

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**PRODUÇÃO DE MEMBRANAS POLIMÉRICAS
COM MATERIAL DE REUSO E APLICAÇÕES**

Jessica Gatti Silva
Uberlândia - MG
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Produção de membranas poliméricas com material de reuso e aplicações

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Miriam Maria
de Resende

Coorientadora: Profa. Dr. Vicelma Luiz
Cardoso

Discente: Jessica Gatti Silva

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586 Silva, Jessica Gatti, 1994-
2025 PRODUÇÃO DE MEMBRANAS POLIMÉRICAS COM MATERIAL DE REUSO E APLICAÇÕES. [recurso eletrônico] / Jessica Gatti Silva. - 2025.

Orientadora: Miriam Maria de Resende.

Coorientadora: Vicielma Luiz Cardoso.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2025.503>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia química. I. Resende, Miriam Maria de, 1971-, (Orient.). II. Cardoso, Vicielma Luiz, 1960-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. IV. Título.

CDU: 66.0

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Química

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG,
CEP 38400-902

Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgceq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-graduação em:	Engenharia Química			
Defesa de:	Tese de Doutorado, 12/2025, PPGCEQ			
Data:	14 de agosto de 2025	Hora de início:	8:30	Hora de encerramento: 12:00
Matrícula da Discente:	12113EQU003			
Nome da Discente:	Jessica Gatti Silva			
Título do Trabalho:	Produção de membranas poliméricas com material de reuso e aplicações			
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos			
Linha de pesquisa:	Engenharia Bioquímica			
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Produção de membranas de troca iônica para células de eletrodiálise			
ODS-ONU:	ODS 3 – Saúde e Bem-estar e ODS 6 – Água Potável e Saneamento			

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Diego Andrade Lemos - DEQ/UFSCar, Josy Anteveli Osajima Furtini - PPGCM/UFPI, Patrícia Angélica Vieira - FEQUI/UFU, Líbia Diniz Santos - PPGCEQ/UFU, Vicelma Luiz Cardoso - PPGCEQ/UFU, coorientadora, e Miriam Maria de Resende - PPGCEQ/UFU, orientadora da candidata.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Profª Drª Miriam Maria de Resende, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, a presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final considerando a candidata:

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Miriam Maria de Resende, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/08/2025, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Libia Diniz Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/08/2025, às 12:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Josy Anteveli Osajima Furtini, Usuário Externo**, em 14/08/2025, às 12:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vicelma Luiz Cardoso, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/08/2025, às 12:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Patricia Angelica Vieira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/08/2025, às 12:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diego Andrade Lemos, Usuário Externo**, em 14/08/2025, às 12:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6587184** e o código CRC **8A006FEE**.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Objetivos Específicos	3
2. REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1 Resíduos sólidos	5
2.2 Resíduos sólidos no Brasil.....	6
2.3 Degradação do meio ambiente.....	7
2.4 Membranas poliméricas.....	9
2.5 Biopolímeros: Acetato de celulose e gomas naturais.....	10
2.6 Poliéster tereftalato de etileno	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1 Material Residual e Reagentes utilizados.....	18
3.2 Produção das membranas.....	18
3.3 Caracterização das membranas	22
3.3.1 Morfologia	22
3.3.2 Espectroscopia infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	22
3.3.3 Permeabilidade	23
3.3.4 Hidrofobicidade	24
3.3.5 Resistência mecânica.....	24
3.3.6 Teor de água em equilíbrio (EWC)	24
3.3.7 Porosidade e tamanho de poros	25
3.3.8 Recuperação de fluxo e índice de fouling	26
3.3.9 Teste de rejeição	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1 Produção das membranas.....	29
4.1.1 Membranas de Acetato de Celulose	29
4.1.1.1 Morfologia	29
4.1.1.2 Espectroscopia infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	32
4.1.1.3 Permeabilidade	34
4.1.1.4 Hidrofobicidade, resistência mecânica, teor de água em equilíbrio, porosidade e tamanho de poros, recuperação de fluxo e índice de fouling e teste de rejeição.....	35
4.1.2 Membranas de PET	36
4.1.2.1 Morfologia	36
4.1.2.2 Permeabilidade	44
4.1.2.3 Hidrofobicidade	47
4.1.2.4 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) 53	53
4.1.2.5 Resistência Mecânica	55
4.1.2.6 Teor de água em equilíbrio (EWC)	58
4.1.2.7 Porosidade e tamanho de poros	59
4.1.2.8 Recuperação de fluxo e índice de fouling	60
4.1.2.9 Teste de rejeição	64

5. <i>CONCLUSÕES</i>	67
6. <i>REFERÊNCIAS</i>	70

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde, força e por sempre ter estado ao meu lado me dando amparo e proteção.

Aos meus pais Gustavo e Priscila por todo amor, incentivo e apoio incondicionais. Aos meus irmãos Iasmim, Pedro, Pietra e Valentina por todo o amor e carinho.

Ao meu noivo Rodrigo, por todo amor, carinho, companheirismo, compreensão e incentivo no decorrer desta etapa.

As minhas orientadoras, Dra. Miriam Resende e Dra. Vicelma Cardoso, pela dedicação, orientações, paciência, apoio, conhecimentos compartilhados e amizade ao longo da pesquisa. Aos professores Dra. Josy Anteveli Osajima Furtini e Dr. Edson Cavalcanti da Silva Filho por toda colaboração, apoio e direcionamento.

Às minhas avós Ângela e Vera e aos meus avôs Gilberto e Guilherme (*in memoriam*) por todo amor, incentivo e carinho. Ao meu padrasto Fabrício e minha madrasta Suziane, aos meus tios Fabiana, Fernando e Mariana, e à toda minha família que tanto me apoia.

À Cássia, Silvio, Alberto, Marília, Alice e Luan por serem minha segunda família e por todo amor e cuidado comigo.

Aos meus amigos, pela amizade, apoio e por me proporcionarem momentos de descontração.

Aos colegas e amigos do NUCBIO/UFU e do LIMAV/UFPI, por cada conhecimento compartilhado e apoio prestado. Em especial à Mayara e à Fran, por todo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

À CNPq pela bolsa de estudo concedida e pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho. À CAPES pela bolsa concedida para o programa PRINT.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal do Piauí pelas oportunidade e instalações oferecidas.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento dessa pesquisa.

*"Porque eu bem sei os planos que tenho para
vós, diz o Senhor; planos de paz e não de mal,
para vos dar um futuro e uma esperança."
(Jeremias 29:11)*

RESUMO

O presente estudo apresenta uma abordagem inovadora e sustentável para o desenvolvimento de membranas poliméricas a partir de materiais residuais, visando combater a crescente geração de resíduos sólidos. A pesquisa se concentrou na produção de membranas a partir de acetato de celulose (AC) residual de filtros de cigarro inutilizados e de politeraftalato de etileno (PET) de garrafas plásticas. As membranas de AC foram modificadas com a adição de resinas aniónicas e catiônicas e as membranas de PET foram modificadas com a adição de biopolímeros: goma arábica (GA) (1%, 3%, 5%, 7,5% e 10%) e a goma karaya (GK) (1%, 3%, 5% e 7,5%). As membranas de AC produzidas apresentaram uma morfologia porosa similar à de membranas de AC não residual, mas falharam estruturalmente e sofreram rupturas durante os testes de permeabilidade, o que inviabilizou a continuidade dos ensaios. Devido a essa limitação, os estudos foram focados no uso do PET, que demonstrou ser um material mais adequado para as aplicações de separação em meio solúvel propostas, com maior resistência mecânica e pela grande disponibilidade como resíduo. A incorporação das gomas nas membranas de PET teve um efeito significativo nas propriedades do material. As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostraram que a adição de 1% e 3% de GA preservou uma estrutura porosa bem definida, enquanto concentrações mais elevadas (5%, 7,5% e 10%) resultaram em alterações morfológicas desfavoráveis, com poros menos interconectados e maior densidade. As micrografias das membranas com GK revelaram uma estrutura menos homogênea e potencialmente mais frágil, comprovada pela análise de permeabilidade, com muitos vazios e baixa densidade. A permeabilidade das membranas de PET foi aprimorada com a adição de GA. A membrana com 5% de GA (PGA5) atingiu um máximo de 157,70 L/h m², no entanto, concentrações superiores levaram a uma diminuição da permeabilidade. A modificação com ambas as gomas naturais também reduziu a hidrofobicidade da membrana de PET, com o ângulo de contato da membrana pura (94,00°) diminuindo para 33,90° com a adição de 7,5% de GA. A resistência mecânica foi aprimorada com a adição de GA, e a membrana PGA3 (3% de GA) apresentou um alongamento de 33%, superando a de PET puro (20,40%). Com isso, as membranas modificadas com GA se mostraram mais eficazes para a aplicação proposta do que as de GK. Nos testes de desempenho hidráulico para tratamento de água, com teste de rejeição de solução contaminante de lignina a 100mg/L, a membrana PGA3 demonstrou uma alta taxa de recuperação de fluxo (entre 93,55% e 97,30%) e um baixo índice de fouling irreversível (de 2,70% a 6,45%). Nos testes de rejeição, a membrana PGA3 foi capaz de reter entre 85,34% e 93,10% da turbidez, o que foi significativamente superior à de PET puro (65,52% a 74,14%). A análise de condutividade elétrica confirmou que a separação ocorreu por ultrafiltração, retendo sólidos suspensos e permitindo a passagem de espécies de baixo peso molecular. Em conclusão, a modificação de membranas de PET residual com goma arábica é uma estratégia promissora para o desenvolvimento de materiais com propriedades aprimoradas para processos de separação em meio líquido. A formulação com 3% de goma arábica (PGA3) foi a mais equilibrada, combinando de forma ideal permeabilidade, hidrofilicidade, resistência mecânica e desempenho na rejeição de contaminantes. Essa abordagem contribui para a valorização de resíduos plásticos, promovendo a economia circular e oferecendo uma solução sustentável para o tratamento de águas e outros desafios ambientais.

Palavras-chave: Membranas poliméricas; resíduos; acetato de celulose, politeraftalato de etileno; goma arábica; goma karaya.

ABSTRACT

This study presents an innovative and sustainable approach to developing polymeric membranes from waste materials, aiming to combat the growing generation of solid waste. The research focused on producing membranes from residual cellulose acetate (AC) from unused cigarette filters and polyethylene terephthalate (PET) from plastic bottles. The AC membranes were modified with the addition of anionic and cationic resins, and the PET membranes were modified with the addition of biopolymers: gum arabic (GA) (1%, 3%, 5%, 7.5%, and 10%) and gum karaya (GK) (1%, 3%, 5%, and 7.5%). The produced AC membranes showed a porous morphology similar to non-residual AC membranes, but they had structural failure and ruptured during permeability tests, which made it unfeasible to continue the assays. Due to this limitation, the studies focused on using PET, which proved to be a more suitable material for the proposed soluble medium separation applications due to its higher mechanical resistance and greater availability as waste. The incorporation of the gums into the PET membranes had a significant effect on the material's properties. Scanning electron microscopy (SEM) analyses showed that adding 1% and 3% of GA preserved a well-defined porous structure, while higher concentrations (5%, 7.5%, and 10%) resulted in unfavorable morphological changes, with less interconnected pores and higher density. Micrographs of the membranes with GK revealed a less homogeneous and potentially more fragile structure, with many voids and low density, which was confirmed by the permeability analysis. The permeability of the PET membranes was enhanced with the addition of GA. The membrane with 5% GA (PGA5) reached a maximum of 157.70 L/h m², but higher concentrations led to a decrease in permeability. The modification with both natural gums also reduced the PET membrane's hydrophobicity, with the contact angle of the pure membrane (94.00°) decreasing to 33.90° with the addition of 7.5% GA. Mechanical resistance was improved with the addition of GA, and the PGA3 membrane (3% GA) showed an elongation of 33%, surpassing that of pure PET (20.40%). The GA-modified membranes were more effective for the proposed application than the GK-modified ones. In hydraulic performance tests for water treatment, with a lignin contaminant solution rejection test at 100 mg/L, the PGA3 membrane showed a high flux recovery rate (between 93.55% and 97.30%) and a low irreversible fouling index (from 2.70% to 6.45%). In the rejection tests, the PGA3 membrane was able to retain between 85.34% and 93.10% of the turbidity, which was significantly higher than the pure PET membrane (65.52% to 74.14%). The electrical conductivity analysis confirmed that the separation occurred by ultrafiltration, retaining suspended solids and allowing the passage of low molecular weight species. In conclusion, modifying residual PET membranes with gum arabic is a promising strategy for developing materials with enhanced properties for liquid medium separation processes. The formulation with 3% gum arabic (PGA3) was the most balanced, ideally combining permeability, hydrophilicity, mechanical resistance, and performance in contaminant rejection. This approach contributes to the valorization of plastic waste, promoting the circular economy and offering a sustainable solution for water treatment and other environmental challenges.

Keywords: Polymeric membranes; waste; cellulose acetate; polyethylene terephthalate; gum arabic; gum karaya.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Estrutura química do acetato de celulose.....	11
Figura 2.2: Cigarro com o filtro de acetato de celulose.....	12
Figura 2.3: Estrutura química da goma arábica.....	13
Figura 2.4: Estrutura química da goma karaya.....	14
Figura 2.5: Estrutura química do PET.....	15
Figura 3.1: Vidro e equipamento utilizados para produção das membranas.....	20
Figura 3.2: Metodologia de fabricação das membranas.....	21
Figura 3.3: Membrana polimérica no módulo de permeação.....	23
Figura 4.1: Análise da morfologia das membranas ACP com vista da seção transversal.....	30
Figura 4.2: Seção transversal de membrana de acetato de celulose desenvolvida por Maryudi et al., 2024.....	30
Figura 4.3: Análise da morfologia das membranas ACA com vista da seção transversal.....	31
Figura 4.4: Análise da morfologia das membranas ANC com vista da seção transversal.....	31
Figura 4.5: Espectroscopia do infravermelho das membranas produzidas com acetato de celulose (ACP, ACA e ACC).....	32
Figura 4.6: Análise da morfologia da membrana PBO0 (A- superfície; B- seção transversal).....	37
Figura 4.7: Análise da morfologia das membranas com a inserção de Goma Arábica (superfícies - lado esquerdo; seções transversais - lado direito). PGA1 (A/B), PGA3 (C/D), PGA5 (E/F), PGA7,5 (G/H) e PGA10 (I/J).....	38
Figura 4.8: Análise da morfologia das membranas com a inserção de Goma Karaya (aumentos de 1000x da face e 1000x da seção transversal). PGK1 (A/B), PGK3 (C/D), PGK5 (E/F) e PGK7,5 (G/H).....	41
Figura 4.9: Permeabilidade das membranas produzidas com seus respectivos desvios padrões.....	45
Figura 4.10: Ângulos de contato das membranas PBP0, PGA1,PGA3, PGA5, PGA7,5 e PG10.....	48
Figura 4.11: Ângulos de contato das membranas PBP0, PGK1,PGK3, PGK5 e PGK7,5.....	50
Figura 4.12: Espectros de FTIR das membranas de PET puro e modificadas com GA (A) e GK (B) nas concentrações de 1%, 3% e 5%.....	53
Figura 4.13: Ângulo de contato e EWC das membranas produzidas com adição de GA.....	58
Figura 4.14: Efeito da adição de GA na porosidade e no tamanho dos poros das membranas desenvolvidas.....	60
Figura 4.15: Recuperação de fluxo e índice de fouling na membrana PGA3, considerando as três triplicatas.....	61
Figura 4.16: Sequência fotográfica da membrana PGA3 durante os processos de análise de rejeição e fouling. (a) membrana ainda não utilizada; (b) membrana após o teste de rejeição de lignina; (c) membrana após a limpeza por ultrassom; (d) solução de lignina de alimentação (esquerda) e permeado (direita).....	62
Figura 4.17: Performance de rejeição das membranas PET e PGA3. PET: 4 bar, 1h, permeado 9 mL; PGA3: 1 bar, <0,5h, permeado 80 mL.....	64

LISTA DE ABREVIASÕES E SIGLAS

AC: Acetato de Celulose.

ABRELPE: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

ABREMA: Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ACA: Membrana de acetato de celulose com resina aniónica (código de membrana).

ACP: Membrana de acetato de celulose puro (código de membrana).

ANC: Membrana de acetato de celulose com resina catiônica (código de membrana).

ATR: Célula de refletância total.

EWC: Teor de água em equilíbrio.

FAO: Food and Agriculture Organization.

FRR: Índice de recuperação de fluxo.

FTIR: Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier.

GA: Goma arábica.

GK: Goma karaya.

IFR: Índice de fouling irreversível.

IPEA: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

ISWA: International Solid Waste Association.

JECFA: Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives.

MBR: Biorreatores de membrana.

MEV: Microscopia eletrônica de varredura.

NMP: N-metil-pirrolidona.

PBP0: Membrana de PET puro.

PGA1: Membrana de PET com 1% de goma arábica.

PGA3: Membrana de PET com 3% de goma arábica.

PGA5: Membrana de PET com 5% de goma arábica.

PGA7,5: Membrana de PET com 7,5% de goma arábica.

PGA10: Membrana de PET com 10% de goma arábica.

PGK1: Membrana de PET com 1% de goma karaya.

PGK3: Membrana de PET com 3% de goma karaya.

PGK5: Membrana de PET com 5% de goma karaya.

PGK7,5: Membrana de PET com 7,5% de goma karaya (código de membrana).

PET: Politemeftalato de etileno.

PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos.

RS: Resíduos sólidos.

RSU: Resíduos sólidos urbanos.

RFR: Índice de fouling reversível.

TFA: Ácido Trifluoracético.

TFR: Índice total de fouling.

TNT: Não tecido.

UNEP: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.

UV-Visível: Espectrofotômetro Ultra-violeta Visível.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composições das 13 membranas fabricadas.....	19
Tabela 4.1: Permeabilidade das membranas fabricadas.....	44
Tabela 4.2: Medidas dos Ângulos de contato das membranas fabricadas.....	48
Tabela 4.3: Propriedades mecânicas das membranas produzidas.....	56

1. INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais decorrentes das atividades humanas iniciaram-se muito antes da Revolução Industrial, mas, foi nesse período que tais atividades intensificaram-se, resultando em consequências ambientais cada vez mais graves. Inicialmente, não se dava a devida importância às consequências dessas ações, mas hoje, a grande geração de resíduos é um dos problemas ambientais mais alarmantes. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2022, o Brasil gerou 81,8 milhões de toneladas de resíduos. A previsão da International Solid Waste Association (ISWA) é que, até 2050, a geração mundial de resíduos sólidos atinja 3,4 bilhões de toneladas anuais.

Está ocorrendo um “fenômeno” mundial de modelo de consumo que tem se mostrado como um dos principais impulsionadores do aumento anual na quantidade de resíduos sólidos produzidos em todo o mundo (Wahlén, 2018): segundo relatório das Nações Unidas (2018), grande maioria dos produtos adquiridos pelos consumidores são descartados como resíduos nos primeiros seis meses após a compra. Entre esses resíduos, estima-se que 300 milhões de toneladas anuais sejam plásticos, representando a maior parte da geração mundial (Tulashie *et al.*, 2020).

O acetato de celulose é um polímero que possui grande potencial para reuso. Tratando-se da produção industrial, sabe-se que a geração de resíduos industriais é comum, e a não conformidade dos materiais nas linhas de produção é esperada, seja por padrões exigidos internamente ou por fiscalizações externas. Um exemplo é o resíduo das barras de filtro de cigarro, que é produzido a partir do acetato de celulose. Esse material é utilizado para remover constituintes da fumaça, como nicotina e alcatrão, e sua eficiência depende de características como comprimento, circunferência e firmeza do filtro, que é aumentada com a adição de triacetina como plastificante (Browne, 1990).

Neste contexto, há também o politereftalato de etileno (PET), amplamente utilizado na produção de garrafas, que é um dos polímeros mais estudados devido ao seu impacto ambiental, que vai desde a necessidade de grandes áreas para disposição final, quando não são realizadas técnicas de destinação final, até a presença de microplásticos

em corpos hídricos. Embora existam estudos sobre a gestão e descarte do PET, ainda são poucos os produtos reciclados com bom retorno financeiro e ambiental (Ayeleru, 2020).

Diversificar os produtos reciclados e ampliar as possibilidades de materiais reutilizados é benéfico tanto para o meio ambiente quanto para a qualidade de vida da população. O acetato de celulose, por exemplo, já é amplamente reaproveitado na produção de sacolas, embalagens, papéis e mulch, um produto utilizado para proteção de superfícies e controle de erosão na agricultura (Silva *et al.*, 2018).

É notável que há relação direta entre a alta geração de resíduos sólidos e a contaminação de corpos hídricos. Portanto, a busca por tecnologias limpas para mitigar tais danos e focar também no tratamento de águas tem crescido, movimentando anualmente mais de 10,8 bilhões de dólares na economia global (Galiano *et al.*, 2018). Dentro deste cenário, tem-se o emprego de membranas poliméricas, uma tecnologia de separação relativamente recente e eficiente, com baixo custo operacional, baixa demanda energética e aplicabilidade em diversos tipos de separação (Nasser, 2020).

Membranas de celulose têm mostrado grande potencial como matriz polimérica orgânica para processos de filtração, devido à sua boa tenacidade, biocompatibilidade, baixo custo e alta capacidade de fluxo. Estudos buscam aprimorar a estrutura dos poros e a morfologia das membranas (Silva; Belmonte-Reche; De Amorim, 2021). Por exemplo, Athira *et al.* (2020) desenvolveram membranas mistas de acetato de celulose com polietersulfona para adsorção de proteínas sanguíneas, enquanto Silva *et al.* (2021) produziram membranas de acetato de celulose com porosidade aumentada utilizando a técnica de inversão de fases.

Além de ser um dos resíduos mais gerados, a alta permeabilidade óptica do PET o torna um substrato útil em muitas aplicações, como no processamento de filmes finos (Ryu, 2014). Embora membranas de PET já sejam utilizadas no tratamento de águas residuais e purificação de água, o potencial do uso de resíduos plásticos PET na fabricação de membranas ainda não foi totalmente explorado devido a alguns obstáculos, como sua superfície naturalmente hidrofóbica (Ali, 2022).

Uma das estratégias para superar essas limitações tem sido a modificação de matrizes poliméricas com aditivos hidrofílicos. Nesse contexto, destaca-se o uso de

biopolímeros naturais, como a goma arábica (GA) e a goma karaya (GK), que têm ganhado atenção por suas propriedades estruturais e por sua capacidade de melhorar a hidrofilicidade, porosidade e resistência mecânica das membranas. A GA, rica em grupos hidroxila, e a GK, parcialmente acetilada, são capazes de interagir com a matriz polimérica por meio de ligações de hidrogênio e mecanismos físicos, promovendo modificações na estrutura morfológica e no desempenho das membranas em processos de filtração (Sabri *et al.*, 2019; Alhassan, 2014). Além disso, esses aditivos são biodegradáveis, abundantes, e de baixo custo, o que reforça sua viabilidade para aplicações ambientais (Coelhoso *et al.*, 2025).

Entretanto, apesar do crescente interesse na reciclagem e reaproveitamento de polímeros para produção de membranas, não foram encontrados estudos que investiguem a produção de membranas de acetato de celulose com o material residual que será utilizado neste trabalho, ou a combinação do politereftalato de etileno (PET) com as gomas arábica ou karaya na fabricação de membranas poliméricas. Portanto, a proposta deste trabalho representa uma abordagem inovadora e pouco explorada na literatura atual.

Diante desse cenário, este trabalho visa desenvolver membranas a partir de materiais poliméricos residuais de acetato de celulose e de PET com aprimoramento por gomas de polissacarídeos (GA e GK), que têm o objetivo de ajustar as propriedades estruturais e superficiais das membranas, atuando na hidrofobicidade, porosidade e propriedades mecânicas para aplicação em processos de separação. Essas abordagens buscam, além de diversificar as possibilidades de reaproveitamento de materiais poliméricos, oferecer solução para dois problemas ambientais críticos, tais como: a alta geração de resíduos sólidos e a degradação da qualidade dos corpos hídricos.

1.1 Objetivos

O objetivo principal do trabalho é desenvolver, caracterizar e avaliar o desempenho de membranas poliméricas, a partir de material de reuso de acetato de celulose e de PET modificado com a adição de gomas de polissacarídeos.

1.2 Objetivos Específicos

- Sintetizar solução polimérica de acetato de celulose residual;

- Sintetizar solução polimérica de politereftalato de etileno residual com adição de gomas de polissacarídeo;
- Produzir filmes poliméricos pela técnica de inversão de fases;
- Caracterizar as membranas em relação às suas propriedades químicas, mecânicas e morfológicas;
- Avaliar a melhor condição para a diminuição da hidrofobicidade das membranas de politereftalato de etileno.
- Determinar o desempenho das membranas quanto à rejeição de contaminantes modelo em solução aquosa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Resíduos sólidos

O avanço da urbanização, da industrialização e do crescimento populacional tem impulsionado significativamente a geração de resíduos sólidos (RS) em escala global, tornando sua gestão um dos maiores desafios da atualidade (Sesay; Fang, 2025). Estima-se que, até 2050, a produção anual de RS ultrapasse 3,4 bilhões de toneladas, o que evidencia a complexidade crescente desse problema (UNEP, 2024). Os resíduos sólidos são definidos como qualquer material descartado considerado indesejável pelo gerador original (Amare, 2022), e sua gestão eficaz é fundamental para mitigar impactos ambientais, econômicos e sociais.

Países em desenvolvimento enfrentam grandes desafios nesse campo, especialmente pela limitação de recursos financeiros e pela carência de infraestrutura adequada para a implantação de sistemas eficientes de gerenciamento de resíduos (Kanhai *et al.*, 2021). As fontes geradoras são diversas, incluindo domicílios, indústrias, hospitais, comércios, agricultura e serviços de limpeza urbana (Santos, 2012).

Embora os avanços tecnológicos tenham sido significativos, o desenvolvimento industrial contínuo intensifica a poluição ambiental e a exploração de recursos naturais, resultando na geração de substâncias perigosas que afetam a saúde humana (Veber *et al.*, 2022). Os resíduos sólidos urbanos (RSU) apresentam composição variada: em 2022, cerca de 33,6% eram recicláveis secos, com destaque para plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), vidro (2,7%) e metais (2,3%) (Planares, 2022).

A produção de plásticos, especificamente, representa um dos aspectos mais preocupantes da crise dos resíduos. Segundo Ritchie e Roser (2023), a produção mundial de plásticos ultrapassou 380 milhões de toneladas anuais, sendo que cerca de 267 milhões de toneladas foram descartadas como resíduos em 2022. Destes, apenas 9% foram reciclados, 29 milhões de toneladas tiveram descarte inadequado e 103 milhões foram destinados a aterros sanitários (Huang *et al.*, 2024). Além disso, estima-se que a fabricação de garrafas plásticas consuma aproximadamente 1,6 milhão de barris de petróleo por ano (Stock, 2021).

