

MICROFILTRAÇÃO E ULTRAFILTRAÇÃO PARA REMOÇÃO DE MICROPLÁSTICOS EM MEIOS AQUOSOS

Priscila Edinger Pinto – priscila.edingerp@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M), Av. Bento Gonçalves, n. 9500, 91509-900 - Porto Alegre - RS.

Alexandre Giacobbo - alexandre_giacobbo@yahoo.com.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M).

Gabriel Maciel de Almeida - gabrielmacielrs@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M).

Andréa Moura Bernardes - amb@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M).

Resumo: Este trabalho avalia a remoção de microplásticos (MPs), especificamente o polietileno (PE), em matrizes aquosas de diferentes etapas do tratamento de água potável através de Processos de Separação por Membranas (PSM). Técnicas analíticas como ensaios de turbidez, microscopia ótica e espectroscopia FTIR foram estabelecidas para a detecção do contaminante. Foram operadas membranas comerciais planas de ultrafiltração (LY e PZ) e de microfiltração (V0.2) sob pressão de 0,7 bar por 2 horas, em escoamento tangencial, testadas em amostras de água deionizada, água tratada, água de filtro de areia e água bruta natural do Lago Guaíba. As amostras resultantes tiveram a presença indetectável de PE, sem que as membranas sofressem fratura ou apresentassem incrustação irreversível. A membrana de microfiltração (V0.2) exibiu maior suscetibilidade ao fouling (redução no fluxo) ao filtrar a água bruta de menor qualidade, evidenciando que a implementação da técnica como polimento requer atenção específica à qualidade da matriz de alimentação.

Palavras-chave: Microplásticos, Polietileno, Microfiltração, Ultrafiltração, Tratamento de água, Poluição plástica.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

MICROFILTRATION AND ULTRAFILTRATION FOR THE REMOVAL OF MICROPLASTICS IN AQUEOUS MEDIA

Abstract: This study evaluates the removal of microplastics (MPs), specifically polyethylene (PE), from aqueous matrices representing different stages of drinking water treatment using Membrane Separation Processes (MSPs). Analytical techniques, including turbidity measurements, optical microscopy, and FTIR spectroscopy, were established for contaminant detection. Commercial flat-sheet ultrafiltration (LY and PZ) and microfiltration (V0.2) membranes were operated at a transmembrane pressure of 0.7 bar for 2 hours under crossflow conditions and tested using deionized water, treated water, sand filter effluent, and raw water collected from Guaíba Lake. No detectable PE was found in the resulting permeate samples, and the membranes showed neither structural failure nor irreversible fouling. The microfiltration membrane (V0.2) exhibited greater susceptibility to fouling (flux decline) when filtering the lower-quality raw water, indicating that the implementation of this technique as a polishing step requires particular attention to the quality of the feed water matrix.

Keywords: Microplastics, Polyethylene, Microfiltration, Ultrafiltration, Water treatment, Plastic pollution.

1. INTRODUÇÃO

A contaminação do planeta por polímeros tornou-se tão expressiva que a presença onipresente de plásticos tem caracterizado o Antropoceno como a "Era do Plástico" (Catarino et al., 2018; Eriksen et al., 2014; Zalasiewicz et al., 2016). A produção global alcança hoje a marca de 8,9 bilhões de toneladas fabricadas, das quais aproximadamente 6,3 bilhões de toneladas já se tornaram resíduos desprovidos de reciclagem adequada (Ritchie et al., 2023; Geyer et al., 2017). O descarte ineficiente associado ao intemperismo induz à degradação deste material na natureza, formando microplásticos (MPs) com dimensões inferiores a 5 mm e nanoplásticos (NPs) menores que 1 µm (Cole et al., 2011; Hartmann et al., 2019). Essas partículas, por se dispersarem facilmente na água e pela difícil remoção, tornam-se um contaminante de preocupação emergente (Catarino et al., 2018). O Lago Guaíba, principal manancial da região metropolitana de Porto Alegre, já apresentou estudos atestando concentrações de contaminação de MP na casa de dezenas de fragmentos por metro cúbico (Bertoldi, 2022).

