



INFLUÊNCIA DO TEOR DE Mo^{6+} NAS PROPRIEDADES DO SnO_2 E NA ATIVIDADE FOTOCATALÍTICA FRENTE AO VERMELHO REMAZOL

Lorena S. Rodrigues¹; Gislayne S. L. P. Isidro¹; Diana L. P. Morais¹

¹Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba-IFPB
lorena.santos@academico.ifpb.edu.br

Palavras-Chave: Semicondutores, corantes azo, processos oxidativos avançados.

Introdução

O crescimento das atividades industriais tem intensificado a geração de efluentes contendo corantes sintéticos, especialmente no setor têxtil. Esses compostos apresentam elevada estabilidade química e baixa biodegradabilidade, podendo comprometer a qualidade dos ecossistemas aquáticos e representar riscos à biota e à saúde humana (Roy et al., 2022; El-Awady et al., 2024). Além disso, sua presença em corpos hídricos reduz a penetração da radiação solar e prejudica a atividade fotossintética, tornando os corantes de difícil decomposição contaminantes de particular interesse ambiental (Roy et al., 2022).

Entre esses compostos encontra-se o Vermelho Remazol (Reactive Red 133), de fórmula molecular $\text{C}_{27}\text{H}_{18}\text{ClN}_7\text{Na}_4\text{O}_{16}\text{S}_5$, classificado como corante reativo aniônico pertencente à classe dos azo corantes. Trata-se de um corante azo bifuncional, cuja molécula apresenta anéis aromáticos associados a grupos cromóforos azo ($-\text{N}=\text{N}-$), além de grupos sulfonato ($-\text{SO}_3\text{Na}$), responsáveis por sua solubilidade em água, e grupos reativos capazes de estabelecer ligações covalentes com as fibras durante o tingimento (Adeniyi et al., 2023; Harianingsih et al., 2025). Sua estabilidade química, resistência à biodegradação e limitada remoção por tratamentos convencionais favorecem sua permanência em efluentes têxteis (Adeniyi et al., 2023), reforçando a necessidade de tecnologias capazes de promover sua transformação química.

Diante desse desafio, diferentes métodos têm sido empregados no tratamento de águas residuárias contendo corantes. Entretanto, compostos recalcitrantes podem apresentar baixa eficiência de remoção por técnicas convencionais, além da possibilidade de formação de resíduos secundários (Shindhal et al., 2021; Donkadokula et al., 2020). Como alternativa, os Processos Oxidativos Avançados (POAs), em especial a fotocatalise heterogênea, apresentam potencial para a oxidação de poluentes orgânicos persistentes por meio da geração de espécies altamente reativas (Nascimento et al., 2025; Mukherjee et al., 2023). O desempenho dessa abordagem está, contudo, diretamente associado às características do semicondutor utilizado como fotocatalisador.

Entre os materiais investigados para essa finalidade, o dióxido de estanho (SnO_2) apresenta elevada estabilidade térmica e química e energia de *band gap* em torno de 3,6 eV, características que justificam seu interesse em aplicações fotocatalíticas (Nascimento et al., 2022; Dangi et al., 2023; Nascimento et al., 2025). Apesar dessas vantagens, sua eficiência pode ser limitada pela rápida recombinação dos pares elétron-lacuna fotoinduzidos (Perumal et al., 2023; Senthilkumar et al., 2022). Dessa forma, modificações capazes de alterar seu



comportamento estrutural e eletrônico tornam-se relevantes para ampliar sua atividade sob irradiação.

Uma dessas estratégias consiste na dopagem, sendo a incorporação de Mo^{6+} na rede cristalina do SnO_2 particularmente interessante. A possível incorporação substitucional de Mo^{6+} em sítios originalmente ocupados por Sn^{4+} pode promover desequilíbrio de cargas na rede, desencadeando mecanismos de compensação e a formação de defeitos estruturais (Dangi et al., 2023).

A proximidade entre os raios iônicos de Mo^{6+} (0,59 Å) e Sn^{4+} (0,69 Å) também favorece a incorporação substitucional do dopante no SnO_2 (Ma et al., 2021; Senthilkumar et al., 2022; Dangi et al., 2023). Tais alterações podem modificar o comportamento estrutural, eletrônico e óptico do semicondutor e, consequentemente, sua resposta durante a fotocatalise. Nesse sentido, o teor de dopante constitui um parâmetro determinante, uma vez que diferentes concentrações de Mo^{6+} podem produzir modificações distintas no material e repercutir diretamente em sua eficiência.

