

Síntese verde de g-C₃N₄ dopado com carbono derivado da lignina: Um estudo comparativo de estratégias para otimização fotocatalítica

César F. B. Piscoya^{1*}, Giulia T. Silveira¹, Vithor G. R. M. Oliveira¹, Jhonatan D. M. Oliveira¹, Maria E. A. D. Mota¹,
Lucas G. P. Santos¹, Alan G. Câmara¹, Celmy M. B. Menezes¹, José G.A. Pacheco¹

¹ Laboratório de Refino e Tecnologias Limpas, Instituto LITPEG, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Da arquitetura S/N, Recife, Pernambuco, Brasil, cesar.piscoya@ufpe.br

Resumo/Abstract

RESUMO – O presente trabalho aborda a modificação do semicondutor nitreto de carbono grafítico (g-C₃N₄) por dopagem com carbono derivado da lignina, visando aprimorar seu desempenho em aplicações fotocatalíticas. Também foi realizada uma análise comparativa dos efeitos da exfoliação termo-ultrassônica sobre as propriedades estruturais e funcionais do g-C₃N₄. Os materiais foram obtidos por policondensação térmica e caracterizados quanto à estabilidade térmica, estrutura cristalina, grupos funcionais, propriedades óptico-eletrônicas e espécies paramagnéticas. As modificações aumentaram a exposição de grupos funcionais e reduziram significativamente a recombinação de cargas. A eficiência fotocatalítica foi avaliada pela degradação do corante RB5 sob irradiação policromática (UVA-UVB e visível). Após 180 min, os materiais modificados atingiram 70–75% de degradação, enquanto o g-C₃N₄ não modificado alcançou apenas 55%. Os resultados mostram que as estratégias são eficazes, de simples execução e com potencialidades práticas, com especial destaque para a dopagem com carbono que também é sustentável e econômica, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas fotocatalíticos mais eficientes.

Palavras-chave: poluentes orgânicos, POA, modificação estrutural, síntese sustentável, fotocatalise.

ABSTRACT - This study addresses the modification of the semiconductor graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) through carbon doping using lignin-derived carbon, aiming to enhance its performance in photocatalytic applications. A comparative analysis was also conducted to evaluate the effects of thermal-ultrasonic exfoliation on the structural and functional properties of g-C₃N₄. The materials were synthesized via thermal polycondensation and characterized in terms of thermal stability, crystalline structure, surface functional groups, optoelectronic properties and paramagnetic species. The modifications promoted greater exposure of functional groups and significantly reduced charge recombination. Photocatalytic efficiency was assessed by the degradation of RB5 dye under polychromatic irradiation (UVA-UVB and visible). After 180 minutes, the modified materials achieved 70–75% degradation, whereas unmodified g-C₃N₄ reached only 55%. The results confirm that both strategies are effective, easy to implement, and practically applicable, with particular emphasis on carbon doping, which is also sustainable and cost-effective, contributing to the development of more efficient photocatalytic systems.

Keywords: organic pollutants, AOPs, structural modification, sustainable synthesis, photocatalysis.

Introdução

Os semicondutores têm desempenhado um papel central no avanço de tecnologias aplicadas à fotocatalise heterogênea, especialmente em contextos que exigem soluções sustentáveis para o tratamento de poluentes orgânicos recalcitrantes. Entre os diversos materiais estudados, destaca-se o nitreto de carbono grafítico (g-C₃N₄), um semicondutor orgânico de estrutura conjugada, que combina características desejáveis como ativação por luz visível, baixo custo, facilidade de síntese e ausência de metais em sua composição (1,2). Sua estrutura baseada em unidades heptazínicas conectadas por ligações C–N confere estabilidade térmica e fotoquímica, tornando-o atrativo para processos ambientais baseados na geração de radicais oxidantes. No entanto, limitações estruturais, como a baixa área superficial e a elevada recombinação dos pares elétron-

vacâncias gerados sob irradiação, reduzem sua eficiência catalítica durante a aplicação do processo. Para superar essas barreiras, têm sido investigadas rotas de modificação como a exfoliação térmica, capaz de expandir a estrutura lamelar e expor mais sítios ativos, e a dopagem com carbono, que promove alterações na densidade eletrônica e na absorção de luz, aumentando a separação de cargas e a eficiência eletrônica do material (3,4).

