

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE MEMBRANAS POLIMÉRICAS BIODEGRADÁVEIS APLICADAS A PROCESSOS DE MICROFILTRAÇÃO

Luiza Cristina Almeida Meurer¹
Jaqueline Suave²

Resumo: O desenvolvimento de membranas biodegradáveis tem ganhado destaque como alternativa sustentável às membranas sintéticas tradicionalmente utilizadas em processos de microfiltração. Neste trabalho, foram produzidas e caracterizadas membranas de poli(ácido láctico) (PLA) utilizando polivinilpirrolidona (PVP) como agente porogênico. As membranas foram preparadas pelo método de evaporação do solvente, seguido de lavagem com água para remoção da PVP e consequente geração de poros. Posteriormente, as membranas foram caracterizadas quanto à morfologia, porosidade, tamanho médio de poros, fluxo de permeado aquoso, propriedades mecânicas e estabilidade térmica. O desempenho funcional foi avaliado por meio de ensaios de microfiltração utilizando uma suspensão coloidal de sulfato de bário (BaSO_4) como modelo de partículas inorgânicas. Os resultados indicaram que as membranas biodegradáveis produzidas apresentaram características adequadas para aplicações em processos de microfiltração, combinando eficiência técnica e menor impacto ambiental.

Palavras-Chave: Membranas de separação. Microfiltração. Poli(ácido láctico). Polímeros biodegradáveis. Separação de coloides.

1 INTRODUÇÃO

Os processos de separação por membranas têm se consolidado como tecnologias eficientes e versáteis para aplicações industriais, ambientais e biotecnológicas, devido à elevada eficiência de separação, facilidade de operação, modularidade e possibilidade de operação contínua. Embora esses processos requerem a aplicação de pressão para promover o transporte através da membrana, o consumo energético geralmente é inferior ao de métodos convencionais baseados em mudanças de fase, como destilação e evaporação (Strathmann, 2011). Entre as diferentes técnicas disponíveis, a microfiltração destaca-se pela capacidade de remover partículas em suspensão, microrganismos, coloides e outros contaminantes presentes em correntes líquidas. As membranas de microfiltração apresentam, tipicamente, diâmetros de poros na faixa de 0,1 a 10 μm , sendo amplamente empregadas no tratamento de água, efluentes industriais, alimentos e bebidas (Mulder, 2012; Zhang *et al.*, 2022).

Tradicionalmente, as membranas utilizadas nesses processos são produzidas a partir de polímeros sintéticos derivados de fontes petroquímicas, como polissulfona (PSF), polietersulfona (PES), poliacrilonitrila (PAN) e fluoreto de polivinilideno (PVDF). Embora esses materiais apresentem boas propriedades mecânicas e químicas, sua baixa biodegradabilidade e a dependência de recursos não

¹ Acadêmica do curso de Engenharia Química do Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Lages; luiza.m09@aluno.ifsc.edu.br

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

renováveis têm despertado preocupações relacionadas ao impacto ambiental associado à sua produção e descarte (Moradi *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o desenvolvimento de membranas biodegradáveis tem recebido crescente atenção da comunidade científica como alternativa mais sustentável aos materiais convencionais. Entre os biopolímeros disponíveis, o poli(ácido láctico) (PLA) destaca-se por ser obtido a partir de fontes renováveis, apresentar biodegradabilidade, biocompatibilidade e boas propriedades mecânicas, características que favorecem sua aplicação na produção de membranas para processos de separação (Bashir *et al.*, 2022). Além disso, o PLA possui boa processabilidade e pode ser empregado na obtenção de estruturas porosas adequadas para aplicações em filtração e separação de partículas, tornando-se um material promissor para o desenvolvimento de membranas ambientalmente sustentáveis.

Uma estratégia amplamente utilizada para promover a formação de porosidade em membranas poliméricas consiste na incorporação de aditivos hidrofílicos. A polivinilpirrolidona (PVP) é um dos aditivos mais empregados para essa finalidade. Durante o processo de fabricação, a PVP é incorporada à matriz polimérica e posteriormente removida por lavagem, promovendo a formação de estruturas mais porosas e favorecendo o aumento do fluxo de permeado (Chen *et al.*, 2022). Além disso, a utilização de diferentes concentrações de PVP permite controlar características importantes da membrana, como porosidade, tamanho médio de poros e desempenho de filtração.

Estudos recentes demonstram que membranas baseadas em PLA associadas a agentes porogênicos apresentam resultados promissores em aplicações de microfiltração, combinando desempenho técnico satisfatório com menor impacto ambiental (Moradi *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023). No entanto, ainda são necessários estudos que avaliem a influência da concentração do agente formador de poros sobre as propriedades morfológicas, mecânicas, térmicas e de separação dessas membranas, contribuindo para a otimização de suas condições de preparo e aplicação.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar membranas biodegradáveis de PLA contendo diferentes concentrações de PVP K-30 como agente formador de poros, avaliando a influência desse aditivo sobre as propriedades mecânicas, térmicas, químicas e morfológicas das membranas, bem como seu desempenho em processos de microfiltração utilizando uma suspensão coloidal de sulfato de bário como composto modelo.