Esse cenário é agravado pelo modelo de consumo acelerado e insustentável vigente. De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, cerca de 99% dos produtos adquiridos pelos consumidores são descartados como resíduos nos primeiros seis meses após a compra (UNEP, 2024). Esse padrão, baseado em uma lógica linear de extração, uso e descarte, contraria os princípios da economia circular, que propõe a reintegração dos materiais aos ciclos produtivos por meio do reuso, reciclagem e valorização dos resíduos (Sesay; Fang, 2025; Geneva Environment Network, 2025).

Diante desse contexto, a gestão de resíduos sólidos deve ser tratada não apenas como uma medida ambiental, mas também como uma responsabilidade social e um dever do poder público. A efetividade dessa gestão depende de políticas públicas integradas, de capacidades organizacionais robustas e do engajamento da sociedade civil com práticas mais sustentáveis de consumo e descarte (IFC, 2024).

2.2 Resíduos sólidos no Brasil

A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil tem apresentado crescimento constante, impulsionado por fatores como urbanização acelerada, aumento do consumo e mudanças nos hábitos da população. Segundo o relatório mais recente da Abrelpe (2024), o Brasil gerou, em 2023, aproximadamente 82,5 milhões de toneladas de RSU, o que corresponde a 226 mil toneladas por dia e a uma média per capita de 1,039 kg/hab.dia.

Apesar dos avanços normativos trazidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, cerca de 38,5% dos resíduos ainda são dispostos de forma inadequada, em lixões ou aterros controlados (Abrelpe, 2024). Isso evidencia lacunas entre a legislação e sua efetiva implementação no território nacional.

A gestão dos resíduos sólidos depende essencialmente da infraestrutura pública e da capacidade dos municípios em executar ações de coleta, triagem, tratamento e destinação final adequada. Entretanto, muitos municípios brasileiros operam com sistemas deficitários — mais de 90% oferecem coleta convencional, mas apenas cerca de 32% realizam coleta seletiva, e a taxa de recuperação de recicláveis continua baixa. Esses fatores dificultam a efetivação dos princípios da economia circular no país (IPEA, 2022).

Segundo Souza *et al.* (2023), embora o país possua diretrizes consolidadas na PNRS, a prática municipal cotidiana ainda é limitada por entraves institucionais, financeiros e operacionais. Em 2023, menos de 5% dos RSU foram reciclados no Brasil (Abrelpe, 2024), resultado considerado extremamente baixo frente ao potencial econômico e ambiental da reciclagem. Estima-se que o país desperdice aproximadamente R\$ 14 bilhões por ano em materiais recicláveis, que acabam sendo encaminhados a aterros ou lixões, gerando perda de valor e impactos sociais negativos (CNN Brasil, 2024).

Regionalmente, a geração de resíduos sólidos se concentra principalmente no Sudeste (43,2%), seguido do Nordeste (25,6%), Sul (14,5%), Centro-Oeste (9,3%) e Norte (7,4%) (Abrelpe, 2024), refletindo o perfil populacional e econômico do país. Segundo a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2023), a leve redução da geração per capita observada em 2022 foi um efeito pontual do fim do isolamento social, com a retomada de atividades comerciais e escolares, que deslocaram parte dos resíduos do ambiente domiciliar para o setor de serviços.

Diante desse cenário, fica evidente a necessidade de fortalecer as políticas públicas de gestão integrada de resíduos, com foco em prevenção, valorização de materiais recicláveis, inclusão social e incentivo à infraestrutura local, para alinhar a prática brasileira aos princípios da sustentabilidade.

2.3 Degradação do meio ambiente

A degradação ambiental é uma consequência direta das inadequadas práticas de gerenciamento de resíduos sólidos, que afetam negativamente a qualidade de vida e a saúde pública. O lixiviado, um dos subprodutos mais preocupantes dos aterros sanitários, é definido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) como um líquido de cor escura, com mau cheiro e elevada Demanda Química de Oxigênio (ABNT 8419/1992; ABNT, 2004).

Esse líquido é originado pela decomposição de matéria orgânica por micro-organismos, pelas infiltrações pluviométricas e pela umidade presente nos resíduos (Ahmed e Lan, 2012; Renou *et al.*, 2008; Koshy *et al.*, 2007; Giordano *et al.*, 2002). As águas pluviais, arrastam substâncias presentes nos resíduos, formando uma mistura

complexa que pode conter matéria orgânica dissolvida, ácidos orgânicos voláteis, metais pesados e microrganismos (Lins, 2003).

Os impactos dessa poluição se estendem à saúde pública. Estima-se que cerca de 24% de todas as mortes globais e 28% das mortes infantis estejam associadas à poluição ambiental, incluindo a contaminação do ar, solo e água. Isso se deve, principalmente, à poluição causada por práticas inadequadas de manuseio de resíduos sólidos, que levam à transmissão de infecções respiratórias, doenças diarreicas e doenças transmitidas por vetores (Daryabeigi, 2019; Farzadkia, 2021).

As práticas inadequadas de descarte e gerenciamento de resíduos sólidos são responsáveis também por danos estéticos ao ambiente e pela deterioração do saneamento, contribuindo para doenças gastrointestinais, respiratórias, dermatológicas e até mesmo distúrbios psicológicos (Tenodi, 2020; Kanhai *et al.*, 2021). A presença de produtos químicos tóxicos nos resíduos sólidos descartados é um fator preocupante, pois a decomposição desses resíduos libera gases como amônia e sulfeto de hidrogênio, que, além de causarem odores desagradáveis, podem agravar reações alérgicas e provocar danos genéticos, defeitos congênitos, câncer e outros distúrbios congênitos (Ansari, 2019; Norsa'adah, 2020).

Em um contexto global, a necessidade de um ambiente seguro e saudável para proteger a saúde das crianças e promover o bem-estar comunitário é crucial. A sustentabilidade ambiental, como destacado nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, exige a implementação eficaz de sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos (Abubakar, 2022).

Para mitigar os impactos ambientais e proteger a saúde pública, diversos métodos de tratamento de águas residuais foram desenvolvidos, incluindo precipitação, coagulação, floculação, adsorção, troca iônica e separação por membranas (Ali, 2023). As membranas, em particular, têm se mostrado eficientes nos processos de separação, oferecendo baixo custo operacional e demanda energética reduzida, além de serem aplicáveis a diferentes tipos de separação e purificação (Nasser, 2020).

A crescente produção e descarte inadequado de materiais plásticos e de acetato de celulose têm contribuído significativamente para a degradação ambiental. Esses

materiais, amplamente utilizados em diversas indústrias, possuem uma taxa de decomposição extremamente lenta, o que resulta em sua persistência no meio ambiente por longos períodos. Quando descartados de forma inadequada, esses resíduos se acumulam em aterros sanitários, corpos hídricos e ecossistemas terrestres, liberando substâncias tóxicas durante sua degradação. Além disso, a fragmentação desses materiais em microplásticos e micropartículas de celulose representa uma ameaça à vida aquática e à qualidade da água, contribuindo para a contaminação dos recursos hídricos e afetando a biodiversidade (Nasser, 2020; Shen, 2021).

2.4 Membranas poliméricas

As membranas poliméricas são essenciais em tecnologias de separação, especialmente no tratamento de águas residuais. Diversos métodos têm sido adotados para enfrentar os desafios associados ao tratamento de águas residuais, incluindo precipitação, coagulação, floculação, adsorção, troca iônica e filtração por membrana (Ali *et al.*, 2023). Entretanto, o custo elevado dos materiais de membrana ainda é um fator limitante para alcançar um desempenho ideal nos processos de separação (Abdullah *et al.*, 2019).

Os biorreatores de membrana (MBR), que combinam tratamento biológico e filtração por membrana, também têm atraído interesse significativo devido à alta qualidade do efluente, menor pegada espacial e baixa produção de lodo. No entanto, a incrustação das membranas continua a ser um grande desafio, afetando a eficiência da filtragem, aumentando o consumo de energia e reduzindo a vida útil das membranas (Mu *et al.*, 2019).

Além de dificuldades técnicas, o alto custo de fabricação das membranas representa uma barreira para uma utilização mais ampla dessas tecnologias. O mercado global de membranas movimenta mais de \$10,8 bilhões anualmente, com a maioria das membranas sendo produzidas a partir de polímeros de origem fóssil, o que levanta preocupações ambientais (Galiano *et al.*, 2018).

Para melhorar o desempenho das membranas e superar problemas como a incrustação, novas estratégias estão sendo desenvolvidas. Uma abordagem promissora é a integração de aditivos na estrutura das membranas. A propriedade hidrofóbica das membranas poliméricas é um problema significativo, pois compromete a eficiência do

tratamento de água. Para abordar essa questão, a inclusão de aditivos como biopolímeros é crucial para ajustar as propriedades das membranas, melhorar a eficiência e prolongar sua vida útil (Ayeleru, 2020). Apesar dos avanços, poucos produtos resultantes da reciclagem de resíduos têm sido desenvolvidos com sucesso em termos de retorno financeiro e ambiental, o que ressalta a necessidade de continuar explorando e desenvolvendo soluções sustentáveis.

2.5 Biopolímeros: Acetato de celulose e gomas naturais

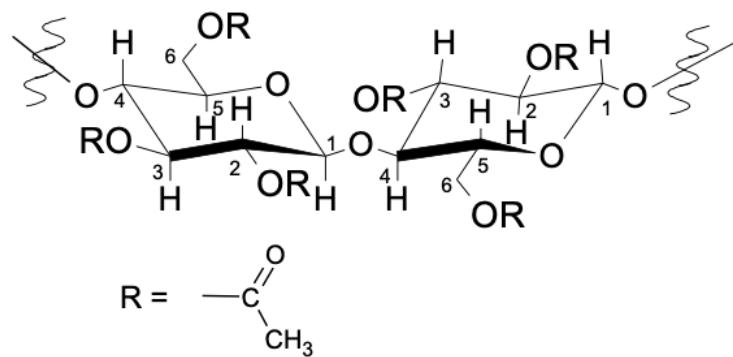
Biopolímeros são macromoléculas naturais ou sintéticas que podem ser decompostas por organismos vivos, tornando-se uma alternativa sustentável aos polímeros convencionais derivados de petróleo. Comumente encontrados na natureza, biopolímeros como a celulose, a quitina, e as proteínas têm sido amplamente utilizadas em diversas aplicações, desde embalagens biodegradáveis até sistemas de liberação controlada de fármacos. Sua biodegradabilidade e biocompatibilidade fazem deles uma opção atraente para tecnologias voltadas à sustentabilidade ambiental (Galiano *et al.*, 2018; Oliveira & Silva, 2021).

O uso de biopolímeros em processos industriais é cada vez mais comum devido às suas propriedades únicas, como resistência mecânica, estabilidade térmica e capacidade de formar filmes, além de serem produzidos a partir de fontes renováveis. Polímeros como o polihidroxialcanoato e o ácido polilático são exemplos de biopolímeros amplamente estudados e aplicados em embalagens e dispositivos médicos devido à sua biodegradabilidade e biocompatibilidade (Sharma *et al.*, 2022).

No contexto do desenvolvimento de membranas, os biopolímeros têm sido explorados pela sua capacidade de formar estruturas porosas e seletivas, adequadas para processos de separação, como a filtração. Estudos recentes têm focado no desenvolvimento de membranas híbridas, combinando biopolímeros com outros materiais para melhorar propriedades como permeabilidade, resistência e seletividade. Por exemplo, Athira *et al.* (2020) desenvolveram membranas mistas de acetato de celulose, como um biopolímero, com polietersulfona, destacando-se pela capacidade de adsorver proteínas sanguíneas, enquanto outros pesquisadores exploraram o uso de polissacarídeos para aumentar a porosidade das membranas, melhorando sua eficiência em processos de filtração (Silva *et al.*, 2021).

A celulose é um polissacarídeo encontrado principalmente em plantas e composto por biomassa lignocelulósica. Já o acetato de celulose é um polímero derivado da celulose, caracterizado por sua estrutura altamente pura. Este éster orgânico é obtido através do tratamento da celulose com ácido acético, anidrido acético e ácido sulfúrico como catalisador (Nascimento, 2015). O acetato de celulose (Figura 2.1) é um material extremamente versátil e suas aplicações são variadas, sendo muito utilizado desde a indústria têxtil, na tecnologia de separação e filtração por membranas, até no processo de fabricação de cigarros, onde este composto é utilizado na produção dos filtros (Galiano *et al.*, 2018; Browne, 1990).

Figura 2.1: Estrutura química do acetato de celulose.

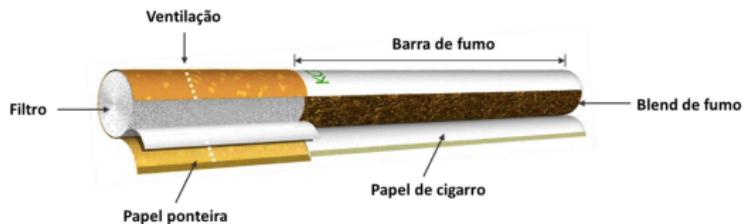


A respeito das membranas de acetato de celulose, elas oferecem várias vantagens, como boa tenacidade, alta biocompatibilidade, baixo custo e elevada capacidade de fluxo. Além disso, a celulose e seus derivados, como o acetato de celulose, também têm se destacado na produção de membranas para filtração de água, devido à sua alta resistência mecânica, boa estabilidade química e capacidade de adsorção de contaminantes (Galiano *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2021). No entanto, essas membranas possuem limitações, incluindo uma faixa restrita de pH operacional, suscetibilidade a ataques biológicos e compactação estrutural sob alta pressão (Silva; Belmonte-Reche; de Amorim, 2021). Para superar essas limitações, pesquisas têm se concentrado em melhorar a estrutura dos poros e a morfologia da seção transversal das membranas, visando aumentar sua eficiência e durabilidade.

Em relação ao filtro do cigarro, este pode ser fabricado a partir de diversos materiais, sendo o acetato de celulose um deles. A eficiência de filtros à base de acetato

de celulose é influenciada significativamente pelo comprimento, circunferência e firmeza deste (Browne, 1990). Tal firmeza é conferida a partir de uma pulverização de triacetina (de 5 a 10%), com propósito de efeito plastificante, sendo este um composto aglutinante. A Figura 2.2 mostra o produto em foco.

Figura 2.2: Cigarro com o filtro de acetato de celulose.



Fonte: Alves, 2016.

A utilização de acetato de celulose reciclado para a fabricação de membranas representa uma atraente possibilidade na busca por soluções sustentáveis. Recentemente, foi demonstrado que membranas compostas por acetato de celulose reciclado, combinado com polietersulfona, podem ser empregadas na adesão de plaquetas e na adsorção de proteínas do sangue (Athira; Mohanty; Nayak, 2020). Esta abordagem não só contribui para a redução do impacto ambiental associado ao descarte de acetato de celulose, mas também oferece uma alternativa econômica e ecológica às técnicas convencionais de produção.

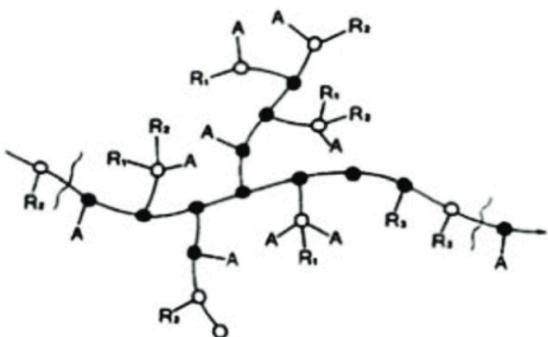
Além disso, a integração com resíduos plásticos, como o PET, na produção de membranas também tem ganhado atenção como uma solução inovadora para a reutilização de resíduos sólidos e a mitigação dos impactos ambientais. Membranas de PET têm sido estudadas para o tratamento de águas residuais, e a combinação com biopolímeros pode oferecer novas perspectivas para a fabricação de membranas mais eficientes e ambientalmente amigáveis (Ali, 2023).

Ainda dentro da área ramo da produção de membranas poliméricas, diversas pesquisas dedicam-se a explorar as propriedades físico-químicas, morfológicas e estruturais de gomas naturais, como a goma xantana, a goma karaya e a goma arábica, evidenciando seu potencial para serem utilizadas como aditivos, melhorando as

características das membranas. A goma xantana, por exemplo, foi utilizada para aprimorar as propriedades de membranas de polissulfona, tornando-as mais eficazes na separação de ácido húmico. Além de demonstrar boa eficiência na remoção desse ácido, as membranas tratadas com goma xantana apresentaram redução no ângulo de contato e aumento na permeabilidade à água (Chaturvedi *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2003).

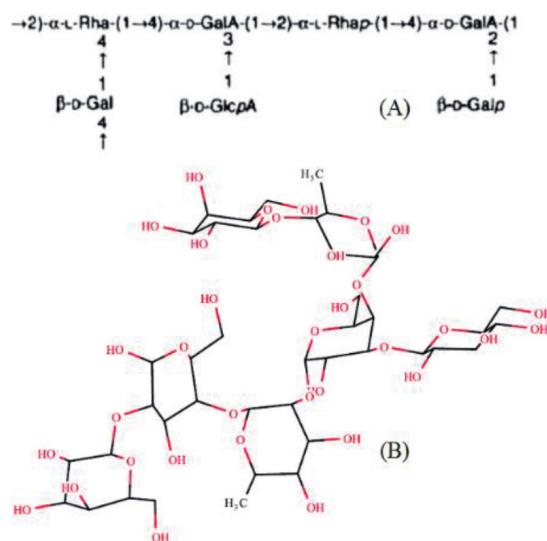
A goma arábica (Figura 2.3), um polissacarídeo natural composto de *L*-arabinose, *L*-ramnose e ácido *D*-glucurônico, tem sido estudada por suas interações com compostos orgânicos e inorgânicos, além de nanopartículas, devido aos grupos hidroxila presentes em sua estrutura. No entanto, a literatura ainda é escassa no que se refere ao estudo de sua incorporação em membranas para mitigação de incrustações (Chai *et al.*, 2021; Gidde, 2021).

Figura 2.3: Estrutura química da goma arábica.



Já goma karaya, definida pelo Comitê Conjunto de Especialistas em Aditivos Alimentares (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives – JECFA), como exsudatos secos de caules e ramos da planta *Sterculia urens* Roxburgh, é um polissacarídeo parcialmente acetilado com alta massa molecular, comumente utilizada em estudos que investigam suas propriedades quando incorporada em membranas de álcool polivinílico eletrofiado (Chaturvedi *et al.*, 2001; FAO, 2021).

Figura 2.4: Estrutura química da goma karaya.



Desta forma, a presença de aditivos pode desempenhar um papel crucial na modificação das propriedades de membranas poliméricas. Extensos resultados obtidos em estudos anteriores indicam que o desenvolvimento de membranas a partir de blendas poliméricas com frações de elementos hidrofilicos influencia significativamente o desempenho desses materiais, levando a um menor potencial geral de incrustação e menor ângulo de contato, reduzindo a hidrofobicidade (Mu et al., 2019; Ahmad, 2018).

O uso de biopolímeros como aditivos em membranas poliméricas e materiais de reuso na criação de novas tecnologias de separação tem o potencial de contribuir não só para a sustentabilidade, como também para a preservação ambiental. Portanto, no contexto deste trabalho, o acetato de celulose residual será utilizado como matriz polimérica principal para a produção de membranas, enquanto os biopolímeros goma arábica e goma karaya serão empregados como aditivos em membranas produzidas a partir de PET residual, com o objetivo de melhorar as propriedades físicas e estruturais das membranas, essenciais para aplicações em processos de separação.

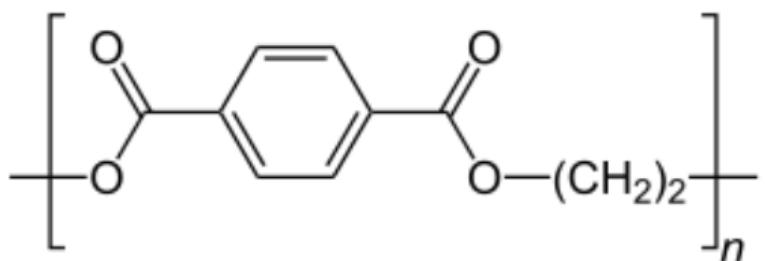
2.6 Poliéster tereftalato de etileno

O Poliéster Tereftalato de Etileno (PET) é um polímero amplamente utilizado, caracterizado por sua estrutura química que inclui grupos ésteres. Esta configuração confere ao PET uma superfície naturalmente hidrofóbica devido à sua baixa interação com a água (Rajesh *et al.*, 2014). Desenvolvido em 1946 por Whinfield e Dickson, o PET é um poliéster de cor branca ou creme, com uma viscosidade intrínseca variando entre

0,70 e 0,85. Destaca-se por sua processabilidade, estabilidade térmica e resistência à tração e impacto (Paul; Goodman; Kroschwitz, 1985; Caldicott, 1999).

A estrutura semicristalina do PET (Figura 2.5), que combina regiões amorfas e cristalinas, influencia diretamente o processamento e as propriedades finais do material (Chanda; Roy, 2009). A produção de PET tem crescido significativamente tanto no Brasil quanto no cenário global. No Brasil, o PET é amplamente utilizado em embalagens para alimentos e bebidas, e na produção de fibras sintéticas.

Figura 2.5: Estrutura química do PET.



Em 2016, o consumo de PET no Brasil alcançou 840 kton, representando 8,1% do consumo total de resinas termoplásticas no país (ABIPET, 2016; ABIPLAST, 2017). Globalmente, os resíduos de PET gerados em 2022 foram estimados em cerca de 381 milhões de toneladas, sublinhando a magnitude do desafio ambiental relacionado ao descarte inadequado (Ali, 2023).

Devido às suas características não biodegradáveis, a maioria dos plásticos tende a se acumular e se fragmentar, acabando por atingir os ambientes marinhos tanto através de transporte fluvial quanto diretamente das áreas costeiras (Barnes, 2009). Outra característica desses materiais é ter a sua massa específica maior que a da água, influenciando diretamente a poluição dos ambientes aquáticos quando descartado de forma incorreta (Oliveira, 2011). As atividades terrestres são identificadas como a principal fonte de detritos plásticos marinhos (Li *et al.*, 2016). Além disso, devido à sua alta resistência à corrosão, os plásticos são considerados materiais de difícil degradação, podendo persistir no meio ambiente por até um século (Cole *et al.*, 2011).

O uso intensivo de plásticos ao longo das últimas décadas resultou em uma produção global crescente e, consequentemente, no acúmulo expressivo desses materiais no meio ambiente. Estima-se que, em 1950, a produção era de 2 milhões de toneladas, enquanto em 2019 esse valor já ultrapassava 460 milhões de toneladas anuais. Até 2023, aproximadamente 79% de todo o plástico produzido globalmente havia sido acumulado em aterros, lixões ou no ambiente natural, como rios e oceanos (UNESCO, 2023). De acordo com projeções recentes, caso os padrões atuais de produção e gestão de resíduos se mantenham, a geração anual de plásticos pode ultrapassar 884 milhões de toneladas até 2050, com um acúmulo estimado em 4.725 milhões de toneladas desde o início do século XXI (Dokl *et al.*, 2024).

Esse cenário é agravado pela gestão ineficiente dos resíduos sólidos em diversos países em desenvolvimento, especialmente em nações de baixa e média renda, onde a coleta seletiva, a reciclagem e a infraestrutura adequada ainda são incipientes (Guerrero *et al.*, 2013). A combinação entre crescimento da demanda por produtos plásticos e descarte inadequado amplia os riscos ambientais, sanitários e sociais, tornando urgente a implementação de políticas públicas voltadas à redução da produção, reutilização e incentivo à economia circular.

O rápido crescimento da demanda por produtos plásticos (Geyer, 2017), aliado à gestão inadequada de resíduos sólidos em países de baixa e média renda (Guerrero, 2013), contribui para a crise atual de poluição plástica. Estudos indicam que anualmente, cerca de 11 milhões de toneladas métricas de plásticos acabam em sistemas aquáticos devido à má gestão de resíduos, e mesmo com os esforços de mitigação em andamento, os cenários mais otimistas ainda preveem que entre 20 e 53 Mt de plástico por ano continuariam sendo liberados no ambiente aquático (Borrelle, 2020; Lau *et al.*, 2020).

A reciclagem do PET é vital para reduzir a dependência de plástico virgem e minimizar impactos ambientais, como consumo de água e emissões. Garrafas plásticas de PET são frequentemente recicladas para novas aplicações, incluindo o tratamento de águas residuais (El-Khateeb *et al.*, 2018; El-Khateeb *et al.*, 2021). No entanto, a extração de monômeros a partir de resíduos de PET ainda é cara e não demonstrou viabilidade em larga escala, o que destaca a necessidade de novas abordagens para a reciclagem e regeneração do PET (Mu *et al.*, 2019).

As membranas de PET têm mostrado potencial em aplicações de separação. Rajesh *et al.* (2014) desenvolveram membranas compostas por PET reciclado e polivinilpirrolidona (PVP) utilizando um processo de inversão de fase. Essas membranas foram avaliadas quanto à permeabilidade à água pura, corte de peso molecular, fluxo e morfologia. No trabalho citado anteriormente, a adição de aditivos, como o polietilenoglicol (PEG) com alto peso molecular, melhorou a permeabilidade da água pura, e influenciou na rugosidade e na morfologia da superfície das membranas.

Apesar das técnicas promissoras, as membranas de PET reciclado enfrentam desafios significativos. A principal dificuldade reside na gestão da incrustação e na redução da eficiência durante a filtração. Além disso, a produção de membranas de PET reciclado ainda enfrenta questões relacionadas ao custo e à viabilidade econômica (Ali *et al.*, 2021). A rigidez e baixa flexibilidade do PET, resultantes do grupo etileno e do anel benzênico dissubstituído, também limitam sua aplicabilidade em algumas condições (Awaja & Pavel, 2005). Desta forma, a modificação do PET com a inserção de aditivos é uma metodologia promissora para a tecnologia.

Dada a crescente crise de poluição plástica e o impacto ambiental associado à produção e ao descarte de PET, é essencial continuar a pesquisa e o desenvolvimento de métodos eficazes para a modificação e otimização das membranas de PET reciclado. Melhorias nesses materiais não só contribuirão para a redução dos custos de fabricação e do impacto ambiental, mas também aumentarão sua eficácia em aplicações como o tratamento de águas residuais, tornando a reciclagem de PET uma solução viável e sustentável (Thompson, 2009; Baste, 2021; Geyer, 2017; Guerrero, 2013; Barnes, 2009; Andrade, 2011; Cole *et al.*, 2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material Residual e Reagentes utilizados

O Acetato de Celulose (AC) foi adquirido mediante doação de indústria tabagista situada na cidade Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. O material é fruto de descarte da linha de produção industrial, após não atingir as necessárias características de qualidade da empresa. O material possui peso total de 0,65g, e primeiramente teve retirado papel que o englobava, para então ser cortado com tesoura manual.

