

DESENVOLVIMENTO DE MEMBRANAS POLIMÉRICAS FOTOCATALÍTICAS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTE SINTÉTICO CONTENDO CORANTE

Alessandra de Pádua e Silva¹
Jaqueline Suave²

Resumo: Soluções ambientalmente sustentáveis têm se tornado essenciais no desenvolvimento de novas tecnologias no tratamento de efluentes. Nesse trabalho foram produzidas e caracterizadas membranas poliméricas biodegradáveis de poli(ácido láctico) (PLA) e metilcelulose (MC), funcionalizadas com óxido de zinco (ZnO) visando a remoção do corante azul de metileno (AM). As membranas foram produzidas com diferentes proporções de MC, que atuou como agente formador de poros, e caracterizadas quanto à morfologia, porosidade, fluxo de filtração, propriedades mecânicas, desempenho fotocatalítico e reciclabilidade. Os resultados demonstraram que o aumento na proporção da MC promoveu maior porosidade e fluxo de filtração. A incorporação do ZnO conferiu atividade fotocatalítica sob luz UV com eficiência de degradação do corante superior a 40%. As características combinadas de biodegradabilidade, eficiência degradação fotocatalítica e reciclabilidade tornam essas membranas uma alternativa promissora para aplicação em tratamento de efluentes contendo corantes.

Palavras-Chave: Membranas poliméricas. Polímeros biodegradáveis. Águas residuárias. Óxido de zinco.

1 INTRODUÇÃO

A presença de corantes nos efluentes industriais, principalmente nos provenientes do setor têxtil, não apenas compromete a qualidade da água, como também representa um sério risco à saúde humana e ao equilíbrio dos ecossistemas aquáticos (SILVA; OLIVEIRA, 2010). Estes compostos conferem cor à água, interferem na passagem de luz, afetam a atividade fotossintética e provocam alterações na biota aquática, podendo persistir no ambiente, resultando em toxicidade aguda e crônica e tornando-se um desafio significativo para os processos convencionais de tratamento de água (KUNZ *et al.*, 2002).

Diante desse cenário, torna-se essencial buscar soluções tecnológicas inovadoras e sustentáveis para a remoção eficiente desses poluentes, visando a preservação dos recursos hídricos e a mitigação de impactos ambientais. Entre as tecnologias promissoras, destacam-se as membranas poliméricas funcionalizadas com materiais fotocatalíticos, como o óxido de zinco (ZnO), que apresenta potencial para a degradação de corantes orgânicos e outros micropoluentes (OLADOYE *et al.*, 2022).

A utilização de membranas representa uma abordagem eficiente para a separação de substâncias com base em propriedades como tamanho, forma e difusibilidade. Essa tecnologia fundamenta-se em métodos e mecanismos de transporte de matéria através de materiais com permeabilidade seletiva, permitindo

¹ Acadêmica do curso de Engenharia Química do Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Lages; alessandra.ps2000@aluno.ifsc.edu.br

² Docente do curso de Engenharia Química do Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Lages; orientadora; jaqueline.suave@ifsc.edu.br

a passagem de determinados compostos enquanto retém outros. Os principais processos de separação por membranas incluem microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose reversa, eletrodialise e eletrodeionização, sendo amplamente aplicados no tratamento de águas (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

As membranas são comumente produzidas a partir de materiais poliméricos sintéticos como a polissulfona e a poliamida, devido às suas propriedades de fácil processamento e alta seletividade para diferentes espécies químicas. Por outro lado, a biodegradabilidade do polímero utilizado na membrana é de grande importância porque contribui para a sustentabilidade ambiental do processo de tratamento de efluentes. Quando a membrana é biodegradável, ela se decompõe de forma natural no ambiente após seu uso, minimizando a geração de resíduos sólidos persistentes e o impacto ambiental. Isso é especialmente relevante em processos industriais, onde há crescente demanda por soluções que combinem eficiência de separação com menor impacto ecológico, alinhando-se aos princípios de economia circular e sustentabilidade (MIERZWA, 2002).

A modificação de membranas com materiais fotocatalíticos, como óxidos semicondutores de zinco e titânio tem ganhado destaque. Esses materiais são capazes de gerar espécies reativas de oxigênio (ROS) quando irradiados com luz UV ou visível, promovendo a degradação de poluentes orgânicos em compostos menores e menos tóxicos (HARIHARAN, 2006). A funcionalização fotocatalítica não apenas aprimora a eficiência da remoção de contaminantes, mas também contribui para a autolimpeza da superfície da membrana, mitigando a formação de incrustações e prolongando a vida útil operacional (BANERJEE; DIONYSIOU; PILLAI, 2015). Assim, o desenvolvimento de membranas híbridas, integrando processos de separação física e degradação química, representa um avanço significativo em direção a soluções mais sustentáveis e eficazes para o tratamento de águas residuárias e sistemas de purificação avançados. Esse processo têm sido aplicado com êxito para a remoção ou degradação de poluentes recalcitrantes (BRITO; SILVA, 2012).