2 METODOLOGIA

2.1 Preparo das membranas

As membranas foram preparadas pelo método de evaporação do solvente, utilizando diferentes proporções de PVP K-30 (Dinâmica Química Contemporânea). A membrana M1 foi produzida com 0,5 g de PLA (Ingeo® 4043D, NatureWorks) e 0,2 g de PVP K-30; a M2 com 0,5 g de PLA e 0,3 g de PVP K-30; e a M3 com 0,5 g de PLA e 0,4 g de PVP K-30, todas dissolvidas em 10 mL de clorofórmio P.A. (Synth).

As soluções permaneceram sob agitação magnética por 24 horas até completa homogeneização. Em seguida, foram vertidas em placas de Petri e mantidas em capela de exaustão por 24 horas para evaporação do solvente e

formação das membranas. Na sequência, as membranas foram lavadas em banho ultrassônico com água deionizada para remoção da PVP, sendo posteriormente secas a temperatura ambiente e armazenadas para caracterização.

2.2 Caracterização das membranas

2.2.1 Porosidade

A porosidade foi determinada pelo método gravimétrico descrito por Zinadini *et al.* (2014). Em triplicata, seções de 2×2 cm das membranas foram inicialmente acondicionadas em dessecador por 24 horas para remoção da umidade adsorvida. Após esse período, as amostras foram pesadas e, em seguida, imersas em água deionizada por 24 horas. Ao final da imersão, as membranas foram novamente pesadas. 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 efetiva da membrana ($4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$), l é espessura da membrana e d_w é a densidade da água a 25 °C (997 kg/m^3):

$$\epsilon = \frac{m_1 - m_2}{A \times l \times d_w} \quad (\text{Eq. 1})$$

2.2.2 Raio médio de poros

Para determinar o raio médio de poros (r_m) das membranas, utilizou-se a equação de Guerout-Elford-Ferry (Equação 2), baseada no fluxo de permeado aquoso e na porosidade:

$$r_m = \sqrt{\left(\frac{(2,9 - 1,75\epsilon)8\eta l Q}{\epsilon \times A \times \Delta P} \right)} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde η é a viscosidade da água ($8,9 \times 10^{-4} \text{ Pa s}$), Q é o volume de água filtrada pelo tempo (m^3/s), A é a área efetiva de filtração ($1,26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$) e ΔP é a pressão de operação da membrana obtida por meio do manômetro acoplado à bomba de vácuo utilizada nos ensaios de filtração (MPa).

2.2.3 Análise morfológica

A morfologia das membranas foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um equipamento Jeol JCM-7000. Para a análise, as amostras foram fixadas em um porta amostra usando fita dupla face de carbono e, posteriormente, metalizadas com ouro.

2.2.4 Fluxo de permeado aquoso

Para a determinação do fluxo de permeado aquoso, 50 mL de água deionizada foram filtrados em um sistema de filtração à vácuo contendo a membrana acoplada. Todos os ensaios foram feitos em triplicata. O fluxo de permeado, por sua vez, foi calculado através da Equação 3, também descrita por Zinadini *et al.* (2014):

$$F = \frac{V}{A \times \Delta t} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde F é o fluxo de permeado ($\text{L/m}^2\text{h}$), V é o volume de líquido permeado (L), A é a área efetiva da membrana ($1,26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$) e Δt é o tempo total de filtração (h).

2.2.5 Propriedades mecânicas e estabilidade térmica

O módulo de elasticidade, a resistência à tração e o alongamento na ruptura das membranas foram determinados segundo a norma ASTM D882-02, utilizando uma máquina de ensaio universal computadorizada Impac AEL-A-100, equipada com uma célula de carga de 100 kgf. Para cada membrana, 10 seções de 70×25 mm foram ensaiadas, cujas espessuras foram aferidas com um micrômetro digital.

As membranas também foram submetidas simultaneamente à análise termogravimétrica (TGA) e à análise térmica diferencial (DTA) em um analisador Shimadzu DTG-60. As amostras foram aquecidas da temperatura ambiente até 600°C , a uma taxa de 10°C/min , sob atmosfera de nitrogênio.

2.2.6 Espectroscopia de infravermelho

As análises de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foram feitas para identificar possíveis alterações químicas na estrutura do PLA decorrentes da adição de PVP, utilizando um espectrômetro Shimadzu IRSpirit. Os ensaios foram conduzidos pelo método de reflexão total atenuada (ATR), na faixa espectral de 4.000 a 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras.

2.3 Eficiência de rejeição

O desempenho das membranas produzidas, em termos de rejeição de partículas coloidais, foi avaliado pela Equação 4. Para os ensaios, foi utilizada uma dispersão coloidal inorgânica de sulfato de bário na concentração de 500 mg/L , preparada a partir de cloreto de bário e ácido sulfúrico.

Os testes foram conduzidos em um sistema de filtração a vácuo, utilizando-se 50 mL da dispersão como alimentação. Após a filtração, o permeado coletado foi analisado quanto à turbidez com auxílio de um turbidímetro digital (AKSO). Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

$$R(\%) = \left(1 - \frac{T_p}{T_f} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

em que $R(\%)$ representa a eficiência de rejeição, T_p a turbidez do permeado e T_f a turbidez da suspensão de alimentação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Preparo das membranas

As membranas M1, M2 e M3 preparadas pela técnica de evaporação de solvente podem ser observadas na Figura 1. Nota-se que a concentração de PVP influenciou diretamente nas características visuais e estruturais das membranas. A M1, com $0,2 \text{ g}$ de PVP, apresentou melhor homogeneidade e uniformidade

superficial. A membrana M2, contendo 0,3 g de PVP, também apresentou aspecto uniforme, porém com maior dificuldade de remoção das placas de Petri. Já a membrana M3, com 0,4 g de PVP, apresentou bolhas e pequenos furos na superfície, além de maior dificuldade de remoção, indicando que o aumento da concentração de PVP favoreceu a formação de estruturas mais porosas e menos uniformes.