Devido às propriedades hidrofóbicas e à densidade do polietileno (PE) assemelhar-se à da própria água, os MPs de PE e de alguns outros polímeros impõem grandes desafios para a engenharia de separação. Estações de Tratamento de Água (ETAs) convencionais, apoiadas em etapas de coagulação com base em ferro ou alumínio seguidas de decantação, devido a fuga de materiais

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

poliméricos com baixa densidade em decorrência da ausência de uma barreira física absoluta que impeça a passagem até o fim do tratamento (Das et al., 2022; Hidayaturrahman et al., 2019).

Nesse cenário, os Processos de Separação por Membranas (PSM), destacando-se a Microfiltração (MF) e a Ultrafiltração (UF), despontam como tecnologias promissoras no tratamento de contaminantes de preocupação emergente. O principal mecanismo oferecido é a exclusão por tamanho, garantindo barreiras robustas (Baker, 2012). Além disso, contam com vantagens operacionais como a ausência de utilização de aditivos químicos agressivos, baixo custo energético em operação de baixas pressões e alta versatilidade ao tratar efluentes (Habert et al., 2006).

A partir deste contexto, os objetivos deste trabalho consistem em avaliar os processos de MF e UF para a remoção de MPs de PE em matrizes aquosas simples e reais (de ETAs), acompanhando possíveis declínios de fluxo e formações de incrustação (*fouling*), e em definir metodologias consistentes para a detecção deste contaminante.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais e amostras avaliadas

A escolha do material polimérico concentrou-se no Polietileno (PE) pelo fato de ser o plástico líder de mercado no Brasil, totalizando quase 40% do consumo anual do país em 2022 (ABIPLAST, 2022). O MP selecionado foi o PE puro (grau P.A.) com granulometria de 125 µm, dimensão adequada por dispensar processos de moagem criogênica e ser facilmente integrável às análises qualitativas.

Os ensaios operaram através de três grandes grupos amostrais, como pode ser visto no quadro 1. As "Amostras DI" utilizaram água deionizada contaminada sinteticamente com 50 mg/L de PE. As "Amostras MV", extraídas em diferentes graus de turbidez e pureza da ETA Moinhos de Vento do DMAE – Porto Alegre/RS, consistiam de Água Tratada, Água do Filtro de Areia e Água Bruta da captação do Lago Guaíba, todas sendo também contaminadas com 50 mg/L de PE. As "Amostras BN", por fim, referiram-se às amostras reais de Água Bruta e de Permeado purificado retirados diretamente do módulo de ultrafiltração industrial presente na ETA Belém Novo, para análise direta. Devido à dificuldade de suspensão homogênea do polímero sintético na água, utilizou-se o tensoativo dodecil sulfato de sódio (SDS) a uma concentração de 0,001% nas águas de alimentação preparadas no laboratório.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Quadro 1. Identificação das amostras utilizadas

Grupos de amostras	Amostras utilizadas	Descrição
Amostras DI	<i>DI + PE</i>	Amostras de água deionizada do laboratório (LACOR) contaminada com PE
Amostras MV	<i>Bruta - MV + PE</i>	Água bruta da alimentação da ETA Moinhos de Vento contaminada com PE
	<i>Areia - MV + PE</i>	Água proveniente da saída do filtro de areia da ETA Moinhos de Vento contaminada com PE
	<i>Tratada - MV + PE</i>	Água tratada final, produzida na ETA Moinhos de Vento contaminada com PE
Amostras BN	<i>Bruta - BN</i>	Água bruta da alimentação da ETA Belém Novo
	<i>Permeado - BN</i>	Água proveniente do permeado do sistema de UF da ETA Belém Novo

2.2. Equipamentos e características das membranas

Três tipos de membranas planas comerciais cujas forças motrizes ocorrem por diferença de pressão foram selecionadas: uma membrana de Microfiltração de modelo V0.2 (poros de 0,2 µm e produzida em Fluoreto de polivinilideno - PVDF), e duas membranas de Ultrafiltração de modelos LY (massa molecular de corte de 100 kDa em Polietersulfona - PES) e PZ (massa molecular de corte de 30 kDa em Poliacrilonitrila - PAN).

