  $La_2O_3$  apresenta alto potencial de aplicação devido às suas propriedades, como a ampla energia de banda proibida, estrutura atômica ajustável, baixa energia reticular e alta constante dielétrica, sendo objeto de pesquisas em diversas áreas.<sup>10-12</sup>

Figura 2 – Mecanismo da fotocatalise heterogênea.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Este trabalho teve como objetivo geral obter um material composto de  $La_2O_3$  e cinza de castanha de caju e avaliar o seu potencial na degradação do metronidazol por fotocatalise. Sendo tomado os objetivos específicos: (i) sintetizar o compósito  $La_2O_3$

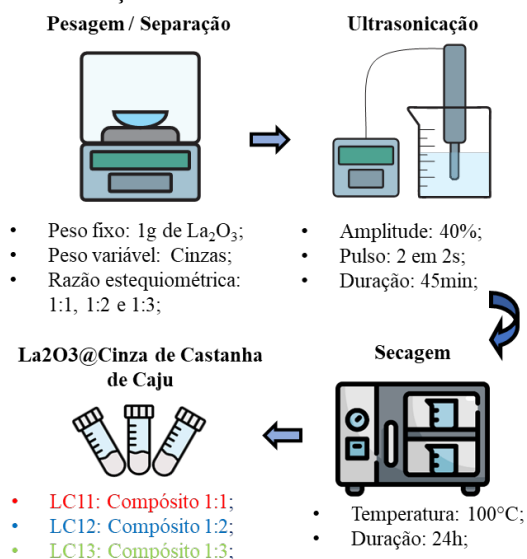
com cinza de castanha de caju nas razões estequiométricas 1:1, 1:2 e 1:3 por meio da ultrasonicação, (ii) realizar os experimentos de fotocatalise em metronidazol, (iii) caracterizar o material e sua eficiência pelos métodos de DRX, MEV, EDS e DRS e (iv) realizar caracterização e avaliação da eficiência do compósito após a calcinação a  $400^\circ C$ .

## METODOLOGIA

### Síntese do compósito $La_2O_3@$ cinza de castanha de caju

A síntese do compósito  $La_2O_3@$ cinza de castanha de caju foi realizada pelo método de ultrasonicação. Os precursores óxido de lantânio ( $La_2O_3$ ) e cinzas de castanha de caju foram utilizadas no experimento. A síntese do compósito foi conduzida utilizando uma concentração fixa de 1 g de  $La_2O_3$ , enquanto a concentração de cinzas de castanha de caju foi variada, seguindo as razões estequiométricas de 1:1, 1:2 e 1:3. Em um béquer contendo 100 mL de água destilada, os materiais precursores  $La_2O_3$  e cinza de castanha de caju foram mantidos em ultrassom por 45 minutos, com amplitude de 40%. Posteriormente, a mistura foi seca a  $100^\circ C$  por 24 horas. Os materiais obtidos foram denominados L0 (para o óxido de lantânio puro) e LC11, LC12 e LC13, correspondentes às razões estequiométricas 1:1, 1:2 e 1:3, respectivamente.

Figura 3 – Fluxograma da síntese do compósito por ultrasonicação.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

### Caracterização do Compósito

As amostras foram caracterizadas estruturalmente pelo padrão de difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro modelo D8 Advance da Bruker, com radiação  $\text{Cu-K}\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) e monocromador, em uma varredura no intervalo de  $10^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ , com passo de 2s. A morfologia e a composição química dos compósitos foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), empregando um microscópio TESCAN VEGA3 acoplado a um detector de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), com diferença de potencial de 10 kV e ampliações de 5 kx e 10 kx. A análise da energia da banda proibida foi realizada a partir do gráfico obtido pelas equações de Kubelka-Munk em função da energia, extraído da refletância medida por espectroscopia de refletância difusa (DRS), utilizando um espectrofotômetro UV-VIS Shimadzu UV-2700, na faixa de 800 a 200 nm.