O Poli tereftalato de Etileno (PET) utilizado foi obtido mediante descarte de garrafas já utilizadas comercialmente. As garrafas foram lavadas e secas em temperatura ambiente. Após secas, foram submetidas a cortes também com tesoura manual até atingirem tamanho médio de 0,01 m² de área.

As resinas comerciais utilizadas foram Duolite AP143/1083 e Amberlit IRP69, de carga aniónica e catiônica respectivamente, ambas da companhia Dow Company. As gomas Arábica e Karaya foram adquiridas das companhias Issofar e Sigma respectivamente. Os solventes Trifluoracético (TFA) e N-metil-pirrolidona (NMP) foram obtidos da companhia Sigma. O Álcool Etílico utilizado foi adquirido da empresa Dinâmica. O suporte de não tecido (TNT), produzido a partir de fibras de poliéster com espessura em média de 7 mm, foi adquirido da companhia Kami. Para os testes de rejeição, foi utilizada lignina residual proveniente de indústria do setor papeleiro.

3.2 Produção das membranas

Para a produção das membranas, primeiramente os polímeros, biopolímeros e solventes foram pesados em beckers em balança analítica e adicionados a erlenmeyers de vidro borosilicato totalmente vedados com parafilm da empresa American, a fim de evitar a evaporação dos solventes. As proporções para cada membrana preparada estão apresentadas na Tabela 3.1. As soluções foram então colocadas sob agitação por barra magnética a 500 rpm e temperatura ambiente até homogeneização total. Após total homogeneização, as soluções foram deixadas em repouso para que não houvesse a presença de bolhas de ar em etapas futuras.

Tabela 3.1: Composições das 13 membranas fabricadas.

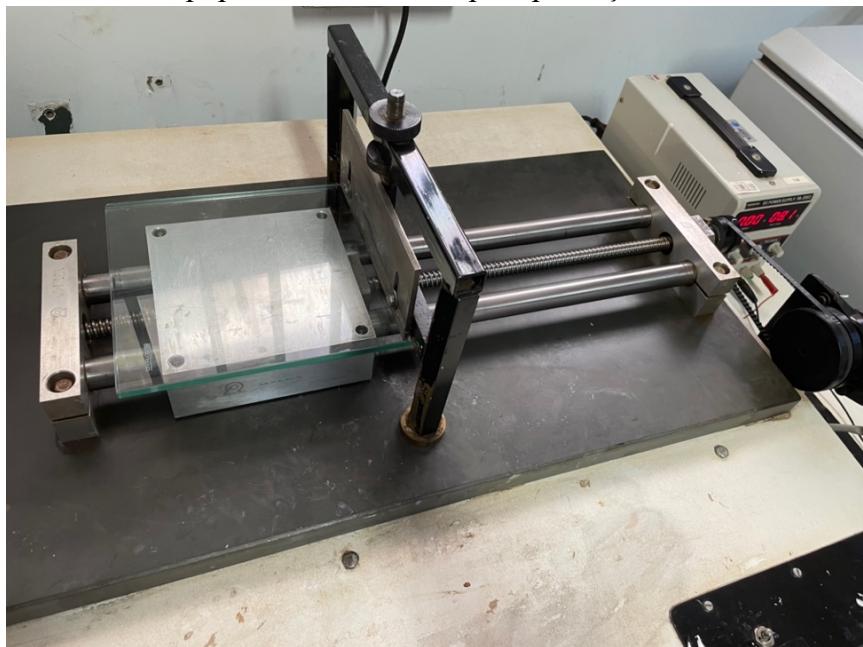
Membrana	Código	AC residual (p.%)	PET residual (p.%)	Goma	Goma (p.%)	Solvente	Proporção solvente (p.%)	Resina	Proporção Resina (p.%)
1	ACP	20						-	-
2	ACA	15	-	-	-	NMP	80	Aniônica	5
3	ACC	15						Catiônica	5
4	PBP0		15	-	0				
5	PGA1		14		1				
6	PGA3		12		3				
7	PGA5		10	Arábica	5				
8	PGA7,5		7,5		7,5				
9	PGA10		5		10				
10	PGK1		14		1				
11	PGK3		12		3				
12	PGK5		10	Karaya	5				
13	PGK7,5		7,5		7,5				

AC=Acetato de celulose; PET= Polietereftalato de Etileno; NMP= N-Metil-Pirrolidona; TFA= Ácido Trifluoracético; ANP= 20% AC, 80% NMP; ANA= 15% AC, 80% NMP, 5% resina aniônica; ANC= 15% AC, 80% NMP, 5% resina catiônica; PBP0= 15% PET residual, 85% TFA; PGA1= 14% PET residual, 1% goma arábica, 85% TFA; PGA3= 12% PET residual, 3% goma arábica, 85% TFA; PGA5= 10% PET residual, 5% goma arábica, 85% TFA; PGA7,5= 7,5% PET residual, 7,5% goma arábica, 85% TFA; PGA10= 5% PET residual, 10% goma arábica, 85% TFA; PGK1= 14% PET residual, 1% goma karaya, 85% TFA; PGK3= 12% PET residual, 3% goma karaya, 85% TFA; PGK5= 10% PET residual, 5% goma karaya, 85% TFA; PGK7,5= 7,5% PET residual, 7,5% goma karaya, 85% TFA.

Nas membranas que tiveram resinas incorporadas, estas foram adicionadas após a homogeneização completa das soluções. Todas as membranas foram preparadas a partir do método de inversão de fase, segundo metodologia análoga utilizada por Rodrigues *et al.* (2024). Para as membranas produzidas com AC, o não solvente utilizado foi a solução de álcool etílico 20%, preparada com água deionizada. Para membranas de PET, o não solvente utilizado foi água deionizada.

Para moldagem dos filmes, foi utilizado equipamento específico para o espalhamento das soluções poliméricas e confecção das membranas, apresentado na Figura 3.1, além de placa de vidro de tamanho 20x20 cm. As soluções poliméricas foram despejadas na placa de vidro, e então ligava-se o equipamento, fazendo com que a placa de vidro se movimentasse para o lado contrário, espalhando toda a solução. Para as membranas de AC, foi utilizado suporte de TNT. A espessura entre a placa de vidro e o equipamento foi definida a espessura de 0,7 mm para todas as membranas produzidas. Nas membranas de AC, o TNT foi previamente acoplado na placa de vidro com o auxílio de fitas adesivas.

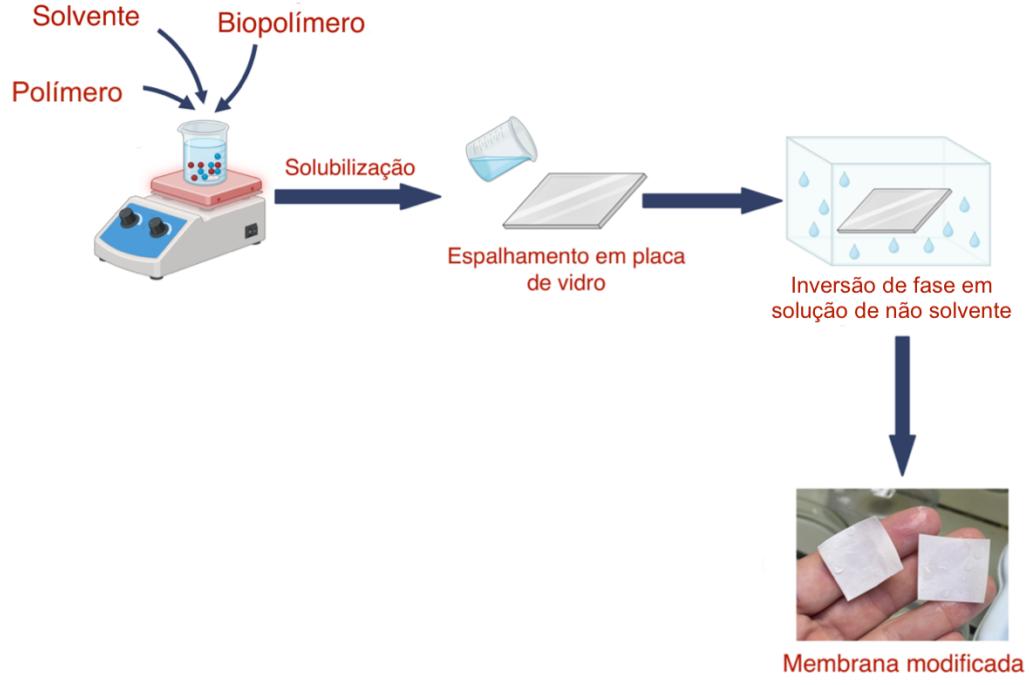
Figura 3.1: Vidro e equipamento utilizados para produção das membranas.



Fonte: Autora, 2022.

Após o espalhamento das soluções poliméricas na placa de vidro, a placa então era submersa em bacia contendo o não solvente. A Figura 3.2 ilustra a metodologia de fabricação das membranas.

Figura 3.2: Metodologia de fabricação das membranas.



As formulações utilizadas para a produção das membranas foram definidas com base em revisão da literatura. Nas membranas de AC, as formulações foram baseadas em estudo prévio de Rodrigues *et al.* (2024). Nas membranas de PET, foram considerados estudos que avaliaram a incorporação de biopolímeros em matrizes poliméricas para aprimoramento de propriedades como hidrofobicidade, porosidade e estabilidade mecânica.

A revisão da literatura revelou que as concentrações de polímeros influenciam significativamente as propriedades das membranas. Susuki *et al.* (2016) investigaram membranas de PVDF com 8% e 10% de concentração polimérica, adicionando 1% de PMMA e 1% de sais como KCl ou LiCl, evidenciando que essas variações impactam diretamente na morfologia e desempenho das membranas.

Em particular, a escolha das proporções da goma arábica e da goma Karaya com PET foram fundamentadas nos valores mais recorrentes em estudos científicos previamente publicados, como nos resultados reportados por Ali *et al.* (2023b), que investigaram a incorporação de goma arábica em membranas de PVC para aumento da hidrofilicidade e remoção de matéria orgânica natural em processos de filtração de água.

Dessa forma, as composições adotadas foram estabelecidas para otimizar o desempenho das membranas, garantindo compatibilidade com a metodologia de inversão de fase e as condições de operação pretendidas.

3.3 Caracterização das membranas

3.3.1 Morfologia

Micrografias de microscópio eletrônico de varredura (MEV) tem sido amplamente utilizada para investigar a morfologia da superfície de membranas de acetato de celulose, permitindo a visualização de sua microestrutura e topografia. As morfologias da membrana refletem a termodinâmica e a cinética de separação de fases entre o polímero, solvente e não solvente durante a inversão de fase seca-úmida (Maryudi *et al.*, 2024).

A morfologia da superfície de todos os filmes preparados foi avaliada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando dois equipamentos distintos devido às agendas dos equipamentos: Zeiss EVO MA10 e FEI Quanta FEG 250, operando com tensão de aceleração de 15 kV, spot size 4,0 e detector vCD (detector de baixa voltagem e alto contraste).

As amostras foram fixadas em substrato de alumínio (stub) com fita adesiva dupla face e posteriormente metalizadas com ouro. Para a visualização das seções transversais, as membranas foram previamente imersas em nitrogênio líquido e imediatamente rompidas, com o objetivo de preservar suas estruturas morfológicas.

3.3.2 Espectroscopia infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

As análises de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foram realizadas em um espectro 100 do modelo Perkin Elmer Spectrophotometer. As amostras foram examinadas, usando célula de refletância total (ATR) de seleneto de zinco (ZNSE),

16 cm⁻¹, cobertura de seleneto de zinco (ZNSE), 16 cm⁻¹, cobertura de seleneto A região espectral de 500 a 4000 cm⁻¹, com 64 varreduras. Todas as amostras foram secas em temperatura ambiente antes de serem analisadas.

3.3.3 Permeabilidade

As membranas foram testadas quanto à permeabilidade hidráulica com área total de 0,0052 m². O módulo de filtração (Figura 3.3) é composto por dois discos em aço inox, onde a membrana é acoplada na parte central, na parte superior são inseridos os dutos de entrada do extrato e saída do concentrado e na parte inferior o duto de saída do permeado.

Figura 3.3: Membrana polimérica no módulo de permeação.



Fonte: Miguel, 2022.

Inicialmente, após serem afixadas no módulo, as membranas tiveram pressões máximas aplicadas em cada uma, até fluxo de permeado constante, a fim de realizar a compactação das membranas no módulo. Foi utilizada válvula mecânica para ajuste da pressão, que foi conferida ao módulo a partir de gás nitrogênio. A pressão transmembrana foi verificada com auxílio de um manômetro. Água deionizada foi utilizada como permeado nos testes de permeabilidade.

A permeabilidade da membrana porosa corresponde ao coeficiente angular da reta da relação do fluxo de permeado em função da diferença de pressão. As medidas de fluxo permeado variaram de 0,5 a 6,0 bar. A permeabilidade foi calculada usando a seguinte fórmula (Equação 1) (Kong *et al.*, 2021):

$$F = V / (A * t) \quad (1)$$

em que F é o fluxo de água, V é o volume permeado, A (m^2) é a área efetiva da membrana e t (h) é o tempo de permeação.

3.3.4 Hidrofobicidade

A análise do ângulo de contato é fundamental para avaliar a hidrofobicidade das membranas desenvolvidas, uma vez que esse parâmetro influencia diretamente a interação da superfície com a água, sendo crucial para aplicações em processos de separação. Esse parâmetro desempenha um papel crucial na interação da membrana com soluções aquosas, afetando diretamente seu desempenho em aplicações como filtração, troca iônica e separação seletiva (Susuki *et al.*, 2016).

Para avaliar a hidrofobicidade das amostras, foi medido o ângulo de contato estático com a água. O ângulo de contato foi avaliado por equipamento Kruss Advance 1.16.10201, por meio do método de medição da gota séssil, com aceleração gravitacional de $9,80 \text{ m/s}^2$, volume médio da gota de $1,4 \mu\text{L}$, no instante 0 segundos. As membranas foram cortadas e colocadas no equipamento. Água deionizada foi liberada por seringa na forma de gota na superfície das amostras de membrana.

3.3.5 Resistência mecânica

A avaliação da resistência mecânica foi realizada utilizando máquina universal de ensaio de tração e compressão da marca HSENSOR, operanda em temperatura ambiente. A taxa de tração foi fixada em 10 mm/min , e as amostras utilizadas apresentavam 1 cm de largura e 4 cm de comprimento. Foram realizadas três réplicas para cada amostra.

3.3.6 Teor de água em equilíbrio (EWC)

A absorção de água da membrana foi determinada neste estudo. Para isso, amostras com área equivalente a 1 cm^2 foram saturadas em água destilada por 24 h e sua massa foi medida. Em seguida, as amostras foram mantidas em estufa por 24 h a uma

temperatura de 40 °C e a massa da amostra seca foi determinada. Após a coleta desses dados, o valor de EWC foi estimado utilizando a Equação 2 (Aji *et al.*, 2020):

$$Teor\ de\ água\ (\%) = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100 \quad (2)$$

onde, W_w e W_d representam, respectivamente, a massa úmida e a massa seca da membrana.

3.3.7 Porosidade e tamanho de poros

A porosidade da membrana foi determinada com base na Equação 3 (Aji *et al.*, 2020):

$$Porosidade\ (\%) = \frac{W_w - W_d}{\rho A \delta} \pi r^2 \quad (3)$$

onde, A representa a área da membrana (m^2), ρ (Kg/m^3) é a densidade da água em temperatura e pressão padrão, δ (m) é a espessura da membrana, e W_w e W_d correspondem, respectivamente, às massas úmida e seca da membrana (Kg).

O tamanho médio dos poros das membranas obtidas foi determinado pela equação de Guerout–Elford–Ferry (Equação 4) (Aji *et al.*, 2020):

$$r_m = \sqrt{\frac{(2.9 - 1.75\epsilon)8\mu\delta Q}{\epsilon A \Delta P}} \quad (4)$$

onde μ é a viscosidade da água ($8,9 \times 10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), Q é o fluxo de água e ΔP é a pressão operacional.

3.3.8 Recuperação de fluxo e índice de fouling

A recuperação de fluxo foi avaliada utilizando uma solução de lignina residual ($100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) como agente modelo de incrustação. Os experimentos foram realizados em um módulo de filtração com volume efetivo de 80 mL e área total de membrana de $0,00132 \text{ m}^2$, operado sob pressão constante fornecida por gás inerte (nitrogênio). Todos os experimentos foram realizados em triplicata, sendo considerados os valores médios para a análise.

Inicialmente, o fluxo de água pura (F_{w1}) foi medido após a compactação da membrana até atingir um coeficiente de compactação próximo de 1, indicando estabilização estrutural e fluxo permeado constante. O fluxo de água só foi medido após esse ponto de estabilização. Em seguida, a solução de lignina foi permeada e o fluxo do permeado (F_{Lig}) foi registrado. Após essa etapa, as membranas foram lavadas por imersão em água deionizada e submetidas à ultrassonicação em banho de água por 20 minutos. Posteriormente, o fluxo de água pura (F_{w2}) foi novamente medido sob a mesma pressão.

O termo fouling refere-se ao depósito e acúmulo de materiais indesejados, como partículas coloidais, compostos orgânicos e microrganismos, na superfície ou no interior dos poros da membrana durante a operação de filtração, o que provoca a obstrução parcial ou total dos poros, redução do fluxo de permeado, aumento da resistência hidráulica e comprometimento do desempenho do sistema (IBRAR *et al.*, 2019).

A avaliação do comportamento de fluxo e de fouling foram realizadas com base nas Equações (5–8) (Aji *et al.*, 2020):

$$TRF = \frac{F_{w1} - F_{Lig}}{F_{w1}} \quad (5)$$

$$RFR = \frac{F_{w2} - F_{Lig}}{F_{w1}} \quad (6)$$

$$IRF = \frac{F_{w1} - F_{w2}}{F_{w1}} \quad (7)$$

$$FRR = \frac{F_{w2}}{F_{w1}} \quad (8)$$

onde, TFR é o índice total de fouling, RFR corresponde ao índice de fouling reversível, IFR é o índice de fouling irreversível e FRR é o índice de recuperação de fluxo.

3.3.9 Teste de rejeição

O desempenho da rejeição foi avaliado utilizando solução de lignina com concentração de $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Foi utilizado o mesmo sistema de filtração empregado nos estudos de permeação e de fluxo e fouling. A turbidez da alimentação e do permeado foi medida utilizando um espectrofotômetro UV-Visível da Thermo Scientific (modelo Genesys 180) para o cálculo da taxa de rejeição, conforme a Equação (9).

$$R(\%) = (1 - \frac{T_p}{T_f}) \times 100 \quad (9)$$

onde, R é a porcentagem de retenção, T_p é a turbidez do permeado e T_f é a turbidez da solução de alimentação.

A condutividade elétrica da solução de lignina de alimentação e do permeado foi medida com um condutivímetro Digimed (modelo DM-32), como análise complementar

para avaliar o comportamento de retenção de sais e compostos de baixo peso molecular.

Todos os experimentos de rejeição também foram realizados em triplicata.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Produção das membranas

Os processos com cortes manuais do AC e do PET foram bem-sucedidos, resultando em materiais em tamanhos que se fizeram viáveis para posterior solubilização. No processo de solubilização dos polímeros em solvente, não houve perda de volume, evidenciando a vedação efetiva dos recipientes. Todas as amostras foram totalmente homogeneizadas antes de realizar a produção dos filmes.

Após total homogeneização das soluções poliméricas, o repouso aplicado às amostras a fim de não haver presença de bolhas de ar foi eficaz. Todas as membranas formaram filmes sem a presença bolhas de ar, que poderia implicar desde a falta de uniformidade das membranas até a empecilhos nas propriedades mecânicas e desempenho em processos de separação futuros.

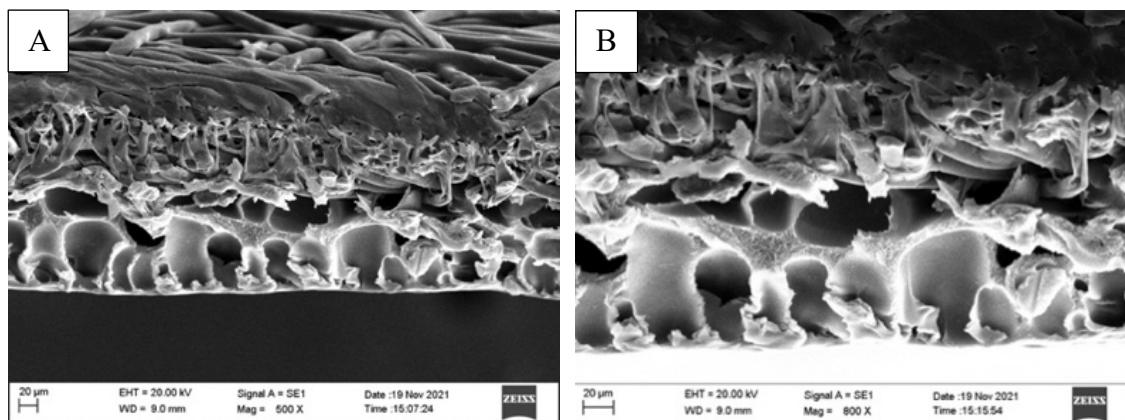
A técnica de inversão de fases foi eficiente em todas as amostras. Confirmada pela formação de membranas em todas as formulações testadas, indicando que a transição da fase líquida para a fase sólida após o contato com o banho de não-solvente foi eficaz. Esta técnica tem sido aplicada para produzir membranas com maior porosidade a partir de acetato de celulose reciclado, melhorando suas propriedades e ampliando suas aplicações (Silva; Belmonte-Reche; de Amorim, 2021).

4.1.1 Membranas de Acetato de Celulose

4.1.1.1 Morfologia

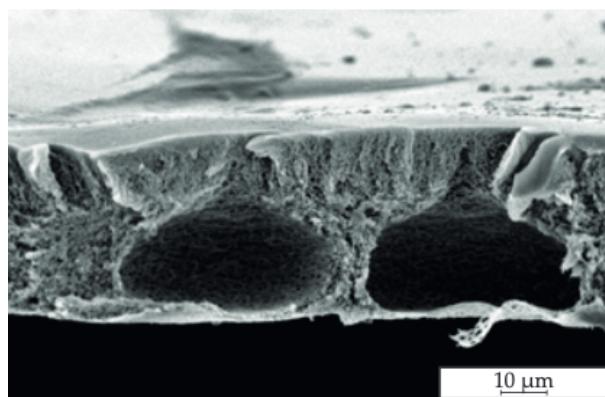
As micrografias obtidas a partir das membranas produzidas podem ser visualizadas nas Figuras 4.1 e 4.3. A Figura 4.1 apresenta as seções transversais da amostra ACP, onde é possível observar a ocorrência de uma estrutura porosa, com distribuição de poros na extensão da membrana. A membrana exibiu uma morfologia homogênea, sem evidências de defeitos significativos, como rupturas ou falta de continuidade. Também é possível visualizar o TNT utilizado como suporte na parte superior das micrografias, evidenciando sua estrutura de filamentos.

Figura 4.1: Análise da morfologia das membranas ACP com vista da seção transversal.



Apesar de ser um material fabricado a partir de material residual, a membrana demonstrou-se com morfologia similar a membranas produzidas do acetato de celulose não residual, mostrada na Figura 4.2. Apesar da presença de triacetina no acetato de celulose residual, não houve comprometimento da morfologia das membranas produzidas, que apresentaram poros definidos e continuidade estrutural (Figura 4.1). Isso está de acordo com estudos que demonstram que a triacetina atua como plastificante compatível, promovendo redução da rigidez e modificação térmica sem colapsar a estrutura porosa (Kim *et al.*, 2015).

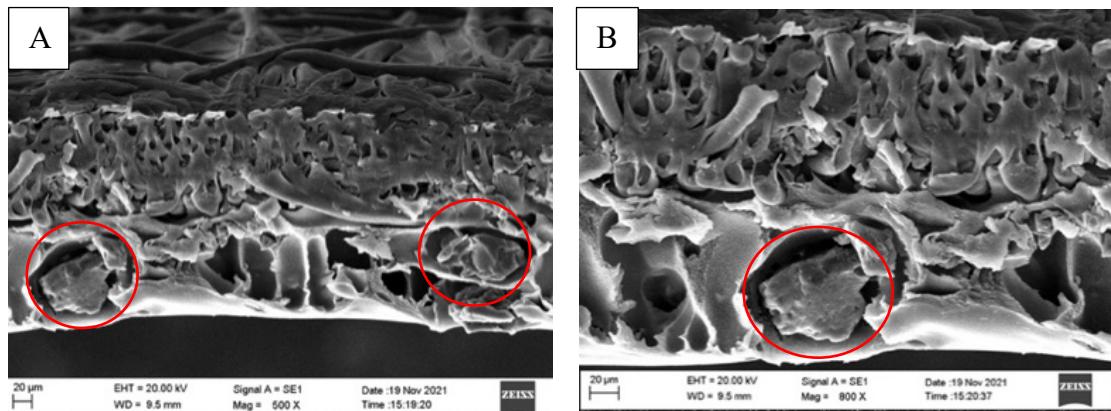
Figura 4.2: Seção transversal de membrana de acetato de celulose desenvolvida por Maryudi et al., 2024.



A Figura 4.3 mostra as seções transversais da amostra ACA. As micrografias revelam o alongamento dos micro vasos e a presença de partículas de resina aniónica

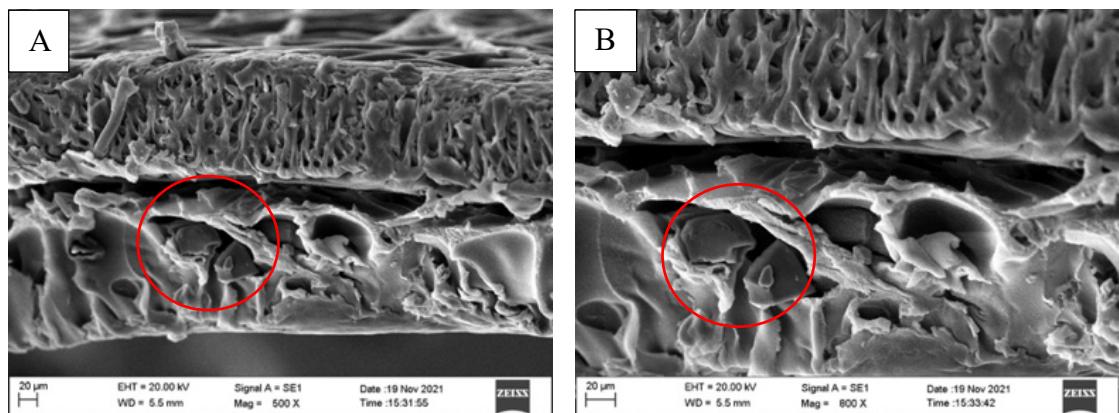
(circuladas em vermelho) na estrutura da membrana. Apesar da incorporação das resinas, a aderência da solução polimérica ao suporte de TNT permaneceu inalterada.