Dois sistemas de separação de escoamento tangencial (crossflow) em regime de recirculação total foram empregados para conduzir os PSM. O Equipamento 1 (Módulo LabUnit M20 – Alfa Laval), abrigou em módulo empilhado as membranas LY, PZ e V0.2, operado à vazão de 400 L/h. O Equipamento 2, um sistema de bancada com módulo individual (área útil de 0,009317 m²), filtrou especificamente a amostra da Água Bruta do Lago Guaíba operando a membrana V0.2 a 200 L/h. Em todos os ensaios, utilizou-se PTM fixa em 0,7 bar, tempo de operação de 120 minutos, e controle rigoroso de temperatura em 25 °C via *chiller*. Todos os testes de separação por membranas foram precedidos de testes de permeabilidade das membranas.

Ao longo dos 120 minutos, ensaios de controle de fluxo do permeado foram realizados a cada 10 minutos. Os testes foram feitos com a coleta de uma fração de permeado, em um determinado tempo (este cronometrado pelo analista), seguida da pesagem do líquido coletado. Com o uso destes dados e a sua aplicação na Equação (1), foi determinado o fluxo mássico do permeado, cuja variação ao longo do tempo permitiu visualizar o comportamento da membrana, bem como possíveis formações, ou não, de incrustação.

$$J = \frac{V_{perm}}{(A_{memb} \times t)} \quad (1)$$

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Onde:

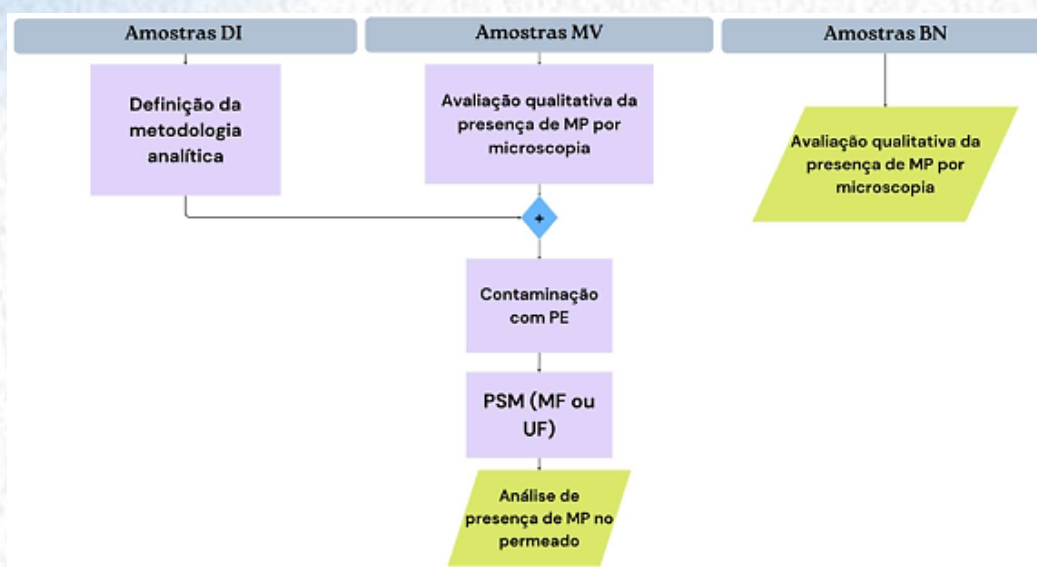
V_{perm} = volume de permeado (L);

A_{memb} = área de filtração da membrana (m^2);

t = tempo (s).

Uma síntese de todas as etapas de testes pode ser observada na figura 1.

Figura 1. Fluxograma das etapas do estudo



2.3. Testes de detecção analítica

O método nefelométrico de medição da turbidez, foi escolhido para a determinação da concentração das suspensões em água deionizada, pois oferece um índice rápido, quando comparado à outras metodologias. Contudo, nas amostras baseadas na matriz do Lago Guaíba, a presença de turbidez decorrente de compostos nativos limitou o uso do turbidímetro. Assim, a detecção seguiu pela filtração e secagem do meio retido para observação visual e morfológica utilizando um microscópio modelo Dino-Lite Edge, com incrementos entre 4x a 100x de aumento em varreduras com padrão em "zigue-zague". Para auxílio na caracterização da espécie química dos possíveis polímeros e outras fibras naturais registradas, integrou-se às análises a leitura de partículas diretamente dos filtros via espectroscopia no equipamento Anton Paar Lyza 7000 de espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR), equipado com ATR IRIS num range de 400 a 4000 cm^{-1} . Nas amostras mais naturalmente contaminadas (Amostras MV e BN), promoveu-se reações de degradação orgânica prévia ao ensaio, com peróxido de hidrogênio (30%) conjugado a $FeSO_4$.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



