

Remoção de metais pesados por membranas biodegradáveis revestidas com nanopartículas de quitosana

Aliçon Douglas Zaparte | aliconzaparte@gmail.com¹
Jaqueline Suave | jaqueline.suave@ifsc.edu.br²

Edital 02/2025/PROPI - PIBIC

Trabalho de Pesquisa

DT 2 - Meio Ambiente, Agroindústrias, Territórios e Sustentabilidade Socioambiental

Resumo:

A poluição da água por metais pesados é um problema de escala global, em função de sua elevada toxicidade e potencial de bioacumulação, exigindo o desenvolvimento de tecnologias avançadas para sua remoção. Nesse contexto, membranas biopoliméricas funcionalizadas com agentes quelantes surgem como uma alternativa promissora. A quitosana, derivada da quitina, destaca-se como um quelante eficaz. Logo, este trabalho teve como objetivo desenvolver membranas de poli(ácido láctico) (PLA) recobertas com nanopartículas de quitosana (nQS), visando à remoção de íons Cu^{2+} e Pb^{2+} em meio aquoso. As nanopartículas foram caracterizadas por espalhamento dinâmico de luz (DLS), evidenciando tamanho médio de 287 nm e estabilidade moderada. Ensaios de remoção indicaram capacidades adsorptivas de até $285 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ para Cu^{2+} e $802 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ para Pb^{2+} . Esses resultados demonstram o potencial da combinação entre PLA e nQS no desenvolvimento de membranas sustentáveis aplicadas ao tratamento de águas contaminadas por metais pesados.

Palavras-chave: metais pesados; quitosana; poli(ácido láctico); nanotecnologia.

Introdução

A água é essencial à vida e, embora cubra cerca de 70% da superfície terrestre, apenas uma pequena fração é acessível. Além disso, a intensificação das atividades industriais tem contribuído significativamente para a contaminação de corpos hídricos, especialmente por metais pesados.

Elementos como chumbo, cromo, cádmio, mercúrio, arsênio, níquel, cobre e zinco são tóxicos, bioacumulativos e pouco degradáveis, causando impactos ambientais e à saúde, mesmo em baixas concentrações (Bahouch *et al.*, 2026). Diante disso, torna-se imprescindível o desenvolvimento de tecnologias avançadas para o tratamento de águas contaminadas por metais pesados.

¹ Estudante do curso de Engenharia Química do Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Lages.

² Docente do curso de Engenharia Química do Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Lages.

A separação por membranas tem se mostrado como uma técnica promissora para a remoção de íons metálicos. No entanto, a origem fóssil, a baixa biodegradabilidade dos polímeros sintéticos utilizados e a elevada pressão de operação requerida limitam a sustentabilidade desses sistemas. Assim, este trabalho propõe o desenvolvimento e a avaliação de membranas à base de poli(ácido láctico) (PLA), um biopolímero com boas propriedades mecânicas, revestidas com nanopartículas de quitosana (nQS) para a remoção de íons Cu^{2+} e Pb^{2+} em meio aquoso.

Fundamentação teórica

Os processos de separação por membranas acionados por pressão são classificados em microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (OR). Dentre essas tecnologias, as membranas de NF, com diâmetro de poros na faixa de 1 e 10 nm, são capazes de remover íons multivalentes, enquanto as membranas de OR, caracterizadas por poros inferiores a 1 nm, podem remover inclusive íons monovalentes (Mashhadikhan *et al.*, 2024).

Apesar da elevada eficiência de separação, as membranas convencionais apresentam limitações relevantes, tais como o alto custo de aquisição e operação, além da utilização predominante de polímeros de origem fóssil. Atualmente, esses polímeros têm sido considerados contaminantes persistentes, em razão de sua elevada resistência à degradação e consequente permanência no ambiente. Nesse contexto, a investigação de materiais alternativos, especialmente polímeros biodegradáveis, constitui uma demanda atual no campo de separação por membranas.