Figura 4.3: Análise da morfologia das membranas ACA com vista da seção transversal.



De forma análoga à membrana ACA, ocorre com a incorporação das resinas catiônicas na membrana ACC, como mostra a Figura 4.4. Novamente, a incorporação da resina não alterou a aderência da solução polimérica ao suporte de TNT, evidenciado na parte superior das micrografias. As partículas da resina catiônica também foram aderidas aos poros da membrana, como estão destacadas com círculo vermelho nas micrografias.

Figura 4.4: Análise da morfologia das membranas ANC com vista da seção transversal.



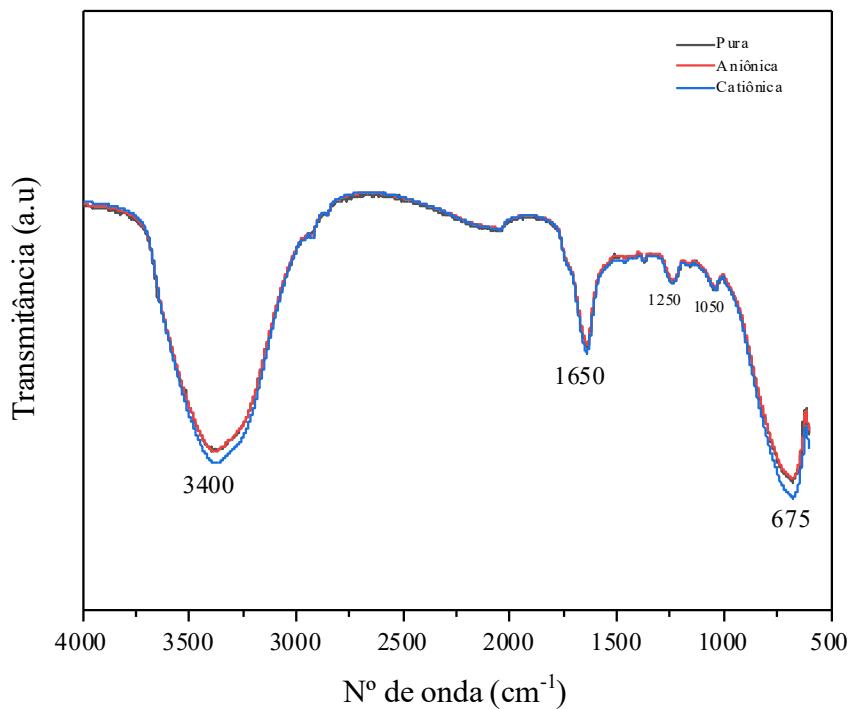
Em todas as micrografias das amostras (Figura 4.1, Figura 4.3 e Figura 4.4), observa-se a aderência da solução polimérica ao suporte de TNT. O TNT, visível na parte superior das micrografias e caracterizado pelas suas fibras, com filamentos cruzados, que está em contato com a solução polimérica, localizada na parte inferior das imagens.

Por fim, as micrografias do MEV revelaram estruturas porosas desenvolvidas e contínuas, com distribuição visualmente regular de poros ao longo da seção transversal. Essa configuração morfológica indica um potencial para boa eficiência de filtração, embora a confirmação da distribuição eficaz de fluxos exija resultados adicionais.

4.1.1.2 Espectroscopia infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 4.5 apresenta o espectro na região do infravermelho das amostras ANP, ANA e ANC. Observa-se que a adição das resinas, em uma proporção de 5% em massa, não influenciou significativamente os picos de absorção das amostras. Destaca-se uma forte banda em torno de 3400 cm^{-1} , referente às ligações O-H, possivelmente resultantes da associação polimérica. As membranas não foram secas em estufa, para evitar possíveis deformações ou alterações estruturais que poderiam comprometer suas propriedades, como mudanças na porosidade ou recristalização do material (Nayak, 2020).

Figura 4.5: Espectroscopia do infravermelho das membranas produzidas com acetato de celulose (ACP, ACA e ACC).



Um pico de absorção em 1650 cm^{-1} é característico de ligações C=C em alcenos conjugados (Athira; Mohanty; Nayak, 2020). O pico em 1250 cm^{-1} é atribuído a ligações C-N de compostos aromáticos (Pielesz; Binias, 2010). A banda em 1050 cm^{-1}

corresponde a ligações C–O, que podem estar associadas à presença de glicerol, devido à utilização de triacetina, um triéster do glicerol (Vinodhini *et al.*, 2017).

A triacetina, por ser um triéster, apresenta bandas características na espectroscopia de infravermelho devido às suas ligações químicas, sendo que a banda em torno de 1050 cm^{-1} pode ser atribuída às vibrações de estiramento das ligações C–O presentes nos ésteres. Além disso, a triacetina também exibe uma banda característica de estiramento C=O de ésteres em torno de 1702 cm^{-1} (Athira; Mohanty; Nayak, 2020). O forte pico de absorção em torno de 600 cm^{-1} é devido às vibrações de flexão C–H (Vinodhini *et al.*, 2017).

A imobilização das resinas nas membranas poderia ter ocorrido por diferentes mecanismos, sendo os dois principais a imobilização por ligação química e a imobilização por oclusão. Quando a imobilização ocorre por ligação química, significa que as resinas formam interações fortes e permanentes com a matriz da membrana, como ligações covalentes ou interações intermoleculares mais intensas, que podem modificar a estrutura química e física da membrana (Fernandes, 2003).

No presente estudo, a imobilização ocorreu por oclusão, uma vez que as resinas são simplesmente incorporadas à membrana sem estabelecer ligações químicas com os polímeros da matriz. Isso significa que as partículas de resina são aprisionadas mecanicamente nos poros da membrana ou dispersas na sua estrutura sem modificar sua composição química. Esse tipo de imobilização ocorre geralmente por interações físicas fracas, como forças de Van der Waals ou aprisionamento mecânico, e não promove alterações significativas na morfologia da membrana (Mayurdi, 2024). A imobilização por oclusão pode ser observada por técnicas de microscopia, que revelam a presença das resinas dentro da estrutura da membrana, mas sem qualquer indício de modificação na rede polimérica (Athira; Mohanty; Nayak, 2020).

Dessa forma, ao comparar as três membranas estudadas, observou-se que elas apresentaram características similares, pois a incorporação das resinas ocorreu exclusivamente por oclusão e não por ligação química. Isso era o esperado, uma vez que a ausência de interações químicas mais fortes impede que as resinas causem alterações estruturais na matriz polimérica. A análise das imagens obtidas por microscopia evidenciou que as resinas foram distribuídas ao longo da membrana sem interferir na

morfologia ou nas propriedades químicas do material (Sato, Kidaka, 1983). Além disso, os espectros de FTIR não mostraram variações significativas nos picos de absorção entre as membranas com e sem resinas, reforçando a ideia de que a incorporação ocorreu apenas por aprisionamento físico.

Assim, a análise realizada confirmou que a imobilização das resinas nas membranas ocorreu por oclusão e não por ligação química, o que explica por que as três membranas apresentaram características semelhantes. A igualdade entre as membranas tem implicações importantes para sua aplicação.

A imobilização por oclusão pode ser vantajosa em processos em que se deseja preservar as propriedades originais da membrana, garantindo que a presença da resina não comprometa sua estrutura ou desempenho. A imobilização por aprisionamento físico permite preservar as propriedades químicas e estruturais da matriz da membrana, o que é desejável em aplicações que requerem estabilidade mecânica e integridade funcional do material de base. Além disso, esse tipo de incorporação é mais simples do ponto de vista operacional, dispensando a necessidade de agentes de acoplamento ou etapas adicionais de funcionalização (Ouaddari *et al.*, 2019).

No entanto, essa abordagem pode apresentar desafios, especialmente em aplicações que envolvem meios líquidos, uma vez que a ausência de ligações químicas fortes pode levar à lixiviação das resinas ao longo do tempo, reduzindo sua eficiência e estabilidade operacional (Fernandes, 2003). A ausência de ligações químicas entre as resinas e a matriz polimérica pode resultar em menor estabilidade durante o uso prolongado, especialmente em meios líquidos, favorecendo a lixiviação dos aditivos incorporados. Essa limitação pode comprometer o desempenho e a vida útil da membrana em processos contínuos, sendo necessário considerar estratégias complementares para minimizar esse efeito, como o controle do tamanho de poro ou a aplicação de pós-tratamentos físicos (Ouaddari *et al.*, 2019).

4.1.1.3 Permeabilidade

Nos testes de permeabilidade, as membranas desenvolvidas a partir de acetato de celulose apresentaram falha estrutural sob pressão de 0,5 bar, resultando em ruptura antes

da conclusão das medições. Esse resultado indica que as membranas não possuíam resistência suficiente para suportar o diferencial de pressão aplicado no sistema de análise.

Possíveis causas para essa falha podem estar relacionadas à porosidade excessiva das membranas, onde a presença de poros grandes ou a distribuição não uniforme pode ter criado pontos de fraqueza estrutural, facilitando a ruptura sob pressão. Além disso, a espessura da membrana pode ter sido inadequada para suportar o diferencial de pressão, tornando-a mais vulnerável ao rompimento. Portanto, os resultados indicam que modificações na formulação ou no processo de fabricação das membranas podem ser necessárias para melhorar sua estabilidade mecânica e permitir testes de permeabilidade mais eficazes.

4.1.1.4 Hidrofobicidade, resistência mecânica, teor de água em equilíbrio, porosidade e tamanho de poros, recuperação de fluxo e índice de fouling e teste de rejeição

Devido à ruptura precoce das membranas durante os testes de permeabilidade, e a inviabilidade de utilizar as membranas em futuras aplicações, optou-se por não realizar as demais caracterizações: Hidrofobicidade, resistência mecânica, teor de água em equilíbrio, porosidade e tamanho de poros, recuperação de fluxo e índice de fouling e teste de rejeição.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade demonstraram que as membranas fabricadas com AC residual e suporte de TNT não possuem resistência mecânica adequada para futuras aplicações, que exigiriam estabilidade quando sob fluxo pressurizado.

Entre as possíveis causas para essa baixa resistência mecânica, destaca-se a possibilidade de utilização de um suporte não muito adequado, uma vez que o TNT com espessura muito fina pode não ter fornecido sustentação suficiente para as membranas, além da proporção de polímero/solvente utilizada, que pode ter resultado em uma estrutura porosa muito frágil, aumentando a vulnerabilidade das membranas à ruptura. Para solucionar essas limitações, seriam necessários ajustes na formulação, como o uso de suportes mais rígidos, o aumento da espessura da membrana e a mudança nas formulações das membranas

No entanto, tais ajustes não foram realizados, pois a pesquisa decidiu direcionar os estudos para o desenvolvimento de membranas a partir de PET residual, um material que demonstrou qualidades superiores em relação ao acetato de celulose. Embora o acetato de celulose seja amplamente utilizado na fabricação de membranas devido à sua alta biocompatibilidade, baixo custo e boa estabilidade química (Galiano *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2021), ele apresenta algumas limitações importantes, como faixa restrita de pH operacional, suscetibilidade a ataques biológicos e compactação estrutural sob alta pressão (Silva; Belmonte-Reche; de Amorim, 2021), assim como evidenciado nos testes preliminares em que as membranas apresentaram ruptura nas análises de permeabilidades.

Já o PET se destaca por sua elevada resistência mecânica e química, permitindo sua aplicação em condições mais severas sem degradação significativa (Chanda; Roy, 2009). Além disso, sua estrutura semicristalina confere maior estabilidade térmica e controle da porosidade, características essenciais para a otimização da permeabilidade das membranas (Paul; Goodman; Kroschwitz, 1985; Rajesh *et al.*, 2014).

Outro fator determinante para a escolha do PET neste estudo é sua maior disponibilidade como resíduo, uma vez que o PET é amplamente utilizado em embalagens, especialmente garrafas plásticas. A reciclagem do PET não só reduz a dependência de polímeros virgens, mas também contribui para a minimização do impacto ambiental associado à poluição plástica (Geyer, 2017). Dessa forma, as membranas de acetato de celulose foram utilizadas apenas na etapa preliminar do trabalho, servindo como base inicial para os experimentos, mas sem continuidade nos testes posteriores.

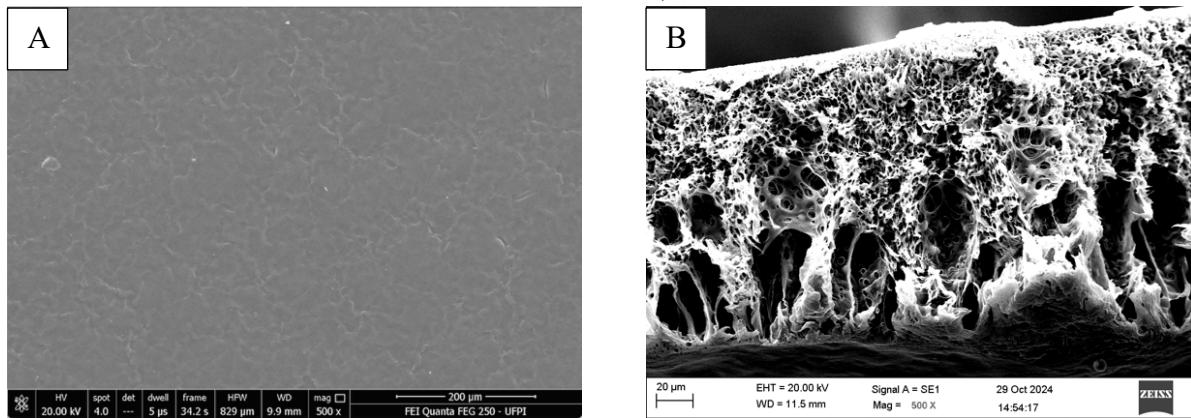
4.1.2 Membranas de PET

4.1.2.1 Morfologia

A Figura 4.6 apresenta as micrografias da membrana PBO0. A Figura 4.6-A é relativa à superfície da membrana. Esta apresenta-se de maneira relativamente homogênea. A superfície da membrana mostra-se lisa e contínua, o que é característico de membranas poliméricas sem modificações. Esta homogeneidade indica a ausência de fases distintas ou agregados. A Figura 4.6-B mostra a sessão transversal da membrana

PBO0. Nela, é possível visualizar poros na parte inferior (cujos tamanhos serão avaliados na seção 4.1.2.7), e uma camada mais densa na parte superior.

Figura 4.6: Análise da morfologia da membrana PBO0 (A- superfície; B- seção transversal).

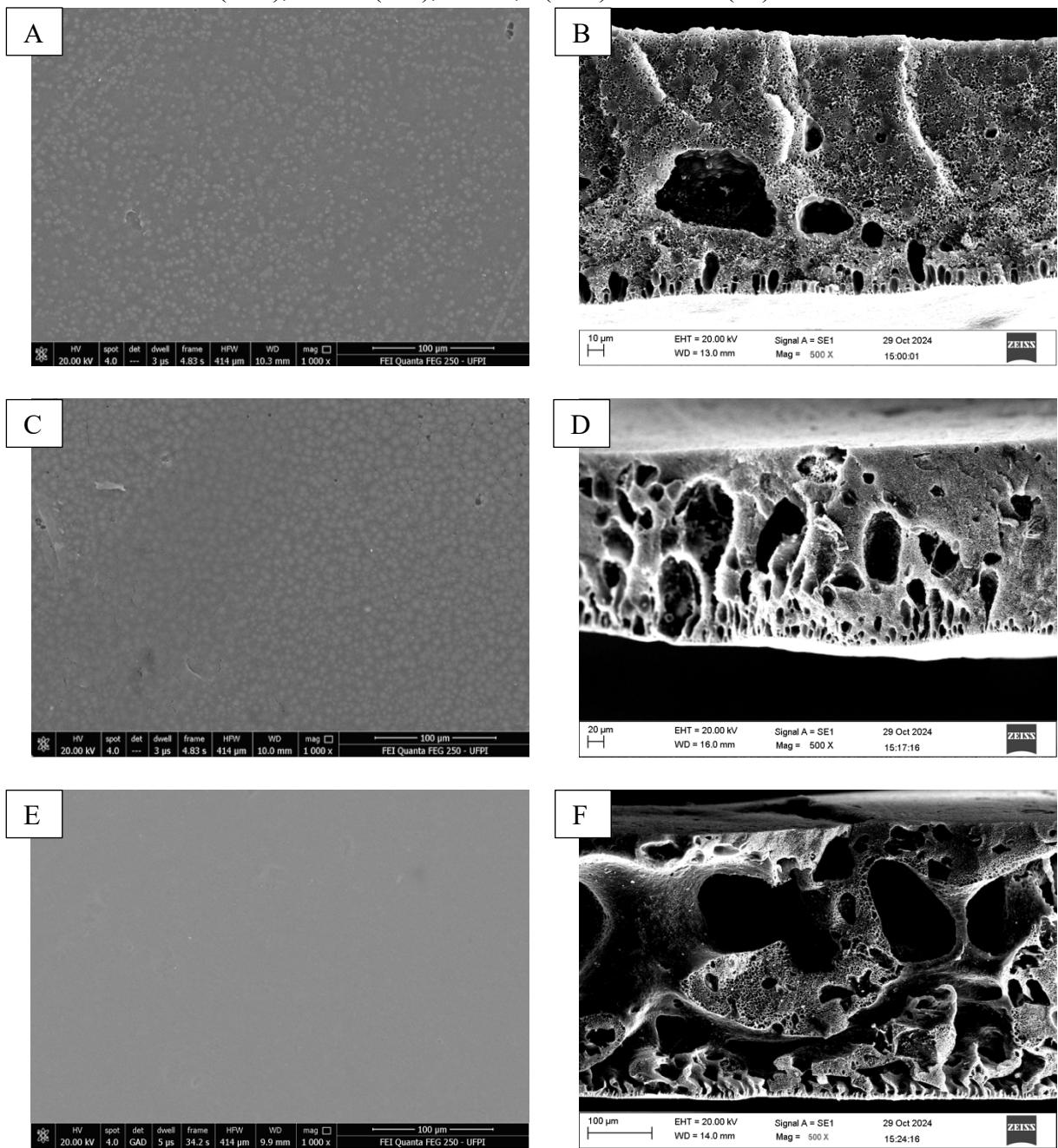


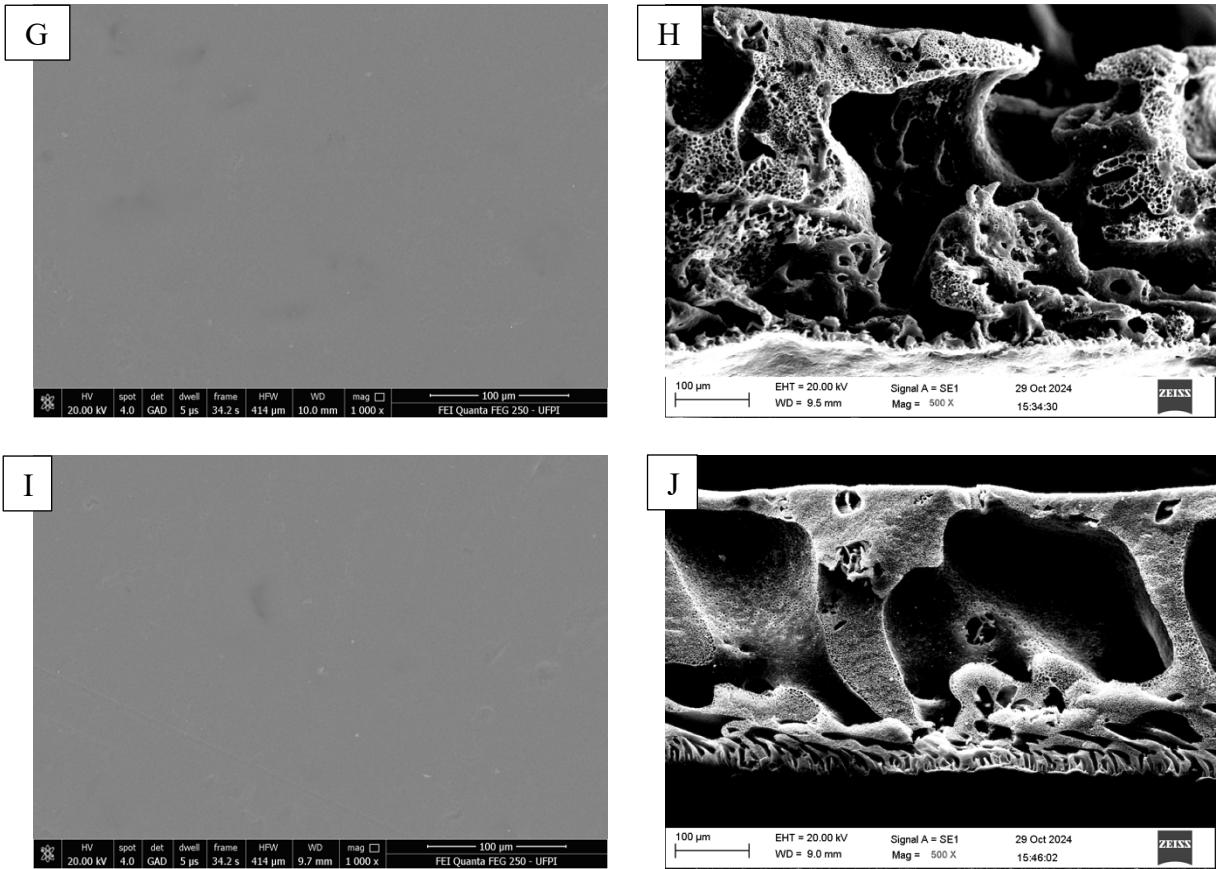
Ao analisar a micrografia da membrana PBO0 (Figura 4.6), a seção transversal revela uma distribuição sem uma rede de poros muito bem definida, sugerindo que o processo de fabricação resultou em uma estrutura relativamente compactada e sem uma rede interconectada de poros bem desenvolvida. Essa morfologia pode limitar a passagem de fluido através da membrana, tornando-a menos eficiente para aplicações que requerem uma alta taxa de permeação.

Diante de tais observações, os biopolímeros, como a goma arábica (GA) e a goma karaya (GK), podem atuar como agentes modificadores, promovendo ajustes estruturais que tendem a aumentar a porosidade e melhorar a distribuição interna dos poros, promovendo uma maior interconexão entre eles.

As micrografias da Figura 4.7 mostram as membranas produzidas com a adição de GA. Ao analisar as micrografias das seções transversais, é possível observar mudanças na morfologia da membrana à medida que a proporção de GA aumentou. As micrografias mostram que as membranas com menores concentrações de goma arábica (PGA1 (A/B) e PGA3 (C/D)) ainda tiveram a estrutura porosa preservada, evidenciada na parte inferior das micrografias. Tal comportamento sugere que, nessas concentrações, a interação entre o PET e a goma arábica ainda permite a formação de uma estrutura aberta, facilitando a visualização de poros e ainda com uma boa interconexão.

Figura 4.7: Análise da morfologia das membranas com a inserção de Goma Arábica (superfícies - lado esquerdo; seções transversais - lado direito). PGA1 (A/B), PGA3 (C/D), PGA5 (E/F), PGA7,5 (G/H) e PGA10 (I/J).





No entanto, à medida que a concentração de goma arábica aumenta (PGA5 (E/F), PGA7,5 (G/H) e PGA10 (I/J)), observa-se alteração na morfologia das membranas, com poros menos definidos, aparência mais irregular e redução da interconexão. Esse comportamento pode estar associado a modificações das propriedades da solução polimérica em função do maior teor de aditivo. Concentrações mais elevadas de goma arábica aumentam a viscosidade da solução e retardam o processo de inversão de fases, favorecendo a formação de estruturas mais densas e menos porosas (Abdelrahim *et al.*, 2017; Sabri *et al.*, 2019).

Maciel (2005) investigou a formação de complexos polieletrolíticos entre quitosana e goma do cajueiro, um polissacarídeo estruturalmente semelhante à goma arábica. Suas análises de MEV mostraram que a morfologia das membranas variou conforme a proporção dos componentes. Observou-se que, com o aumento da concentração de goma do cajueiro, as partículas apresentaram superfícies mais rugosas e estruturas menos definidas, sugerindo que concentrações mais altas do polissacarídeo

podem levar a uma morfologia mais irregular devido à formação de agregados e ao preenchimento de poros na matriz polimérica.

No presente estudo, a goma arábica também pode estar preenchendo os poros da matriz de PET, alterando a estrutura interna da membrana. Em concentrações mais elevadas, a goma pode estar aglomerando, causando irregularidades e prejudicando a formação de uma morfologia com poros mais bem organizados, com interconexão presente.

Para concentrações mais altas (5%, 7,5% e 10%) a goma pode estar contribuindo para uma falha parcial da estrutura porosa, com maior irregularidade e com regiões mais densificadas em comparação às amostras com menor teor de aditivo. Nessas membranas, observa-se uma diminuição na definição dos canais porosos, surgimento de áreas mais compactas, e principalmente uma diminuição na interconexão dos poros, sugerindo que o excesso de goma pode favorecer a formação de aglomerados e interferir na organização da matriz. Esses padrões indicam que o aumento da concentração de goma pode afetar a morfologia das membranas (Sabri *et al.*, 2019; Maciel, 2005).

Estudo de Silva (2003) mostrou que a incorporação da goma arábica em filmes isolados de polímero acrílico aumentou a permeabilidade e a hidratação dos materiais, indicando uma modificação significativa na estrutura do polímero. Esses achados corroboram os resultados observados em nossas micrografias MEV, onde a adição progressiva de goma arábica levou a alterações na morfologia das membranas.