Membranas de poli(ácido láctico) (PLA) são uma alternativa interessante por serem biodegradáveis e possuírem boa estabilidade mecânica e química, além de permitirem a incorporação de nanopartículas fotocatalíticas, resultando em sistemas de filtração eficientes e ambientalmente amigáveis (HABERT; BORGES; NÓBREGA, 2006). Assim, este trabalho teve como objetivo principal desenvolver e caracterizar membranas poliméricas biodegradáveis de poli(ácido láctico) e metilcelulose (MC), como agente formador de poros, funcionalizadas com nanopartículas de óxido de zinco, visando a remoção do corante azul de metileno de soluções aquosas e buscando avaliar a eficiência dessas membranas na filtração e na degradação fotocatalítica do corante.

2 METODOLOGIA

Este estudo utilizou o poli(ácido láctico) Ingeo 4043D (NatureWorks) e a metilcelulose com viscosidade 4.000 cP (Sigma-Aldrich), os demais reagentes utilizados apresentavam grau analítico.

2.1 Síntese e caracterização das nanopartículas de óxido de zinco

A síntese das nanopartículas de ZnO foi realizada conforme o método descrito por Ahmadzadeh, Babaei e Goudarzi (2018): 10 mL de solução de acetato

de zinco ($1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) foram adicionados a 230 mL de água deionizada. Em seguida, adicionaram-se 10 mL de solução de hidróxido de amônio, mantendo a mistura sob agitação. A solução foi submetida ao aquecimento em forno de micro-ondas (Brastemp) a 150 W por 30 minutos. Após o término do aquecimento, as nanopartículas formadas foram filtradas, lavadas com água deionizada e secas em estufa a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ por 2 horas.

A caracterização das nanopartículas de ZnO foi realizada por difração de raios X (DRX) em um equipamento Rigaku MiniFlex 600, utilizando radiação $K\alpha\text{Cu} = 1,54060 \text{ \AA}$, passo de varredura $0,02 \text{ }^\circ/\text{s}$ numa região 2θ de 10° a 80° . O difratograma obtido foi comparado com os padrões do arquivo JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) de número 36-1451 para o ZnO.

Caracterizações de microscopia eletrônica por emissão de campo (MEV-FEG), utilizando um microscópio JSM-6701F, foram realizadas para o estudo da morfologia e do tamanho de grão das nanopartículas de ZnO.

2.2 Preparo das membranas de poli(ácido láctico)

Para o preparo das membranas poliméricas, o PLA e a MC foram adicionados simultaneamente ao clorofórmio em frasco com tampa de rosca, sob agitação constante. As proporções mássicas dos polímeros foram ajustadas para obter três composições distintas PLA/MC: 50/50, 60/40 e 70/30. Utilizaram-se 100 mL de clorofórmio como solvente para cada 10 g de polímero, mantendo a solução em agitação a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas para assegurar a completa homogeneização.

Após a homogeneização, aproximadamente 10 mL de solução foram vertidos em placas de Petri. As placas foram mantidas em capela de exaustão durante 24 horas para promover a evaporação do solvente à temperatura ambiente. Ao final, as membranas formadas foram removidas das placas e lavadas com água deionizada por 12 vezes consecutivas para eliminar a metilcelulose, produzindo os poros.

2.3 Incorporação das nanopartículas de ZnO às membranas

A incorporação das nanopartículas de ZnO nas membranas foi realizada mediante a pulverização de uma suspensão de ZnO em etanol absoluto a 1% (m/v). Utilizou-se um aerógrafo com minicompressor (Vonder) para aplicar a suspensão, pulverizando 10 vezes consecutivas sobre a superfície superior das membranas. Entre cada pulverização, aguardou-se a evaporação completa do solvente.

2.4 Caracterização das membranas

2.4.1 Análise morfológica

A morfologia das membranas puras e recobertas foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um equipamento Jeol JCM-7000. As amostras foram fixadas em fita dupla face de carbono e coladas em um porta amostra e, em seguida, foram metalizadas com ouro.