### Ensaio Fotocatalítico

Os ensaios fotocatalíticos foram realizados usando 50 mg do compósito em 100ml de uma solução contendo água destilada e 20mg/L do fármaco metronidazol. Em agitação constante a

mistura em um reator foi colocada no escuro por 30 minutos para a medida de adsorção. Após o tempo foi retirada uma alíquota de 1ml da mistura e exposta a uma luz artificial de uma lâmpada comercial UV de 125W a uma altura de 13cm durante 180min. 9 Alíquotas de 1ml foram retiradas nos tempos de 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120 e 180 minutos. A banda do Metronidazol em ~319 nm foi explorada usando a absorvância medida pelo espectrofotômetro (Shimadzu, UV-2700) na faixa 400 a 200 nm. A degradação do metronidazol foi calculada usando a equação 1:

$$\text{Degradação (\%)} = \frac{C_0 + C}{C_0} * 100 \quad (1)$$

Aqui,  $C_0$  e  $C$  são as concentrações inicial e final, respectivamente.

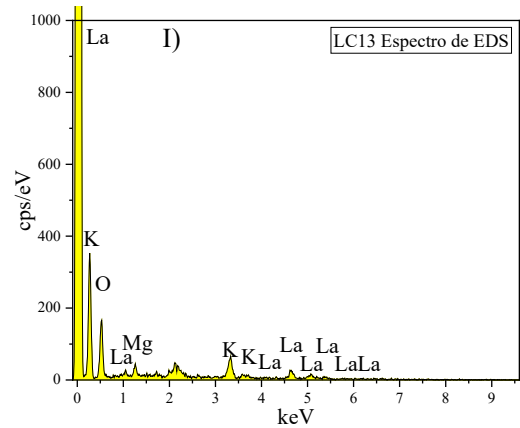
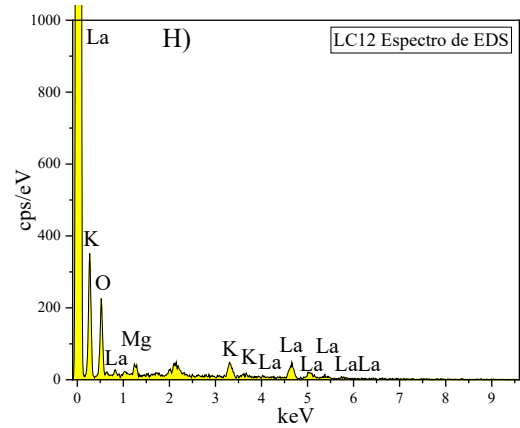
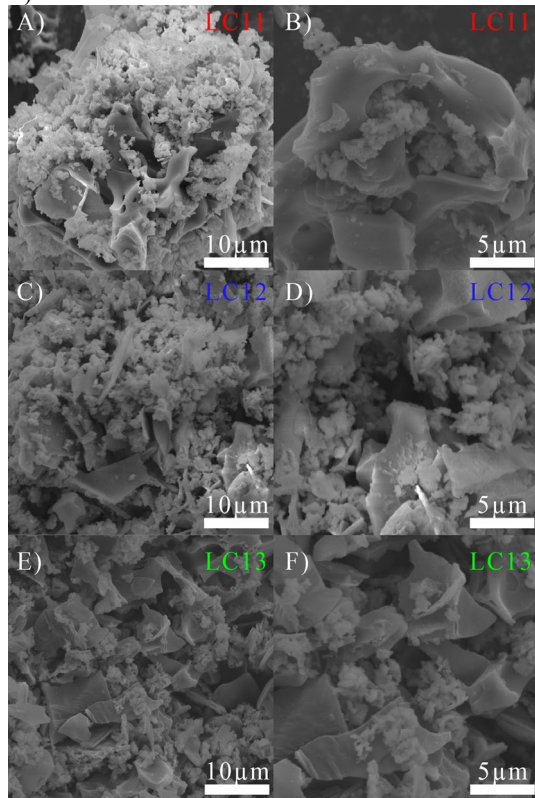
### Supressores