Estudos recentes vêm destacando o potencial dessas estratégias de modificação para otimizar o desempenho do g-C₃N₄. Como exemplo disso, Jiang *et al.* (2024) demonstraram que a exfoliação térmica do g-C₃N₄ aumentou em até oito vezes sua área superficial, enquanto Bao *et al.* (2017) e Wang *et al.* (2023) observaram melhorias na absorção de luz visível e redução da energia de *band gap* para até 2,4 eV ao incorporar diferentes fontes de carbono

em sua estrutura. Nesse cenário, ganha relevância o uso de dopantes sustentáveis como a lignina, biopolímero abundante, subproduto da indústria de papel, com alto teor de grupos aromáticos e funcionais que favorecem sua interação com precursores nitrogenados (5,6). Essa abordagem não apenas melhora o desempenho do material, mas também reforça os princípios da economia circular, incorporando resíduos industriais em soluções tecnológicas de alto valor agregado.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo sintetizar e caracterizar fotocatalisadores de $g\text{-C}_3\text{N}_4$ modificados por exfoliação termo-ultrassônica e dopagem com carbono derivado de lignina, analisando suas propriedades estruturais, morfológicas, ópticas e paramagnéticas.

Para validar a aplicabilidade dos semicondutores, foi estudada a degradação do corante têxtil *Reactive Black 5* (RB5), reconhecido por sua alta solubilidade, estabilidade química e resistência à biodegradação (7). A degradação do corante sob luz solar simulada permitiu verificar a eficácia dos catalisadores de $g\text{-C}_3\text{N}_4$ sintetizados no contexto dos Processos Oxidativos Avançados (POAs), destacando o potencial das modificações estruturais propostas para uso em tratamentos ambientais com foco na degradação de poluentes recalcitrantes.

Experimental

Síntese dos materiais

A síntese do $g\text{-C}_3\text{N}_4$ bulk (C_3N_4) foi realizada a partir da melamina como precursor, por meio do método de policondensação térmica, utilizando cadinho cerâmico acondicionado em forno mufla sob atmosfera de ar. A programação térmica consistiu em aquecimento até $550\text{ }^\circ\text{C}$, à taxa de $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, com manutenção por 4 horas após atingir a temperatura de patamar, seguido de resfriamento natural dentro do forno até temperatura ambiente, finalizando com moagem. A partir do C_3N_4 , foram obtidos o $g\text{-C}_3\text{N}_4$ exfoliado termicamente/ultrassonicado ($\text{C}_3\text{N}_4\text{-EXF}$) e o dopado com carbono da lignina ($\text{C}_3\text{N}_4\text{-C}$). Para a síntese do $\text{C}_3\text{N}_4\text{-EXF}$, o C_3N_4 foi submetido a novo tratamento térmico a $500\text{ }^\circ\text{C}$, com taxa de aquecimento de $5\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ e patamar de 2 horas, seguido de resfriamento na mufla. O sólido foi então disperso em isopropanol e água destilada (2:3, v/v), ultrassonicado a 40 kHz por 2 horas, seco em estufa a $100\text{ }^\circ\text{C}$ por 12 horas e moído em almofariz. Para obtenção do $\text{C}_3\text{N}_4\text{-C}$, melamina e lignina (0,38% w/w) foram misturadas e dispersas na mesma solução hidroalcolica, ultrassonicadas por 1,5 horas e secas a $100\text{ }^\circ\text{C}$. O material seco foi calcinado a $550\text{ }^\circ\text{C}$ ($5\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, 4 horas), resfriado na mufla e moído, obtendo-se o $\text{C}_3\text{N}_4\text{-C}$.

Caraterização dos materiais

A fim de investigar os fenômenos térmicos, foram realizados dois enfoques via Análise Termogravimétrica