2.4.2 Porosidade

A porosidade foi determinada pelo método gravimétrico descrito por Zinadini *et al.* (2014). As membranas foram imersas em água deionizada por 12 horas,

pesadas e secas ao ar, antes de nova pesagem. A porosidade (ε) foi calculada conforme a Equação 1, onde m_1 e m_2 representam, respectivamente, a massa da membrana úmida (kg) e seca (kg), A é a área superficial efetiva da membrana ($4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$), l é espessura da membrana e d é densidade da água a 25 °C (997 kg/m^3):

$$\varepsilon = \frac{m_1 - m_2}{A \times l \times d} \quad (1)$$

2.4.3 Fluxo de filtração

O fluxo de filtração foi medido em sistema de filtração a vácuo. Para isto, 100 mL de solução de azul de metileno (AM) (10 mg/L) foram filtrados sob pressão constante gerada por bomba de vácuo. O fluxo (F) foi calculado pela Equação 2, onde V é o volume da solução filtrada (L), A é a área efetiva da membrana ($1,26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$) e t é o tempo de filtração (h):

$$F = \frac{V}{A \times t} \quad (2)$$

2.4.4 Eficiência de rejeição de corante

A eficiência de rejeição de corante pelas membranas foi avaliada utilizando uma solução de AM com concentração inicial de 10 mg/L como alimentação. Um volume de 50 mL da solução foi submetido ao processo de filtração a vácuo, o permeado obtido foi coletado e sua absorvância (ABS_p) determinada por espectrofotometria a 665 nm em um espectrofotômetro Bel Spectro LGS53. A concentração da solução de alimentação (ABS_f) também foi medida nas mesmas condições. A eficiência de rejeição ($R\%$) foi então calculada utilizando a Equação 3:

$$R\% = 1 - \left(\frac{ABS_p}{ABS_f} \right) \times 100 \quad (3)$$

2.4.5 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, resistência à tração e alongamento na ruptura) foram determinadas segundo a norma ASTM D882-02, utilizando uma máquina de ensaio computadorizada Impac AEL-A-100 equipada com uma célula de carga de 100 kgf. As dimensões das membranas foram aferidas com um paquímetro Starrett.

2.5 Avaliação da atividade fotocatalítica e da reciclabilidade das membranas

As membranas foram cortadas em discos de 40 mm de diâmetro e fixadas em placas de Petri de 90 mm, com a superfície funcionalizada voltada para cima. 20 mL de solução de azul de metileno (10 mg/L) foram adicionados às placas. O sistema foi mantido no escuro por 60 minutos para alcançar o equilíbrio de adsorção/dessorção. Em seguida, utilizaram-se duas lâmpadas UV-A de 8 W (Philips) posicionadas a dez centímetros de distância. Em intervalos regulares, amostras foram coletadas e analisadas em um espectrofotômetro Bel Spectro LGS53 (665 nm). A eficiência de degradação ($D\%$) foi calculada segundo a Equação 4, onde ABS_0 é a absorvância inicial e ABS_f , a final:

$$D\% = \frac{ABS_0 - ABS_f}{ABS_0} \times 100 \quad (4)$$

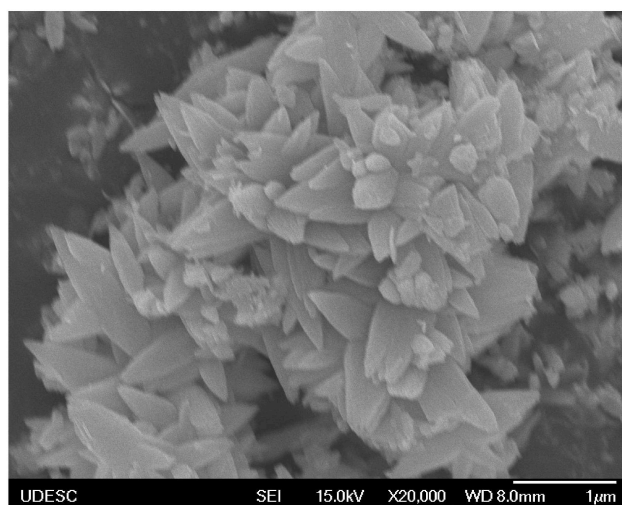
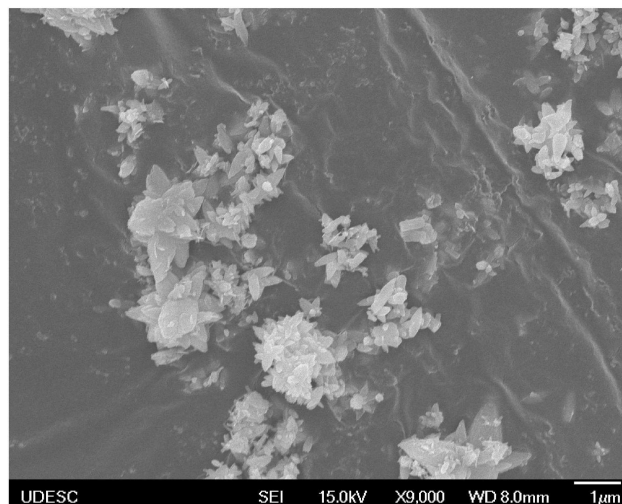
Na sequência, as diferentes membranas foram avaliadas por três ciclos consecutivos para determinar sua reciclabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Síntese e caracterização das nanopartículas de óxido de zinco