Durante o processo de fotocatalise heterogênea, algumas espécies ativas são responsáveis pela degradação do poluente. Para uma melhor compreensão dos principais agentes envolvidos na degradação do metronidazol pelo compósito, foram realizados ensaios fotocatalíticos com a adição de supressores, que neutralizam determinadas espécies ativas. Os ensaios com supressores foram conduzidos na razão estequiométrica que apresentou a melhor eficiência. Como supressores, foram utilizados nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ), ácido etilenodiaminotetracético (EDTA), álcool metílico (MetOH) e clorofórmio, empregados como capturadores das espécies ativas  $e^-$ ,  $h^+$ ,  $\bullet\text{OH}$  e  $\bullet\text{O}_2^-$ , respectivamente.



e densa ao longo das camadas da cinza de castanha de caju, quando comparada às amostras LC11 e LC13, nas quais ainda é possível identificar regiões maiores sem a presença do semiconductor.

Figura 6 – EDS e MEV das amostras LC11, LC12, LC13 nas ampliações 5kx (A, C e E) e 10kx (B, D, F).



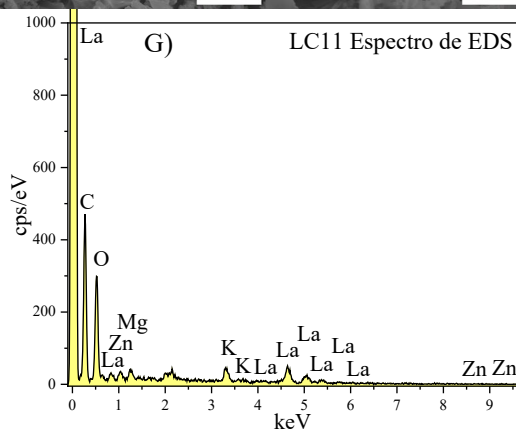
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O espectro EDS de todas as amostras apresentou a presença de La, O, K e Mg correspondendo aos elementos presentes nos aglomerados de  $\text{La}(\text{OH})_3$  e os óxidos presentes nas camadas da cinza de castas de caju.

### Análise das propriedades ópticas do compósito

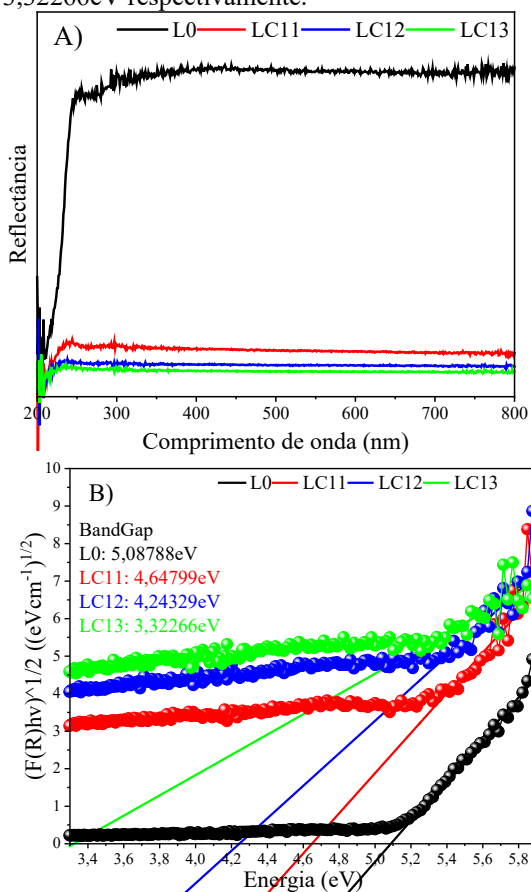
A Figura 7B) apresenta o gráfico Tauc plot, obtido a partir das equações de Kubelka-Munk, utilizado para determinar a energia de banda proibida com base nas medidas de refletância obtidas por espectroscopia de Refletância Difusa (DRS). Os valores de energia de banda proibida determinados para as amostras L0, LC11, LC12 e LC13 foram, respectivamente, 5,068 eV, 4,680 eV, 4,736 eV e 4,139 eV.

