UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA
GRANDE CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

PRODUÇÃO DE MEMBRANAS CERÂMICAS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

EMILLY VITÓRIA GOMES MOREIRA

CAMPINA GRANDE – PB
Abril de 2026

EMILLY VITÓRIA GOMES MOREIRA

PRODUÇÃO DE MEMBRANAS CERÂMICAS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenheira Química.
Orientadora: Profa. Dra. Meiry Gláucia Freire Rodrigues.

Campina Grande – PB

Abril de 2026

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Sistema de Bibliotecas - SISTEMOTECA
Catalogação de Publicação na Fonte. UFCG - Biblioteca Central

M838p Moreira, Emilly Vitória Gomes.
Produção de membranas cerâmicas para tratamento de efluentes industriais / Emilly Vitória Gomes Moreira. – 2026.
118 f. : il. color.

Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Humanidades, 2026.
"Orientação: Profa. Dra. Meiry Gláucia Freire Rodrigues".
Referências.

1. Membranas Cerâmicas. 2. Microfiltração. 3. Casca de Ovo. 4. Caulim. 5. Carboximetilcelulose. 6. Azul de Metileno. 7. Tratamento de Efluentes. I. Rodrigues, Meiry Gláucia Freire. II. Título.

UFCG/BC CDU 66.0(043.3)
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA ITAPUANA SOARES DIAS GONÇALVES CRB-15/93

EMILLY VITÓRIA GOMES MOREIRA

PRODUÇÃO DE MEMBRANAS CERÂMICAS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, pertencente à linha de pesquisa fenômenos de transporte e reações e área de concentração em tratamento de águas, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenheira Química. Orientadora: Profª. Drª. Meiry Gláucia Freire Rodrigues.

Data de aprovação 07 / 08 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br
MEIRY GLAUCIA FREIRE RODRIGUES
Data: 25/09/2026 11:03:27-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª. Drª. Meiry Gláucia Freire Rodrigues – UFCG

Orientadora

Documento assinado digitalmente
gov.br
WAGNER BRANDAO RAMOS
Data: 23/09/2026 05:01:26-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Wagner Brandão Ramos

Membro Interno

Documento assinado digitalmente
gov.br
ALFREDINA DOS SANTOS ARAUJO
Data: 23/09/2026 10:00:23-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª. Drª. Alfredina dos Santos Araújo – UFCG POMBAL

Membro Externo

Dedico este trabalho a Deus, que nunca me deixou desanimar. A Ele, que transformou cada obstáculo em aprendizado e me deu o suporte necessário para concluir esta etapa. Minha vida e esta vitória pertencem a Ti.

AGRADECIMENTOS

Minha primeira gratidão é a Deus. Pelo dom da vida, por conduzir meus passos e abençoar cada decisão, protegendo-me sempre. Agradeço por ter colocado pessoas tão especiais em meu caminho e por me conceder a força e o discernimento que me sustentaram desde o primeiro dia até a concretização deste sonho.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional e por não medirem esforços para me guiar e incentivar, sempre com sabedoria e carinho. Agradeço às minhas irmãs, Evellen e Ellen, por estarem presentes em todos os momentos, a amizade de vocês torna minha vida mais feliz, leve e completa.

À minha companheira, Gabriella, por caminhar ao meu lado, incentivando-me constantemente, oferecendo conselhos valiosos e tornando o meu dia a dia mais acolhedor. Agradeço pela sua companhia e pelo suporte fundamental em cada etapa desta jornada.

Agradeço imensamente à minha família, em especial aos meus avós e tias, cuja presença foi um pilar fundamental; o incentivo constante e o auxílio que sempre me ofereceram foram essenciais para que eu alcançasse este objetivo.

À minha orientadora, Profª. Drª. Meiry Gláucia Freire Rodrigues, por ter aceitado me orientar e por ser muito mais que uma orientadora. Agradeço imensamente pelos ensinamentos, pelo apoio, pela força e por ter me proporcionado momentos inesquecíveis de aprendizado e crescimento.