Figura 1 - Membranas poliméricas: a) M1, b) M2 e c) M3



Fonte: As autoras (2026).

3.2 Caracterização das membranas

3.2.1 Porosidade e raio médio de poros

Os resultados de porosidade e raio médio de poros (Tabela 1) indicaram uma tendência de aumento desses parâmetros com o aumento da quantidade de PVP utilizada na preparação das membranas. Entretanto, os elevados desvios-padrão observados, especialmente para a porosidade, sugerem elevada variabilidade entre as amostras, de modo que a confirmação de diferenças estatisticamente significativas dependeria da aplicação de testes estatísticos específicos.

A tendência observada pode estar relacionada à atuação da PVP como agente formador de poros. Durante as etapas de lavagem, a PVP é removida da matriz polimérica, favorecendo a formação de vazios e canais internos na estrutura da membrana de PLA. Como consequência, quantidades maiores de PVP utilizadas na etapa de preparo tendem a gerar estruturas mais porosas e com maiores dimensões de poros.

Tabela 1 - Porosidade e raio médio de poros das diferentes membranas

Membrana	Porosidade (%)	Raio médio de poros (nm)
M1	$31,1 \pm 7,7$	$58,7 \pm 3,3$
M2	$36,6 \pm 8,5$	$69,1 \pm 5,1$
M3	$46,8 \pm 12,4$	$99,8 \pm 15,5$

Fonte: As autoras (2026).

Em relação ao raio médio de poros das membranas, os resultados também indicaram tendência de aumento juntamente com a elevação da concentração de

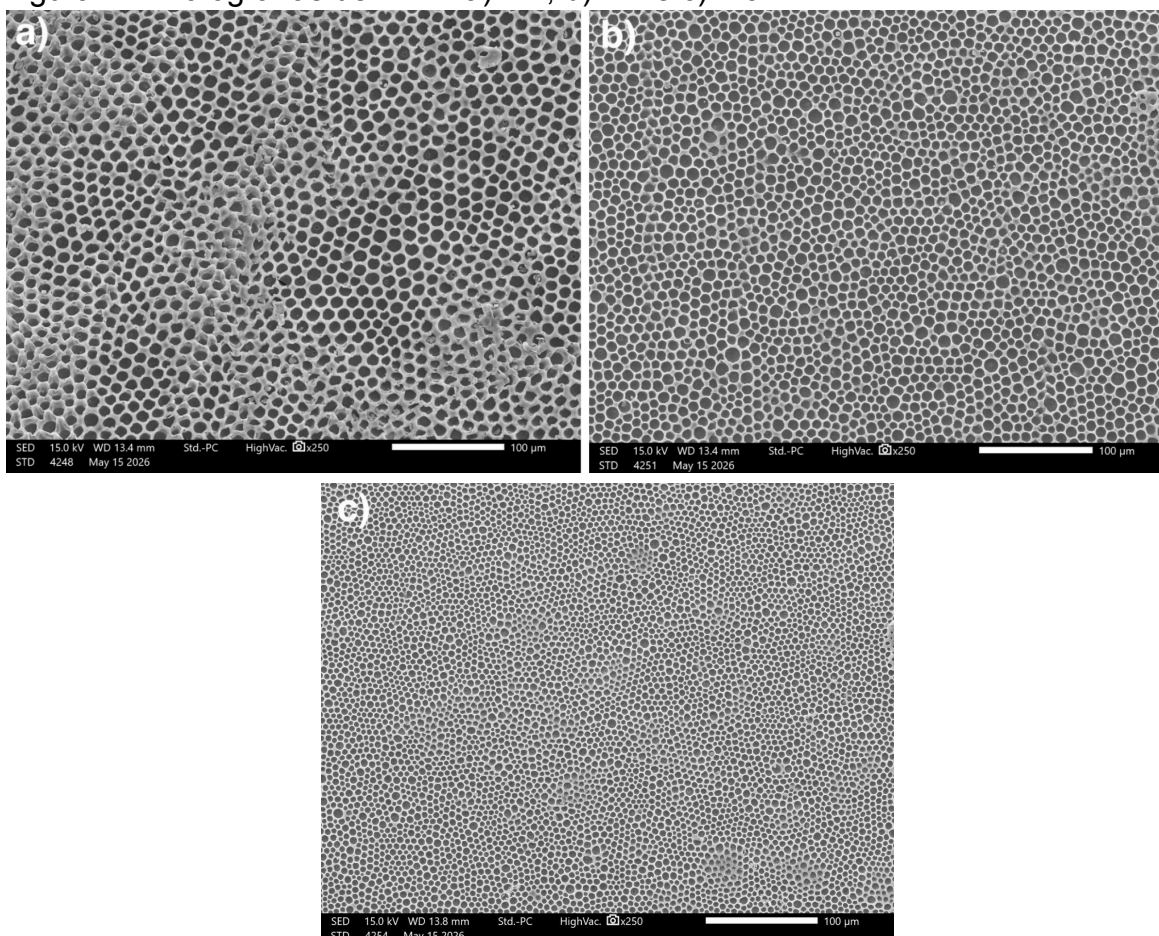
PVP. Isso sugere que o agente porogênico não apenas contribuiu para a formação de maior quantidade de poros, mas também favoreceu o desenvolvimento de poros de maiores dimensões.