A síntese das nanopartículas de ZnO resultou em um material de cor branca, com aspecto pulverulento após secagem. A aplicação do método de micro-ondas mostrou-se eficiente, permitindo a obtenção de partículas homogêneas e de tamanho reduzido, conforme mostrado na Figura 1. Também nota-se que as nanopartículas de óxido de zinco obtidas apresentaram formato oblongo, variando de 300 a 1200 nm na dimensão do seu comprimento com algumas aglomerações ocasionais.

Figura 1 - Imagens de MEV/FEG das nanopartículas de ZnO

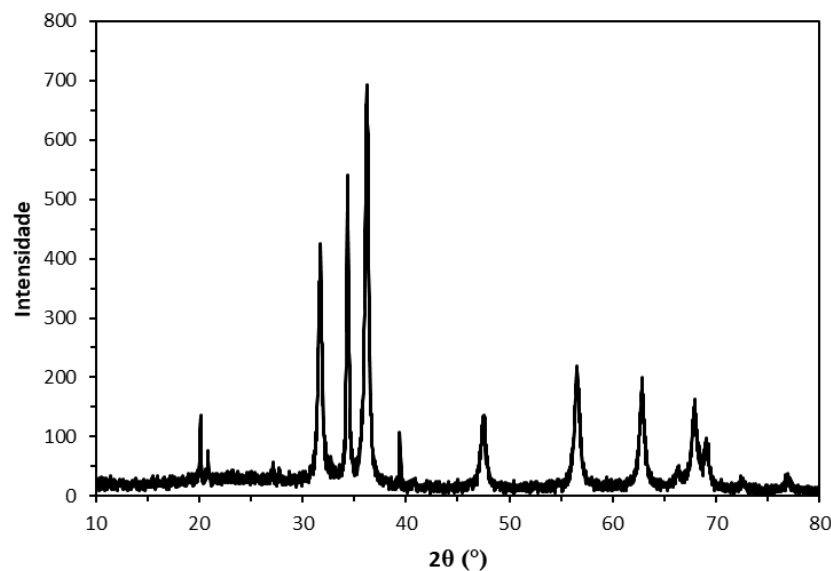


Fonte: as autoras (2025)

Essa morfologia é favorável para aplicações em fotocatalise pois confere uma grande área superficial, essencial para a adsorção de corantes e posterior degradação. Esses resultados comprovam a adequação do método utilizado para a síntese das nanopartículas de ZnO, garantindo a obtenção de partículas com tamanho e morfologia adequados para sua aplicação em membranas poliméricas fotocatalíticas. Rustembekkyzy *et al.* (2024) afirmam que o método de síntese assistido por micro-ondas é rápido, de baixo custo e é capaz de produzir ZnO com elevado potencial fotocatalítico.

O difratograma apresentado na Figura 2 exibe picos de difração bem definidos, compatíveis com a estrutura cristalina hexagonal tipo wurtzita do ZnO. Os picos localizados em torno de $2\theta = 31,8^\circ$, $34,4^\circ$ e $36,3^\circ$ correspondem aos planos (100), (002) e (101), respectivamente, e são característicos dessa fase. A correspondência com os dados da ficha JCPDS nº 36-1451 confirma que o material sintetizado é composto majoritariamente por ZnO com estrutura wurtzita, sem presença significativa de impurezas.