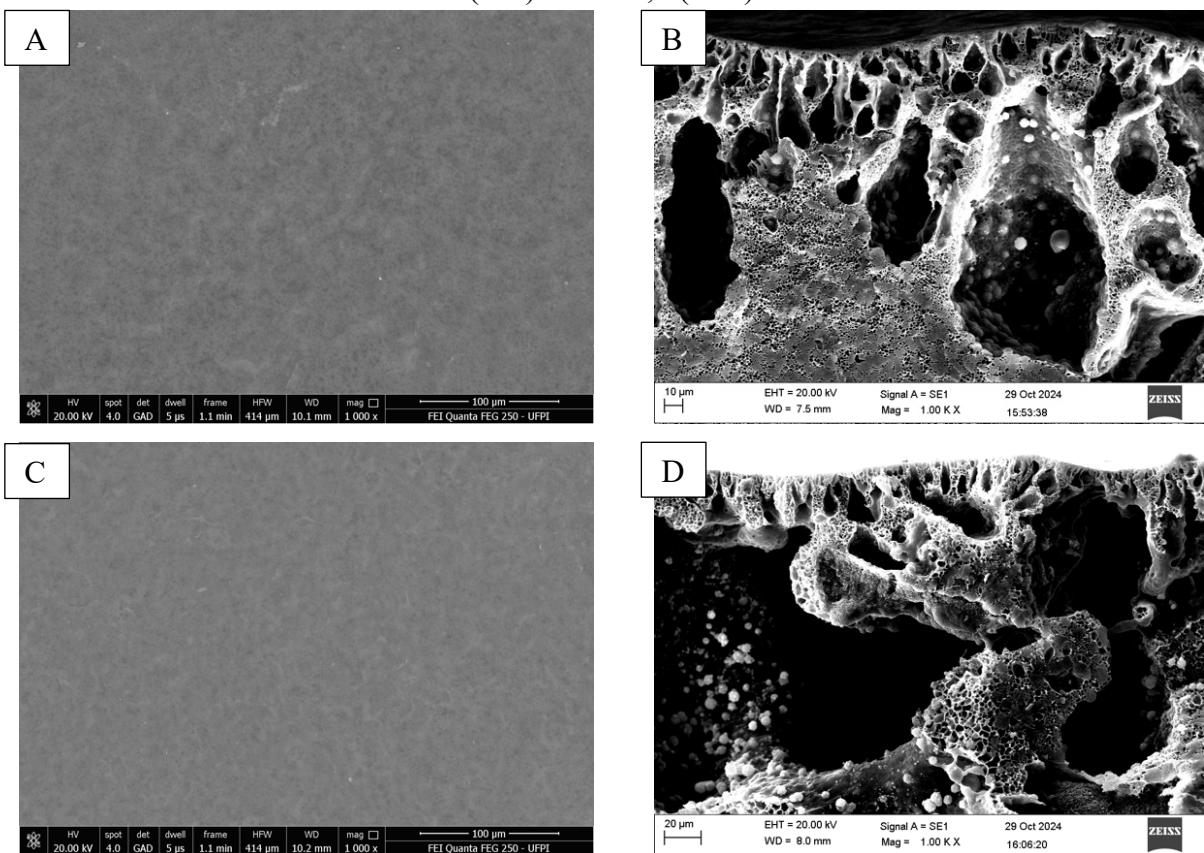
Em baixas concentrações, a estrutura porosa foi preservada, sugerindo uma interação compatível entre a goma arábica e a matriz de PET, possivelmente mediada por ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila da goma e as carbonilas presentes no polímero. Esse tipo de interação tem sido descrito em compósitos contendo goma arábica, onde os grupos –OH atuam como sítios ativos para ligações de hidrogênio com a matriz, contribuindo para estabilidade e integração estrutural (Alhassan, 2016).

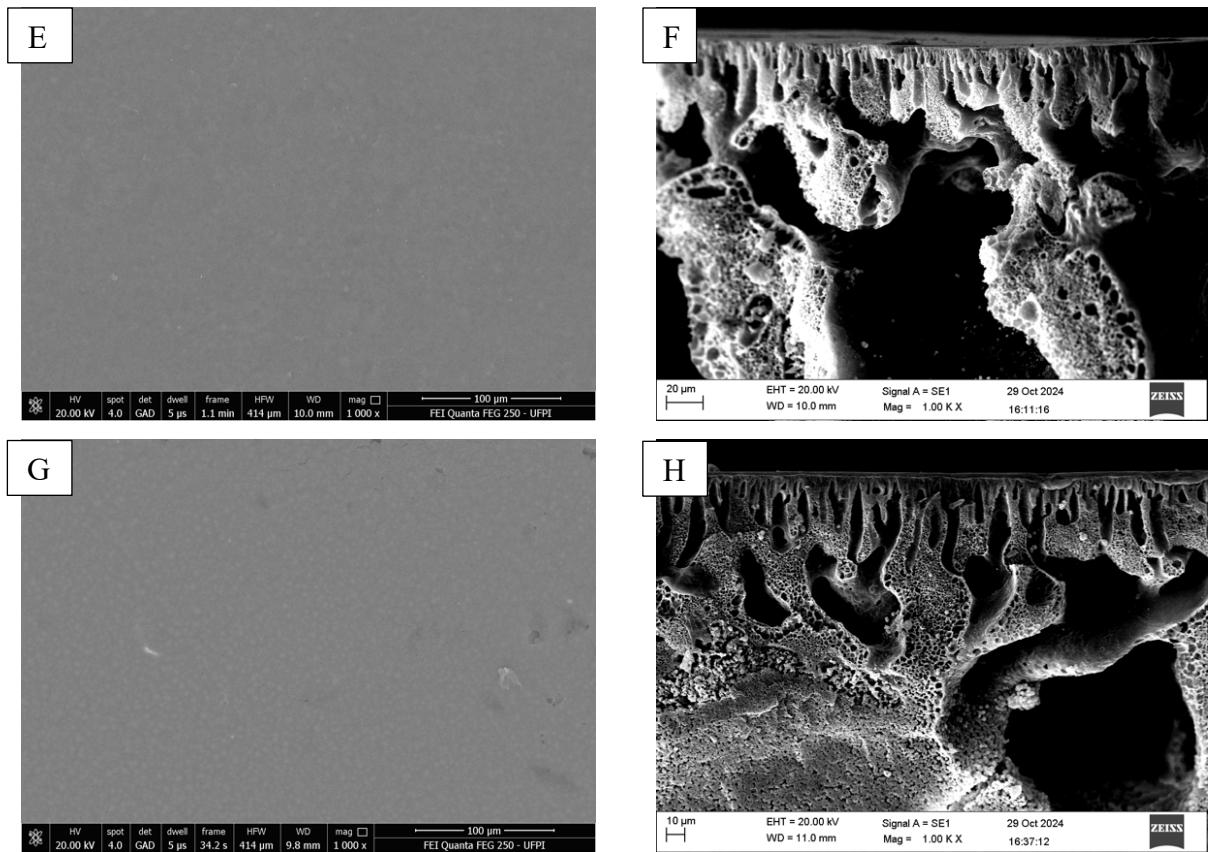
No entanto, à medida que a concentração aumentou, observou-se uma redução na definição dos poros e um aumento da irregularidade estrutural. Esse comportamento pode estar relacionado ao preenchimento parcial dos poros pela goma e à possível alteração nas propriedades da solução polimérica, como aumento da viscosidade, fenômeno

descrito em estudos anteriores com gomas naturais (Sabri *et al.*, 2019; Alhassan, 2014). Esses resultados reforçam que a goma arábica pode atuar como um modificador estrutural, impactando a organização e a funcionalidade das membranas.

As micrografias apresentadas na Figura 4.8 mostram as membranas produzidas com a adição da Goma Karaya. Ao analisar as micrografias MEV das membranas com diferentes concentrações de goma karaya, é possível observar alterações na morfologia superficial e estrutural das mesmas em comparação com a membrana de PET pura (Figura 4.6). Diferentemente das membranas produzidas com a Goma Arábica, as micrografias das membranas com adição de GK apresentaram desde a proporção inicial de 1% (PGK1) uma seção transversal com maior irregularidade e com formatos mais variados.

Figura 4.8: Análise da morfologia das membranas com a inserção de Goma Karaya (aumentos de 1000x da face e 1000x da seção transversal). PGK1 (A/B), PGK3 (C/D), PGK5 (E/F) e PGK7,5 (G/H).





A análise da morfologia das membranas contendo goma karaya (GK) revelou uma estrutura com muitos espaços vazios e menor densidade estrutural. Esse comportamento pode ser atribuído à natureza altamente hidrofílica da goma karaya. Estudos indicam que a adição de polissacarídeos, pode aumentar a porosidade das membranas tão acentuadamente, que as tornam menos compactas e potencialmente mais frágeis. A pesquisa de Nogueira (2013) demonstrou que a introdução de glutaraldeído em membranas de polissulfona/quitosana afetou a resistência mecânica das mesmas, sugerindo que modificações na composição polimérica influenciam diretamente as propriedades estruturais das membranas.

Além disso, o trabalho de Grigoletto (2018) destacou que membranas poliméricas funcionalizadas com polissacarídeos apresentaram alterações na resistência mecânica e estabilidade térmica, reforçando a ideia de que a incorporação de tais aditivos pode comprometer a integridade estrutural das membranas. Portanto, ao observar uma morfologia com muitos vazios e baixa densidade nas membranas com GK, é plausível inferir que essas estruturas possuam menor resistência mecânica e elasticidade, tornando-as mais suscetíveis a rupturas ou deformações sob pressão.

Por fim, os resultados obtidos através das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) indicam que a incorporação de polissacarídeos, como goma arábica (GA) e goma karaya (GK), influencia significativamente a morfologia das membranas de PET. Em concentrações menores, como observado nas amostras PGA1 e PGA3, a goma arábica se dispersa na matriz polimérica de maneira mais uniforme, contribuindo para a preservação da estrutura porosa. No entanto, com concentrações superiores a 3% (PGA5, PGA7,5 e PGA10), a morfologia das membranas se torna mais irregular e menos definida, com redução da porosidade. Esse efeito pode estar associado ao aumento da viscosidade da solução polimérica, que pode prejudicar o processo de inversão de fases, levando à formação de estruturas mais densas e menos permeáveis. Esse comportamento indica que há um limite ótimo de adição de goma arábica, além do qual a formação da membrana pode ser comprometida para aplicações em processos de separação baseados em fluxo de permeado.

Já no caso da goma karaya, desde a menor concentração avaliada, observou-se um padrão estrutural com maiores vazios e menor densidade, indicando uma morfologia menos homogênea e potencialmente mais frágil. Esse efeito pode estar relacionado à natureza altamente hidrofílica da GK, que influencia a cinética do processo de inversão de fases, resultando em uma estrutura mais porosa, mas potencialmente menos resistente mecanicamente.

De maneira geral, os achados obtidos nas análises de MEV corroboram o que já foi amplamente descrito na literatura quanto ao impacto da adição de polissacarídeos em matrizes poliméricas. A adição de GA e GK promove alterações significativas na formação estrutural das membranas, influenciando diretamente sua porosidade, distribuição dos poros e potencial resistência mecânica. A adição de GA em baixas concentrações favorece a formação de membranas com estrutura mais organizada, apresentando poros bem definidos e boa interconexão entre eles, o que pode beneficiar o controle da porosidade e otimizar o desempenho da membrana em processos de separação. No entanto, concentrações mais elevadas de GA tendem a comprometer essa organização, resultando em estruturas menos definidas e, possivelmente, menos eficientes para aplicações baseadas em fluxo.

Já a GK induz estruturas menos organizadas e que tendem ser mais frágeis, sugerindo a necessidade de ajustes na formulação para garantir melhor estabilidade

mecânica. Assim, a escolha do polissacarídeo e sua concentração devem ser cuidadosamente avaliadas conforme a aplicação pretendida da membrana, equilibrando permeabilidade, resistência estrutural e eficiência no processo de separação.

4.1.2.2 Permeabilidade

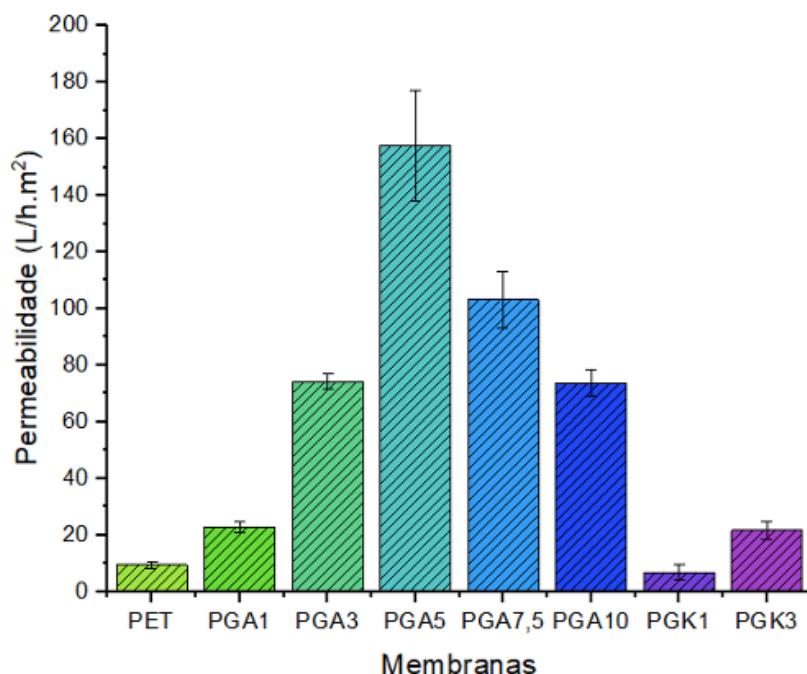
As análises de permeabilidade das membranas podem ser vistas na Tabela 4.1 e na Figura 4.9.

Tabela 4.1: Permeabilidade das membranas fabricadas.

Membranas	Permeação (L/h·m ²)	Desvio padrão
PBP0	9,45	1,27
PGA1	21,60	1,85
PGA3	77,30	2,62
PGA5	157,70	19,55
PGA7,5	103,10	9,95
PGA10	73,70	4,63
PGK1	6,74	2,72
PGK3	26,70	3,22

A membrana de PET puro apresentou um valor de 9,45 L/h·m², que é uma permeabilidade moderada. O resultado se assemelha a estudo realizado por Fernandes (2021), em que membranas de PET com concentrações de 10% de polímero e solvente TFA/DCM na proporção 50/50 apresentam fluxos permeados de água na faixa de 9 L/h·m². Para processos de separação, não apenas a permeabilidade que importa, mas também a seletividade da membrana, ou seja, a capacidade de permitir a passagem de água e pequenos solutos, enquanto impede a passagem de substâncias maiores (Rajes *et al.*, 2014).

Figura 4.9: Permeabilidade das membranas produzidas com seus respectivos desvios padrões.



Quando adicionada a goma arábica às membranas, a permeabilidade inicialmente aumentou. As membranas com 1% (PGA1) e 3% (PGA3) de goma arábica apresentaram fluxos de permeado de 21,60 L/h·m² e 77,30 L/h·m², respectivamente. O aumento da concentração de goma arábica para 5% (PGA5) levou a um aumento considerável na permeabilidade, alcançando 157,70 L/h·m², mas após essa concentração, a membrana apresentou valores de fluxo mais baixos.

As membranas com concentrações ainda maiores (PGA7,5 e PGA10) apresentaram uma diminuição na permeabilidade, com valores de 103,10 L/h·m² e 73,70 L/h·m². Essa diminuição pode estar relacionada ao aumento da viscosidade da solução, o que pode dificultar a difusão do solvente durante a inversão de fases, resultando em estruturas mais densas e com menor porosidade efetiva. Essa mudança na morfologia pode ter comprometido o fluxo de permeado, e possivelmente ter reduzido a eficiência do material em futuras aplicações de separação, onde a estrutura porosa interconectada é essencial para o desempenho hidrodinâmico (Peng, 2023).

Esse comportamento pode ser explicado pela possível influência da carga polimérica na viscosidade da solução formadora da membrana. Em estudos prévios na

bibliografia, o aumento na concentração de biopolímeros como GA tende a aumentar a viscosidade da solução, resultando em uma redução no tamanho dos poros e na esponjosidade da membrana, o que impacta negativamente na permeabilidade (Singh, 2016). Ali *et al.* (2023a) também observaram uma diminuição no fluxo permeado em membranas de polietersulfona quando a carga de biopolímero ultrapassou 5% em peso, o que corrobora os resultados obtidos no presente estudo.

Esses resultados sugerem que a adição de goma arábica influencia diretamente a porosidade das membranas, promovendo, inicialmente, um aumento na permeabilidade. No entanto, em concentrações elevadas, essa modificação compromete a estrutura da rede polimérica, tornando as membranas mais frágeis e com menor desempenho hidráulico. Conforme observado neste estudo, concentrações acima de 5% de goma arábica resultaram em uma redução significativa da permeabilidade e alterações morfológicas desfavoráveis. Isso está alinhado com estudos que indicam que a adição excessiva de biopolímeros, acima de 5% em massa, no caso das formulações deste trabalho, pode resultar em estruturas muito frágeis, que afetam negativamente as propriedades de separação e resistência das membranas (Ayeleru *et al.*, 2020).

As membranas com goma karaya PGK1 e PGK3 mostraram um desempenho semelhante, em termos de permeabilidade, porém, com valores de fluxo mais baixos, o que pode ser atribuído à estrutura menos homogênea da goma karaya, assim como visualizado nas micrografias do MEV.

Observa-se que, para as amostras PGK5 e PGK7,5, não foi possível obter valores mensuráveis de fluxo permeado, uma vez que ocorreu passagem total da água deionizada durante os testes. Esse comportamento indica que tais membranas apresentaram uma estrutura excessivamente porosa, com ausência de resistência hidráulica significativa.

Esse resultado pode estar relacionado à alta concentração de goma karaya utilizada nessas formulações, que comprometeu a estrutura da matriz polimérica. Tal efeito é compatível com estudos recentes sobre filmes e membranas à base de polissacarídeos naturais, que demonstram que, em concentrações elevadas, esses materiais frequentemente exibem alta permeabilidade à água e baixa resistência mecânica, dificultando sua aplicação em processos de separação (Coelhoso *et al.*, 2025).

A análise dos desvios padrão na Tabela 4.1 oferece informações importantes sobre a reprodutibilidade e a uniformidade das membranas. Observa-se que, à medida que a concentração de goma arábica aumenta, os desvios padrão da permeabilidade também crescem, atingindo um valor máximo notável para a membrana PGA5 (19,55). Um desvio tão elevado pode tanto indicar uma maior heterogeneidade na estrutura da membrana, mas também pode sugerir a possibilidade de ter ocorrido algum erro experimental, como uma dispersão não uniforme do aditivo. Essa variabilidade pode indicar a dificuldade de dispersão uniforme das gomas em altas concentrações, o que pode resultar na formação de aglomerados ou na criação de poros de tamanhos variados, como já sugerido nas análises de morfologia.

As membranas modificadas com goma karaya apresentaram desvios padrão comparativamente mais altos em relação às membranas de PET puro e PGA1, o que pode estar relacionado à natureza estrutural menos homogênea da goma karaya, que contribui para uma menor uniformidade na formação da membrana, evidenciado também nas análises de MEV. Essa variabilidade nas propriedades das membranas é um fator importante a ser considerado, pois pode impactar diretamente em futuras aplicações,

Os resultados de permeabilidade indicam que as membranas de PET modificadas têm um desempenho promissor para processos de separação, devido à sua alta permeabilidade. No entanto, as membranas com maior concentração de goma (acima de 5%), necessitam de ajustes nas suas formulações para melhorar a resistência mecânica e garantir sua aplicação prática em sistemas pressurizados.

4.1.2.3 Hidrofobicidade

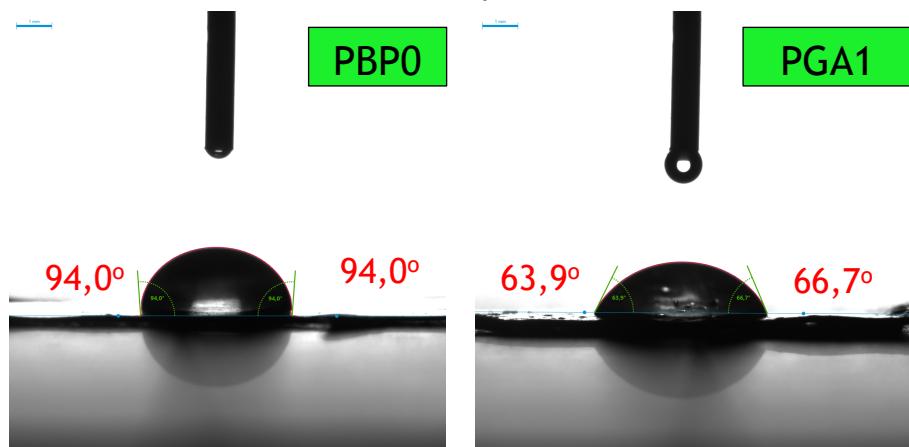
Os resultados obtidos quanto à hidrofobicidade das membranas fabricadas estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Medidas dos Ângulos de contato das membranas fabricadas.

Membranas	Ângulos de contato			
	Esquerdo	Direito	Média	Desvio Padrão
PBP0	94,00	94,00	94,00	0,00
PGA1	63,90	66,70	65,30	1,98
PGA3	54,400	53,40	53,90	0,71
PGA5	46,10	46,20	46,10	0,07
PGA7,5	33,60	34,30	33,90	0,49
PGA10	43,30	44,00	43,60	0,49
PGK1	64,80	63,20	64,00	1,13
PGK3	66,80	64,20	65,50	1,84
PGK5	53,60	46,80	50,20	4,81
PGK7,5	48,60	51,40	50,10	1,98

Os resultados indicaram uma redução significativa da hidrofobicidade com a adição de GA e de GK às membranas. A membrana de PET puro (PBP0) apresentou o maior ângulo de contato médio (94°), caracterizando-se como hidrofóbica. A Figura 4.10 apresenta as imagens da análise para as membranas com a adição da goma arábica.

Figura 4.10: Ângulos de contato das membranas PBP0, PGA1, PGA3, PGA5, PGA7,5 e PG10.





Com a inserção inicial de 1% de GA, o ângulo de contato reduziu para $65,30^\circ$, chegando a uma redução até $33,90^\circ$ em 7,5% de GA (PGA7,5), indicando um aumento da molhabilidade. Entretanto, ao atingir 10% de GA (PGA10), o ângulo de contato aumentou novamente para $43,60^\circ$, sugerindo um efeito de saturação, assim como também sugerido em estudo de Sinha (2013).

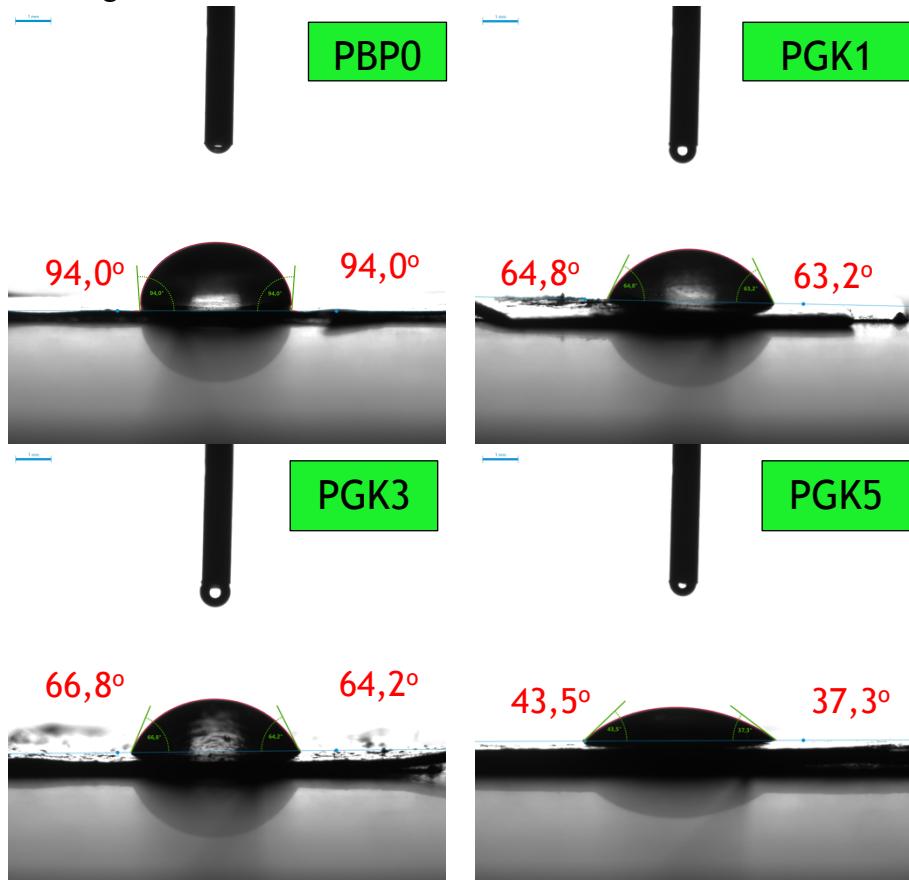
A estrutura química da goma arábica é composta por polissacarídeos altamente ramificados, contendo resíduos de arabinose, galactose, ramnose e ácido glucurônico. Essa complexidade estrutural tende a permitir a formação de ligações de hidrogênio com grupos funcionais presentes na matriz polimérica da membrana, contribuindo para a modificação da superfície e aumento da hidrofilicidade. Além disso, a presença de grupos hidroxila na goma arábica também pode facilitar interações com moléculas de água, reduzindo a hidrofobicidade do material e melhorando seu desempenho em processos de separação (Souza, 2021).

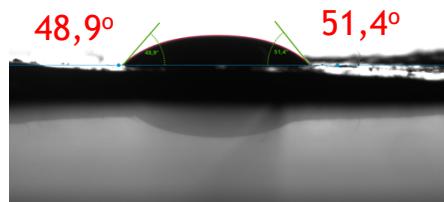
As membranas contendo goma karaya (GK) seguiram uma tendência semelhante, embora com pequenas variações (Figura 4.11). A amostra com 1% de GK (PGK1) apresentou um ângulo de contato médio de $64,00^\circ$, indicando um efeito inicial de

hidrofilização. No entanto, os valores observados para 3% e 5% de GK (PGK3 e PGK5) mostraram uma variação menos linear, com ângulos de contato médios de $65,50^\circ$ e $50,20^\circ$, respectivamente.

A membrana com 7,5% de GK (PGK7,5) apresentou um valor médio de $50,10^\circ$, semelhante ao observado para 5%. Esse comportamento sugere a ocorrência de um ponto de saturação na modificação da superfície, no qual o aumento da concentração de aditivo não resulta em variações significativas nos ângulos de contato. Esse fenômeno também foi descrito por Li *et al.* (2020), que observaram uma estabilização nas propriedades de molhabilidade após certo limite de modificação com aditivos hidrofílicos, devido ao preenchimento das regiões ativas da matriz polimérica.

Figura 4.11: Ângulos de contato das membranas PBP0, PGK1,PGK3, PGK5 e PGK7,5.





Um estudo realizado por Ali *et al.* (2022) demonstrou que a incorporação de biopolímeros, como a goma arábica, em membranas poliméricas de PVC reciclado resultou em um aumento significativo da hidrofilicidade, reduzindo o ângulo de contato da água e melhorando a permeabilidade das membranas. Os autores relataram um aumento de aproximadamente 25% na hidrofilicidade, acompanhado por uma melhora na resistência mecânica e na eficiência da remoção de matéria orgânica natural. Esses achados destacam o potencial das gomas naturais na modificação de superfícies poliméricas, tornando-as mais adequadas para aplicações em filtração e purificação de água. Assim, a incorporação dos polissacarídeos nas membranas estudadas neste trabalho pode desempenhar um papel fundamental na melhoria das propriedades estruturais e funcionais do material, contribuindo para a obtenção de membranas mais eficientes e sustentáveis.