Considerando que os valores obtidos correspondem ao raio médio dos poros, os diâmetros médios estimados foram de aproximadamente 117,4 nm para a membrana M1, 138,2 nm para a membrana M2 e 199,6 nm para a membrana M3. Portanto, os diâmetros obtidos situam-se na faixa inferior normalmente associada aos processos de microfiltração, que compreendem membranas com poros entre aproximadamente 0,1 e 10 μm . Dessa forma, as membranas produzidas podem ser classificadas como membranas de microfiltração, demonstrando potencial para aplicação em processos de separação de partículas suspensas e coloides presentes em meios aquosos.

3.2.2 Análise morfológica

As micrografias de MEV (Figura 2) indicam que todas as membranas apresentam superfície densamente recoberta por poros, evidenciando a efetividade do processo de formação da estrutura porosa. Além disso, observa-se uma tendência de redução do tamanho dos poros superficiais com o aumento da concentração de PVP na formulação, indicando que a maior incorporação do agente porogênico influenciou a morfologia superficial das membranas, promovendo a formação de poros mais numerosos e de menores dimensões.

Figura 2 - Micrografias de MEV: a) M1, b) M2 e c) M3



Fonte: As autoras (2026).

De acordo com Lalia *et al.* (2013), a incorporação de aditivos hidrofílicos, como a PVP, influencia diretamente a morfologia das membranas, promovendo maior formação e interconectividade dos poros devido à sua posterior solubilização e extração da matriz polimérica. As micrografias obtidas por MEV indicaram uma tendência de redução do tamanho dos poros superficiais com o aumento da concentração de PVP. Entretanto, os resultados de raio médio de poros (Tabela 1) mostraram tendência oposta, com aumento desse parâmetro para as membranas contendo maiores quantidades de PVP. espessura da membrana. Dessa forma, embora a superfície apresente poros aparentemente menores e mais numerosos, a estrutura interna pode apresentar canais mais amplos e interconectados, resultando em maiores valores de raio médio de poros. Esse comportamento também é compatível com a tendência de aumento da porosidade observada para as membranas produzidas com maiores quantidades de PVP.

3.2.3 Fluxo de permeado aquoso

Nos ensaios de fluxo de água permeada, observou-se aumento progressivo da permeabilidade das membranas conforme o aumento da concentração de PVP na formulação (Tabela 2). Esse comportamento está diretamente relacionado ao aumento da porosidade e do raio médio de poros das membranas, conforme observado na Tabela 1. Com o aumento da quantidade de vazios internos na matriz polimérica, ocorreu menor resistência à passagem da água através da membrana, favorecendo o fluxo de permeado.

Os valores de fluxo obtidos neste trabalho são compatíveis com aqueles reportados na literatura para membranas de microfiltração utilizadas em processos de separação aquosa. Segundo Mulder (2012), membranas microporosas apresentam elevada permeabilidade hidráulica devido à presença de poros relativamente grandes e interconectados, podendo alcançar fluxos de centenas de L/m²h, dependendo da estrutura da membrana e das condições operacionais. Lalia *et al.* (2013) também relatam que o aumento da porosidade e da conectividade dos poros favorece significativamente o transporte de água através da membrana, resultando em maiores valores de fluxo permeado. Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo corroboram o comportamento esperado para membranas de microfiltração, evidenciando a influência da estrutura porosa sobre o desempenho de permeação.

Tabela 2 - Fluxo de permeado das diferentes membranas

Membrana	Fluxo de água permeada (L/m ² h)
M1	83,9 ± 8,7
M2	191,7 ± 29,6
M3	537,0 ± 84,4

Fontes: As autoras (2026).

3.2.4 Propriedades mecânicas

Conforme indica a Tabela 3, o uso de diferentes concentrações de PVP influenciou diretamente a resistência mecânica das membranas. As membranas

contendo menores concentrações do agente porogênico (M1 e M2) apresentaram comportamento mecânico semelhante, com maior módulo de elasticidade e maior capacidade de deformação antes da ruptura quando comparadas à M3. Esse comportamento indica uma estrutura polimérica mais compacta e organizada, favorecendo a integridade mecânica dessas membranas durante os ensaios.

Tabela 3 - Propriedade mecânicas das diferentes membranas

Membrana	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)
M1	402,8 ± 73,1	11,4 ± 2,9	50 ± 13,9
M2	445,2 ± 57,4	8,6 ± 2,0	48,3 ± 11,4
M3	242,8 ± 67,9	8,1 ± 2,4	6,4 ± 2,1

Fonte: As autoras (2026).

A redução do módulo de elasticidade e do alongamento na ruptura para a membrana produzida com a maior concentração de PVP pode estar associada ao aumento da porosidade e do raio médio de poros. Embora essa característica favoreça a permeabilidade da membrana, ela também reduz a quantidade de material sólido disponível para suportar esforços mecânicos, tornando a estrutura mais frágil e menos flexível. Esse comportamento é evidenciado pela expressiva redução do alongamento na ruptura da membrana M3 em comparação às demais formulações.