O espectro de Refletância Difusa (DRS) revelou que o aumento da proporção de cinza de castanha de caju no compósito resultou na redução da energia de banda proibida. Os valores de bandgap



permaneceram acima de 3 eV, indicando a necessidade do uso de uma lâmpada de 125 W no espectro UV para promover a excitação eletrônica no compósito e viabilizar o processo de fotocatalise.

Figura 7 – A) gráfico de refletância em função do comprimento de onda obtido pelo DRS. B) Tauc plot das amostras L0, LC11, LC12, LC13, com o bandgap de 5,08788eV, 4,64799eV, 4,24329eV e 3,32266eV respectivamente.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

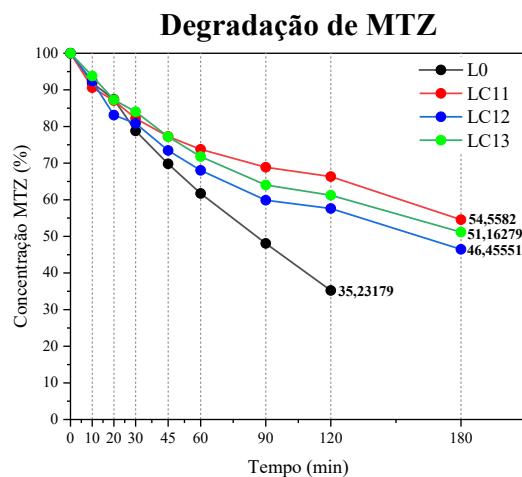
### Ensaios de fotocatalise do MTZ com compósito

A figura 8 mostra os resultados dos experimentos de fotocatalise. A degradação do MTZ pelas amostras LC11, LC12, LC13 tiveram os resultados 45,44%, 53,54% e 48,84% em 180 minutos e a amostras L0 mostrou uma degradação de 64,77% em 120 minutos. O resultado com melhor degradação foi o do compósito LC12.

Os resultados obtidos por MEV e pelos ensaios fotocatalíticos indicam que o compósito com melhor distribuição do

semicondutor na superfície da cinza (LC12) apresentou a maior eficiência na degradação do metronidazol. Esses achados sugerem que a distribuição do semicondutor exerce influência direta sobre a eficiência fotocatalítica do compósito.

Figura 8 – Gráfico comparativo da degradação do metronidazol pelas amostras L0, LC11, LC12, LC13.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

### Ensaio de supressores e reuso

Os resultados dos testes com supressores indicaram que a adição de clorofórmio não causou alterações significativas na eficiência fotocatalítica, sugerindo que o radical superóxido ( $\bullet O_2^-$ ) não desempenha um papel relevante no processo. Para o nitrato de prata ( $AgNO_3$ ), observou-se um aumento significativo na degradação do metronidazol (MTZ), indicando que esse composto reagiu diretamente com o fármaco, contribuindo para sua decomposição. Já a adição de EDTA e metanol resultou em uma redução da eficiência fotocatalítica, evidenciando que tanto as vacâncias de elétrons ( $h^+$ ) quanto os radicais hidroxila ( $\bullet OH$ ) exercem um papel fundamental no mecanismo de degradação do MTZ pelo compósito.

A Figura 10 apresenta os testes fotocatalíticos de reuso do compósito LC12. Os testes demonstraram um declínio de 12,96% na eficiência no primeiro ciclo de reutilização em relação à sua aplicação inicial. No segundo ciclo, observou-se um aumento de 8,59% em comparação ao

primeiro uso e de 24,76% em relação ao segundo uso.

Esse comportamento pode ser atribuído a possíveis alterações estruturais decorrentes da elevação da temperatura do compósito durante o processo de secagem entre os ciclos. No entanto, uma mudança mais expressiva foi observada apenas no segundo ciclo, quando a massa recuperada foi da ordem de 20 mg. Esse fator motivou a ampliação da pesquisa para uma análise complementar, investigando eventuais modificações estruturais e a eficiência fotocatalítica do compósito após a calcinação a 400°C.