(TG/DTG) no STA 6000 (PerkinElmer), o primeiro para acompanhar a síntese dos semicondutores a partir dos precursores, e o segundo para avaliar a estabilidade térmica dos materiais obtidos. Usou-se atmosfera oxidante, faixa de temperatura de $30\text{ }^\circ\text{C}$ a $900\text{ }^\circ\text{C}$, a $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Para o estudo da estrutura cristalina dos materiais foi realizada a Difração de raios X (DRX), utilizando difratômetro RIGAKU SmartLab SE equipado com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0,15406\text{ nm}$), na faixa angular de 5 a 80° , com passo de varredura de $0,02^\circ$ e velocidade de aquisição de 2° por minuto, incluindo condições operacionais de tensão de 40 kV e corrente de 40 mA . Para a identificação dos grupos orgânicos presentes nos semicondutores, foi realizada Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), utilizando um espectrômetro Perkin Elmer modelo Spectrum 400, acoplado a um módulo de Refletância Total Atenuada (ATR), com 16 varreduras, abrangendo a faixa espectral de 4000 a 600 cm^{-1} , usando o modo transmitância. Com o objetivo de determinar as propriedades texturais dos materiais, foram obtidas isotermas de Adsorção/Dessorção de N_2 a $-196\text{ }^\circ\text{C}$, empregando o analisador Quanta Chrome NovaWin2, tratando previamente as amostras *in situ* sob vácuo a 120°C por 3 horas, a área superficial foi estimada pelo método de Brunauer–Emmett–Teller (BET), e a análise da distribuição de poros foi realizada com base no modelo de Barrett–Joyner–Halenda (BJH). Para a avaliação das propriedades ópticas dos semicondutores, foi realizada espectroscopia de Fotoluminescência em um espectrofluorímetro Horiba Jobin Yvon FL3, com excitação fixada em 383 nm , as fendas do monocromador de excitação ajustadas para $1,0\text{ nm}$ e as de emissão para $0,5\text{ nm}$ de banda passante, a emissão foi registrada na faixa de 400 a 600 nm , com incremento de 1 nm . Com o objetivo de identificar espécies paramagnéticas associadas a vacâncias e possíveis radicais persistentes formados nos materiais, foi realizada a análise por espectroscopia de ressonância paramagnética (EPR) em um espectrômetro Bruker Magnetech ESR5000, operando na banda X, com frequência de micro-ondas de $9,4536\text{ GHz}$. Os espectros foram obtidos à temperatura ambiente, com varredura de campo de 325 a 355 mT , potência de micro-ondas de 10 mW , modulação de campo de $0,2\text{ mT}$ e frequência de modulação de 100 kHz . O valor de g foi calculado com base no campo de ressonância do pico principal $\sim 3370\text{ G}$.

Testes de fotodegradação de corante têxtil

A atividade fotocatalítica do C_3N_4 , $\text{C}_3\text{N}_4\text{-EXF}$ e $\text{C}_3\text{N}_4\text{-C}$ foi avaliada por meio da fotodegradação do corante aniônico *Reactive Black 5* (RB5) em reator batelada de 200 mL , sob irradiação policromática fornecida por lâmpada Osram Ultra-Vitalux® ($315\text{--}700\text{ nm}$, 300 W), posicionada a 20 cm da superfície da solução, assegurando densidade de potência uniforme de $4,6\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ na faixa UVA-UVB ($290\text{--}390\text{ nm}$) para simular luz solar,

monitorada antes de cada ensaio com radiômetro MRU-201 (Instrutherm). As soluções de RB5, preparadas por dissolução do corante sólido (50% de pureza) em água destilada até concentração de 20 mg.L^{-1} , foram submetidas a testes com $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ de catalisador, sob agitação constante a 500 rpm, temperatura de $\sim 35^\circ\text{C}$, pH inicial e final $\sim 5,5$ e realizados em duplicata. Previamente à irradiação, as suspensões permaneceram em equilíbrio de adsorção no escuro por 30 min, incluindo também testes de fotólise e de adsorção por 180 min. Após essa etapa, os sistemas foram irradiados por 180 min com coleta de alíquotas nos tempos de 0, 15, 30, 60, 120 e 180 min, as quais foram imediatamente filtradas a vácuo em membrana Millipore de $0,45 \mu\text{m}$ para remoção do catalisador e posterior quantificação da concentração residual de RB5 por espectrofotômetro UV-Vis (Edutec), monitorando a absorvância em 598 nm.

Resultados e Discussão

Caraterização dos materiais

Os resultados da análise TG em atmosfera de ar sintético dos precursores da síntese e dos materiais preparados C3N4, C3N4-EXF e C3N4-C estão mostrados na Figura 1.a) e 1.b), respectivamente. A curva DTG também está incluída para identificar os picos de temperatura de perda de massa.

A figura 1.a) mostra que o TG da melamina apresentou uma única etapa de perda de massa entre 240°C e 360°C , com redução de $\sim 99\%$ após atingir 338°C , atribuída à sua decomposição térmica com liberação de cianamida (NCNH_2), cianato (NCOH) e formila (COH), indicando ruptura de ligações triazínicas (8). Nesse processo, formam-se intermediários como melam e melem, e entre 290°C e 390°C ocorre a condensação das unidades s-triazina em tri-s-triazina, formando o polímero melon, base do g-C₃N₄, seguido por policondensação a $\sim 520^\circ\text{C}$, gerando um material amarelado com razão molar C/N de 0,72:1 (9,10). Para a amostra com melamina e 0,38% (w/w) de lignina, o perfil térmico foi similar, porém com dois picos adicionais na DTG, em 261°C e 288°C , relacionados à oxidação de frações fenólicas e estruturas aromáticas da lignina. Segundo Zhao *et al.* (2025), essas frações se decompõem abaixo de 400°C com liberação de compostos oxigenados, sugerindo que, mesmo em baixa concentração, a lignina interagiu com a melamina, alterando o perfil de voláteis. O material apresentou coloração marrom-claro.