Figura 2 - Difratograma das nanopartículas de ZnO



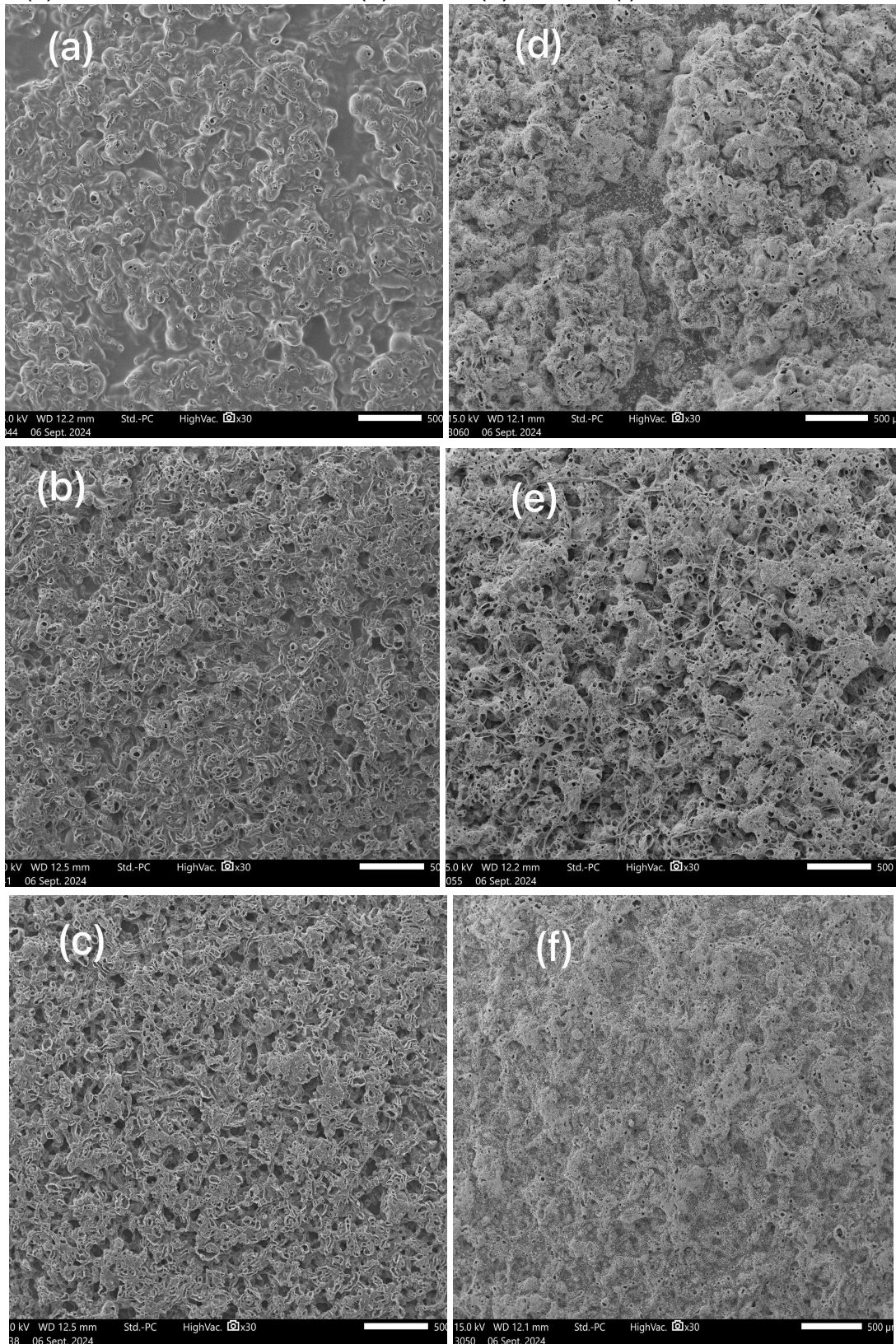
Fonte: as autoras (2025)

3.2 Caracterização das membranas

3.2.1 Análise morfológica

As micrografias de MEV mostradas na Figura 3 revelam que o aumento da concentração de metilcelulose (MC), que é o agente formador de poros, resultou em membranas com maior porosidade. Entretanto, nas formulações PLA/MC 60/40 e 50/50, observou-se uma ampla distribuição no tamanho dos poros, variando entre 10 e 100 μm . Para as membranas recobertas com ZnO não é possível observar uma diferença significativa na morfologia, mas é possível atestar a presença de ZnO uniformemente distribuído sobre as membranas. Além disso, a rugosidade superficial gerada pelo ZnO pode favorecer a ancoragem de moléculas e favorecer a atividade fotocatalítica sob luz UV.

Figura 3 - Imagens de MEV das membranas de PLA/MC (a) 70/30, (b) 60/40 e (c) 50/50 e de PLA/MC/ZnO (d) 70/30, (e) 60/40 e (f) 50/50



Fonte: as autoras (2025)

3.2.2 Porosidade

A Tabela 1 mostra que a porosidade das membranas aumentou com o maior teor de metilcelulose, o que era esperado, já que esse componente atua como agente formador de poros. As membranas revestidas com ZnO apresentaram porosidade ainda maior, possivelmente devido à adsorção de água pelas nanopartículas, que contribuiu para a porosidade total medida.