Em relação à resistência à tração, os resultados permaneceram relativamente constantes entre as diferentes membranas. Considerando os desvios-padrão obtidos, não é possível afirmar que houve diferenças significativas nesse parâmetro em função da concentração de PVP. Dessa forma, embora a maior porosidade tenha afetado a rigidez e a capacidade de deformação das membranas, a resistência máxima suportada antes da ruptura manteve-se semelhante entre as formulações avaliadas.

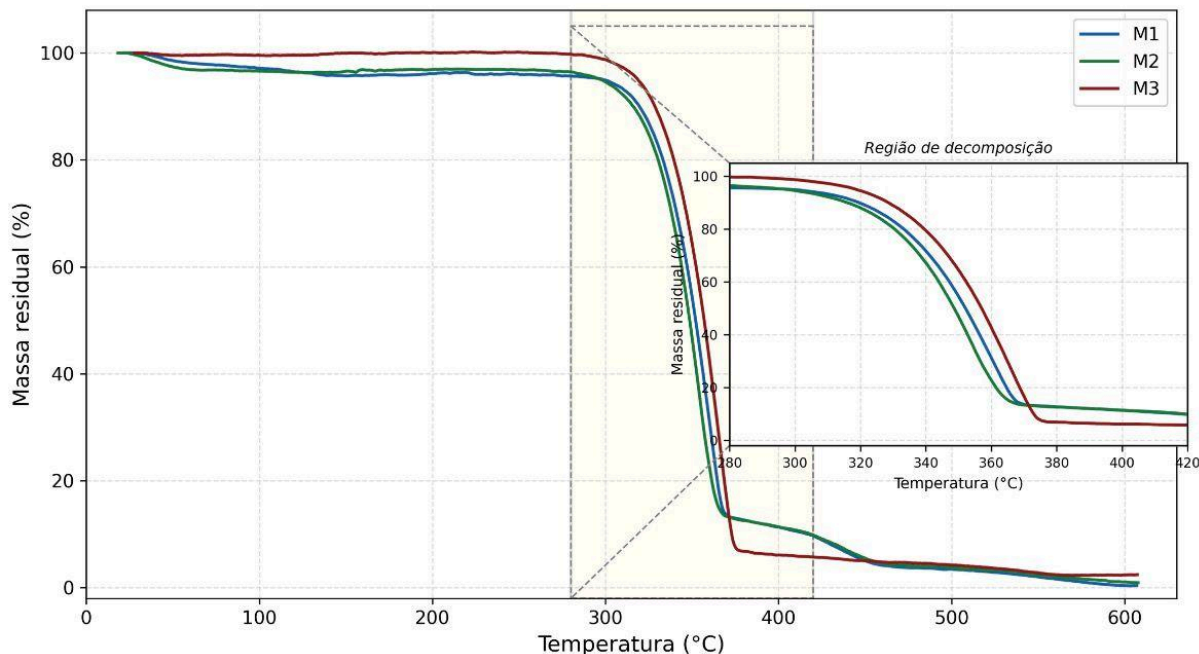
Os valores de módulo de elasticidade obtidos neste estudo (242,8 a 445,2 MPa) encontram-se na mesma ordem de grandeza daqueles reportados para diversas membranas poliméricas utilizadas em processos de microfiltração, produzidas a partir de polímeros como polisulfona (PSF), polietersulfona (PES) e fluoreto de polivinilideno (PVDF). Segundo Lalia *et al.* (2013), a incorporação de agentes formadores de poros geralmente promove aumento da permeabilidade, porém tende a reduzir a rigidez mecânica devido à maior fração de vazios presentes na estrutura. Dessa forma, os resultados obtidos indicam que as membranas produzidas apresentam propriedades mecânicas compatíveis com aquelas normalmente observadas em membranas microporosas para aplicações em filtração, mantendo resistência mecânica adequada mesmo com o aumento da porosidade.

3.2.5 Estabilidade térmica

A análise termogravimétrica (TGA) e a análise térmica diferencial (DTA) foram empregadas em conjunto para avaliar a estabilidade térmica das diferentes membranas, bem como para identificar os eventos físicos e químicos associados às

perdas de massa observadas ao longo do aquecimento. As curvas termogravimétricas obtidas estão apresentadas na Figura 3, incluindo um ampliado da região de decomposição térmica entre 280 e 420 °C.

Figura 3 - Curvas de TGA das membranas M1, M2 e M3



Fonte: As autoras (2026).

As curvas de TGA revelaram três estágios distintos de perda de massa para as membranas M1 e M2, enquanto a membrana M3 apresentou comportamento diferenciado desde o início do aquecimento. No primeiro estágio, compreendido entre aproximadamente 25 e 150 °C, verificou-se uma perda de massa de cerca de 2-4% para as membranas M1 e M2, ao passo que a membrana M3 praticamente não apresentou variação de massa nessa faixa, mantendo massa residual superior a 99,5% até 150 °C. Essa perda inicial, observada exclusivamente para as membranas M1 e M2, é atribuída à liberação de água adsorvida. A maior quantidade de umidade retida nas M1 e M2 pode estar relacionada à presença de poli(vinilpirrolidona) residual nessas amostras, uma vez que a PVP é um polímero de caráter higroscópico, com elevada afinidade pela água (Bühler, 2005). A ausência desse fenômeno na M3 indica que essa membrana não contém PVP residual em quantidade significativa, ou que foi submetida a condições de processamento que favoreceram a sua completa remoção.