No estudo da estabilidade térmica dos materiais preparados, a Figura 1.b) mostra que os três materiais apresentaram perfis de degradação típicos do g-C₃N₄ entre 500 e 750°C , evidenciando a boa estabilidade térmica dos semicondutores, em concordância com a literatura. A baixa dopagem de lignina no C3N4-C e a exfoliação no C3N4-EXF não comprometeram significativamente a resistência térmica dos semicondutores, que mantiveram sua integridade até altas temperaturas. Nos materiais

modificados, observaram-se picos em torno de 60°C , ausentes no C3N4, atribuídos à evaporação de água e resíduos de isopropanol retidos durante o processo de ultrassonicação. As perdas de massa foram relacionadas à decomposição térmica total dos materiais sob atmosfera oxidante, com liberação de compostos nitrogenados e voláteis orgânicos (1,8).

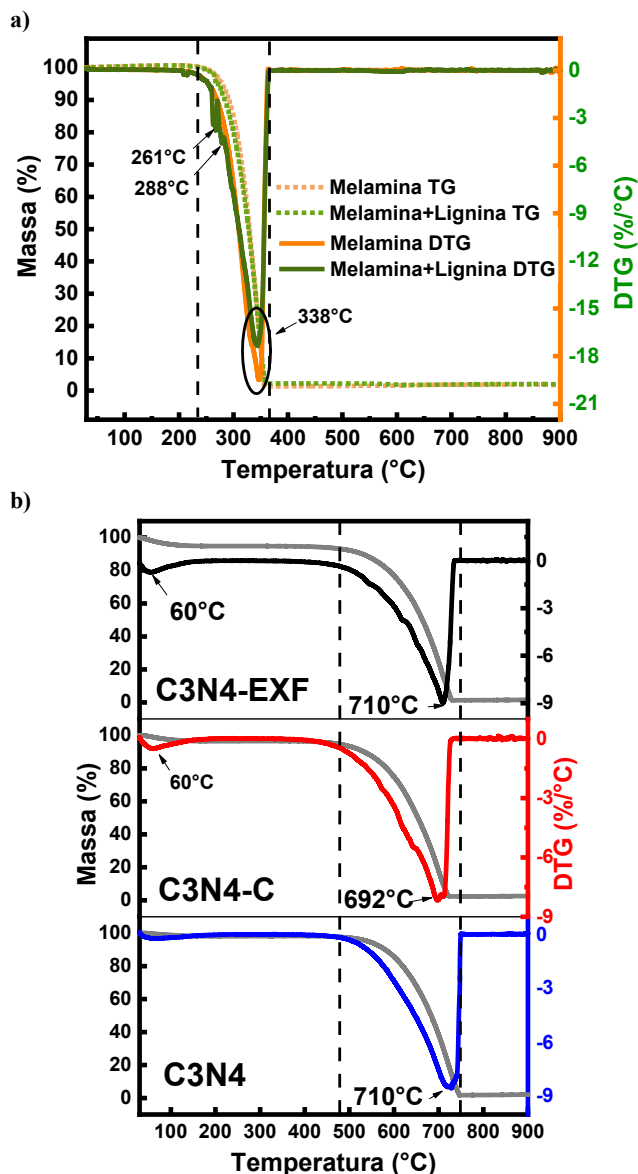


Figura 1. a)Curvas de TG e DTG da melamina e melamina+lignina e b)Curvas de TG e DTG do C3N4, C3N4-EXF e C3N4-C.

Os difratogramas dos três semicondutores, estão inseridos na Figura 2. O C3N4 mostrou picos em $12,91^\circ$ e $27,38^\circ$, atribuídos aos planos (100) e (002), conforme o padrão JCPDS 87-1526, indicando empacotamento periódico das unidades tri-s-triazina e empilhamento interlamelar típico da estrutura gráfica (9,11). No C3N4-EXF, os mesmos picos

foram preservados, com redução de intensidade e leve deslocamento do pico (002) para ângulos maiores, sugerindo diminuição da cristalinidade e redução da distância interlamelar devido à exfoliação termo-ultrassônica (12). Já o C3N4-C apresentou forte atenuação do pico (002), indicando maior desordem estrutural, enquanto o deslocamento do pico (100) para ângulos maiores sugere compactação lateral associada às interações com a lignina, sem formação de novas fases cristalinas (6,13).