Tabela 1 - Porosidade das diferentes membranas

Membrana (PLA/MC)	Porosidade (%)
70/30	41,9 ± 8,9
60/40	53,3 ± 17,1
50/50	70,8 ± 8,1
70/30/ZnO	56,7 ± 19,8
60/40/ZnO	84,0 ± 19,8
50/50/ZnO	103,7 ± 24,3

Fonte: as autoras (2025)

3.2.3 Fluxo de filtração

O aumento da proporção de metilcelulose nas membranas PLA/MC resultou em maior fluxo de filtração, devido à elevação da porosidade (Tabela 2). A membrana 50/50 apresentou o maior fluxo entre as amostras sem ZnO ($92,3 \times 10^3$ L/m²h). Com a adição de ZnO, essa tendência se manteve, sendo a membrana 50/50/ZnO a mais eficiente ($98,9 \times 10^3$ L/m²h), indicando que o revestimento de ZnO não compromete a permeabilidade e pode até favorecê-la, possivelmente devido à sua ação na modificação da morfologia superficial e aumento da hidrofilicidade.

Tabela 2 - Fluxo de filtração das diferentes membranas

Membrana (PLA/MC)	Fluxo de filtração (L/m ² h)
70/30	18,1 ± 10,0
60/40	74,0 ± 7,9
50/50	92,3 ± 11,6
70/30/ZnO	18,6 ± 6,0
60/40/ZnO	66,7 ± 18,7
50/50/ZnO	98,9 ± 12,8

Fonte: as autoras (2025)

3.2.4 Eficiência de rejeição de corante

As membranas sem ZnO apresentaram eficiências de rejeição similares, independentemente da proporção de MC utilizada na sua fabricação, conforme mostra a Tabela 3. Esse comportamento indica que a separação física por tamanho de poro foi pouco significativa para o azul de metileno, possivelmente devido à sua pequena dimensão molecular frente à porosidade das membranas. Já com o ZnO, observou-se uma queda expressiva na eficiência de rejeição, que pode estar

associada à baixa afinidade entre as moléculas de corante e as nanopartículas de ZnO presentes na superfície das membranas, o que favorece a passagem do corante em vez de sua retenção.

Tabela 3 - Eficiência de rejeição de AM pelas membranas

Membrana (PLA/MC)	Rejeição (%)
70/30	6,7 ± 2,4
60/40	6,6 ± 2,3
50/50	6,6 ± 1,0
70/30/ZnO	2,6 ± 0,4
60/40/ZnO	1,5 ± 0,0
50/50/ZnO	2,9 ± 0,5

Fonte: As autoras (2025).

3.2.5 Propriedades mecânicas

A Tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas das membranas. Nas amostras sem ZnO, o aumento da porosidade resultou na redução do módulo de elasticidade, da resistência à tração e do alongamento na ruptura, indicando menor resistência mecânica. Com a adição das nanopartículas de ZnO, observou-se uma queda no módulo de elasticidade e na resistência, mas um aumento no alongamento, possivelmente devido à ação do etanol usado na pulverização, que pode ter alterado a estrutura do PLA, tornando o material mais dúctil e menos rígido.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas das diferentes membranas

Membrana (PLA/MC)	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)
70/30	231,7 ± 50,6	7,5 ± 2,1	3,7 ± 1,1
60/40	223,6 ± 44,7	5,9 ± 1,7	3,1 ± 0,8
50/50	181,7 ± 51,5	3,1 ± 1,1	2,3 ± 1,2
70/30/ZnO	112,9 ± 24,0	5,6 ± 0,8	5,6 ± 1,4
60/40/ZnO	151,7 ± 29,4	5,6 ± 0,9	4,4 ± 0,8
50/50/ZnO	151,3 ± 32,6	4,8 ± 1,1	3,6 ± 0,8

Fonte: as autoras (2025)

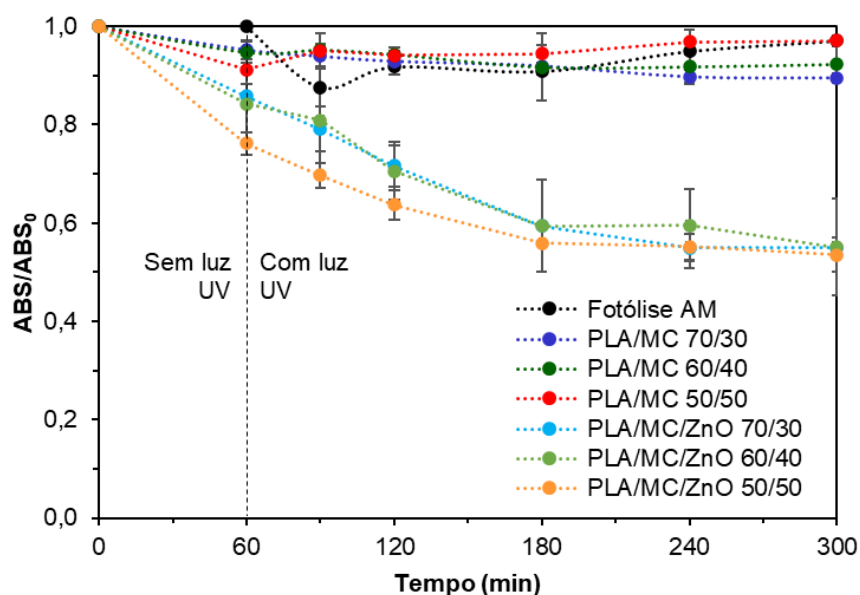
3.3 Avaliação da atividade fotocatalítica e da reciclabilidade