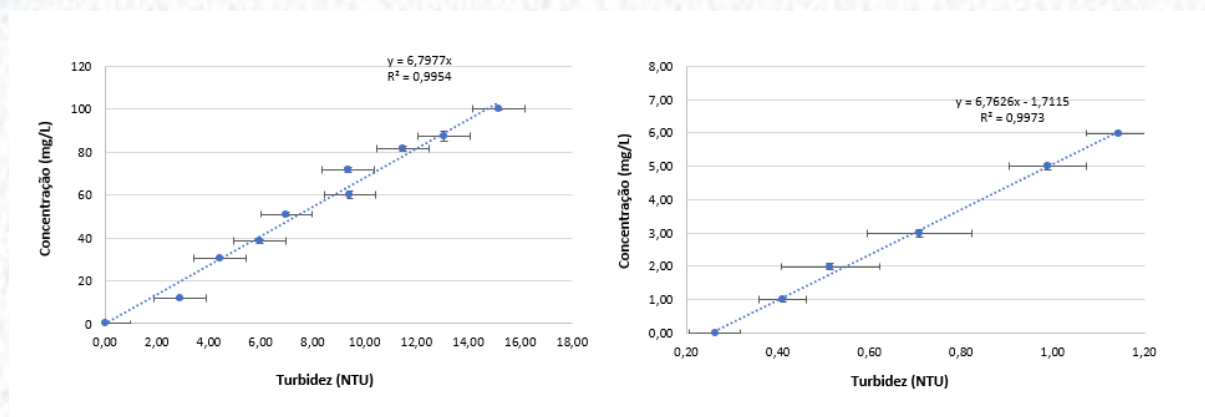
www.abes-rs.org.br

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ensaios de quantificação turbidimétrica

As múltiplas leituras replicadas, juntamente com a avaliação dos dados de correlação por ANOVA, confirmaram que a turbidez pode ser utilizada como parâmetro indireto para estimar as concentrações de PE testados. A correlação no espalhamento de feixes luminosos promovido pelas partículas sintéticas de PE suspensas nas Amostras DI em função das concentrações diluídas pode ser visto na figura 2.

Figura 2. Curvas de turbidez vs. Concentração de PE



Aplicando o fator obtido, na saída do PSM, as alíquotas do permeado atestaram medições indetectáveis de NTU para todas as matrizes purificadas da Microfiltração e Ultrafiltração, denotando retenção das partículas de MPs de PE na dimensão testada, em todas as saídas do fluido tratado no primeiro teste, conforme é visto no quadro 2. Contudo, como salientado pela literatura, o sucesso da metodologia restringiu-se apenas às dispersões isentas de interferentes coloidais inorgânicos complexos.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Quadro 2. Valores calculados durante os testes de separação de MPs.

Amostra	Turbidez (NTU)	Correspondência em concentração de PE (mg/L)
Concentrado no início dos testes	9,84	66
	7,08	48
	5,28	35
Concentrado após 1h testes	7,32	50
	7,68	52
	8,04	54
Concentrado após 2h testes	8,04	54
	8,64	58
	8,76	59
Filtrado (V.02)	Não detectável	Não detectável
Filtrado (LY)	Não detectável	Não detectável
Filtrado (PZ)	Não detectável	Não detectável

3.2. Estabilidade de fluxo e permeabilidade hidráulica

3.2.1. Filtração em água deionizada

O fluxo da membrana de MF (V0.2) representou o maior volume de permeado produzido, superior em quase cinco vezes aos padrões alcançados pela UF mais restritiva de PAN (PZ), o que está fundamentalmente ancorado ao tamanho ampliado do seu poro de 0,2 μm . A comparação dos fluxos mostrou que nenhuma das membranas apresentou declínio acentuado durante os ensaios, sendo a V0.2 a de maior produção de permeado, embora com uma discreta redução de fluxo em relação às demais. Esse comportamento pode estar relacionado à maior hidrofobicidade do PVDF, favorecendo a adesão de partículas de PE e aumentando a propensão ao *fouling*, porém o desvio padrão indica que essa queda pode não ser significativa, sugerindo um comportamento praticamente estável ao longo do ensaio.