Figura 9 – Gráfico comparativo da eficiência fotocatalítica em 180min dos supressores AgNO<sub>3</sub>, EDTA, Met(OH) e clorofórmio na amostra LC12.

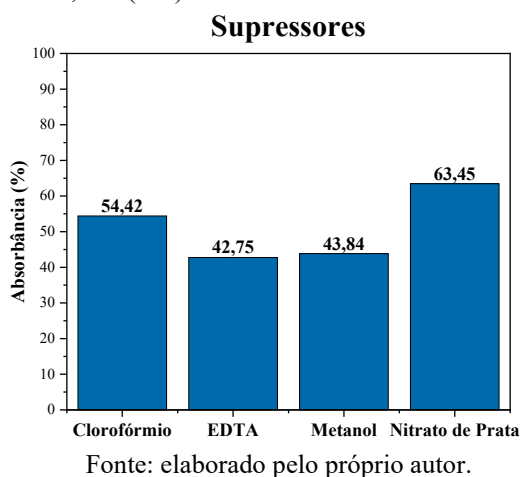
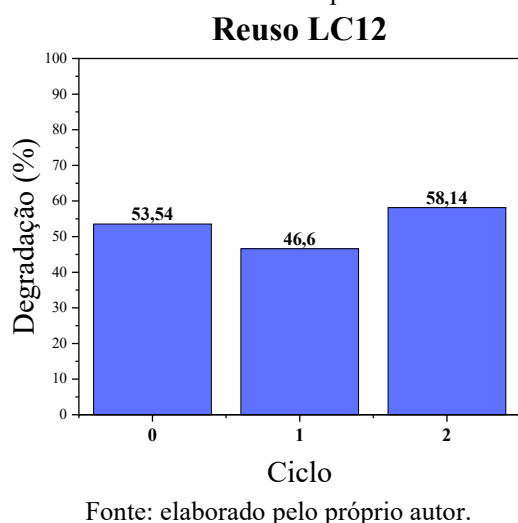


Figura 10 – Gráfico comparativo dos ciclos 1 e 2 de reuso da amostra LC12 com a primeira fotocatalise.

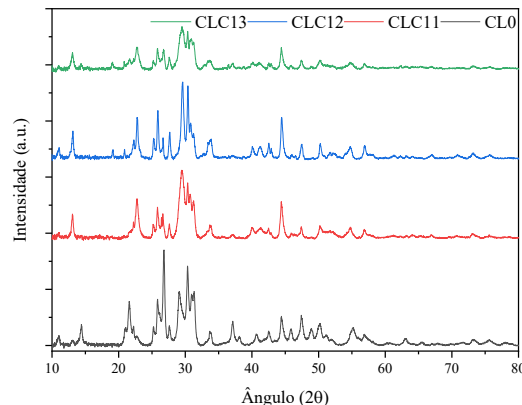


## Resultados após Calcinação a 400°C

Para avaliar o efeito da exposição a altas temperaturas na eficiência fotocatalítica do material, as amostras L0, LC11, LC12 e LC13 foram submetidas à calcinação em forno mufla a 400°C por 2 horas, sem atmosfera controlada, utilizando uma taxa de aquecimento e resfriamento de 1°C/min. Após a calcinação, o material foi caracterizado por DRX e DRS, além da realização de testes de fotocatalise e reuso nas amostras que apresentaram os melhores resultados anteriormente, L0 e LC12, sendo, após a calcinação, denominadas CL0 e CLC12, respectivamente.

A Figura 11 apresenta os padrões de DRX das amostras calcinadas a 400°C, evidenciando que o processo térmico promoveu a conversão estrutural do La(OH)<sub>3</sub> para La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (COD número 96 100 0464) tanto no compósito quanto na amostra pura.

Figura 11 – Padrão de difração DRX das amostras L0, LC11, LC12, LC13. Os picos da fase La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> foi observada.