A diminuição nos ângulos de contato das membranas com adição de GA e GK, com exceção da PGA10 que possivelmente atingiu um efeito de saturação (Sinha, 2013), pode ser atribuída à presença dos polissacarídeos dessas gomas, que possuem afinidade com a água e promovem a hidrofilização da superfície das membranas (Yuan & Lee, 2013). Este efeito é explicado pela teoria de Wenzel (1936), que relaciona a rugosidade da superfície com a molhabilidade: superfícies mais rugosas tendem a apresentar menor ângulo de contato devido ao aumento da área de contato entre o líquido e o sólido. Neste caso, os fragmentos polissacarídicos do GA e GK expostos na superfície aumentam a interação com a água, melhorando a hidrofilicidade das membranas.

Segundo o modelo de Wenzel, superfícies rugosas tendem a aumentar a molhabilidade se forem hidrofílicas e a reforçar a hidrofobicidade se já forem hidrofóbicas. O modelo de Cassie-Baxter, por sua vez, sugere que a presença de microcavidades preenchidas por ar pode manter a hidrofobicidade, criando um efeito de auto-limpeza semelhante ao observado em folhas de lótus (Sinderski, 2020).

A análise da Tabela 4.2 também evidencia informações importantes sobre a uniformidade das membranas por meio dos desvios padrão das medições de ângulo de contato. Observa-se que a membrana de PET puro (PBP0) apresentou desvio padrão de 0,00, indicando uma superfície extremamente homogênea. No entanto, a incorporação das gomas resultou em um aumento na variabilidade dos resultados.

Ao comparar as membranas com goma karaya (GK) e as com goma arábica (GA), nota-se que, para a maioria das proporções, as membranas de GK apresentaram desvios padrão mais elevados (PGK3 com 1,84 e PGK5 com 4,81) do que as de GA (PGA3 com 0,71 e PGA5 com 0,07). Essa maior variabilidade nas medições pode estar associada à morfologia menos homogênea e à baixa densidade estrutural observada nas membranas com GK, como evidenciado na seção de morfologia (seção 4.1.1.1). Tais características podem levar a mudanças na superfície da membrana, onde diferentes regiões podem apresentar distintos níveis de molhabilidade. Por outro lado, as membranas com GA em baixas concentrações tenderam a manter uma estrutura mais uniforme, o que é refletido nos menores desvios padrão (com exceção da PGA1 que pode ter ocorrido algum erro experimental pontual e talvez uma não homogeneização total da membrana avaliada) e, consequentemente, em uma maior confiabilidade nas propriedades de hidrofobicidade.

Os resultados reforçam que a adição de biopolímeros aumentaram significativamente a hidrofilicidade das membranas, tornando-as mais adequadas para aplicações em separação e purificação de água. Entretanto, o efeito da concentração desses aditivos deve ser otimizado, uma vez que concentrações elevadas dos polissacarídeos podem comprometer a estrutura e molhabilidade da membrana, afetando sua funcionalidade.

Esse resultados indicam que a modificação das membranas de PET com GA e GK pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a hidrofilicidade das membranas, com potencial para otimizar o desempenho em aplicações de filtração de água. A melhoria da

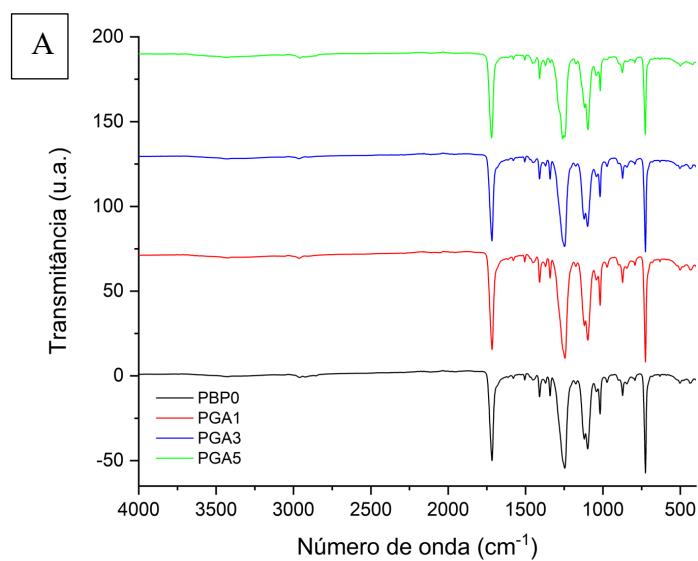
hidrofilicidade é um fator crucial, pois pode aumentar o fluxo de água e reduzir a tendência à incrustação, características desejáveis em membranas utilizadas para separação e purificação.

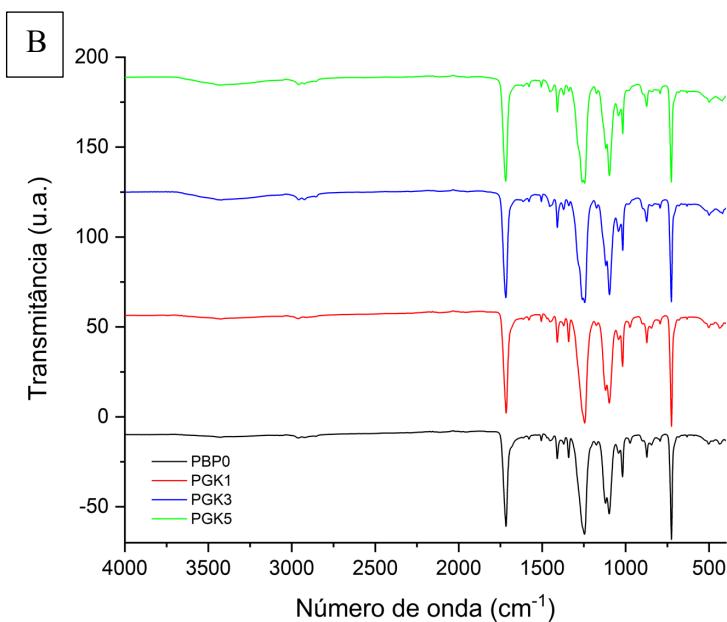
4.1.2.4 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Nesta etapa do estudo, já se optou por focar nas amostras com até 5% de adição de goma arábica e goma karaya (1%, 3% e 5%). Essa decisão baseou-se nos resultados obtidos nas análises anteriores, que indicaram alterações em suas propriedades mais benéficas para processos de separação até essa faixa de concentração. Além disso, concentrações superiores apresentaram comportamento menos linear e potenciais limitações estruturais, como discutido nas seções anteriores, o que justifica a delimitação das demais análises nas proporções mais promissoras para aplicações.

A análise de FTIR das membranas de PET modificadas com GA e GK (Figura 4.12) por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) permitiu identificar as principais bandas de absorção associadas aos grupos funcionais presentes nesses materiais.

Figura 4.12: Espectros de FTIR das membranas de PET puro e modificadas com GA (A) e GK (B) nas concentrações de 1%, 3% e 5%.





Os espectros FTIR apresentaram bandas largas na região de 3200-3500 cm⁻¹, que podem ser atribuídas às vibrações de estiramento dos grupos hidroxila (-OH) presentes na estrutura química das gomas naturais. No entanto, assim como discutido nas membranas de acetato de celulose, é provável que essas bandas estejam associadas principalmente à presença de água residual nas amostras, uma vez que as membranas não foram secas em estufa para evitar possíveis alterações estruturais. Essa atribuição é corroborada por estudos anteriores que indicam que a presença de umidade nos materiais pode resultar em bandas largas nessa região espectral (Erbil, 2014; Yuan e Lee, 2013).

Além das bandas relacionadas ao grupo hidroxila, os espectros das membranas modificadas também apresentaram absorções na região de 1600 cm⁻¹, atribuídas às vibrações de estiramento do grupo carboxilato (COO⁻), e em torno de 2896 cm⁻¹, associadas às vibrações de estiramento C-H (Alves *et al.*, 2025; University of Colorado, 2025). Também foram observadas bandas na região de 1020 cm⁻¹, que podem estar relacionadas às vibrações de estiramento C-O, correspondentes às ligações glicosídicas características de polissacarídeos presentes na goma arábica e na goma karaya (Araújo, 2024). A presença dessas bandas confirma a incorporação das gomas naturais na matriz do PET, indicando que os biopolímeros não foram removidos no processo de fabricação das membranas.

Ao comparar os espectros das membranas de PET puro e das membranas modificadas, verificou-se um aumento na intensidade das bandas em 1020 cm⁻¹ e uma

leve alteração nas absorções na região de 3200-3500 cm⁻¹. Essas mudanças sugerem que a introdução dos biopolímeros pode ter promovido interações intermoleculares com a matriz do PET.

A formação de ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxila das gomas e os grupos funcionais do PET é uma possibilidade, uma vez que estudos prévios indicam que polissacarídeos, como a goma arábica, podem interagir com polímeros sintéticos dessa forma (Carvalho, 2019). No entanto, é importante ressaltar que, devido à sobreposição de bandas no espectro e à possível ocorrência simultânea de diferentes tipos de interações físico-químicas, como ligações de hidrogênio, interações dipolo-dipolo e rearranjos estruturais locais, a confirmação dessas interações exigiria o uso de técnicas complementares, como espectroscopia de ressonância magnética nuclear. Isso porque o FTIR, embora eficaz na identificação de grupos funcionais, não permite distinguir de forma inequívoca entre os modos de interação intermolecular presentes em sistemas multicomponentes complexos (Alqaheem & Alomair, 2020).

A presença de bandas características do PET, como as absorções em torno de 1715 cm⁻¹, atribuídas ao estiramento C=O de ésteres, foi mantida em todas as amostras analisadas, indicando que a estrutura do polímero base não sofreu degradação significativa com a adição das gomas naturais. No entanto, a variação na intensidade relativa dessas bandas entre as amostras pode indicar pequenas alterações na matriz polimérica, possivelmente devido à redistribuição das cadeias poliméricas durante o processo de inversão de fases (Chen *et al.*, 2012).

Dessa forma, os resultados de FTIR confirmam a incorporação da goma arábica e da goma karaya nas membranas de PET e sugerem que os biopolímeros podem ter estabelecido interações intermoleculares com a matriz polimérica. Essas interações podem ser cruciais para a modificação das propriedades físico-químicas das membranas, como sua hidrofilicidade e permeabilidade, conforme discutido nas seções anteriores.

4.1.2.5 Resistência Mecânica

A partir desta etapa, apenas as membranas com 1%, 3% e 5% com adição de goma arábica (PGA1, PGA3 e PGA5) foram selecionadas para a continuidade dos ensaios. Essa escolha foi fundamentada em uma avaliação integrada dos resultados obtidos nas etapas

anteriores do trabalho. As formulações escolhidas apresentaram morfologias com melhor interconexão dos poros, evidenciada nas análises de MEV e permeabilidade, além de um melhor comportamento hidrofílico, conforme evidenciado pela redução dos ângulos de contato em relação à membrana de PET puro.

A análise de FTIR também confirmou a incorporação do aditivo na matriz polimérica, sem indícios de degradação do polímero base (PET). Assim, a seleção das amostras PGA1, PGA3 e PGA5 se deu com base em critérios de desempenho estrutural, funcional e de viabilidade para os ensaios subsequentes.

O comportamento mecânico foi avaliado com base na resistência à tração e no alongamento na ruptura, conforme mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Propriedades mecânicas das membranas produzidas.

Membranas	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)
PET	$1,14 \pm 0,15$	$20,40 \pm 1,20$
PGA1	$0,03 \pm 0,00$	$6,00 \pm 2,22$
PGA3	$0,40 \pm 0,05$	$33,00 \pm 2,50$
PGA5	$0,013 \pm 0,04$	$23,28 \pm 9,88$

A membrana de PET apresentou uma resistência média à tração de 1,14 MPa e alongamento médio de 20,40%. A incorporação de 1% de GA resultou em uma redução acentuada da resistência à tração (0,03 MPa) e, também, do alongamento (6,00%). Esse comportamento pode estar relacionado à fraca interação entre a goma e a matriz de PET, levando à formação de regiões frágeis. Situação semelhante foi relatada por Syarifuddin *et al.* (2024), que observaram que filmes produzidos exclusivamente com GA apresentaram baixa resistência mecânica e pouca integridade estrutural, especialmente na ausência de compatibilidade efetiva entre os componentes da matriz.

Por outro lado, a membrana PGA3 apresentou desempenho significativamente superior em termos de alongamento, atingindo valor médio de 33%. A adição de 3% de GA promoveu alterações importantes na morfologia da membrana, conforme demonstrado nas imagens de MEV, nas quais foi observada uma estrutura mais aberta e porosa em comparação com as demais amostras. Essa maior porosidade está associada à maior capacidade de absorção de água, como verificado nos testes posteriores de EWC

(seção 4.1.2.6), o que pode contribuir para uma maior mobilidade da matriz sob tensão e, consequentemente, maior deformação até a ruptura.

Além disso, a literatura indica que membranas porosas podem manter ou até melhorar sua resistência mecânica quando apresentam uma rede polimérica reforçada e bem conectada, como observado por Manawi *et al.* (2017) em membranas de polietersulfona modificadas com GA. A maior concentração de GA também pode ter favorecido a formação de interações intermoleculares com a matriz polimérica.

No caso do PET reciclado utilizado neste trabalho, a presença de grupos terminais como hidroxila ($-\text{OH}$) e carboxila ($-\text{COOH}$), resultantes de cadeias quebradas ou parcialmente degradadas, pode favorecer a formação de ligações de hidrogênio com os grupos $-\text{OH}$ da goma arábica. Os grupos carbonila nas ligações éster do PET também podem atuar como sítios de interação hidrofílica, embora em menor intensidade. Essas interações contribuem para a coesão da matriz mantendo sua flexibilidade e ajudam a explicar o aumento expressivo no alongamento observado nas amostras PGA3. Estudos recentes mostraram que a adição de goma arábica pode aumentar a flexibilidade de filmes poliméricos, especialmente quando há compatibilidade e interações hidrofílicas (Syarifuddin *et al.*, 2024).

Resultados semelhantes foram relatados por Tahsiri *et al.* (2019), que observaram melhorias mecânicas em filmes proteicos reforçados com GA, atribuindo esse efeito à formação de ligações de hidrogênio, interação que também pode ocorrer em sistemas de polímeros sintéticos como o PET reciclado, especialmente quando há grupos reativos terminais disponíveis.

Por fim para as membranas com GA, a membrana PGA5 apresentou alongamento moderado (23,28%) e resistência à tração extremamente baixa (0,013 MPa), indicando que a incorporação de 5% de GA comprometeu significativamente a integridade estrutural da membrana. Além desses baixos valores médios, observou-se elevado desvio padrão, especialmente no alongamento, o que pode estar relacionado à alta concentração de aditivo utilizada.

Em concentrações elevadas, essa heterogeneidade, combinada com variações nos processos de dispersão, moldagem ou secagem, pode resultar em membranas com

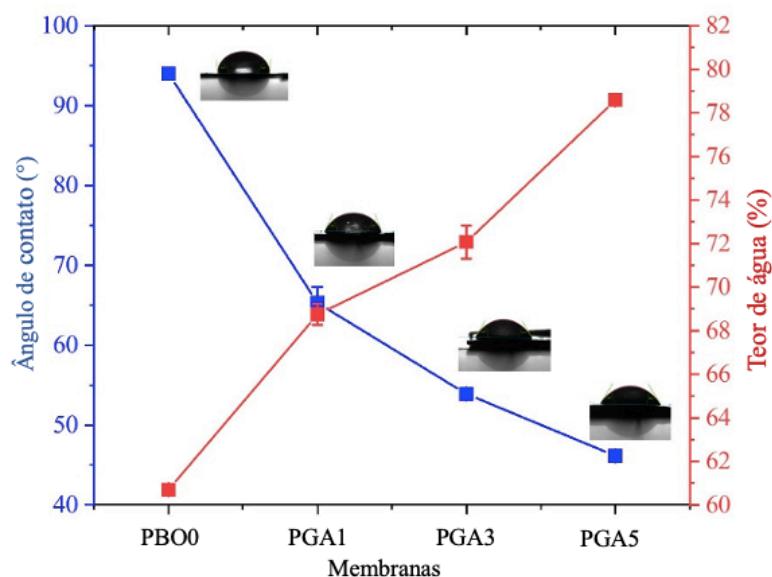
distribuição não uniforme do aditivo e, consequentemente, diferenças morfológicas significativas entre as amostras. Além disso, a formação de estruturas mais porosas ou desorganizadas pode afetar a coesão da rede polimérica, contribuindo para a variabilidade nos resultados mecânicos (Manawi *et al.*, 2017).

Dessa forma, os resultados indicam que a adição de GA influencia significativamente as propriedades mecânicas das membranas de PET reciclado. Em particular, a amostra PGA3 demonstrou o melhor equilíbrio entre resistência e elasticidade, justificando sua seleção para os testes de rejeição realizados neste estudo.

4.1.2.6 Teor de água em equilíbrio (EWC)

Os resultados obtidos nas medições da capacidade de retenção de água (EWC) das membranas com adição de GA são apresentados na Figura 4.13, que também relaciona os valores do ângulo de contato das amostras. É possível observar que o EWC das membranas aumentou progressivamente de 60,70% para 78,58% com o aumento do teor de GA na membrana. Esse aumento é atribuído ao acréscimo na hidrofilicidade da membrana.

Figura 4.13: Ângulo de contato e EWC das membranas produzidas com adição de GA.



Tal comportamento está de acordo com a redução dos valores de ângulo de contato, que também indicaram uma melhoria significativa na hidrofilicidade superficial. O aumento do parâmetro EWC está diretamente associado à elevação da porosidade da membrana, aspecto que será discutido com mais detalhes na Seção 4.1.2.7, e também é evidenciado pelas análises morfológicas.

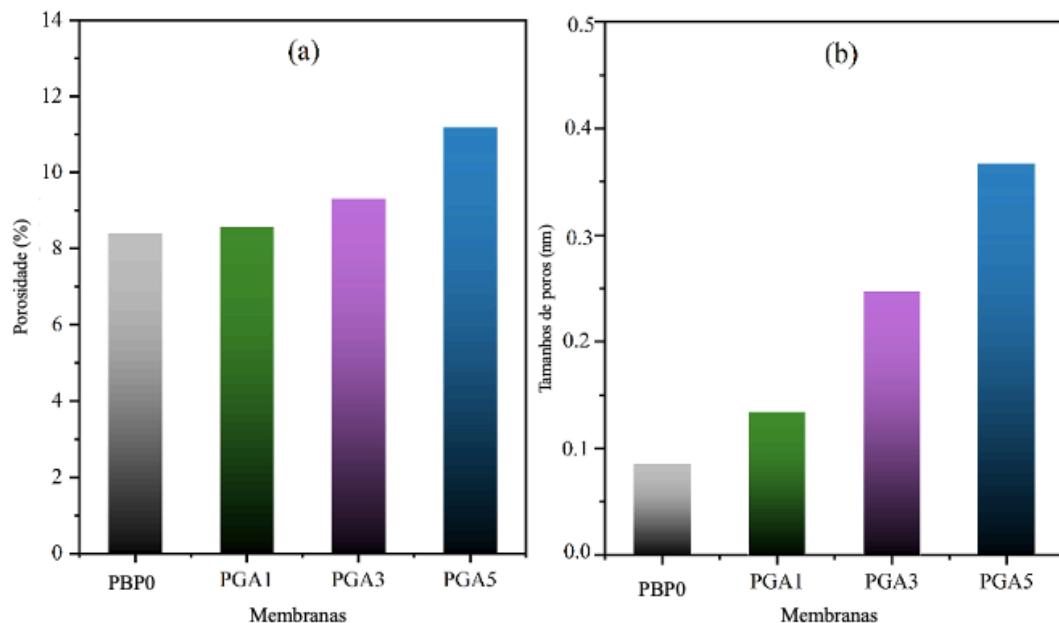
Comportamento semelhante foi observado por Aji *et al.* (2020), que produziram membranas de PVC contendo goma arábica como carga. Além disso, a literatura reforça a correlação direta entre EWC, porosidade e fluxo de água pura, sendo que o aumento da hidrofilicidade contribui para minimizar fenômenos de fouling e otimizar o desempenho das membranas em processos de separação (Lavanya e Balakrishna, 2020).

Os dados de ângulo de contato e EWC obtidos neste estudo confirmam a eficácia da adição da GA na modificação da superfície da membrana, tornando-a mais hidrofílica, o que facilita significativamente o transporte de água através da matriz polimérica e, consequentemente, melhora seu desempenho em processos de filtração.

4.1.2.7 Porosidade e tamanho de poros

Porosidade e tamanho de poro são parâmetros morfológicos importantes de uma membrana, diretamente relacionados à capacidade de permeação do material. A Figura 4.14 apresenta os dados para as membranas analisadas, com a porosidade (Figura 4.14a) e o tamanho de poros (Figura 4.14b). De modo geral, a porosidade e o tamanho dos poros aumentaram em função do aumento da proporção da GA.

Figura 4.14: Efeito da adição de GA na porosidade e no tamanho dos poros das membranas desenvolvidas.



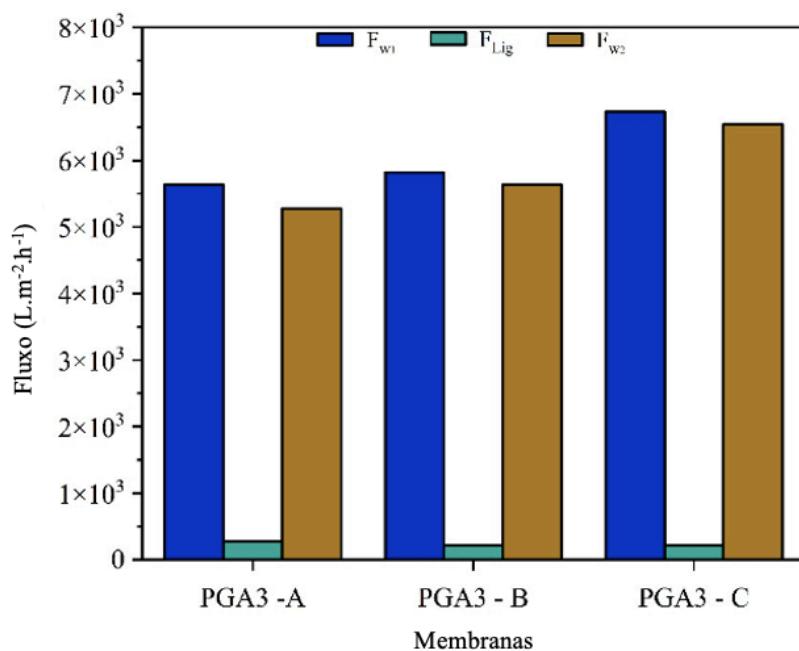
Em comparação à membrana de PET, a porosidade (Figura 4.14a) das amostras contendo GA aumentou proporcionalmente ao teor do aditivo. O efeito do polissacarídeo no tamanho dos poros também foi evidente quando foi investigado como parâmetro (Figura 4.14b).

Observou-se um aumento drástico no tamanho dos poros quando a dosagem da GA foi maior (5%), resultado que está de acordo com as imagens de MEV apresentadas na Figura 4.7. Isso sugere que o aumento da concentração de goma nos sistemas resultou em maior difusão de água, promovendo a formação de maior volume de vazios nas amostras (Rekik, 2023). Dessa forma, é possível afirmar que, dentro das condições deste estudo, a goma arábica tornou a membrana de PET mais porosa, sendo sua concentração um fator decisivo para o tamanho dos poros observados.

4.1.2.8 Recuperação de fluxo e índice de fouling

O estudo de recuperação de fluxo e fouling foi realizado utilizando uma solução de lignina residual ($100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) como modelo de agente incrustante (Figura 4.15). As análises foram conduzidas com duas formulações de membranas: PET e PGA3, ambas avaliadas em triplicata.

Figura 4.15: Recuperação de fluxo e índice de fouling na membrana PGA3, considerando as três triplicatas.

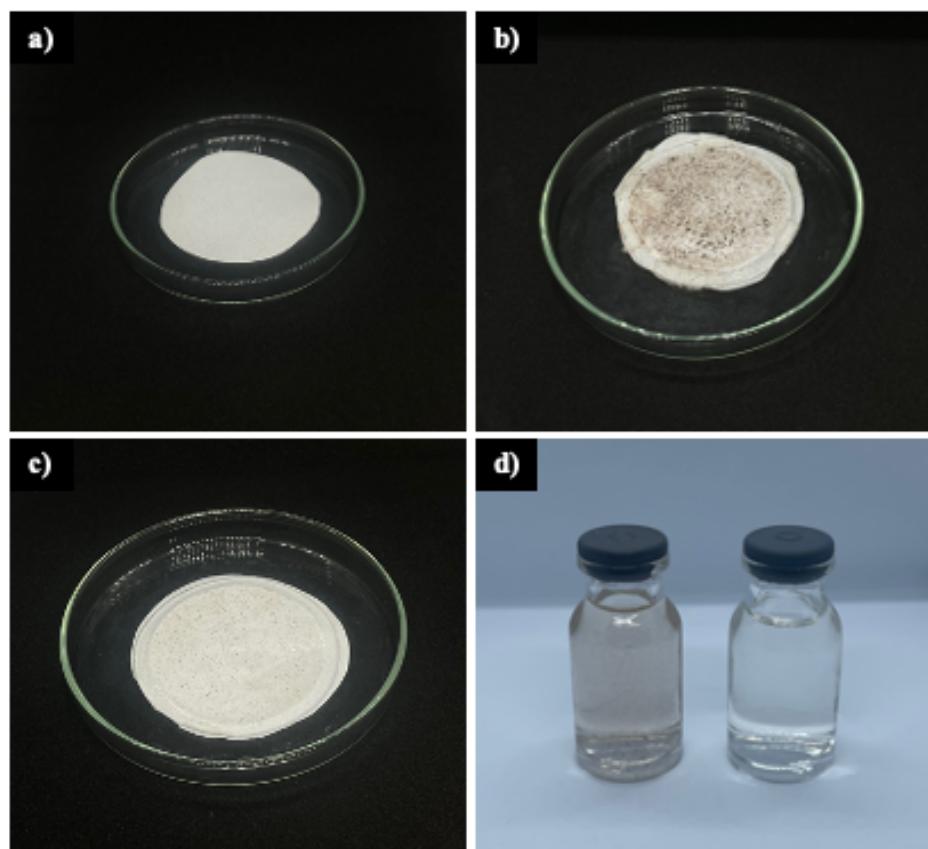


O fluxo de água pura inicial (F_{w1}) das membranas modificadas (PGA3) apresentou valores elevados, variando de $5636,36$ a $6727,27 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, enquanto a membrana de PET apresentou um F_{w1} médio de $181,58 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, evidenciando sua limitação em termos de permeabilidade. Esse comportamento está diretamente relacionado às características estruturais das membranas.