No intervalo entre 150 e 280 °C, as três membranas apresentaram estabilidade térmica, com massa residual relativamente constante. Esse comportamento é esperado para membranas à base de PLA, cujo início dos processos de degradação térmica ocorre em temperaturas superiores a 200 °C (Farah; Anderson; Langer, 2016). Assim, o segundo estágio de perda de massa, que corresponde ao primeiro evento de decomposição térmica, foi observado entre aproximadamente 300 e 380 °C para as três membranas, sendo atribuído à degradação do PLA. Conforme evidenciado no ampliado da Figura 3, as temperaturas de início de decomposição diferem ligeiramente entre as membranas: a M2 apresentou o início mais precoce (~316 °C), seguida pela M1 (~320 °C), enquanto a M3 demonstrou maior estabilidade, com início da queda abrupta de

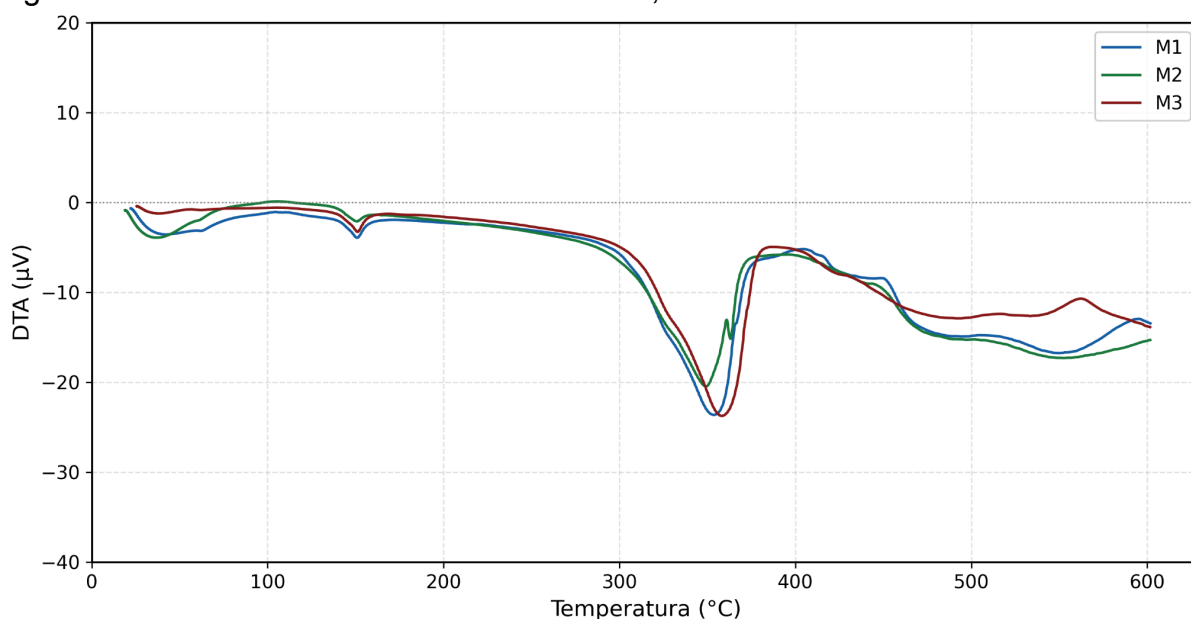
massa em torno de 329 °C. Esse comportamento sugere que a membrana M3, por não conter PVP residual, possui maior integridade estrutural do PLA, o que se reflete em maior resistência térmica nessa etapa.

Após o primeiro estágio de decomposição, observou-se a formação de um platô de massa entre aproximadamente 380 e 420 °C nas curvas das membranas M1 e M2, com massa residual em torno de 9-12%. Esse platô é interpretado como a massa de PVP residual que permanece após a degradação completa do PLA, uma vez que a temperatura de decomposição da PVP é superior à do PLA (Bühler, 2005). Esse resultado indica que o processo de extração da PVP utilizado na fabricação das membranas não foi completamente eficiente para essas amostras, ao contrário do observado para a M3, que não apresenta platô equivalente, sugerindo teor de PVP residual desprezível ou ausente.

O segundo evento de decomposição, observado entre 420 e 500 °C nas membranas M1 e M2, é atribuído à degradação térmica do PVP residual. Ao final da análise, as três membranas apresentaram massa residual inferior a 3%, indicando que o material é predominantemente orgânico, com ausência de componentes inorgânicos em quantidade expressiva. O resíduo remanescente é atribuído à formação de carvão carbonáceo, produto típico da decomposição incompleta de polímeros durante o aquecimento em altas temperaturas (Levchik; Weil, 2005).

Na Figura 4 estão apresentadas as curvas de DTA obtidas para as diferentes membranas. Os eventos estão diretamente relacionados às perdas de massa identificadas nas curvas de TGA.

Figura 4 - Curvas de DTA das membranas M1, M2 e M3



Fonte: As autoras (2026).