Embora a dopagem do SnO_2 com Mo^{6+} seja reconhecida como uma estratégia de modificação do semicondutor, a relação entre o teor nominal do dopante, as alterações estruturais e ópticas resultantes e a resposta fotocatalítica frente ao Reactive Red 133 ainda demanda investigação. Assim, este trabalho tem como objetivo sintetizar nanopartículas de SnO_2 com teores nominais de 3% e 6% mol de Mo, definidos estequiometricamente, pelo método dos precursores poliméricos, caracterizá-las estrutural e opticamente e avaliar sua atividade na fotodegradação do Vermelho Remazol sob radiação UV, buscando relacionar o teor nominal do dopante às características dos materiais obtidos e à eficiência do processo.

Material e Métodos

As nanopartículas de SnO_2 puro e dopadas com teores nominais de 3% e 6% mol de Mo^{6+} , definidos estequiometricamente, foram sintetizadas pelo método dos precursores poliméricos, derivado do método Pechini. O citrato de estanho foi utilizado como precursor e o heptamolibdato de amônio tetrahidratado como fonte de Mo^{6+} .

Após a formação da resina polimérica, os materiais foram submetidos a tratamento térmico em mufla a 300 °C por 2 h, seguido de calcinação a 700 °C por 2 h.

A caracterização estrutural foi realizada por Difração de Raios X (DRX), enquanto as propriedades ópticas foram avaliadas por Espectroscopia de Refletância Difusa na região do UV-Vis. A atividade fotocatalítica foi investigada, em triplicata, utilizando solução aquosa de Vermelho Remazol (10 mg L⁻¹) e concentração de fotocatalisador de 0,50 g L⁻¹. Os ensaios foram conduzidos em fotorreator de bancada equipado com três lâmpadas UV-C de 30 W ($\lambda = 254$ nm), durante 6 h de irradiação. A fotodegradação foi monitorada por espectroscopia UV-Vis a partir da variação da absorbância em 520 nm, correspondente ao cromóforo azo do corante.