Como demonstrado nas seções anteriores, a adição de GA promoveu um aumento significativo na porosidade, de 6,46% (PET) para 9,43%, assim como no tamanho médio de poro, que passou de 0,09 nm (PET) para 0,25 nm (PGA3), favorecendo a capacidade de transporte de fluido através da matriz polimérica. Resultados estes que também estão em concordância com estudos prévios conduzidos por Manawi *et al.*, (2017).

Durante a etapa de filtração da lignina para o estudo de fouling (Figura 4.16), a diferença de desempenho entre as membranas foi evidente. A membrana PGA3 apresentou fluxos de lignina variando entre $218,18$ e $272,73$ $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, enquanto a membrana de PET exibiu um fluxo extremamente baixo, de apenas $0,15$ $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, valor obtido após a etapa de compactação, quando o coeficiente de compactação atingiu valor próximo de 1, garantindo a estabilização do fluxo antes da medição.

Figura 4.16: Sequência fotográfica da membrana PGA3 durante os processos de análise de rejeição e fouling. (a) membrana ainda não utilizada; (b) membrana após o teste de rejeição de lignina; (c) membrana após a limpeza por ultrassom; (d) solução de lignina de alimentação (esquerda) e permeado (direita).



Após a etapa de limpeza, que consistiu em imersão em água deionizada seguida de ultrassonicação por 20 minutos, o fluxo de água pura final (F_{w2}) da membrana PGA3 se recuperou de forma eficiente, atingindo valores entre $5272,73$ e $6545,45$ $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$,

com razão de recuperação de fluxo (FRR) variando entre 93,55% e 97,30%, demonstrando excelente resistência ao fouling. Esse desempenho está diretamente associado às características hidrofílicas da superfície, favorecidas pela incorporação da goma arábica, bem como à estrutura mais aberta da matriz polimérica (Aji *et al.*, 2020; Manawi *et al.*, 2017).

Por outro lado, a membrana de PET, mesmo após a limpeza, apresentou recuperação menor, com F_{w2} médio de $127,10 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, correspondendo a um FRR de aproximadamente 69,99%, valor significativamente inferior em comparação às membranas modificadas.

A TFR das membranas PGA3 foi elevada, ultrapassando 95%, o que é esperado na filtração de compostos orgânicos de alto peso molecular, como a lignina. No entanto, a maior parte desse fouling foi reversível, conforme indicado pelos altos valores de RFR (88,71% a 94,05%), enquanto a IFR permaneceu baixa (2,7% a 6,45%), evidenciando a eficiência do procedimento de limpeza.

Em contraste, a membrana de PET apresentou não apenas uma TFR extremamente alta (próxima de 99,9%), mas também uma proporção muito maior de fouling irreversível, com IFR estimada em torno de 30%, refletindo sua baixa resistência ao fouling e sua limitação para aplicações envolvendo a separação de compostos orgânicos como a lignina.

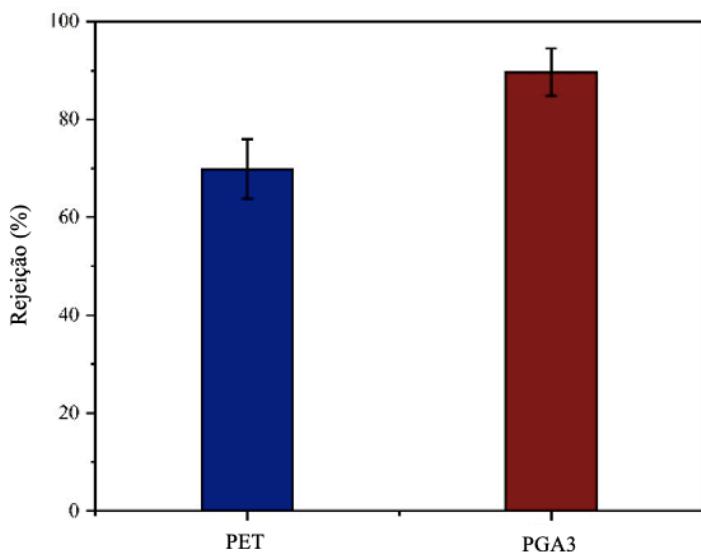
De modo geral, os resultados confirmam que a incorporação de 3% em massa de GA em membranas de PET proporcionou melhorias estruturais significativas no desempenho hidráulico das membranas, tanto na filtração de água quanto de lignina. Além disso, também contribuiu para a redução do fouling e para a melhora da capacidade de recuperação de fluxo após a limpeza, resultados amplamente consistentes com o

relatado na literatura (Aji *et al.*, 2020; Manawi *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2019; Sathish Kumar *et al.*, 2015).

4.1.2.9 Teste de rejeição

O desempenho das membranas no teste de rejeição está apresentado na Figura 4.17.

Figura 4.17: Performance de rejeição das membranas PET e PGA3. PET: 4 bar, 1h, permeado 9 mL; PGA3: 1 bar, <0,5h, permeado 80 mL.



A membrana de PET apresentou desempenho limitado, operando sob uma pressão de 4 bar com volumes de permeado extremamente baixos: 9 mL para PET-A, 7 mL para PET-B e 11 mL para PET-C (valores das 3 triplicatas realizadas), todos após uma hora de operação. Devido a esse comportamento, os testes foram interrompidos após esse período, uma vez que o volume filtrado não apresentou aumento significativo com o tempo.

Esse resultado demonstra a baixa permeabilidade da membrana de PET, que exibiu alta resistência à passagem de fluido, possivelmente relacionada à sua morfologia com menor porosidade e à hidrofobicidade de sua matriz polimérica. Em contraste, as membranas PGA3 apresentaram desempenho significativamente superior, operando sob menor pressão (1 bar) e permitindo a filtração completa do volume do módulo (80 mL) em todas as réplicas, com tempos de filtração inferiores a 0,5 h, evidenciando a alta permeabilidade do material.

Esse comportamento confirma que a modificação da matriz polimérica com a GA proporcionou um aumento significativo da hidrofilicidade, favorecendo a formação de uma estrutura porosa mais aberta e facilitando o transporte de água (Mazar *et al.*, 2018). Quanto à remoção de turbidez, as membranas de PET apresentaram valores de rejeição entre 65,52% e 74,14%, enquanto as membranas PGA3 apresentaram valores significativamente mais elevados, variando de 85,34% a 93,10%, demonstrando que a modificação com GA melhorou a capacidade das membranas em reter partículas e sólidos suspensos.

A análise de condutividade complementou esses resultados ao permitir a avaliação da passagem de compostos dissolvidos na solução. A solução de alimentação apresentou condutividade de 8,178 μS . Nos permeados das membranas de PET, os valores de condutividade foram significativamente mais altos: 75,59 μS para PET-A, 70,45 μS para PET-B e 73,28 μS para PET-C. Para as membranas PGA3, os valores foram de 35,91 μS para PGA3-A, 33,98 μS para PGA3-B e 35,26 μS para PGA3-C.

Esse aumento da condutividade no permeado de ambas as membranas indica que compostos dissolvidos, como sais e íons, não foram retidos, o que é característico de processos de ultrafiltração, nos quais o mecanismo de separação baseia-se predominantemente na exclusão por tamanho, restringindo a passagem de sólidos

suspensos enquanto permite a livre passagem de espécies de baixo peso molecular (Dhaka *et al.*, 2022). Além disso, os maiores valores de condutividade observados nos permeados das membranas de PET estão diretamente relacionados ao pequeno volume de solução efetivamente filtrado, resultando na concentração dos compostos dissolvidos.

Por outro lado, os menores valores de condutividade observados para PGA3 estão associados ao maior volume de solução filtrado e podem também refletir contribuições de características estruturais promovidas pela GA, que podem ter favorecido interações adicionais com os solutos presentes na solução (Syarifuddin *et al.*, 2025). De modo geral, os resultados obtidos neste estudo demonstram que a modificação com GA foi altamente eficaz na melhoria da permeabilidade e na capacidade de remoção de turbidez.

Esses achados são consistentes com a literatura recente, que indica que a incorporação de biopolímeros em matrizes poliméricas é uma estratégia eficaz para o desenvolvimento de membranas com propriedades hidrofílicas aprimoradas, maior fluxo de permeado e maior capacidade de retenção de sólidos suspensos (Dhaka *et al.*, 2022; Mazar *et al.*, 2018; Syarifuddin *et al.*, 2025; Arahman *et al.*, 2022).

5. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs uma abordagem inovadora e sustentável para o desenvolvimento de membranas poliméricas a partir de materiais residuais, com o objetivo de abordar a crescente geração de resíduos sólidos. A pesquisa se concentrou na produção de membranas a partir de acetato de celulose (AC) residual de filtros de cigarro e de politereftalato de etileno (PET) de garrafas plásticas com a adição de gomas naturais (árabica e karaya). A síntese das soluções poliméricas a partir de AC e PET residuais foi bem-sucedida, assim como a produção de filmes poliméricos pela técnica de inversão de fases para todas as formulações testadas.

As membranas de acetato de celulose produzidas apresentaram uma morfologia porosa similar à de membranas de AC não residual. No entanto, esses materiais apresentaram falha estrutural sob pressão, resultando em rupturas durante os testes de permeabilidade. Essa baixa resistência mecânica, atribuída à formulação e ao suporte utilizado, inviabilizou a continuidade dos ensaios com essas membranas. Diante disso, os estudos foram direcionados para as membranas fabricadas a partir de PET residual, que demonstraram maior resistência mecânica, além de maior disponibilidade como resíduo, o que as torna mais adequadas para as aplicações propostas.

A incorporação da goma arábica (GA) nas membranas de PET demonstrou um efeito significativo e positivo nas propriedades físico-químicas do material. As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostraram que a adição de 1% e 3% de GA resultou na preservação de uma estrutura porosa bem definida. Por outro lado, concentrações maiores (5%, 7,5% e 10%) levaram a alterações morfológicas desfavoráveis, com poros menos definidos e maior densidade estrutural.

A permeabilidade das membranas de PET foi melhorada com a adição de GA. A membrana com 3% de GA (PGA3) apresentou uma permeabilidade de 77,30 L/h·m², e a

com 5% de GA (PGA5) atingiu o máximo de 157,70 L/h·m². Concentrações mais altas de GA resultaram em uma diminuição da permeabilidade, sugerindo um limite de saturação que compromete a eficiência da membrana.

A modificação com gomas naturais reduziu a hidrofobicidade da membrana de PET. O ângulo de contato da membrana pura (94,00°) diminuiu significativamente com a adição de GA, alcançando 33,90° para a amostra PGA7,5. A goma karaya (GK) também promoveu a hidrofilização, mas as membranas modificadas com GK apresentaram valores de permeabilidade mais baixos e estruturas mais frágeis, indicando que a GA foi mais eficaz para este tipo de aplicação.

As análises de resistência mecânica revelaram que a membrana com 3% de GA (PGA3) apresentou um alongamento de 33%, superando a membrana de PET puro (20,40%). Esse resultado indica que a GA, nessa concentração, melhorou a flexibilidade da membrana. No entanto, a amostra com 5% de GA (PGA5) mostrou uma baixa resistência à tração, o que demonstra que a concentração do aditivo deve ser controlada para garantir a integridade estrutural.

Os testes de desempenho hidráulico confirmaram a eficácia da modificação. A membrana PGA3 demonstrou eficaz desempenho de filtração, operando em baixa pressão (1 bar) e com alta permeabilidade. Além disso, apresentou uma alta taxa de recuperação de fluxo (FRR entre 93,55% e 97,30%), com baixo índice de fouling irreversível (IFR de 2,70% a 6,45%). O teste de rejeição de lignina mostrou que a membrana PGA3 foi capaz de reter entre 85,34% e 93,10% da turbidez, enquanto a membrana de PET puro alcançou valores de 65,52% a 74,14%. A análise de condutividade confirmou que a separação ocorre por ultrafiltração, retendo sólidos suspensos e permitindo a passagem de espécies de baixo peso molecular.

Portanto, este trabalho demonstrou que a modificação de membranas de PET residual com goma arábica é uma estratégia promissora para o desenvolvimento de materiais com propriedades aprimoradas para o processos de separação em meio líquido. A atenção à concentração do biopolímero é crucial, e a formulação com 3% de goma arábica (PGA3) se destacou como a mais equilibrada, apresentando uma combinação ideal de permeabilidade, hidrofilicidade, resistência mecânica e desempenho na rejeição de contaminante. Essa abordagem inovadora contribui para a valorização de resíduos plásticos, promovendo a economia circular e oferecendo uma solução sustentável para desafios ambientais

6. REFERÊNCIAS

- ABDELRAHIM, M. Y. M. et al. Supported ionic liquid membranes immobilized with carbonic anhydrases for CO₂ transport at high temperatures. **Journal of Membrane Science**, v. 528, p. 225–230, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.01.033>.
- ABDULLAH, N. et al. Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 76, p. 17-38, 2019.
- ABIPET. **Censo de Reciclagem de PET no Brasil**. 2016. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- ABIPLAST. **Cadeia Produtiva e Aplicações do Material Plástico**. 2017. Disponível em: <http://file.abiplast.org.br/file/download/2018/Perfil-2017.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- ABREMA. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. São Paulo: ABREMA, 2023. Disponível em: https://www.abrema.org.br/wpcontent/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf. Acesso em: 18 mar. 2025.
- ABREMA. **Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente**. 2023. Disponível em: <https://www.abrema.org.br>. Acesso em: 16 mar. 2025.
- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2023.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – Ano-base 2023**. São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2024. Disponível em: <https://abrelpe.org.br>. Acesso em: 16 abr. 2025.
- ABUBAKAR, I. R.; MANIRUZZAMAN, K. M.; DANO, U. L.; ALSIHRI, F. S.; ALSHAMMARI, M. S.; AHMED, S. M. S; ALRAWAF, T. I. Environmental sustainability impacts of solid waste management practices in the global South. **International journal of environmental research and public health**, v. 19, n. 19, p. 12717, 2022.
- ADVANCES in Dye Removal Technologies Tinturas - Sourav Mondal, Mihir Kumar Purkait, Sirshendu De - Google Books. [S. l.], [2018?]. Disponível em: https://books.google.co.in/books/about/Advances_in_Dye_Removal_Technologies.html?id=EDQ8DwAAQBAJ&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 18 jan. 2025.
- AGRAWAL, M. et al. Hydrophilic and superoleophobic GO-TiO₂ PVDF/PEI membrane with antifouling properties for efficient oil–water separation. **Next Materials**, v. 8, p. 100618, 2025.

AHMAD, R.; MIRZA, A. Aplicação de goma xantana/n-acetil cisteína bionanocompósito de mica modificado como adsorvente para a remoção de metais pesados tóxicos. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 7, p. 101-108, 2018.

AHMED, F. N.; LAN, C. Q. Treatment of landfill leachate using membrane bioreactors: a review. **Desalination**, v. 287, p. 41–54, 2012. doi:10.1016/j.desal.2011.12.012. Acesso em: 4 fev. 2025.

AJI, M. M.; NARENDREN, S.; PURKAIT, M. K.; KATIYAR, V. Biopolymer (gum arabic) incorporation in waste polyvinylchloride membrane for the enhancement of hydrophilicity and natural organic matter removal in water. **Journal of Water Process Engineering**, v. 38, p. 101569, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101569>.

AL-ARAJI, D. D.; ALSALHY, Q. F.; AL-ANI, F. H. Polyethyleneimine (PEI) grafted silica nanoparticles for polyethersulfone membranes modification and their outlooks for wastewater treatment – a review. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 103, n. 16, p. 4752–4776, 2023. DOI: 10.1080/03067319.2021.1931163.

ALHASSAN, I. S. **Effect of gum Arabic on the structure–property relationship in poly(vinyl chloride)**. 2014. 145 f. Dissertação (Mestrado em Química Física) – Ahmadu Bello University, Zaria, Nigéria, 2014. Disponível em: <https://kubanni.abu.edu.ng/server/api/core/bitstreams/010ec6ec-00a6-484f-b42e-538265b96309/content>. Acesso em: 2 mai. 2025.

ALI, B. T. I.; WIDIASTUTI, N.; KUSUMAWATI, Y.; JAAFAR, J. Utilization of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle waste as membrane with several modifications for the removal of chromium ions in wastewater. **Materials Today: Proceedings**, v. 74, parte 3, p. 433-437, 2023.

ALI, B. T. I. et al. Low-cost membrane from polyethylene terephthalate bottle waste for water purification and chromium removal: modification and application. **RSC advances**, v. 13, n. 13, p. 8985-8995, 2023.

ALI, B. T. I. et al. Utilization of drinking water bottle waste as a sustainable and low-cost membrane material in water purification. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 3030-3036, 2022.

ALQAHEEM, Y.; ALOMAIR, A. A. Microscopy and Spectroscopy Techniques for Characterization of Polymeric Membranes. **Membranes**, v. 10, n. 2, p. 33, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes10020033>.

ALVES, V. B. A influência da densidade do filtro de cigarros nos teores da fumaça. 2016. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2016.

ALVES, L. A. et al. Uso de gomas naturais para obtenção de emulsões de óleo de camomila pretendidos para aplicação cutânea. **Revista Brasileira Multidisciplinar - ReBrAM**, v. 27, supl. 2, 2024. Disponível em: <https://10.25061/2527-2675/ReBrAM/2024.v27iSupl.2I63>. Acesso em: 11 jan. 2025.

AMARE, N. et al. The Practices of Solid Waste Utility and Thriving Conditions of Logistics (a Case of Tepi Town): A Study to Treat the Healthy Environment. **Journal of Environmental and Public Health**, v. 2022, n. 1, p. 8391616, 2022.

AMBAYE, T. G. et al. Emerging technologies and sustainable strategies for municipal solid waste valorization: challenges of circular economy implementation. **Journal of Cleaner Production**, v. 423, p. 138708, 2023.

AMIM ALTAF NABI, A.; NEMA, A. K. An in-depth analysis of factors and forecasting techniques for emerging solid waste streams. **Journal of Environmental Management**, v. 367, p. 122037, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122037>.

ANDERSON, D. M. W.; WEIPING, W. Gum arabic [Acacia senegal] de Uganda: caracterização, espectros de RMN, composto de aminoácidos e relação catiônica goma/solo. **International Tree Crops Journal**, v. 7, p. 167–179, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1080/02652039109373991>.

ANDOY, N. M. et al. Polyethyleneimine-modified cellulose acetate membranes for improved water permeability and antifouling performance. **Membranes**, v. 11, n. 10, p. 768, 2021. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8540495/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

ANDRADY, A. L. Microplastics in the marine environment. **Marine pollution bulletin**, v. 62, n. 8, p. 1596-1605, 2011.

ANSARI, M. et al. Dynamic assessment of economic and environmental performance index and generation, composition, environmental and human health risks of hospital solid waste in developing countries; A state of the art of review. **Environment international**, v. 132, p. 105073, 2019.

ARAHMAN, N. et al. Hydrophilic Antimicrobial Polyethersulfone Membrane for Removal of Turbidity of Well-Water. **Water**, v. 14, p. 3769, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14223769>.

ARAUJO, I. P. **Desenvolvimento e caracterização de membranas poliméricas para aplicações ambientais**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024. Disponível em: https://www.eng-materiais.bh.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/189/2024/05/TCC_IsabellaPAraujo_VersaoFinal.pdf. Acesso em: 10 jan. 2025.

ARAÚJO, T. D. et al. Efeito do uso de LipofectamineTM 2000 e polietilenoimina (PEI) na transfecção e expressão da proteína fluorescente verde em fibroblastos bovinos cultivados in vitro. **CES Revista**, v. 28, n. 1, p. 57–71, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ATHIRA, P.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. Recent advances in biodegradable polymers and their blends towards potential biomedical applications. **Polymers**, v. 12, n. 12, p. 1-42, 2020.

ATHIRA, V. B.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. Preparation and characterization of porous polyethersulfone (PES) membranes with improved biocompatibility by blending sulfonated polyethersulfone (SPES) and cellulose acetate (CA) – A comparative study. **Materials Today Communications**, v. 25, p. 101544, 2020.

AWAJA, F.; PAVEL, D. Recycling of PET. **European Polymer Journal**, v. 41, p. 1453–1477, 2005.

AYELERU, O. O. et al. Challenges of plastic waste generation and management in sub-Saharan Africa: A review. **Waste Management**, v. 110, p. 24-42, 2020.

BALAMURUGAN, J. et al. Highly reversible water splitting cell building from hierarchical 3D nickel manganese oxy- phosphide nanosheets. **Nano Energy**, v. 69, p. 104432, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104432>.

BARNES, D. K.; GALGANI, F.; THOMPSON, R. C.; BARLAZ, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. **Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences**, v. 364, n. 1526, p. 1985-1998, 2009.

BARTHLOTT, W.; NEINHUIS, C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. **Planta**, v. 202, n. 1, p. 1–8, 1997.

BASTE, I. A. et al. Making peace with nature: a scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. [S. l.]: [s. n.], 2021.

BEIGL, P.; LEBERSORGER, S.; SALHOFER, S. Modelling municipal solid waste generation: A review. **Waste management**, v. 28, n. 1, p. 200-214, 2008.

BORRELLE, S. B. et al. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. **Science**, v. 369, n. 6510, p. 1515-1518, 2020.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988.** Brasília, DF: Senado Federal, 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 20 mar. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 24 jul. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Plano Nacional de Resíduos Sólidos: versão final - PLANARES*. Brasília, DF: MMA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/plano-nacional-de-residuos-solidos-planares-e-aprovado-com-meta-de-reciclar-25-dos-residuos-ate-2040>. Acesso em: 4 jun. 2025.

BROWNE, C. L. The design of cigarettes. Winston-Salem: R.J. Reynolds Tobacco Company, 1990. Disponível em: <https://www.industrydocuments.ucsf.edu/docs/gxwv0149>. Acesso em: 4 mai. 2025.

CALDICOTT, R. J. The basics of stretch blow molding PET containers. In: **Plastic Engineering**. Brookfiled, USA: Society of Plastic Engineering, 1999. p. 35.

CAMPOS, H. K. T. Renda e Evolução da Geração per capita de Resíduos Sólidos no Brasil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 171-180, 2012.

CARMO, M.; FRITZ, D. L.; MERGEL, J.; STOLTEN, D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 12, p. 4901-4934, 2013.

CARVALHO, L. T. de. **Modificação química de pululana e seu uso na produção de partículas para sistemas de liberação controlada de Indometacina**. 2019. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019. Disponível em: https://sites.usp.br/ppgeq/wp-content/uploads/sites/537/2019/10/Dissertação_Final_Layne-Teixeira.pdf. Acesso em: 21 jan. 2025.

CASSIE, A. B. D.; BAXTER, S. Wettability of porous surfaces. **Transactions of the Faraday Society**, v. 40, p. 546-551, 1944.

CEMPRE. **Um panorama da reciclagem no Brasil**. 2015. Disponível em: <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/artigos>. Acesso em: 8 mar. 2025.

CETRULO, T. B. et al. Effectiveness of solid waste policies in developing countries: A case study in Brazil. **Journal of cleaner production**, v. 205, p. 179-187, 2018.

CHAI, P. V. et al. Graphene oxide based mixed-matrix membrane in the presence of eco-friendly natural additive gum Arabic. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, Art. 105638, 2021. doi:10.1016/j.jece.2021.105638. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105638>. Acesso em: 4 fev. 2025.

CHANDA, M.; ROY, S. K. **Industrial polymers, specialty polymers**. 4. ed. Florida: CRC Press, 2009.

CHATURVEDI, B. K. et al. Preparation, characterization and performance of polyethersulfone ultrafiltration membranes. **Desalination**, v. 133, n. 1, p. 31-40, 2001.

CHEN, Z.; HAY, J. N.; JENKINS, M. J. FTIR spectroscopic analysis of poly(ethylene terephthalate) on crystallization. **European Polymer Journal**, v. 48, n. 9, p. 1586-1610,

2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2012.06.006>. Acesso em: 1 fev. 2025.

CHENG, H. et al. Improving the performance of titanium bipolar plate in proton exchange membrane water electrolysis environment by nitrogen-chromium composite cathode plasma electrolytic deposition. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 43, p. 16568-16578, 2023.

CHENG, Y. T.; RODAK, D. E. Is the lotus leaf superhydrophobic? **Applied Physics Letters**, v. 86, n. 14, p. 1-3, 2005.

CNN BRASIL. **Brasil deixa de ganhar R\$ 14 bilhões com reciclagem de lixo**. 3 abr. 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/brasil-deixa-de-ganhar-r-14-bilhoes-com-reciclagem-de-lixo>. Acesso em: 16 jun. 2025.

COELHOSO, I. M. et al. Polysaccharide films/membranes for food and industrial applications. **Polysaccharides**, v. 6, n. 2, p. 48, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6020048>. Acesso em: 1 abr. 2025.

COLE, M. et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. **Marine pollution bulletin**, v. 62, n. 12, p. 2588-2597, 2011.

DARYABEIGI ZAND, A.; VAEZIHEIR, A.; HOVEIDI, H. Comparative evaluation of unmitigated options for solid waste transfer stations in North East of Tehran using rapid impact assessment matrix and Iranian Leopold matrix. **Environmental Energy and Economic Research**, v. 3, n. 3, p. 189-202, 2019.

DHAKA, V. et al. Occurrence, toxicity and remediation of polyethylene terephthalate plastics. A review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 20, p. 1777–1800, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01384-8>.

DOKL, M. H. et al. **Global projections of plastic use, end-of-life fate, and potential changes in consumption reduction, recycling, and replacement with bioplastics to 2050**. 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/384773306_Global_projections_of_plastic_use_end-of-life_fate_and_potential_changes_in_consumption_reduction_recycling_and_replacement_with_bioplastics_to_2050. Acesso em: 10 jun. 2025.

DONG, X. et al. Polymers and solvents used in membrane fabrication: A review focusing on sustainable membrane development. **Membranes**, v. 11, n. 5, p. 309, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes11050309>.

EIVAZZADEH-KEIHAN, R. et al. Recent advances on biomedical applications of pectin-containing biomaterials. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 217, p. 1-18, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.016>.

EL-KHATEEB, M. A. et al. The feasibility of using non-woven fabric as packing material for wastewater treatment. **Desalination and Water Treatment**, v. 111, p. 94-100, 2018.

EL-KHATEEB, M. A. et al. Polishing of secondary treated wastewater using nano-ceramic hybrid PET waste plastic sheets. **Desalination and Water Treatment**, v. 217, p. 214-220, 2021.