O desempenho médio das membranas foi comparado, gerando o gráfico observado na figura 3.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700

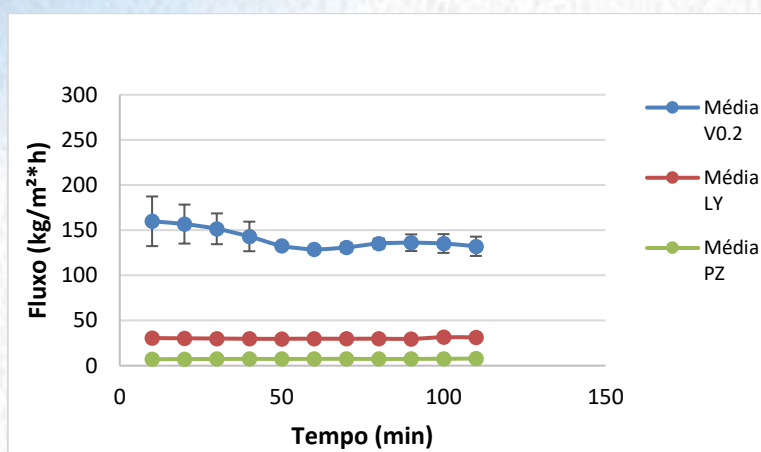


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 3 – Comparação de fluxo entre membranas na remoção de PE em água DI.



3.2.2. Filtração em águas complexas e comportamento de fouling

Quando operado em águas reais de diferentes etapas da ETA Moinhos de Vento, houve natural rebaixamento dos fluxos de todas as membranas testadas se comparadas às curvas da Água Deionizada, dado a interferência de outras matérias que causam adesão. No entanto, nenhuma apresentou queda de fluxo significativa, quando analisados os dados por ANOVA e, também, não apresentaram quedas de fluxo irreversível. Os comportamentos dos fluxos para cada membrana nos diferentes meios aquosos são observados na figura 4.

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



(51) 999330700

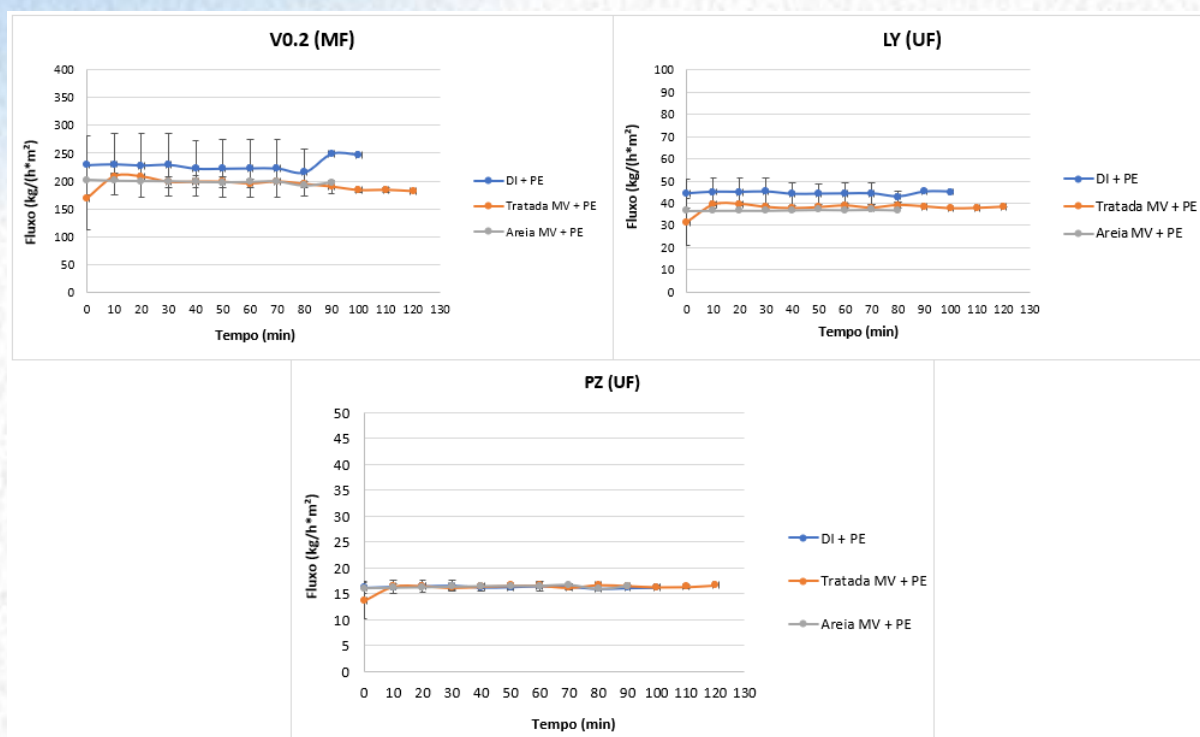


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 4. Comparativo dos testes de PSM.