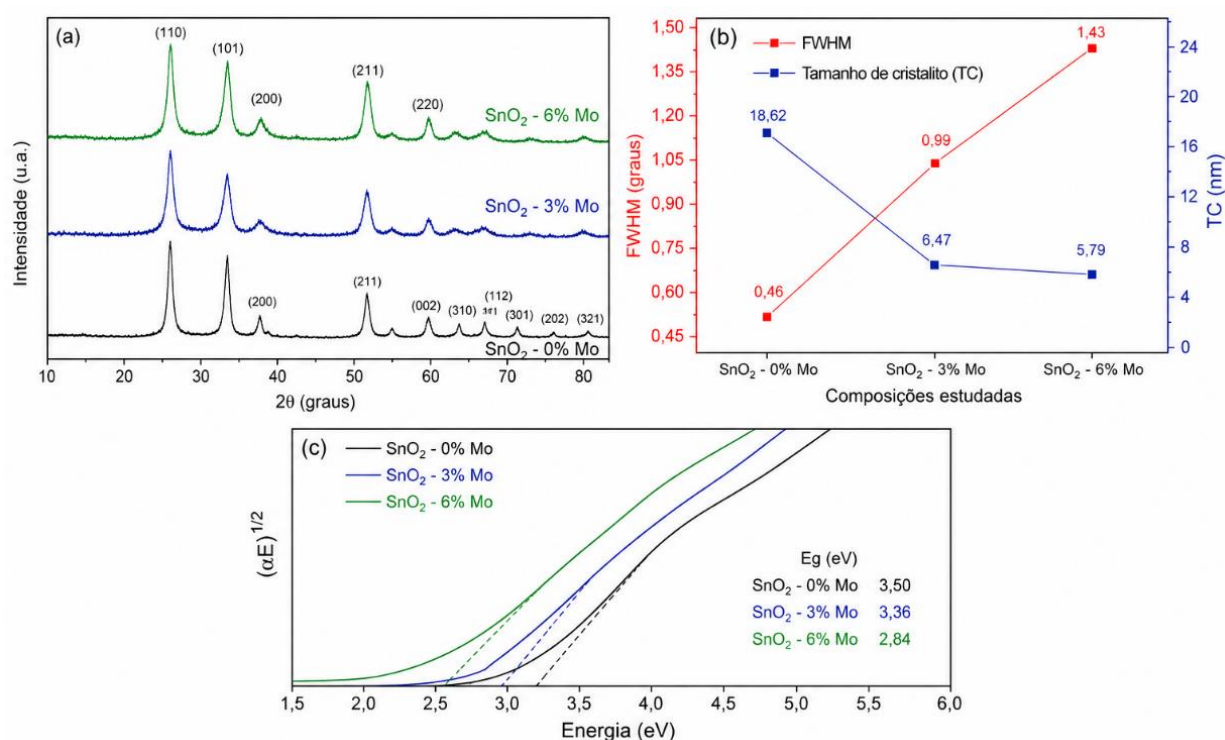
Resultados e Discussão

Os difratogramas de raios X (Figura 1a) evidenciaram a formação da fase tetragonal rutilo do SnO_2 em todas as composições, sem indicação de fases secundárias cristalinas detectáveis por DRX. Com o aumento do teor de dopante, observou-se alargamento das reflexões e redução do tamanho médio de cristalito, que passou de 18,62 nm no SnO_2 puro para

6,47 nm e 5,79 nm nas amostras SnO₂:Mo 3% e SnO₂:Mo 6%, respectivamente. Conforme apresentado na Figura 1b, o aumento da largura à meia altura (FWHM) acompanhou essa tendência, indicando que a presença de Mo⁶⁺ interfere no crescimento dos domínios cristalinos e promove alterações estruturais no SnO₂, compatíveis com a incorporação do dopante à rede cristalina.

As modificações estruturais foram acompanhadas por alterações nas propriedades ópticas. A análise dos gráficos de Tauc (Figura 1c) mostrou redução do *band gap* com o aumento do teor de Mo⁶⁺, de 3,50 eV para o SnO₂ puro para 3,36 eV e 2,84 eV nas composições SnO₂:Mo 3% e SnO₂:Mo 6%, respectivamente. Esse comportamento evidencia a influência da dopagem sobre as propriedades ópticas do semicondutor, com redução da energia estimada para a transição eletrônica.

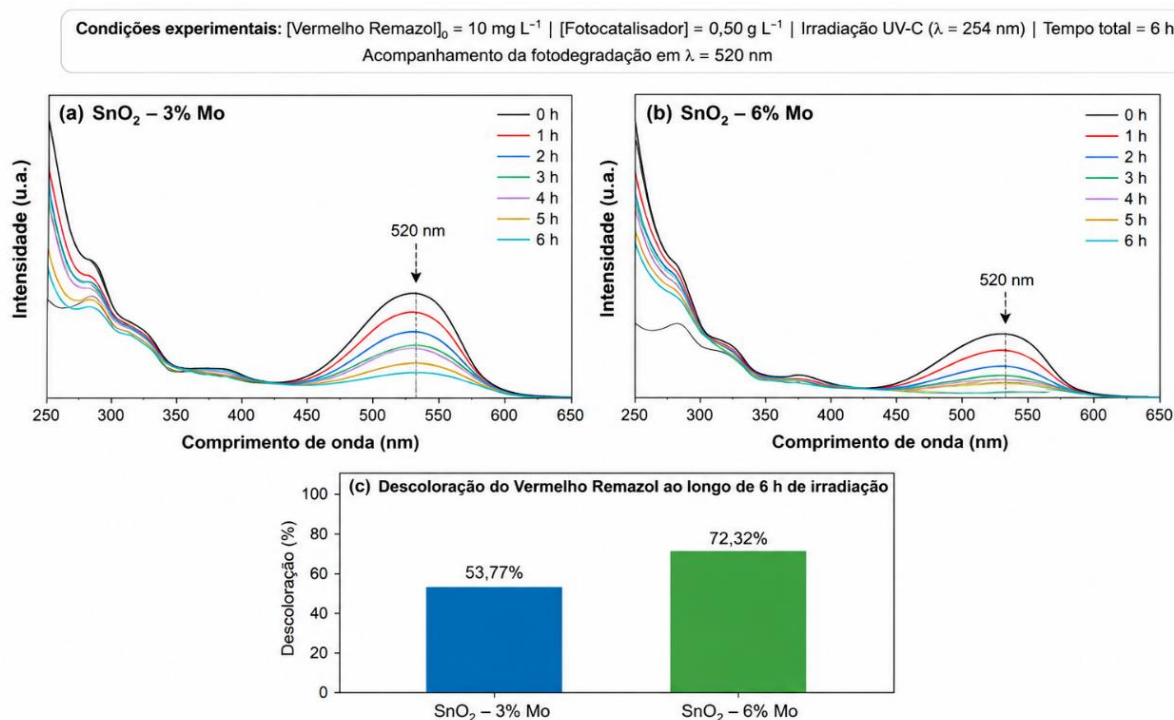
Figura 1 – Caracterização estrutural e óptica das amostras: (a) difratogramas de raios X; (b) variação da largura à meia altura (FWHM) e do tamanho de cristalito (TC); e (c) gráficos de Tauc e valores estimados de *band gap* óptico.