O poli(ácido láctico) destaca-se como um biopolímero de origem renovável, obtido a partir de fontes vegetais, que apresenta biodegradabilidade. Além disso, possui propriedades térmicas e mecânicas comparáveis às de polímeros derivados do petróleo, bem como adequada flexibilidade e versatilidade para a produção de membranas por diferentes técnicas de processamento (Vatanpour *et al.*, 2022).

Entretanto, visando aprimorar a eficiência de remoção de metais pesados por membranas de PLA, propõe-se, neste trabalho, a funcionalização de sua superfície com nanopartículas de quitosana. A quitosana é um derivado desacetilado da quitina, um polissacarídeo amplamente distribuído na natureza, caracterizando-se como um

biopolímero policatiônico contendo grupos hidroxila ($-\text{OH}$) e amino ($-\text{NH}_2$). Esses grupos funcionais conferem à quitosana elevada capacidade de complexação de íons metálicos (Edward; Yuvaraj; Kapoor, 2024). Assim, o revestimento de membranas de PLA com nQS possibilita a combinação da estrutura porosa e das propriedades mecânicas da matriz polimérica com a elevada área superficial e os sítios ativos da quitosana em escala nanométrica, potencializando a remoção de metais pesados.

Procedimentos metodológicos

As membranas foram produzidas pelo método de evaporação do solvente, usando 0,75 g de PLA e 0,25 g de metilcelulose (MC) dissolvidos em 10 mL de clorofórmio. A mistura obtida foi vertida em placa de Petri de 90 mm de diâmetro e mantida em capela para a evaporação do solvente e consequente formação da membrana sólida. Após, as membranas foram submetidas à lavagem com água deionizada para remoção completa da MC, que atuou como agente porogênico. O raio médio dos poros das membranas foi determinado pela equação de Guerout-Elford-Ferry descrita em Zinadini *et al.* (2014).

As nQS foram preparadas pelo método de gelificação iônica, adaptado de Jiang *et al.* (2024): 50 mL de solução de quitosana ($1,0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, pH 4,7) em ácido acético 1%, receberam, gota a gota, 10 mL de solução de tripolifosfato de sódio ($1,0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$), sob agitação a 10.000 rpm em homogeneizador ultra-Turrax, resultando em uma suspensão de nanopartículas. Em seguida, 5 mL da suspensão foi pulverizada, por meio de aerógrafo, na superfície superior de cada membrana de PLA. A aplicação foi realizada de forma fracionada, em alíquotas de 0,5 mL, totalizando dez aplicações sucessivas, com intervalos de secagem entre cada pulverização. As nQS foram caracterizadas por espalhamento dinâmico de luz (DLS), utilizando um Zetasizer Pro (Malvern Instruments), com determinação do tamanho de partícula, índice de polidispersão (PDI) e potencial zeta.

As membranas puras e recobertas foram avaliadas quanto à remoção de íons Pb^{2+} e Cu^{2+} em soluções aquosas de $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, preparadas a partir de nitrato de chumbo(II) e sulfato de cobre(II). Nos ensaios, 25 mL de cada solução foram filtrados à pressão atmosférica, em três ciclos sucessivos de recirculação, de 10 minutos cada. A eficiência

de remoção foi determinada por espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDX), utilizando um EDX-7200 (Shimadzu).