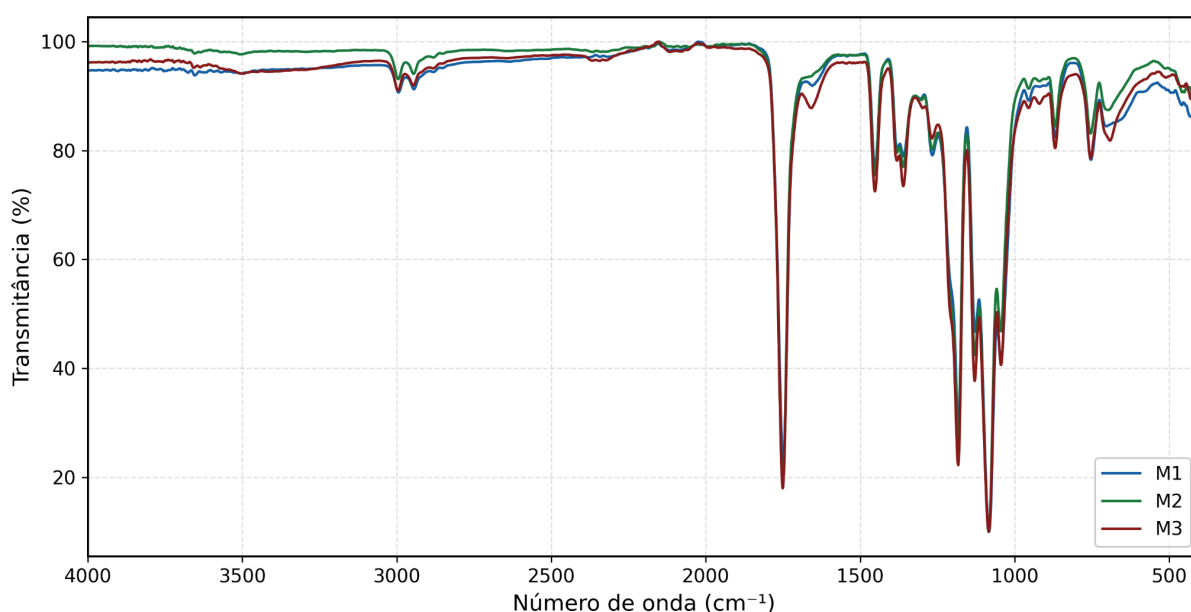
Entre 25 e 100 °C, M1 e M2 apresentaram pico endotérmico mais profundo que M3, associado à evaporação de água adsorvida pela PVP residual higroscópica presentes nessas amostras (Brown, 2001). O pico endotérmico observado em aproximadamente 150 °C em todas as amostras é atribuído ao processo de fusão do PLA. Entre 300 e 380 °C, às três membranas exibiram pico endotérmico intenso (~-23 μV), correspondente à decomposição térmica do PLA, com M3 ligeiramente deslocada para temperaturas mais altas, indicando maior estabilidade térmica,

conforme relatado anteriormente pela análise de TGA (Farah; Anderson; Langer, 2016). Por fim, entre 420 e 500 °C, M1 e M2 apresentaram um segundo evento endotérmico referente à degradação da PVP residual, ausente em M3, confirmando a ausência desse componente nessa membrana (Bühler, 2005).

3.2.6 Espectroscopia de infravermelho

A caracterização das membranas M1, M2 e M3 por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR-ATR) foi realizada com o objetivo de identificar os grupos funcionais presentes nas amostras e verificar possíveis alterações na estrutura química do PLA decorrentes da adição de diferentes concentrações de PVP. Os espectros obtidos estão apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Espectro de FTIR-ATR das diferentes membranas



Fonte: As autoras (2026).

As três membranas apresentaram espectros com bandas características do PLA, confirmando a composição polimérica das amostras. A banda mais intensa foi observada em aproximadamente 1750 cm^{-1} , atribuída ao estiramento da ligação C=O do grupo éster, característica do PLA (Garlotta, 2001). Na região de 2850-2996 cm^{-1} , verificaram-se bandas referentes ao estiramento simétrico e assimétrico de C-H de grupos CH_3 , enquanto as bandas entre 1000 e 1300 cm^{-1} estão associadas ao estiramento C-O-C do grupo éster (Farah; Anderson; Langer, 2016). A banda em torno de 1450 cm^{-1} , presente nas três amostras, é atribuída à deformação angular de C-H, também característica do PLA (Garlotta, 2001).

De maneira geral, a sobreposição dos espectros das três membranas na região de 1000-1800 cm^{-1} evidencia que todas possuem a mesma estrutura química base de PLA, sem evidências de degradação química significativa do polímero durante o processamento (Bühler, 2005; Farah; Anderson; Langer, 2016). Esse resultado indica que a incorporação de diferentes concentrações de PVP K-30 atua predominantemente como modificador físico da morfologia da membrana, sem comprometer a integridade química do PLA.

3.3 Eficiência de rejeição

No teste de rejeição utilizando uma suspensão coloidal de sulfato de bário, foi observado que as membranas preparadas com as menores concentrações de PVP (M1 e M2) apresentaram maior eficiência na retenção das partículas coloidais (Tabela 4). Esse resultado pode ser explicado pela estrutura mais compacta, com menor raio médio de poros e menor interconectividade entre os canais de passagem, dificultando a permeação das partículas através dessas membranas.

Tabela 4 - Eficiência de rejeição do BaSO₄ coloidal pelas membranas

Membrana	Rejeição (%)
M1	52,5 ± 2,7
M2	57,4 ± 2,2
M3	20,9 ± 2,3

Fonte: As autoras (2026).