Fonte: Autoria própria (2026).

A influência do teor do dopante também foi observada na resposta fotocatalítica frente ao Vermelho Remazol. Os espectros de absorção obtidos ao longo de 6 h de irradiação UV-C (Figuras 2a e 2b) mostraram redução progressiva da banda localizada em 520 nm, associada ao cromóforo azo do corante. Para a concentração de fotocatalisador de 0,50 g L⁻¹, a redução da absorvância nessa região foi de 53,77% para SnO₂:Mo 3% e 72,32% para SnO₂:Mo 6%, conforme apresentado na Figura 2c, demonstrando maior descoloração com o aumento do teor de Mo⁶⁺.

Figura 2 – Acompanhamento da fotodegradação do Vermelho Remazol (10 mg L^{-1}), utilizando concentração de fotocatalisador de $0,50 \text{ g L}^{-1}$: espectros de absorção ao longo do tempo para (a) $\text{SnO}_2\text{:Mo}$ 3% e (b) $\text{SnO}_2\text{:Mo}$ 6%; e (c) descoloração após 6 h de irradiação UV-C ($\lambda = 254 \text{ nm}$), monitorada em 520 nm.



Fonte: Autoria própria (2026).

O melhor desempenho apresentado pela composição $\text{SnO}_2\text{:Mo}$ 6% ocorreu concomitantemente às maiores modificações estruturais e ópticas observadas (Figura 1), incluindo a redução do tamanho de cristalito e do *band gap*, e à maior descoloração do Vermelho Remazol (Figura 2). Em conjunto, esses resultados sugerem que as alterações associadas ao aumento do teor de Mo^{6+} influenciam a resposta fotocatalítica do SnO_2 , embora a contribuição individual de cada parâmetro não possa ser estabelecida a partir das análises realizadas. Ressalta-se, ainda, que a redução da absorbância em 520 nm está associada principalmente à ruptura do sistema cromóforo e à consequente descoloração da solução, não sendo suficiente, isoladamente, para confirmar a mineralização completa do corante.

Conclusões

A dopagem com Mo^{6+} promoveu modificações nas características estruturais e ópticas do SnO_2 , preservando a fase tetragonal rutilo detectável por DRX e reduzindo o tamanho de cristalito e o *band gap* com o aumento do teor nominal do dopante. Essas alterações foram acompanhadas pelo aumento da resposta fotocatalítica frente ao Vermelho Remazol, sendo a composição $\text{SnO}_2\text{:Mo}$ 6% a que apresentou maior descoloração entre as amostras avaliadas. Os resultados evidenciam a influência do teor de dopante sobre as propriedades do SnO_2 e sua resposta fotocatalítica, indicando o potencial do material para aplicação na fotodegradação do Vermelho Remazol.



Entretanto, como o monitoramento em 520 nm está associado principalmente à ruptura do cromóforo azo, análises complementares são necessárias para avaliar os intermediários formados e a extensão da mineralização do corante.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) pelo apoio institucional e pela infraestrutura laboratorial disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