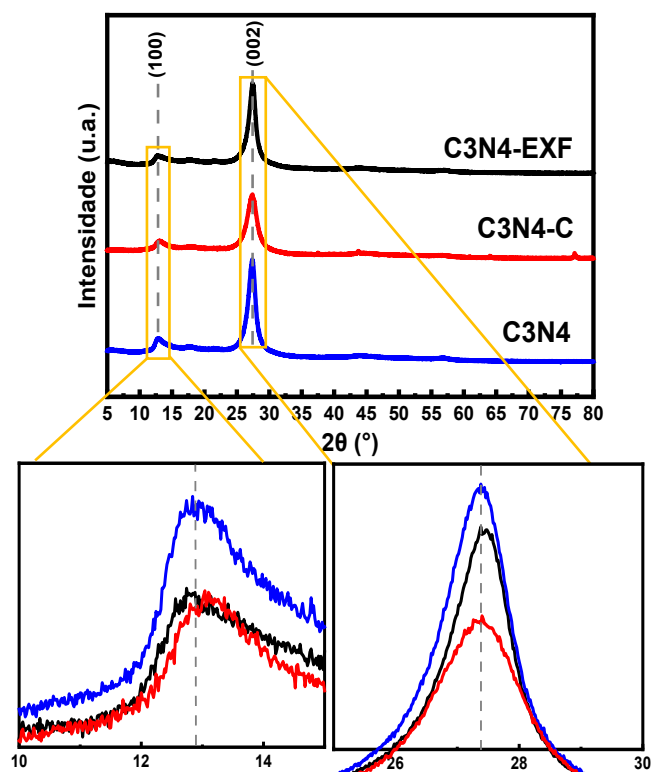


Figura 2. Difratogramas do C3N4, C3N4-EXF e C3N4-C.

O espectro FTIR dos materiais, mostrado na Figura 3, apresentou perfis semelhantes entre os três semicondutores. Para o C3N4, foram observadas bandas típicas entre 3000 e 3500 cm^{-1} , associadas a grupos O-H e N-H, além de sinais em 2150 cm^{-1} atribuídos a traços de nitrilas, também, as bandas entre 1150 e 1630 cm^{-1} indicam estiramentos de C=N e C-N, e as bandas em 885 e 802 cm^{-1} confirmam a presença das unidades triazínicas, características do g-C₃N₄ (9,10). No C3N4-EXF, os mesmos sinais foram mantidos, com aumento na intensidade das bandas, indicando maior exposição de grupos funcionais. Esse efeito é atribuído à ação combinada dos processos térmico e ultrassônico, que favorecem a exfoliação sem comprometer a estrutura do material (14). Já o C3N4-C manteve os picos principais, mas com atenuação geral das bandas, sugerindo interações entre o carbono da lignina e a matriz do g-C₃N₄, além de maior reticulação e modificação da rede heterocíclica (8).

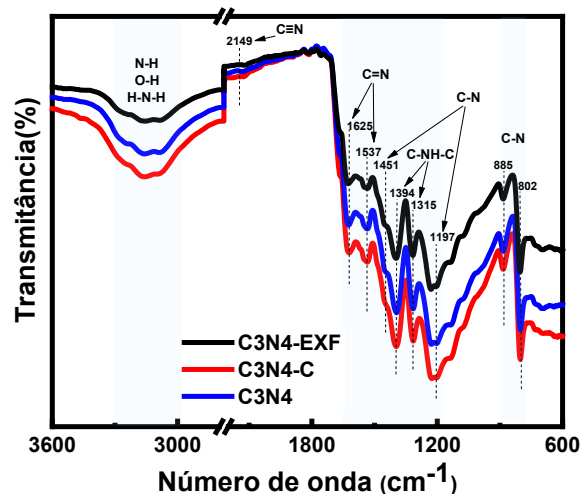


Figura 3. Espectros obtidos mediante FTIR do C3N4, C3N4-EXF e C3N4-C.