Resultados e discussões

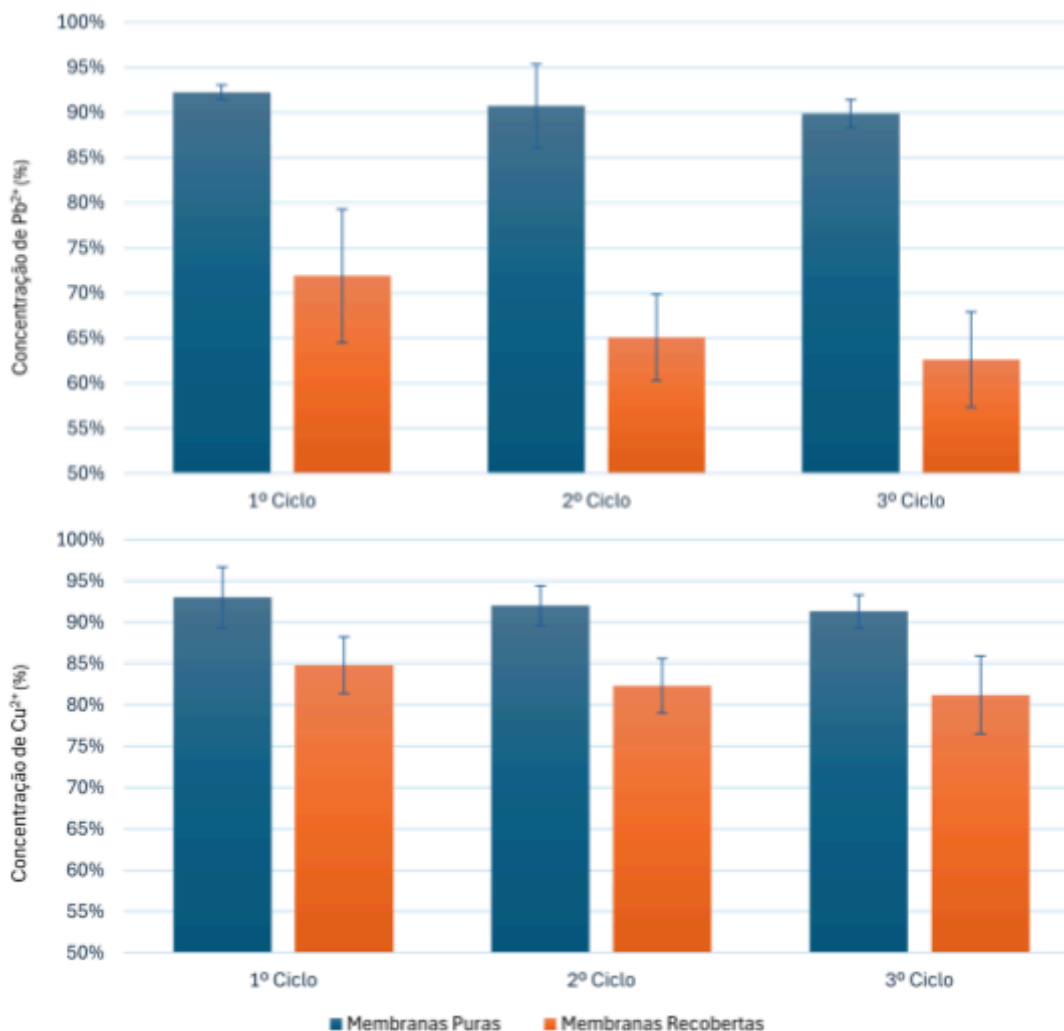
O raio médio dos poros das membranas de PLA foi de 328 ± 21 nm, o que as classifica como membranas de microfiltração (Mashhadikhan *et al.*, 2024). Nessa faixa elevada de tamanho de poros, a remoção de espécies iônicas por exclusão de tamanho é limitada ou inexistente.

As nQs apresentaram diâmetro médio de 287 ± 16 nm, PDI de $0,47 \pm 0,02$ e potencial zeta de 23 ± 1 mV. Valores de PDI inferiores a 0,05 indicam amostras altamente monodispersas, enquanto valores superiores a 0,7 são associados a distribuições de tamanho amplas (Rubio *et al.* 2019). Portanto, o valor obtido para as nQs preparadas sugere uma distribuição de tamanho moderadamente heterogênea. Com relação ao potencial zeta, valores inferiores a -30 mV ou superiores a +30 mV indicam sistemas fortemente carregados, enquanto valores entre -10 e +10 mV correspondem a cargas próximas da neutralidade (Clogston; Patri, 2011). Assim, o valor obtido situa-se em uma faixa intermediária, sugerindo estabilidade eletrostática moderada e possibilidade de aglomeração das nQS ao longo do tempo.