- ADENIYI, A. O.; BOYRO, D. E. A.; CHINDO, I. Y.; MAHMOUD, A. A. Spectrophotometric and infra-red analyses of azo reactive dyes derived from 2-methyl-3-(2'-methylphenyl)-6-arylazo-4-oxoquinazoline. **Science World Journal**, v. 18, n. 2, p. 231–239, 2023. DOI: 10.4314/swj.v18i2.10.
- DANGI, R.; BASNET, B.; PANDEY, M.; BHUSAL, S.; BUDHATHOKI, B.; PARAJULI, K.; TIWARI, S. K.; KAFLE, B. P. Effect of oxygen vacancy on the crystallinity and optical band gap in tin oxide thin film. **Energies**, v. 16, n. 6, 2023. DOI: 10.3390/en16062653.
- DONKADOKULA, N. Y.; KOLA, A. K.; NAZ, I.; SAROJ, D. A review on advanced physico-chemical and biological textile dye wastewater treatment techniques. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 19, n. 3, p. 543–560, 2020. DOI: 10.1007/s11157-020-09543-z.
- EL AWADY, M. E.; EL-SHALL, F. N.; MOHAMED, G. E.; ABD-ELAZIZ, A. M.; ABDEL-MONEM, M. O.; HASSAN, M. G. Exploring the decolorization efficiency and biodegradation mechanisms of different functional textile azo dyes by *Streptomyces albidoflavus* 3MGH. **BMC Microbiology**, v. 24, n. 1, 2024. DOI: 10.1186/s12866-024-03347-9.
- HARIANINGSIH, H.; QUDUS, N.; WIDYASTUTI, C. R.; WIDIARTI, N.; KHOIRUNISA, N.; SAPUTRA, K. Plasma electrolysis as a sustainable strategy for Remazol Red RB-133 degradation in azo dye wastewater. **Applied Chemical Engineering**, v. 8, n. 3, 2025. DOI: 10.59429/ace.v8i3.5696.
- MA, T.; NIKIEL, M.; THOMAS, A. G.; MISSOUS, M.; LEWIS, D. J. A novel and potentially scalable CVD-based route towards SnO₂:Mo thin films as transparent conducting oxides. **Journal of Materials Science**, v. 56, n. 28, p. 15921–15936, 2021. DOI: 10.1007/s10853-021-06269-3.
- MUKHERJEE, J.; LODH, B. K.; SHARMA, R.; MAHATA, N.; SHAH, M. P.; MANDAL, S.; GHANTA, S.; BHUNIA, B. Advanced oxidation process for the treatment of industrial wastewater: a review on strategies, mechanisms, bottlenecks and prospects. **Chemosphere**, v. 345, 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140473.



NASCIMENTO, J. L. A.; CHANTELLE, L.; DOS SANTOS, I. M. G.; DE OLIVEIRA, A. L. M.; ALVES, M. C. F. The influence of synthesis methods and experimental conditions on the photocatalytic properties of SnO₂: a review. **Catalysts**, v. 12, n. 4, 2022. DOI: 10.3390/catal12040428.

NASCIMENTO, J. L. A.; ROSTAS, A. M.; SILVA, A.; KENNEDY, B. J.; BARBUTUDORAN, L.; BOCIRNEA, A.-E.; SANTOS, I. M. G. dos; ALVES, M. C. F.; MENEZES DE OLIVEIRA, A. L. Tailoring structural distortions and ionic defects as alternative strategy to modulate reactive oxygen species and photocatalytic activity in SnO₂ nanoparticles. **Chemistry of Materials**, v. 37, n. 14, p. 4963–4981, 2025. DOI: 10.1021/acs.chemmater.4c03146.

PERUMAL, V.; UTHRAKUMAR, R.; CHINNATHAMBI, M.; INMOZHI, C.; ROBERT, R.; RAJASARAVANAN, M. E.; RAJA, A.; KAVIYARASU, K. Electron-hole recombination effect of SnO₂–CuO nanocomposite for improving methylene blue photocatalytic activity in wastewater treatment under visible light. **Journal of King Saud University – Science**, v. 35, n. 1, 2023. DOI: 10.1016/j.jksus.2022.102388.

ROY, A.; ANANDA MURTHY, H. C.; AHMED, H. M.; ISLAM, M. N.; PRASAD, R. Phytogenic synthesis of metal/metal oxide nanoparticles for degradation of dyes. **Journal of Renewable Materials**, v. 10, n. 7, p. 1911–1930, 2022. DOI: 10.32604/jrm.2022.019410.

SENTHILKUMAR, P.; RAJA, S.; RAMESH BABU, R.; VASUKI, G. Enhanced electrical and optoelectronic properties of W doped SnO₂ thin films. **Optical Materials**, v. 126, 2022. DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112234.

SHINDHAL, T.; RAKHOLIYA, P.; VARJANI, S.; PANDEY, A.; NGO, H. H.; GUO, W.; NG, H. Y.; TAHERZADEH, M. J. A critical review on advances in the practices and perspectives for the treatment of dye industry wastewater. **Bioengineered**, v. 12, n. 1, p. 70–87, 2021. DOI: 10.1080/21655979.2020.1863034.