Por outro lado, o Equipamento 2 focado exclusivamente na separação do contaminante nas condições extremas de Água Bruta do Guaíba revelou algum desafio operacional, quando comparado aos demais meios aquosos. Apesar de ter sido capaz de remover os microplásticos de PE, de forma a não ser detectável nas análises, a V0.2 sofreu queda de fluxo decrescente de 20 - 30 % após duas horas de testes no sistema, como pode ser visto na Figura 5. Apesar do tempo reduzido dos testes, a ligeira formação de *fouling*, também pode ser constatada pois, a cada ciclo consecutivo, a limpeza física e química gerou uma permeabilidade inferior ao limpo original, marcando uma propensão das tecnologias em concentrar lodos na superfície durante os PSM de captações pluviais mais sujas.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700

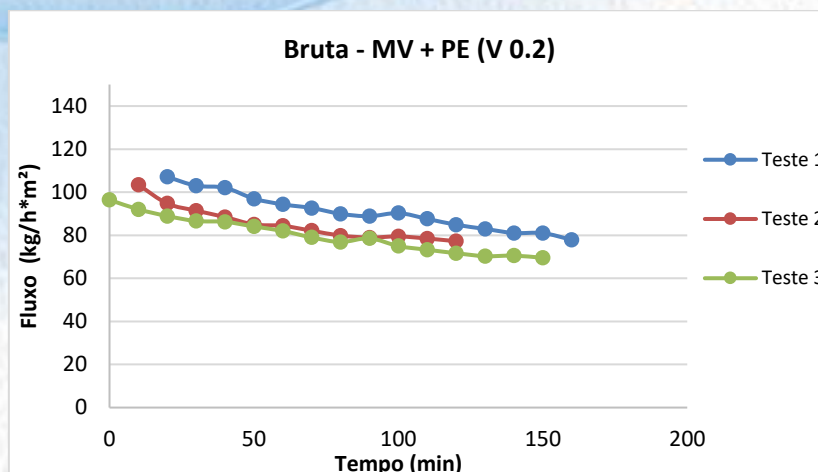


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 5. Comparativo dos testes de MF no equipamento 2 com amostra de água bruta.



3.3. Confirmações visuais e por espectroscopia FTIR

O registro dos microscópios ópticos não detectou partículas de PE, favorecendo a conclusão da efetiva remoção do PE, dentro das condições ensaiadas, pelo teste de PSM. Não houve indícios de partículas confirmadas da dispersão original de PE branco, com tamanho médio de 125 μm , na zona de permeado de todas as frações isoladas durante as horas de processo.

As análises detectaram abundantes núcleos fibrosos espalhados pelos filtros. Contudo, após avaliar a amostra "Branco do Ar" – deixada intencionalmente exposta ao ambiente laboratorial –, rastreou-se e concluiu-se que muitas das tramas azuladas e filamentos orgânicos pertenciam a desprendimentos das fibras têxteis das próprias vestimentas da analista, corroborando com vastos alertas da comunidade científica para o desafio da alta poluição paralela (*self-contamination*) e contaminações do ar na condução dessas pesquisas milimétricas no laboratório aberto. O emprego da técnica de infravermelho encontrou dificuldades significativas: a luz ATR do equipamento Lyza – Anton Paar sofreu forte difração proveniente diretamente das redes de nitrocelulose e fibra de vidro dos próprios filtros da coleta. Uma ilustração de alguns dos achados, em avaliação microscópica, pode ser vista na figura 6.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700

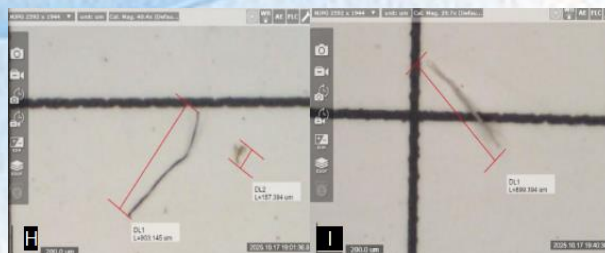


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 6. Imagens de varredura microscópica em um dos filtros avaliados.