À medida que a concentração de PVP foi aumentando, ocorreu a formação de poros internos maiores. Como consequência, a M3 apresenta estruturas mais abertas e permeáveis, favorecendo o fluxo de água, porém reduzindo a capacidade de retenção das partículas coloidais de BaSO₄.

A eficiência de rejeição observada também pode ser discutida com base na relação entre o tamanho das partículas coloidais e a dimensão dos poros da membrana. Segundo Gregory (2006), partículas coloidais geralmente apresentam diâmetros entre aproximadamente 1 nm e 1 µm. No caso das suspensões de sulfato de bário, o tamanho das partículas pode variar significativamente em função das condições de precipitação e dispersão, situando-se frequentemente na faixa coloidal submicrométrica. Dessa forma, parte das partículas presentes na suspensão possui dimensões suficientemente pequenas para atravessar os poros das membranas, especialmente naquelas com maior porosidade e maior raio médio de poros. Esse comportamento ajuda a explicar os valores moderados de rejeição observados para as membranas M1 e M2 e a redução mais acentuada da eficiência para a membrana M3.

Apesar disso, os valores de rejeição obtidos neste trabalho são compatíveis com aqueles normalmente observados para membranas de microfiltração aplicadas à remoção de partículas suspensas e coloides. Segundo Baker (2012), em sistemas contendo partículas coloidais, rejeições parciais são frequentemente observadas devido à ampla distribuição de tamanhos das partículas e à possibilidade de passagem das menores frações pelos poros da membrana. Dessa forma, as rejeições de aproximadamente 52 a 57% observadas para as membranas M1 e M2 podem ser consideradas satisfatórias para membranas microporosas obtidas sem etapas adicionais de funcionalização ou modificação superficial. Por outro lado, a redução da rejeição para a membrana M3 demonstra que o aumento excessivo da porosidade e do tamanho médio de poros favorece a permeação das partículas coloidais, comprometendo a eficiência de separação.

4 CONCLUSÕES

As membranas biodegradáveis de PLA contendo diferentes concentrações de PVP K-30 foram produzidas com sucesso pelo método de evaporação do solvente, apresentando características compatíveis com aplicações em microfiltração. A adição de PVP influenciou diretamente a estrutura das membranas, promovendo aumento da porosidade, do raio médio de poros e do fluxo de permeado.

Os resultados mostraram que concentrações mais elevadas de PVP favoreceram a permeabilidade das membranas, porém reduziram sua ductilidade e eficiência de rejeição de partículas. Entre as formulações avaliadas, as membranas M1 e M2 apresentaram o melhor equilíbrio entre propriedades mecânicas, fluxo e capacidade de retenção de sulfato de bário.

Dessa forma, os objetivos do trabalho foram alcançados, demonstrando que a utilização de PVP como agente porogênico é uma estratégia eficiente para controlar as propriedades estruturais e funcionais de membranas de PLA. Os resultados obtidos contribuem para o desenvolvimento de membranas biodegradáveis com potencial aplicação em processos sustentáveis de microfiltração.

REFERÊNCIAS

BAKER, R. W. **Membrane technology and applications**. 3. ed. Chichester: Wiley, 2012.

BASHIR, M. *et al.* Polylactic acid (PLA) membrane: significance, synthesis, and applications – A review. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 33, n. 2, p. 275-290, 2022.

BROWN, M. E. **Introduction to thermal analysis: techniques and applications**. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.

BÜHLER, V. **Polyvinylpyrrolidone (PVP): excipients for pharmaceuticals**. Berlin: Springer, 2005.

CHEN, Q. *et al.* Biodegradable PLA/PVP composite membranes with improved permeability and antifouling performance. **Journal of Membrane Science**, v. 664, p. 121082, 2022.

FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LANGER, R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications: A comprehensive review. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 107, p. 367-392, 2016.

GARLOTTA, D. A literature review of poly(lactic acid). **Journal of Polymers and the Environment**, v. 9, n. 2, p. 63-84, 2001.

GREGORY, J. **Particles in water: properties and processes**. Boca Raton: CRC Press, 2006.

LALIA, B. S. *et al.* Membrane fabrication: structure, properties and performance relationship. **Desalination**, v. 326, p. 77-95, 2013.

LEVCHIK, S. V.; WEIL, E. D. Thermal decomposition, combustion and fire-retardancy of polyurethanes: A review of the recent literature. **Polymer International**, v. 53, n. 11, p. 1585-1610, 2005.

MORADI, O. *et al.* Biodegradable membranes for water and wastewater treatment: a comprehensive review. **Polymers**, v. 15, n. 7, p. 1531, 2023.

MULDER, M. **Basic principles of membrane technology**. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2012.

STRATHMANN, H. **Introduction to membrane science and technology**. Weinheim: Wiley-VCH, 2011.

ZHANG, Y. *et al.* Recent progress in polymeric membranes for separation processes: a review. **Chemical Engineering Journal**, v. 431, p. 133391, 2022.

ZHANG, Y. *et al.* Fabrication of biodegradable PLA-based membranes with enhanced porosity and water flux for microfiltration. **Separation and Purification Technology**, v. 309, p. 123012, 2023.

ZINADINI, S. *et al.* Preparation of a novel antifouling PES membrane by embedding hydrophilic modified TiO₂ nanoparticles. **Desalination**, v. 326, p. 48-56, 2013.