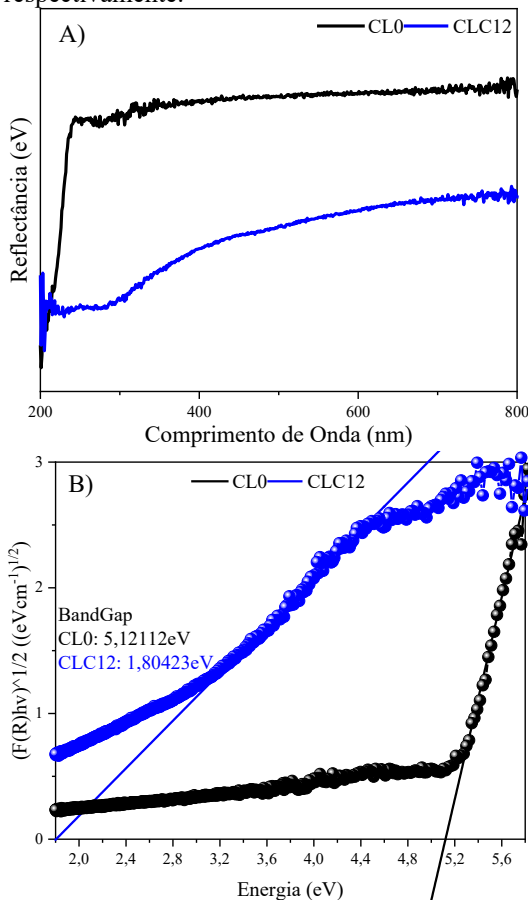
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A figura 14A) mostra o espectro de refletância difusa (DRS). A figura 14B) apresenta o bandgap obtido através do Tauc plot das amostras CL0 e CL12, sendo 5,121 eV e 1,804 eV, respectivamente. Esses resultados indicam uma diminuição drástica na energia de banda proibida após a calcinação do compósito em relação ao semicondutor La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Devido à menor energia de banda proibida, a ativação do novo compósito pode ser realizada por meio de luz visível.

A figura 15 apresenta os resultados dos experimentos fotocatalíticos do composto CLC12 e da amostra pura calcinada CL0 na degradação do metronidazol. Observa-se um aumento significativo na eficiência fotocatalítica da amostra CLC12 (71,97%) em comparação à amostra LC12 (53,54%).

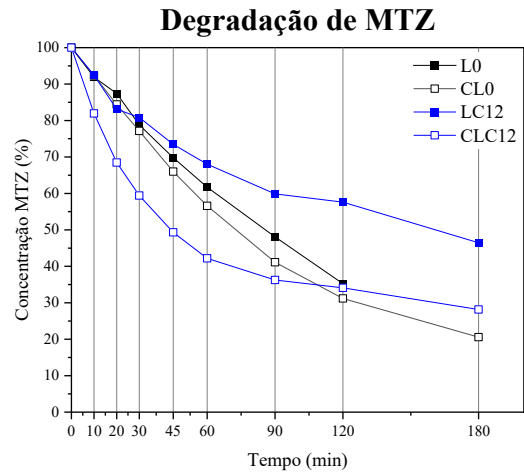
A figura 16 apresenta os resultados dos dois testes de reuso para o composto CLC12, realizados ao longo de 180 minutos. O composto CLC12 apresentou o mesmo comportamento observado na amostra LC12, com uma diminuição no primeiro ciclo e um aumento no segundo ciclo em relação à primeira fotocatalise, alcançando eficiências de 64,42% no primeiro ciclo e 73,83% no segundo ciclo.

Figura 14 – A) gráfico de refletância em função do comprimento de onda obtido pelo DRS das amostras CL0 e CLC12. B) Tauc plot das amostras CL0 e LC12 com o bandgap de 5,12112eV e 1,80423eV respectivamente.