As isotermas de adsorção-dessorção de N₂ dos materiais, indicados na Figura 4, apresentaram perfil tipo IV com laço de histerese H3, indicativo de estrutura mesoporosa formada por aglomerados lamelares, conforme a classificação da IUPAC (9,15). Na Tabela 1, estão inseridas as áreas superficiais específicas, volume e diâmetro do poro, refletindo o impacto da exfoliação termo-ultrassônica e da dopagem com carbono na ampliação da superfície ativa (16). A distribuição de poros abrangeu a faixa de 3 a 150 nm, com picos principais em ~4 nm (microporos) e ~18 nm (mesoporos), resultado típico de materiais obtidos via decomposição de precursores nitrogenados com liberação de gases (9). O volume de poro aumentou com os tratamentos aplicados, sugerindo maior formação de canais acessíveis e maior conectividade porosa, aspectos fundamentais para a difusão de reagentes e transporte de cargas fotoinduzidas (15).

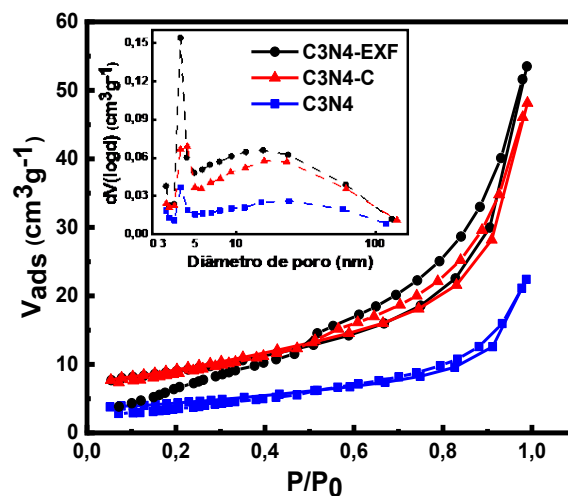


Figura 4. Isotermas de adsorção e dessorção de N₂.

Tabela 1. Área superficial, volume e diâmetro do poro dos fotocatalisadores.

Material	Área Superficial (m ² /g)	Volume do Poro (cm ³ /g)	Diâmetro do Poro (nm)
C3N4	13,7	0,035	10,2
C3N4-EXF	28,8	0,083	11,5
C3N4-C	30,4	0,074	9,8

Os espectros de fotoluminescência, na Figura 5, apresentaram emissão máxima em 459 nm para todos os materiais. O C3N4 apresentou a maior intensidade, indicando alta taxa de recombinação entre pares elétron-vacâncias, característica da estrutura conjugada do material (9). No C3N4-EXF, a intensidade foi significativamente menor, sugerindo que a exfoliação térmica e ultrassônica favoreceu a separação de cargas e dificultou sua recombinação (17). O C3N4-C exibiu a menor intensidade entre os três, indicando que a dopagem com C da lignina favoreceu a separação de cargas. Segundo Zhao *et al.* (2025), isso pode ocorrer porque parte das cargas migra por caminhos alternativos, sem emitir luz, o que reduz a recombinação visível e melhora o desempenho fotocatalítico.

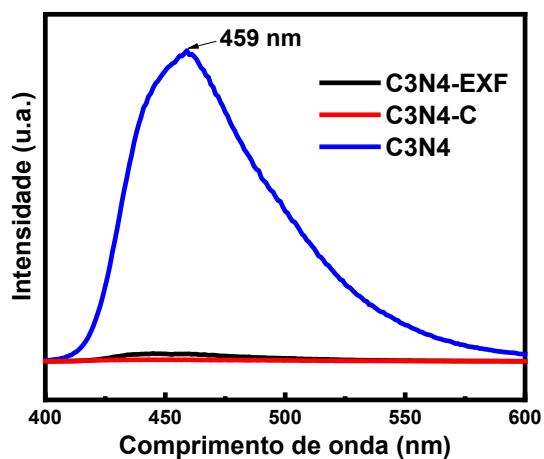


Figura 5. Espectros de fotoluminescência do C3N4, C3N4-EXF, C3N4-C.

A espectroscopia de ressonância paramagnética (EPR), indicada na Figura 6, evidenciou sinais de baixa intensidade e perfil semelhante para C3N4 e C3N4-EXF, enquanto o C3N4-C apresentou sinal nitidamente mais intenso, com perfil Lorentziano centrado em $g \sim 2,003$, característico de estruturas aromáticas π -conjugadas deslocalizadas (4). Esse sinal está associado à presença de radicais persistentes formados (PFR) por vacâncias de nitrogênio e dopagem com carbono, os quais favorecem a densidade eletrônica e a

separação eficiente de portadores de carga (18). A literatura sugere que tanto os sítios deficientes em nitrogênio quanto os radicais derivados de biocarbono contribuem para o aumento da intensidade do sinal EPR e do potencial redox dos materiais modificados (8).