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios realizados demonstraram que os sistemas de Separação por Membranas testados demonstraram capacidade de remoção, das partículas poliméricas de PE ($\sim 125 \mu\text{m}$), dentro das condições estudadas. Tanto as camadas de ultrafiltração testadas quanto a microfiltração atuaram como barreiras da poluição simulada com PE nos sistemas. A detecção dos MPs provou ser complexa a ponto das tecnologias como FTIR e microscopia exigirem protocolos de limpeza rigorosos, pois contaminações do próprio ambiente de trabalho influenciam na detecção das partículas de interesse. Esse ponto é uma limitação do estudo, uma vez que, por ser realizado em laboratório conjunto à outros pesquisadores, não houve um controle total da contaminação ambiental.

A membrana V0.2 apresentou resultados com boa recuperação na permeabilidade e alto fluxo de permeado produzido. Contudo, operada em matriz de água bruta, demonstrou problemas operacionais, a serem observados por testes mais longos, pela possível formação de *fouling*. Diante da eficiência para separar o componente testado, é necessário avaliar com cuidado o custo-benefício da sua instalação, além dos objetivos de aplicação. Os processos de separação por membranas são ótimos sistemas para garantir a proteção ambiental, mas em algumas matrizes aquosas se faz necessário o uso conjunto com pré-tratamentos. Fazer isso evita o desgaste rápido da membrana e reduz a necessidade das limpezas químicas e mecânicas caras que pesam no orçamento das estações de tratamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre (DMAE) pelo fornecimento de amostras e pelo suporte à pesquisa através das bolsas promovidas e auxílio na compra de materiais pelo CNPq e demais fundos de amparo envolvidos.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

REFERÊNCIAS

ABIPLAST - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. **Perfil 2022. As indústrias de transformação e reciclagem de plásticos no Brasil**. [S.l.]: ABIPLAST, 2022. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2023/09/perfil_2022_pt.pdf>.

Acesso em: 10 set. 2023.

BAKER, R. W. **Membrane technology and applications**. 3. ed. United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd, 2012.

BERTOLDI, C. F. **Distribuição espacotemporal, abundância e caracterização de microplásticos em águas superficiais do Lago Guaíba**. Porto Alegre, 177 p., 2022. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CATARINO, A. I. et al. Low levels of microplastics (MP) in wild mussels indicate that MP ingestion by humans is minimal compared to exposure via household fibres fallout during a meal. **Environmental Pollution**, v. 237, p. 675–684, jun. 2018.

COLE, M. et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n. 12, p. 2588–2597, dez. 2011.

DAS, A. A. et al. Recent advancements in microplastics treatments: Characteristics, occurrence, and removal technologies. **Materials Today: Proceedings**, v. 67, p. 1211–1217, 2022.

ERIKSEN, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. **PLoS ONE**, v. 9, n. 12, p. e111913, 10 dez. 2014.

GEYER, R.; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 7 jul. 2017.

HABERT, C. A.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processo de Separação por Membranas**. Rio de Janeiro: E-papers, 2006.

HARTMANN, N. B. et al. Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. **Environmental Science & Technology**, v. 53, n. 3, p. 1039–1047, 5 fev. 2019.

HIDAYATURRAHMAN, H.; LEE, T. G. A study on characteristics of microplastic in wastewater of South Korea: Identification, quantification, and fate of microplastics during treatment process. **Marine Pollution Bulletin**, v. 146, p. 696–702, 2019.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br



13º Simpósio
Internacional de
Qualidade Ambiental

Tecnologias Ambientais e Inovação

23, 24 e 25 de setembro de 2026

RITCHIE, H.; SAMBORSKA, V.; ROSER, M. Plastic Pollution. **Our World in Data**, 28 dez. 2023.

ZALASIEWICZ, J. et al. The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. **Anthropocene**, v. 13, p. 4–17, mar. 2016.

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



REBOB
Rede Brasileira de
Oportunidades de Inovação



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br