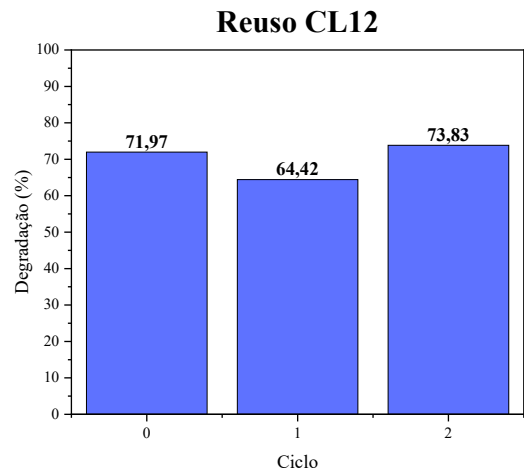
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 15 – Gráfico comparativo da degradação do metronidazol pelas amostras CL0, CLC12 em comparação com as amostras pré-calcinadas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 16 – Gráfico comparativo dos ciclos 1 e 2 de reuso da amostra CLC12 com a primeira fotocatalise.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

## Conclusões

O composto de  $\text{La}(\text{OH})_3$ @Cinza de castanha de caju foi obtido pelo método de ultrasonicação. O padrão de DRX indicou que a cinza não modificou a estrutura do  $\text{La}(\text{OH})_3$  e que o  $\text{La}_2\text{O}_3$  comercial passou por hidratação antes da síntese. Os compostos formados pelas razões estequiométricas 1:1, 1:2 e 1:3 apresentaram uma estrutura de aglomerados de  $\text{La}(\text{OH})_3$  distribuídos irregularmente nas superfícies em camadas da cinza de castanha de caju. O espectro de energia dispersa revelou a presença de La, O, K, Mg e Zn, elementos pertencentes ao  $\text{La}(\text{OH})_3$  e

à cinza. A energia de banda proibida dos compósitos mostrou um decréscimo em função da quantidade de cinza de castanha de caju presente, mas sem alcançar valores que permitissem a ativação no espectro visível. Os testes com supressores indicaram que tanto os buracos (h<sup>+</sup>) quanto os radicais hidroxila (•OH) desempenham um papel fundamental no processo de degradação do metronidazol. Os testes de reuso mostraram uma redução de 12,96% na eficiência no primeiro ciclo, seguida por um aumento de 24,76% no segundo ciclo. Além disso, experimentos complementares após calcinação a 400°C revelaram a formação de uma nova fase de La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> no compósito. Testes fotocatalíticos subsequentes indicaram um aumento significativo na eficiência de degradação do metronidazol pelo compósito de razão 1:2 calcinado, atingindo 71,87%.

## REFERÊNCIAS

- 1 LOPES, L. C.; MOTTER, F. R.; CARVALHO-SOARES, M. D. L. Consumption of antibiotics in Brazil - an analysis of sales data between 2014 and 2019. **Antimicrobial Resistance and Infection Control**, v. 13, n. 1, p. 60, 9 jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13756-024-01412-6>. Disponível em: <https://aricjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13756-024-01412-6>. Acesso em: 4 janeiro 2025.
- 2 BISOGNIN, R. P.; WOLFF, D. B.; CARISSIMI, E. Revisão sobre fármacos no ambiente. **Revista DAE**, v. 66, n. 210, p. 78–95, 2018. DOI:10.4322/dae.2018.009. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/323404324\\_Revisao\\_sobre\\_farmacos\\_no\\_ambiente](https://www.researchgate.net/publication/323404324_Revisao_sobre_farmacos_no_ambiente). Acesso em: 4 janeiro 2025.
- 3 GUIMARÃES, D. O.; MOMESSO, L. DA S.; PUPO, M. T. Antibióticos: importância terapêutica e perspectivas para a descoberta e desenvolvimento de novos agentes. **Química Nova**, v. 33, n. 3, p. 667–679, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000300035>. Disponível em: [https://www.scielo.br/j/qn/a/dhKT3h4Zxxv\\_sQdkzyZ4VnpB/](https://www.scielo.br/j/qn/a/dhKT3h4Zxxv_sQdkzyZ4VnpB/). Acesso em: 4 janeiro 2025.
- 4 LANCINI, G.; PARENTI, F.; GALLO, G. G. The Antibiotics. **Antibiotics**, p. 1–14, 1995.
- 5 MEDEIROS, Ú. T. P.; NAVONI, J. A.; TAVARES, J. L.; TAVARES, J. L.; SANTOS, M. M. F. M.; AMARAL, V. S.. Aspectos regulatórios de contaminantes prioritários em efluentes: uma análise crítica de fármacos de preocupação emergente. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.13, n.11, p.70-85, 2022. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.011.0007>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/articula/view/7810>. Acesso em: 4 janeiro 2025.
- 6 BUCKLIN, M. H.; GROTH, C. M.; HENRIKSEN, B. Metronidazole. In: WEXLER, P.. **Encyclopedia of Toxicology**. 3 ed. Academic Press, 2014. p. 330–331.
- 7 YU, F. *et al.* Adsorptive removal of antibiotics from aqueous solution using carbon materials. **Chemosphere**, v. 153, p. 365–385, jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.083>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27031800/>. Acesso em: 4 janeiro 2025.
- 8 ALBUQUERQUE, W. *et al.* A novel RuO<sub>2</sub>@ZnO-Alginate-Halloysite composite for the effective degradation of Eosin Yellow dye and Ciprofloxacin drug. **Materials Research Bulletin**, v. 182, p. 113178–113178, 6 nov. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2024.113178>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/arti>