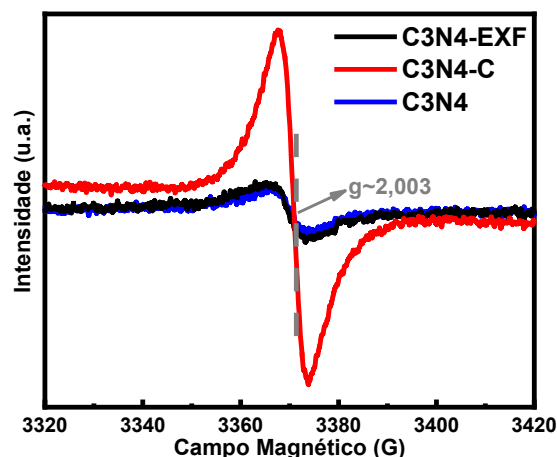


Figura 6. Espectros de ressonância paramagnética dos semicondutores.

Testes de fotodegradação do corante têxtil

Os resultados da fotodegradação do RB5, na Figura 7, mostraram eficiência de 55% para o C3N4 e cerca de 70% e 75% para o C3N4-C e C3N4-EXF, respectivamente, com desempenho estatisticamente equivalente entre os semicondutores melhorados. Testes de adsorção no escuro e fotólise, não apresentaram contribuição relevante, indicando que a degradação observada foi predominantemente fotocatalítica. As melhorias estão de acordo com as alterações estruturais e eletrônicas identificadas, que favoreceram a separação de cargas e a interação com a luz. Resultados semelhantes foram relatados por Majidi *et al.* (2023), que obteve ~70% de degradação de Direct Black 166 com $g\text{-C}_3\text{N}_4$ tratado termicamente, e por Savunthari *et al.* (2021), que alcançou ~90% de degradação de triclosan utilizando lignina acoplada ao semiconductor, reforçando a eficácia das estratégias aplicadas neste estudo.

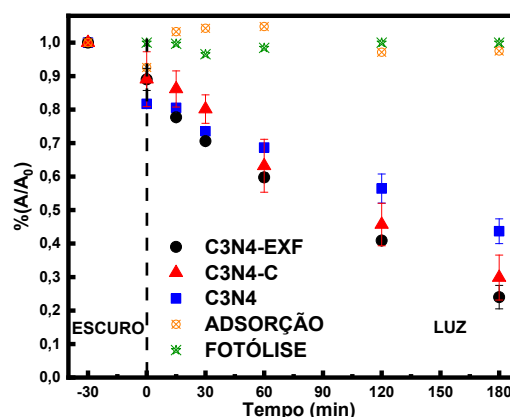


Figura 7. Testes de fotodegradação de RB5, fotólise e adsorção.

A Figura 8 apresenta o ajuste dos dados experimentais ao modelo cinético de pseudo-primeira ordem na degradação do corante RB5. O C3N4-EXF e o C3N4-C exibiram as maiores constantes de velocidade de degradação ($k=0,0062 \text{ min}^{-1}$), com excelentes correlações ($R^2=0,9944$ e $R^2=0,9985$, respectivamente), indicando melhoria significativa na separação de cargas e aumento da área superficial devido às modificações aplicadas. Em comparação, o C3N4 apresentou constante de velocidade inferior ($k=0,0035 \text{ min}^{-1}$) e um R^2 (0,9915), refletindo sua menor eficiência fotocatalítica, associada à maior recombinação de pares elétron-vacância e menor exposição de sítios ativos, conforme discutido nas seções anteriores. Esses resultados confirmam que as estratégias de exfoliação termo-ultrassônica e dopagem com carbono da lignina foram eficazes em aprimorar o desempenho fotocatalítico do g-C₃N₄.

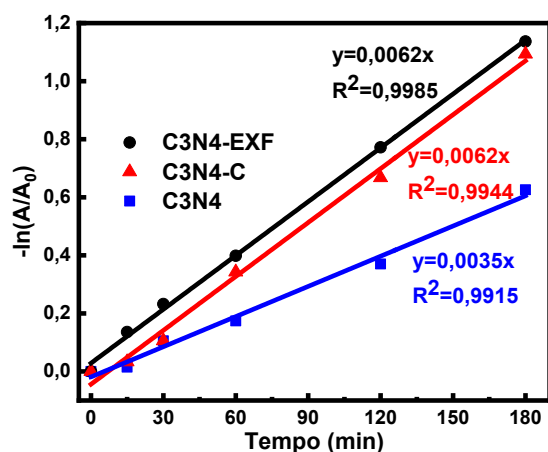


Figura 8. Cinética de pseudo-primeira ordem da fotodegradação do RB5, usando os semicondutores.