ENSINGER. PEI - **Polieterimida**. [S. l.]: Ensinger, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ensingerplastics.com/pt-br/seminacabados/plasticos-de-alto-desempenho/pei>. Acesso em: 20 fev. 2025.

ERBIL, H. Y. The debate on the dependence of apparent contact angles on drop contact area or three-phase contact line: A review. **Surface Science Reports**, v. 69, n. 4, p. 325–365, 2014.

FAO. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives – JECFA. *Specifications for the identity and purity of food additives: Karaya gum*. Compendium of Food Additive Specifications. Rome: FAO, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cb6752en/cb6752en.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2025.

FARZADKIA, M. et al. Municipal solid waste recycling: Impacts on energy savings and air pollution. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 71, n. 6, p. 737-753, 2021.

FERNANDES, P.; AIRES-BARROS, M. R.; CABRAL, J. M. S. Biocatálise Aplicada. In: LIMA, N.; MOTA, M. (Ed.). **Biotecnologia: Fundamentos e Aplicações**. Portugal: Lidel, 2003. p. 219-246.

FERNANDES, R. S. V. **Estudo da rugosidade superficial em membranas poliméricas preparadas pela técnica de inversão de fases**. 2021. [Trabalho de Conclusão de Curso].

FONTANELLA, A. M. **Desempenho de membranas híbridas à base de PET residual, goma arábica e PEI no tratamento de efluentes**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, 2024.

GALIANO, F. et al. Advances in biopolymer-based membrane preparation and applications. **Journal of Membrane Science**, v. 564, p. 562–586, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.07.059>.

GAULT, D. A. ¿Uno o varios tipos de gobernanza? Más allá de la gobernanza como moda: La prueba del tránsito organizacional. **Cuadernos de Gobierno y Administración Pública**, v. 1, n. 2, p. 117-137, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.5209/rev_cgcap.2014.v1.n2.47538.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.

GOMES, A. C. O. et al. Membranas Híbridas com Potencial Uso em Células a Combustível - Parte 1: Nanocompósitos de Poli(éterimida) Sulfonada. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 24, n. 4, p. 464-473, 2014.

GRIGOLETO, L. C. **Membranas poliméricas funcionalizadas para tratamento de amoxicilina**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do

Paraná, 2018. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/31187/1/membranasfuncionalizadastratamentoamoxicilina.pdf>.

GUERRERO, L. A.; MAAS, G.; HOGLAND, W. Solid waste management challenges for cities in developing countries. **Waste management**, v. 33, n. 1, p. 220-232, 2013.

GUO, M. et al. Novel sulfonated poly(ether ether ketone)s containing nitrile groups and their composite membranes for fuel cells. **Journal of Power Sources**, v. 195, n. 15, p. 4613–4621, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.02.036>.

GUTBERLET, J. Ways out of the waste dilemma: Transforming communities in the Global South. **RCC Perspectives: Transformations in Environment and Society**, v. 3, p. 1-476, 2016. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.

GUTBERLET, J. et al. Bridging weak links of solid waste management in informal settlements. **Journal of Environment and Development**, v. 26, n. 1, p. 106-131, 2017. DOI: 10.1177/1070496516672263.

HE, M. et al. Manipulating membrane surface porosity and pore size by in-situ assembly of Pluronic F127 and tannin. **Journal of Membrane Science**, v. 556, p. 285–292, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.087>.

HOSSAIN, I.; TUHA, A. S. M. Biodegradable plastic production from daily Household waste materials and Comparison the decomposing time with synthetic polyethylene plastic. **International journal of advancement in life sciences research**, v. 3, p. 1-5, 2020.

HUMPERT, D.; EBRAHIMI, M.; CZERMAK, P. Membrane technology for the recovery of lignin: A review. **Membranes**, v. 6, n. 3, p. 42, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes6030042>.

IBRAR, I. et al. A review of fouling mechanisms, control strategies and real-time fouling monitoring techniques in forward osmosis. **Water**, v. 11, n. 4, p. 695, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11040695>.

IBÁÑEZ-FORÉS, V. et al. Influence of implementing selective collection on municipal waste management systems in developing countries: A Brazilian case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 134, p. 100-111, 2018.

INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION – IFC. *Waste management: improving public service delivery through private sector participation*. Washington, DC: IFC, 2024. Disponível em: <https://www.ifc.org/en/resources/publications/2024/waste-management-improving-public-service-delivery-through-private-sector-participation>. Acesso em: 4 fev. 2025.

IMOBILIZAÇÃO DE ENZIMAS: Métodos e Aplicações. **Química Nova**, [s. l.], 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/bSzc8CKkjN8zrgLgSVsLvJz>. Acesso em: 13 fev. 2025.

INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION (ISWA). **The future of the waste management sector – Trends, opportunities and challenges for the decade.** Out. 2021.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil: estrutura institucional e instrumentos econômicos.** Brasília: Ipea, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/17083>. Acesso em: 16 jun. 2025.

ISSAOUI, M. et al. Membrane technology for sustainable water resources management: Challenges and future projections. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 25, p. 100590, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100590>.

KANHAI, G. et al. Urban Municipal Solid Waste management: Modeling air pollution scenarios and health impacts in the case of Accra, Ghana. **Waste Management**, v. 123, p. 15-22, 2021.

KARKI, S. et al. Polymeric membranes for industrial applications: Recent progress, challenges and perspectives. **Desalination**, v. 573, p. 1-67, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117200>.

KAUSAR, A. Investigation on self-assembled blend membranes of polyethylene-block-poly [ethylene glycol]-block-polycaprolactone and poly [styrene-block-methyl methacrylate] with polymer/gold nanocomposite particles. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 54, n. 17, p. 1794-1802, 2015.

KIANI, S.; MOUSAVI, S. M.; BIDAKI, A. Preparation of polyethylene terephthalate/xanthan nanofiltration membranes using recycled bottles for removal of diltiazem from aqueous solution. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, p. 128082, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128082>.

KIM, G. H. et al. Effect of polyethylene glycol, triacetin and glycerin on the cellulose acetate plasticizing. **Polymer Korea**, v. 39, n. 4, p. 649–654, 2015. DOI: 10.7317/pk.2015.39.4.649. Acesso em: 28 abr. 2025.

KONG, F. X. et al. Nanofiltration membrane with substrate incorporated amine-functionalized graphene oxide for enhanced petrochemical wastewater and shale gas produced water desalination. **Desalination**, v. 517, p. 115246, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115246>.

KOROLKOV, I. V. et al. Modification of PET ion track membranes for membrane distillation of low-level liquid radioactive wastes and salt solutions. **Separation and Purification Technology**, v. 227, p. 115694, 2019.

KUMAR, R. S. et al. Effective removal of humic acid using xanthan gum incorporated polyethersulfone membranes. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 121, p. 223–228, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.03.036>.

KUSUMOCAHYO, S. P. et al. Utilization of used polyethylene terephthalate (PET) bottles for the development of ultrafiltration membrane. **Journal of Environmental**

Chemical Engineering, v. 8, p. 104381, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104381>.

LAU, W. W. et al. Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. **Science**, v. 369, n. 6510, p. 1455-1461, 2020.

LAVANYA, C.; BALAKRISHNA, R. G. Naturally derived polysaccharides-modified PSF membranes: A potency in enriching the antifouling nature of membranes. **Separation and Purification Technology**, v. 230, p. 115887, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115887>.

LE, N. L.; NUNES, S. P. Materials and membrane technologies for water and energy sustainability. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 7, p. 1-28, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.02.001>.

LEE, S. et al. Comparison of the property of homogeneous and heterogeneous ion exchange membranes during electrodialysis process. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 1, p. 159–166, 2021.

LEONHARDT, R. G. **Produção de membranas de polieterimida (PEI)/polianilina (PANI) e análise do seu desempenho na permeação de gases**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

LI, W. C.; TSE, H. F.; FOK, L. Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. **Science of the total environment**, v. 566, p. 333-349, 2016.

LI, X. et al. Surface modification of polymeric membranes for enhanced anti-fouling performance: A review. **Journal of Membrane Science**, v. 607, p. 118254, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118254>.

LINS, E. A. M. Características físico-químicas do lixiviado do Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos da Muribeca: antes e após o encerramento / Eduardo Antonio Maia Lins et al. Trabalho apresentado no 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2003.

LIU, Y.; KOOPS, G. H.; STRATHMANN, H. Characterization of morphology controlled polyethersulfone hollow fiber membranes by the addition of polyethylene glycol to the dope and bore liquid solution. **Journal of membrane science**, v. 223, n. 1-2, p. 187-199, 2003.

LÓPEZ, J. de J. S. Gobiernos locales y desarrollo territorial en México. **Frontera Norte**, v. 24, n. 47, p. 171-192, 2011.

MACDONALD, W. A. New advances in poly(ethylene terephthalate) polymerization and degradation. **Polymer International**, v. 51, p. 923–930, 2002.

MACIEL, J. S. **Géis de goma do cajueiro e derivados com quitosana**: síntese, caracterização e ensaios preliminares em sistemas de liberação de fármacos. 2005. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

MAJID, H. et al. Surface modification of commercial reverse osmosis membranes using both hydrophilic polymer and graphene oxide to improve desalination efficiency. **Chemosphere**, v. 302, p. 134931, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134931>.

MALDAYE, M. et al. Solid Waste Management Practice and Its Associated Factors among Households in Gessa Town, Dawuro Zone, Southwest Ethiopia. **Advances in Public Health**, v. 2022, p. 6134161, 2022.

MANAWI, Y. et al. Arabic gum as a novel pore-forming and hydrophilic agent in polysulfone membranes. **Journal of Membrane Science**, v. 529, p. 95–104, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.02.002>.

MANAWI, Y. et al. Characterization and Separation Performance of a Novel Polyethersulfone Membrane Blended with Acacia Gum. **Scientific Reports**, v. 7, p. 1–12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14735-9>.

MANAWI, Y. et al. Performance of acacia gum as a novel additive in thin film composite polyamide RO membranes. **Membranes**, v. 9, n. 2, art. 30, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes9020030>.

MARGALLO, M. et al. Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective: A review for policy support. **Science of the Total Environment**, v. 689, p. 1255-1275, 2019.

MARYUDI, M.; HAKIKA, D. C.; AMILLIA, A. Morphology and selected properties of cellulose acetate membranes for environmental applications. **Polimery**, v. 69, n. 5, p. 292-299, 2024.

MAZAR, A. et al. Influence of membrane filtration on extraction and characteristics of lignin from a kraft dissolving pulp mill pre-hydrolysate. **Industrial Crops and Products**, v. 124, p. 726–734, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.046>.

MIGUEL, Karolyna Barros. *Extração e purificação de corantes obtidos da semente de urucum (Bixa orellana L.)*. 2022. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. DOI: 10.14393/ufu.di.2022.336. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/36738/4/Extra%C3%A7%C3%A3oPurifica%C3%A7%C3%A3oCorantes.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2025.

MOHAMED, H. et al. Effects of charge and hydrophilicity on the anti-fouling properties of kidney-inspired, polyester membranes. **Molecular Systems Design & Engineering**, v. 5, p. 1219–1229, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0me00045k>.

MU, S. et al. Efeito do grau relativo de “hidrofobicidade” de incrustação na incrustação da membrana. **Journal of Membrane Science**, v. 570, p. 1-8, 2019.

NASCIMENTO, V. F. et al. Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil: ambiente e água. **Ambiência**, v. 10, n. 4, p. 1-14, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1635>.

NASROLLAHI, N.; GHALAMCHI, L.; VATANPOUR, V.; KHATAEE, A. Photocatalytic-membrane technology: a critical review for membrane fouling mitigation. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 93, p. 101-116, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.09.031>.

NASSER, R. **Separation processes with (bio)membranes**: Overview and new phenomenological classification. [S. l.]: Elsevier, 2020. E-book.

NOGUEIRA, F. T. **Síntese e caracterização de membranas de polissulfona/quitosana para aplicação em processos de separação**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, 2013. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-12062013-171018/publico/Tese_final_versaorevisada.pdf.

NORMAN, A. Tobacco - Production, Chemistry and Technology. In: DAVIES, D. L.; NIELSEN, M. T. (Ed.). **Tobacco - Production, Chemistry and Technology**. Blackwell Publishing, 1999. p. 353-387.

NORSA'ADAH, B. et al. Community health survey of residents living near a solid waste open dumpsite in Sabak, Kelantan, Malaysia. **International journal of environmental research and public health**, v. 17, n. 1, p. 311, 2020.

OLIVEIRA, A. K. R. **Modificação superficial do poli(tereftalato de etileno) (PET) para beneficiamento na reciclagem**. 2011. [Trabalho de Conclusão de Curso] – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

OUADDARI, H. et al. New low-cost ultrafiltration membrane made from purified natural clays for direct Red 80 dye removal. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 4, p. 103268, 2019.

PADIL, V. V. T. et al. Fabricação, caracterização propriedades antibacterianas da membrana eletrofiada composta de goma karaya, álcool polivinílico e nanopartículas de prata. **Journal of Nanomaterials**, v. 2015, p. 750726, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/750726>.

PAUL, D.; GOODMAN, I.; KROSCHWITZ, J. I. Polyesters to Polypeptide Synthesis. In: KROSCHWITZ, J. I. (Ed.). **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. [S. l.]: Wiley, 1985.

PENG, H.; LI, K. Nanostructured membranes with interconnected pores via a combination of phase inversion and solvent crystallisation approach. **Journal of Membrane Science**, v. 680, p. 121738, 2023.

PHAM, N. T. T. et al. Lignin Purification from Mild Alkaline Sugarcane Extract via Membrane Filtration. **Clean Technologies**, v. 6, p. 750–766, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/cleantechol6020038>.

PIELESZ, A.; BINIAŚ, W. Cellulose acetate membrane electrophoresis and FTIR spectroscopy as methods of identifying a fucoidan in *Fucus vesiculosus* Linnaeus. **Carbohydrate research**, v. 345, n. 18, p. 2676-2682, 2010.

PUERARI, F. P. **Desenvolvimento de materiais adsorventes com PEI para remoção de íons metálicos.** 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

RAJESH, S.; MURTHY, Z. V. P. Ultrafiltration membranes from waste polyethylene terephthalate and additives: synthesis and characterization. **Química Nova**, v. 37, p. 653-657, 2014.

RAWINDRAN, H. et al. Ultrafiltration membrane fabricated from polyethylene terephthalate plastic waste for treating microalgal wastewater and reusing for microalgal cultivation. **Chemosphere**, v. 346, p. 140591, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140591>.

RAVICHANDRAN, S. et al. Modification of cellulose acetate membrane by integrating magnetite@ xanthan gum nanocomposite to enhance performance characteristics. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 3, p. 112435, 2024.

RAZAVIAN, F.; KHOSMANESH, B.; IZADYAR, S. Participation of people in waste source separation program. **Journal of Fundamental and Applied Sciences**, v. 8, n. 2, p. 1017-1025, 2016. DOI: 10.32388/361986.

REKIK, S. B.; GASSARA, S.; DERATANI, A. Green Fabrication of Sustainable Porous Chitosan/Kaolin Composite Membranes Using Polyethylene Glycol as a Porogen: Membrane Morphology and Properties. **Membranes**, v. 13, n. 4, p. 378, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes13040378>.

RITCHIE, H.; ROSER, M. **Plastic pollution.** Our World in Data, 2023. Disponível em: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>. Acesso em: 4 fev. 2025.

RODRIGUES, M. S. et al. Óxido de grafeno na produção de membranas de troca ionária para células de eletrodiálise. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 81, p. 4013–4037, 2024.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. Poli(tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, p. 121–132, 2009.

RYU, G.; JEONG, S. H.; Park, B. C. Fabrication of organic thin film transistors on Polyethylene Terephthalate (PET) fabric substrates. **Organic Electronics**, v. 15, p. 1672–1677, 2014.

SABRI, S. et al. Antibacterial properties of polysulfone membranes blended with Arabic gum. **Membranes**, v. 9, n. 2, art. 29, 2019. DOI: 10.3390/membranes9020029.

SACHS, I. **Estratégias de transição para o século XXI – desenvolvimento e meio-ambiente.** São Paulo: Studio Nobel/FUNDAP, 1993.

SANTOS, J. G. A logística reversa como ferramenta para a sustentabilidade: um estudo sobre a importância das cooperativas de reciclagem na gestão dos resíduos sólidos urbanos. **Revista Reuna**, v. 17, n. 2, p. 81-96, 2012.

SATO, H.; KIDAKA, T. Characteristics of the cellulose triacetate membrane for hemofiltration. **International Journal of Artificial Organs**, v. 6, n. 6, p. 289-294, 1983.

SAUERESSIG, G. G. **A contribuição das cooperativas de catadores no gerenciamento e retorno de resíduos sólidos urbanos à indústria: estudo de caso.** 2015. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

SHARMA, M. et al. Microbial biopolymers: From production to environmental applications. **Applied Sciences**, v. 14, n. 12, Art. 5081, 2024. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10058920/>. Acesso em: 4 abr. 2025.

SHEN, Y.; WANG, C. Optimisation of garbage bin layout in rural infrastructure for promoting the renovation of rural human settlements: Case study of Yuding village in China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 21, p. 11633, 2021.

SHOMURA, R. S.; GODFREY, M. L. **Proceedings of the Second International Conference on Marine Debris: 2-7 April, 1989, Honolulu, Hawaii.** U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service, 1990.

SILVA, C. L. de M. et al. Improved hydrogen permeation through thin Pd/Al₂O₃ composite membranes with graphene oxide as intermediate layer. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 43, p. 22990–23005, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.117>.

SILVA, C. S.; BELMONTE-RECHE, E.; DE AMORIM, M. H. Effect of phase inversion process on cellulose acetate membrane porosity. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 138, p. 50789, 2021.

SILVA, J. C. G.; PASCHOALIN FILHO, J. A. ESTUDO Comparativo Entre Técnicas De Proteção Superficial De Taludes Situados Na Rodovia Sp-563 : Biomanta, Hidrossemeadura E Grama Em Placa. In: **SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO EMPRESARIAL**, 2018.

SILVA, M. A. S.; FREITAS, M. N.; CARVALHO, V. F. Influência da adição da goma arábica em filmes isolados de polímero acrílico: estudo das propriedades de intumescimento e de permeabilidade. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 39, n. 4, p. 403-410, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcf/a/rggTWLkbT5PvwfXKC3FwXsk/>.

SILVA, M. A.; BELMONTE-RECHE, E.; DE AMORIM, M. T. P. Morphology and water flux of produced cellulose acetate membranes reinforced by the design of experiments (DOE). **Carbohydrate Polymers**, v. 254, p. 117407, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117407>.

SILVA, S. M. F. **Filmes compósitos de celulose bacteriana e goma de cajueiro para aplicação em alimentos.** 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SIMARI, C. et al. High-performance anion exchange membrane water electrolysis by polysulfone grafted with tetramethyl ammonium functionalities. **Materials Today Sustainability**, v. 21, p. 100293, 2022.

SINDERSKI, L. G. Z. Ângulo de Contato e Rugosidade de Madeiras, uma breve revisão. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 11, n. 1, 2020.

SINGH, R.; PURKAIT, M. K. Cu₂O photocatalyst modified antifouling polysulfone mixed matrix membrane for ultrafiltration of protein and visible light driven photocatalytic pharmaceutical removal. **Separation and Purification Technology**, v. 212, p. 191–204, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.029>.

SINGH, R.; PURKAIT, M. K. Evaluation of mPEG effect on the hydrophilicity and antifouling nature of the PVDF-co-HFP flat sheet polymeric membranes for humic acid removal. **Journal of Water Process Engineering**, v. 14, p. 9-18, 2016.

SINHA, M. K.; PURKAIT, M. K. Increase in hydrophilicity of polysulfone membrane using polyethylene glycol methyl ether. **Journal of Membrane Science**, v. 437, p. 7-16, 2013.

SOUZA, J. R. et al. Síntese e caracterização da goma arábica amino-funcionalizada para aplicação em hidrogéis injetáveis. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA**, 61., 2021. [S. l.]: Abq, 2021.

SOUZA, L. F.; MENDES, K. G.; BARBOSA, A. P. Challenges and prospects for solid waste management in Brazil: A post-pandemic perspective. **Journal of Environmental Management**, v. 335, p. 117662, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117662.

STEPHEN, A. M.; STEPHEN, C. S. C. A. M. STEPHEN (Ed.). **Gums and Mucilages**. Nova York: Marcel Dekker, 1995.

STOCK, V. et al. Uptake and cellular effects of PE, PP, PET and PVC microplastic particles. **Toxicology in vitro**, v. 70, p. 105021, 2021.

SUSUKI, F. F. M. et al. Produção e caracterização de membranas poliméricas, usando os aditivos cloreto de potássio e de lítio, em condições idênticas. **Engevista**, v. 18, n. 1, p. 142-157, 2016.

SUSUKI, T. et al. Preparação e Caracterização de Membranas de PVDF com Adição de PMMA e Sais Inorgânicos. **Revista Brasileira de Polímeros**, v. 26, n. 3, p. 123-130, 2016.

SYARIFUDDIN, A. et al. Physical, Mechanical, Barrier, and Optical Properties of Sodium Alginate/Gum Arabic/Gluten Edible Films Plasticized with Glycerol and Sorbitol. **Foods**, v. 14, p. 1–16, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14071219>.

TAHSIRI, Z.; MIRZAEI, H.; HOSSEINI, S. M. H.; KHALESI, M. Gum arabic improves the mechanical properties of wild almond protein film. **Carbohydrate Polymers**, v. 222, p. 114994, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.114994>.

TAVARES, J. C. L. **Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Maceió-AL**. 2008. 116 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

TENODI, S. et al. Assessment of the environmental impact of sanitary and unsanitary parts of a municipal solid waste landfill. **Journal of Environmental Management**, v. 258, p. 110019, 2020.

THOMPSON, R. C. et al. Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. **Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences**, v. 364, n. 1526, p. 2153-2166, 2009.

THOMBARE, N. et al. Comparative FTIR Characterization of Various Natural Gums: A Criterion for Their Identification. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 31, p. 3372–3380, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02821-1>.

TULASHIE, S. K.; BOADU, E. K.; KOTOKA, F.; MENSAH, D. Plastic wastes to pavement blocks: A significant alternative way to reducing plastic wastes generation and accumulation in Ghana. **Construction and Building Materials**, v. 241, p. 118044, 2020.

UNESCO. **Reducing Plastic Production to Achieve Climate Goals**. Paris: UNESCO, 2023. Disponível em: https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2023/09/Reducing-Plastic-Production-to-Achieve-Climate-Goals_Sept21_V5.pdf. Acesso em: 10 jun. 2025.

UNIVERSITY OF COLORADO BOULDER. **Infrared Spectroscopy of Esters**. Organic Chemistry Tutorials. Disponível em: <https://orgchemboulder.com/Spectroscopy/irtutor/estersir.shtml>. Acesso em: 3 fev. 2025.

VEBER, T. et al. Industrial air pollution leads to adverse birth outcomes: a systematized review of different exposure metrics and health effects in newborns. **Public Health Reviews**, v. 43, Art. 1604775, 10 ago. 2022. Disponível em: PubMed. Acesso em: 4 fev. 2025.

VATANPOUR, V. et al. Fe₃O₄@Gum Arabic modified polyvinyl chloride membranes to improve antifouling performance and separation efficiency of organic pollutants. **Chemosphere**, v. 328, p. 138586, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138586>.

VATANPOUR, V. et al. Hyperbranched polyethylenimine functionalized silica/polysulfone nanocomposite membranes for water purification. **Chemosphere**, v. 290, p. 133363, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133363>.

VATANPOUR, V. et al. TiO₂/CDs modified thin-film nanocomposite polyamide membrane for simultaneous enhancement of antifouling and chlorine-resistance performance. **Desalination**, v. 525, p. 115506, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115506>.

VERBEKEN, D.; DIERCKX, S.; DEWETTINCK, K. “Exsudato de gengivas: ocorrência, produção e aplicações”, **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 63, n. 1, p. 10–21, 2003.

VERMEERSCH, L. A. F. **Desenvolvimento de membranas assimétricas de polieterimida e polietersulfona para aplicação em processos de separação**. 2021. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2021.

VILLANUEVA, L. F. A. **Gobernanza pública para obtener resultados: marco conceptual y operacional**. 2011. Disponível em: <http://unpan1.un.org/intradoc/groups/public/documents/un/unpan044262.pdf>.

VINOD, V. T. P. et al. Caracterização mórfica, físico-química e estrutural da goma kondagogu [Cochlospermum gossypium]: uma goma de árvore da Índia. **Food Hydrocolloids**, v. 22, n. 5, p. 899–915, 2008.

VINODHINI, E. et al. Preparation and characterization of cellulose acetate-polyurethane blend membranes for biomedical applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 104, p. 1887-1895, 2017.

WAHLÉN, C. B. **UN Urges Tackling Waste Management on World Habitat Day, October 2018**. 2018.

WANG, J. et al. Novel RO membranes fabricated by grafting sulfonamide group: Improving water permeability, fouling resistance and chlorine resistant performance. **Journal of Membrane Science**, v. 641, p. 119919, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119919>.

WANG, X. et al. Recent progress on fabrication and applications of advanced block copolymer membranes.

Sustainable Materials and Technologies, v. 39, e00855, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00855>.

WANG, Y.; WEI, G. Recent Trends in Polymer Membranes: Fabrication Technique, Characterization, Functionalization, and Applications in Environmental Science (Part I). **Polymers**, v. 16, n. 20, p. 2889, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16202889>.

WENZEL, R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 28, n. 8, p. 988–994, 1936.

XU, Z.; ALSALHY, Q. F. Polyethersulfone (PES) hollow fiber ultrafiltration membranes prepared by PES/non-solvent/NMP solution. **Journal of Membrane Science**, v. 233, n. 1-2, p. 101-111, 2004.

YAN, L. et al. Bio-inspired mineral-hydrogel hybrid coating on hydrophobic PVDF membrane boosting oil/water emulsion separation. **Separation and Purification Technology**, v. 285, p. 120383, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120383>.

YANG, H. C. et al. Effects of polyethyleneimine molecular weight and proportion on the membrane hydrophilization by codepositing with dopamine. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 133, n. 32, p. 1–10, 2016.

YANG, Z. et al. Exploring the industrial solid wastes management system: Empirical analysis of forecasting and safeguard mechanisms. **Journal of environmental management**, v. 279, p. 111627, 2021.

YUAN, Y.; LEE, T. R. **Contact Angle and Wetting Properties**. [S. l.]: Springer, 2013.

YUAN, Y. Y.; LEE, R. T. Surface science techniques. In: **Springer Series in Surface Sciences**. Nova York: Springer, 2013. v. 51, p. 3-34.

ZAKERI, M. et al. Polyethyleneimine-functionalized membranes for heavy metal removal and antibacterial activity. **Polymers**, v. 10, n. 9, p. 957, 2018. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6171788/>. Acesso em: 10 mar. 2025.