Na Figura 4 são apresentadas as curvas normalizadas de degradação do azul de metileno para as diferentes membranas produzidas, com e sem o recobrimento de nanopartículas de ZnO. Além disso, é demonstrada a fotólise do corante, ou seja, a ação da luz UV na degradação do AM.

A curva de fotólise indica baixa degradação, demonstrando que a luz UV sozinha não é suficiente para remover o corante. As membranas PLA/MC sem nanopartículas de ZnO apresentaram leve redução de absorvância, que pode ser atribuída à adsorção física do AM em sua superfície, sem qualquer ação fotocatalítica. Já as membranas recobertas com ZnO promoveram redução

significativa na concentração do corante azul de metileno, principalmente após a exposição à radiação UV, indicando ação fotocatalítica eficiente.

Figura 4 - Degradação do AM pelas diferentes membranas



Fonte: as autoras (2025)

Na Tabela 5 são apresentados os valores de degradação percentual para os experimentos executados que confirmam as tendências observadas nas curvas da Figura 4. A fotólise do AM é ineficiente, com degradação de apenas 2,9%. As membranas sem recobrimento apresentaram baixa remoção do corante atribuída à adsorção superficial, e as membranas PLA/MC/ZnO alcançaram aproximadamente 45% de degradação, evidenciando o efeito da fotocatalise promovida pelo ZnO.

Tabela 5 - Eficiência de degradação de AM pelas membranas

Membrana (PLA/MC)	Degradação (%)
Fotólise	2,9 ± 0,7
70/30	10,5 ± 1,0
60/40	7,7 ± 3,7
50/50	2,9 ± 1,0
70/30/ZnO	45,0 ± 1,0
60/40/ZnO	45,0 ± 9,9
50/50/ZnO	46,5 ± 3,5

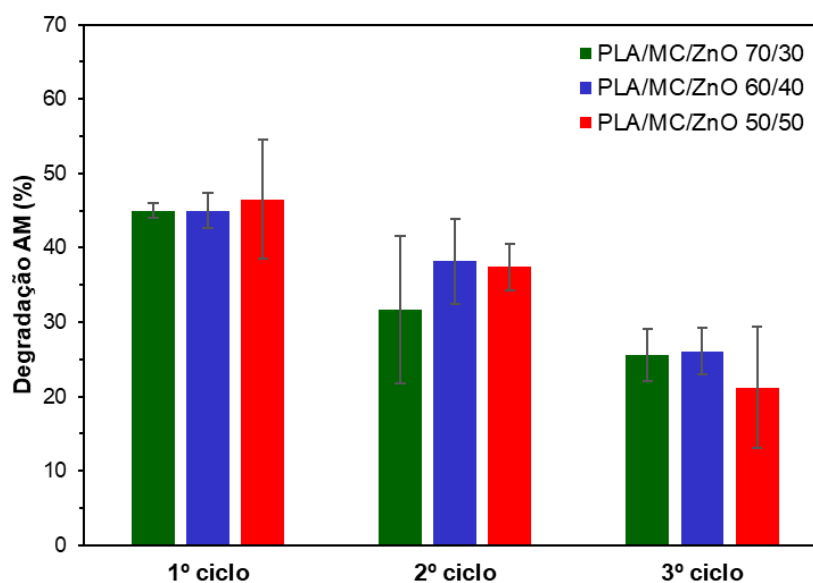
Fonte: as autoras (2025)

Esses resultados são consistentes com valores relatados na literatura para sistemas de fotocatalise heterogênea imobilizados. Soares Sobrinho (2014) verificou cerca de 70% de remoção do corante azul de metileno utilizando ZnO em suspensão aquosa sob radiação UV, em apenas 120 minutos, evidenciando que a forma dispersa do catalisador potencializa o contato com o corante e conseqüentemente, eleva a eficiência do processo. No entanto, a imobilização do ZnO em uma matriz polimérica ainda que resulte em valores absolutos de

degradação menores, oferece vantagens operacionais significativas como a possibilidade de reutilização, facilidade de separação do catalisador e menor risco de contaminação secundária por nanopartículas.