Conclusões

Tendo em vista o exposto, conclui-se que as estratégias de modificação aplicadas foram exitosas para aprimorar significativamente as propriedades estruturais e fotocatalíticas do g-C₃N₄. Tanto a exfoliação termo-ultrassônica quanto a dopagem com carbono derivado da lignina resultaram em semicondutores com maior área superficial, melhor separação de cargas e desempenho fotocatalítico superior. Destaca-se, entretanto, que a rota de dopagem com carbono mostrou-se mais atrativa do ponto de vista econômico e ambiental, por dispensar etapas adicionais de tratamento térmico e utilizar um dopante de fácil acesso e origem renovável. A melhoria nos resultados de degradação do corante, corroborou as características estruturais observadas, validando o potencial dos materiais sintetizados. Dessa forma, a abordagem de síntese verde empregada neste estudo demonstra-se promissora para o desenvolvimento de catalisadores eficientes, sustentáveis e de fácil reprodutibilidade.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pelo fomento da pesquisa, ao Laboratório de Refino e Tecnologias Limpas do Instituto iLitpeg – UFPE pela infraestrutura e ao Laboratório de Terras Raras BSTR – UFPE pelas análises.

Referências

1. A. Sudhaik; P. Raizada; P. Shandilya; D.-Y. Jeong; J.-H. Lim; P. Singh, *J. Ind. Eng. Chem.* **2018**, 67, 28–51.
2. F. Asadi; E.K. Goharshadi; M. Sadeghinia, *Sustain. Chem.* **2020**, 5, 2735–2745.
3. S.A. Hussain; J. Hu; H. Liu; F. Aslam; S. Khan; L. Khan; F. Jiao, *Int. J. Hydrogen Energy* **2024**, 87, 705–712.
4. Y. Song; Z. Li; C. Yang; X. Zhang; Q. Wang; X. Wen; H. Zhang; L. Huang, *Sep. Purif. Technol.* **2024**, 338, 126548.
5. C. Zhao; C. Ding; C. Han; X. Yang; J. Xu, *Adv. Sci. News* **2021**, 5, 2000486.
6. K.V. Savunthari; D. Arunagiri; S. Shanmugam; S. Ganesan; M.V. Arasu; N.A. Al-Dhabi; N.T.L. Chi; V.K. Ponnusamy, *Chemosphere* **2021**, 272, 129801.
7. Para V. Ganthavee; A.P. Trzcinski, *Water Sci. Eng.* **2025**, 18, 1–10.
8. Y. Zhao; Z. Wang; X. Wang; P. Sun; F. Meng; G. Yang; X. Zhou; J. Wang; X. Zhang; G. Lyu, *Adv. Funct. Mater.* **2025**, 24, 2422264.
9. A.G. Camara; R.P. Sousa; M.J.S. Costa; E.J.M. Dantas; R. Frety; G.E. Luz Jr; C.M.B.M. Barbosa; L.C. Almeida; S. Arias; J.G.A. Pacheco, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* **2025**, 459, 116021.
10. S.-H. Cho; J. Park; S. Jung; Y.F. Tsang; D. Lee; E.E. Kwon, *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2024**, 12, 2476–2483.
11. S.C. Yan; Z.S. Li; Z.G. Zou, *Langmuir* **2009**, 25, 10397–10401.
12. M. Zhang; Y. Yang; X. An; J. Zhao; Y. Bao; L. Hou, *J. Hazard. Mater.* **2022**, 424, 127424.
13. S. Yang; L. Zhong; Z. Lin; Z. Zhang; Q. Liu; W. Zhang; X. Qiu, *Carbon Res.* **2024**, 3, 45.
14. M. Majidi; M.H. Givianrad; M. Saber-Tehrani; P.A. Azar, *Diam. Relat. Mater.* **2023**, 137, 110163.
15. N. Bao; X. Hu; Q. Zhang; X. Miao; X. Jie; S. Zhou, *Appl. Surf. Sci.* **2017**, 403, 682–690.
16. M.-m. Wang; Q.-y. Li; J.-g. Liu; Q. Wei; W.-j. Chen, *Opt. Mater.* **2025**, 159, 116618.
17. H.M. Samuel; M.M. M'Arim; C.A. Mecha, *J. Nanotechnol.* **2024**, 6687926.
18. X. Wang; L. Sang; L. Zhang; G. Yang; Y. Guo; Y. Yang, *J. Alloys Compd.* **2023**, 941, 168921.