Os resultados de eficiência de remoção dos íons metálicos são apresentados na Figura 1. De forma geral, observa-se que as membranas de PLA puras, isto é, sem nQS, apresentaram remoção média de cerca de 10% da concentração inicial dos íons, independente do metal avaliado. Esse comportamento sugere a existência de interações químicas entre os íons metálicos e a matriz polimérica, uma vez que o tamanho elevado dos poros limita a retenção por exclusão de tamanho.

Por outro lado, as membranas funcionalizadas com nQS apresentaram desempenho superior, alcançando, ao final de três ciclos de filtração, remoções de aproximadamente 37% para Pb^{2+} e 19% para Cu^{2+} . Esses resultados indicam não apenas o efeito positivo da funcionalização com quitosana, mas também uma possível seletividade do sistema, com maior afinidade pelos íons Pb^{2+} .

Figura 1 – Concentração residual de Pb^{2+} e Cu^{2+} ao longo dos ciclos de filtração em membranas de PLA puras e recobertas com nQs



Fonte: elaborada pelos autores (2026).

A maior capacidade de remoção para as membranas com nQS pode ser atribuída à quimissorção, envolvendo mecanismos de quelação da quitosana. Determinou-se que a capacidade adsortiva foi de $802 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para Pb^{2+} e de $285 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para Cu^{2+} , valores muito superiores aos reportados na literatura para carvões ativados, que apresentam capacidades de cerca de 69 e $26 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente (Abreu *et al.*, 2015; Zanin; Figueiredo; Carvalho, 2009).

Considerações finais

Os resultados obtidos indicam que o objetivo proposto foi alcançado, demonstrando o potencial da utilização de nanopartículas de quitosana no aprimoramento do desempenho de membranas de PLA para a remoção de metais pesados. Dessa forma, o estudo reforça a viabilidade do uso combinado de biopolímeros de baixo custo, como o poli(ácido láctico) e a quitosana, no desenvolvimento de tecnologias de separação mais ambientalmente adequadas, com potencial de operação em condições brandas, dispensando a aplicação de pressão externa.

Referência ao fomento recebido

Os autores agradecem ao IFSC e ao CNPq pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsa de iniciação científica.

Referências

ABREU, M. Aplicação de carvão ativado de bagaço de cana-de-açúcar na adsorção de Cd(II) e Cu(II). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 18., 2015, São Carlos. **Anais [...]** São Carlos: Ufscar, 2015. p. 749-769.

BAHOUCH, M. *et al.* A review on the adsorptive removal of heavy metals from wastewater using eco-friendly adsorbents. **Next Materials**, v. 12, art. 102066, 2026.

CLOGSTON, J. D.; PATRI, A. K. Zeta potential measurement. **Methods In Molecular Biology**, v. 697, p. 63-70, 2011.

EDWARD, K.; YUVARAJ, K. M.; KAPOOR, A. Chitosan-blended membranes for heavy metal removal from aqueous systems: A review of synthesis, separation mechanism, and performance. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 279, art. 134996, 2024.

JIANG, T. *et al.* Synthesis, characterization of chitosan/tripolyphosphate nanoparticles loaded with 4-chloro-2-methylphenoxyacetate sodium salt and its herbicidal activity against *Bidens pilosa* L. **Scientific Reports**, v. 14, art. 18754, 2024.

MASHHADIKHAN, S. *et al.* Breaking temperature barrier: Highly thermally heat resistant polymeric membranes for sustainable water and wastewater treatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 189, art. 113902, 2024.

RUBIO, A. L. *et al.* **Nanomaterials for food applications**. Amsterdã: Elsevier Inc., 2019.



VATANPOUR, V. *et al.* Polylactic acid in the fabrication of separation membranes: A review. **Separation and Purification Technology**, v. 296, art. 121433, 2022.

ZANIN, C. I. de C. B.; FIGUEIREDO, F. C. A.; CARVALHO, W. A. Remoção de chumbo(II) em sistemas contínuos por carvão ativado com vapor. **Química Nova**, v. 32, n. 9, p. 2318-2322, 2009.

ZINADINI, S. *et al.* Preparation of a novel antifouling mixed matrix PES membrane by embedding graphene oxide nanoplates. **Journal of Membrane Science**, v. 453, p. 292-301, 2014.