Na Figura 5 é apresentada a reciclabilidade das membranas fotocatalíticas estudadas. Nota-se que a eficiência de degradação diminuiu ao longo dos ciclos para todas as composições, indicando uma perda gradual de atividade fotocatalítica que pode estar associada à saturação da superfície da membrana. No primeiro ciclo, todas as composições apresentaram eficiência de degradação próxima a 45%. No terceiro ciclo as membranas apresentaram degradação entre 25% e 30%, quase metade do valor inicial, o que demonstra um desgaste no desempenho, mas ainda mantém potencial de reutilização em múltiplos ciclos.

Figura 5 - Reciclabilidade das diferentes membranas



Fonte: as autoras (2025)

4 CONCLUSÕES

As membranas de PLA/MC desenvolvidas apresentam desempenho técnico e potencial de aplicação no tratamento de efluentes contaminados por corantes orgânicos como o azul de metileno. Com morfologia e desempenho de filtração influenciados diretamente pela proporção de metilcelulose, onde o aumento da MC promove maior porosidade e conseqüentemente maior fluxo de filtração, porém diminui sua resistência mecânica.

A incorporação de nanopartículas de ZnO nas membranas não compromete suas propriedades hidráulicas, podendo inclusive favorecer a permeabilidade. Apesar da redução na eficiência de rejeição de azul de metileno pelas membranas com nanopartículas de ZnO, isso pode ser compensado pela capacidade fotocatalítica do material na degradação do AM sob radiação UV com eficiência de degradação ainda acima de 20% no terceiro ciclo, o que viabiliza sua reutilização.

Portanto, a combinação entre biodegradabilidade, alta permeabilidade e funcionalização fotocatalítica com ZnO nanoestruturado torna essas membranas soluções sustentáveis e eficientes para aplicação em tecnologias de tratamento avançado de efluentes líquidos contaminados com corantes.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) pelo apoio institucional ao projeto de pesquisa PILGS3553-2023 e pela concessão da bolsa que viabilizou a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AHMADZADEH, Y.; BABAEI, A.; GOUDARZI, A. Assessment of localization and degradation of ZnO nano-particles in the PLA/PCL biocompatible blend through a comprehensive rheological characterization. **Polymer Degradation and Stability**, v. 158, p. 136-147, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D882-02**: Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting. West Conshohocken: ASTM International, 2002.

BANERJEE, S.; DIONYSIOU, D. D.; PILLAI, S. C. Self-cleaning applications of TiO₂ by photoinduced hydrophilicity and photocatalysis. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 176, p. 396-428, 2015.

BRITO, N. N.; SILVA, V. B. M. Processo oxidativo avançado e sua aplicação ambiental. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 1, n. 3, p. 36-47, 2012.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NÓBREGA, R. **Processo de separação com membranas**. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda, 2006.

HARIHARAN, C. Photocatalytic degradation of organic contaminants in water by ZnO nanoparticles. **Applied Catalysis A: General**, v. 304, p. 55-61, 2006.

KUNZ, A. *et al.* Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, v. 25, p. 78-82, 2002.

MIERZWA, J. C. **O uso racional e o reuso como ferramenta para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria**: Estudo de caso Kodak Brasileira. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. **Água na indústria**: Uso racional e reúso. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

OLADOYE, P. O. *et al.* Methylene blue dye: Toxicity and potential technologies for elimination from (waste) water. **Results in Engineering**, 100678, 2022.

RUSTEMBEKKYZY, K.; SABYR, M.; KANAFIN, Y. N.; KHAMKHASH, L.; ATABAEV, T. Sh. Microwave-assisted synthesis of ZnO structures for effective degradation of methylene blue dye under solar light illumination. **RSC Advances**, v. 14, p. 16293-16299, 2024.

SILVA, W. L. L. D.; OLIVEIRA, S. P. D. Modificação das características de adsorção do bagaço de cana para remoção de azul de metileno de soluções aquosas. **Scientia Plena**, v. 8, p. 1-9, 2010.

SOARES SOBRINHO, J. F. A. **Emprego de óxidos de zinco e titânio na oxidação fotocatalítica do azul de metileno**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Tiradentes, Aracaju, 2014.

ZINADINI, S.; ZINATIZADEH, A. A.; RAHIMI, M.; VATANPOUR, V.; ZANGENEH, H. Preparation of a novel antifouling mixed matrix PES membrane by embedding graphene oxide nanoplates. **Journal of Membrane Science**, v. 453, p. 292-301, 2014.