[cle/abs/pii/S0025540824005087?via%3Di](https://doi.org/10.1590/S0100-40421998000100011)  
[hub](#). Acesso em: 4 janeiro 2025.

9 NOGUEIRA, R. F. P.; JARDIM, W. F. A fotocatalise heterogênea e sua aplicação ambiental. **Química Nova**, v. 21, n. 1, p. 69–72, fev. 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40421998000100011>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/s76bvqpyZMZK38CWzWFF9DR/?lang=pt>. Acesso em: 16 janeiro 2025.

10 KABIR, H. *et al.* Polyethylene glycol assisted facile sol-gel synthesis of lanthanum oxide nanoparticles: Structural characterizations and photoluminescence studies. **Ceramics International**, v. 45, n. 1, p. 424–431, 22 set. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.183>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884218326464?via%3Di>  
[hub](#). Acesso em: 16 janeiro 2025.

11 KHAN, A. A. *et al.* Recent advances in Lanthanum-based photocatalysts with engineering aspects for photocatalytic hydrogen production: A critical review. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 184, p. 108809–108809, 26 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108809>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369800124007054?via%3Di>  
[hub](#). Acesso em: 16 janeiro 2025.

12 KHANJANI, S; MORSALI, A. Synthesis and characterization of lanthanum oxide nanoparticles from thermolysis of nanostructured supramolecular compound. **Journal of Molecular Liquids**, v. 153, n. 2-3, p. 129–132, 9 fev. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2010.01.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167732210000206?via%3Di>  
[hub](#). Acesso em: 20 janeiro 2025.

13 PUGA, F.; J.A. NAVÍO; HIDALGO, M. C. A critical view about use of scavengers for reactive species in heterogeneous photocatalysis. **Applied Catalysis A General**, v. 685, p. 119879–119879, 14 jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2024.119879>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926860X24003247?via%3Di>  
[hub](#). Acesso em: 4 janeiro 2025.

14 FERBY, V. A.; EZHIL, M.; M. BOUOUDINA. Structure and morphology of synthesized lanthanum hydroxide [La(OH)<sub>3</sub>] nanocrystalline powders: study on fuel to oxidant ratio. **Journal of the Australian Ceramic Society**, v. 56, n. 2, p. 711–720, 4 jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41779-019-00389-5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41779-019-00389-5>. Acesso em: 20 janeiro 2025.

15 KANG, J.-G. *et al.* Synthesis and physicochemical properties of La(OH)<sub>3</sub> and La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanostructures. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 40, p. 737–743, 31 jul. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.050>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136980011530086X?via%3Di>  
[hub](#). Acesso em: 20 janeiro 2025.

## AGRADECIMENTOS

Sou grato aos meus pais, à minha namorada, aos amigos, às professoras que me acompanharam na iniciação científica e ao meu orientador. Cada um deles me ofereceu o apoio necessário para que eu pudesse concluir minha jornada acadêmica. Sem esse suporte, eu não teria chegado até aqui.