Expresso minha gratidão aos membros da banca examinadora por terem aceitado o convite para avaliar este trabalho. Agradeço pelas valiosas contribuições e sugestões, que foram fundamentais para o aprimoramento e a consolidação desta pesquisa.

Aos meus companheiros de LABNOV, pelas conversas, desabafos e pelo apoio que tornaram a caminhada mais leve e divertida. Em especial a Lázaro, Natália e Ingrid, por nossa amizade, pelos conselhos e pelos momentos de descontração. Gostaria de estender um agradecimento especial ao Lázaro, que esteve comigo desde o início, auxiliando-me com dicas preciosas, ensinamentos e, principalmente, trazendo alegria aos momentos mais difíceis, considero você um verdadeiro irmão.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação, o meu muito obrigado.

Por fim, parabenizo-me pela resiliência. Foram muitas as vezes em que pensei em desistir, mas fui mais forte. Hoje, celebro a força necessária que encontrei para chegar aonde estou agora.

RESUMO

A crescente contaminação dos recursos hídricos decorrente do lançamento de efluentes industriais contendo elevadas concentrações de poluentes representa um dos principais desafios ambientais da atualidade. Nesse contexto, a tecnologia de separação por membranas cerâmicas destaca-se como uma alternativa promissora para o tratamento de águas residuais, em virtude de sua elevada estabilidade química, resistência mecânica, durabilidade e potencial de produção a partir de matérias-primas de baixo custo. Assim, este trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar membranas cerâmicas sustentáveis à base de caulim e casca de ovo, empregando amido e carboximetilcelulose (CMC) como agentes formadores de poros, bem como avaliar a influência dessas formulações nas propriedades físico-mecânicas e no desempenho de microfiltração para a remoção de azul de metileno de efluente sintético. Foram preparadas duas formulações: MCO1 (caulim, casca de ovo e amido) e MCO2 (caulim, casca de ovo e CMC), conformadas por prensagem uniaxial a seco e sinterizadas a 650 °C. Ambas as membranas apresentaram caráter hidrofílico, característica favorável à permeação de soluções aquosas, além de elevada estabilidade química, com destaque para a formulação MCO2, que apresentou perda de massa de apenas 0,46 % em solução de NaOH. A membrana MCO1 exibiu maior resistência à flexão (20,94 MPa), atribuída à sua estrutura mais densa, enquanto a MCO2 apresentou menor resistência mecânica (11,19 MPa) em decorrência do aumento da porosidade promovido pela CMC. Nos ensaios de microfiltração, a MCO1 apresentou porosidade aparente de 41,47 %, fluxo de permeado de 107,83 $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ e rejeição média de 83,21 % para o azul de metileno, evidenciando maior seletividade. Em contrapartida, a MCO2 apresentou porosidade de 50,42 % e fluxo de permeado de 362,94 $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, aproximadamente três vezes superior ao da MCO1, embora com redução da rejeição média para 68,60 %, evidenciando o compromisso entre permeabilidade e eficiência de separação. Os ensaios de reciclabilidade demonstraram que as membranas preservaram sua integridade estrutural durante ciclos sucessivos de filtração, apesar da redução gradual do desempenho causada pelo fouling, evidenciando sua viabilidade para aplicações em tratamento de efluentes. Os resultados demonstram que a incorporação de casca de ovo, associada ao uso de diferentes agentes formadores de poros, constitui uma estratégia eficaz para a produção de membranas cerâmicas de baixo custo, permitindo modular as propriedades estruturais e hidráulicas do material conforme a aplicação desejada. Além disso, o custo estimado de fabricação inferior a R$ 1,00 por unidade reforça a viabilidade técnica, econômica e ambiental dessas membranas para aplicações em processos de tratamento de efluentes industriais.

Palavras-chave: Membranas cerâmicas; Microfiltração; Casca de ovo; Caulim; Carboximetilcelulose; Azul de metileno; Tratamento de efluentes.

ABSTRACT

The increasing contamination of water resources resulting from the discharge of industrial effluents containing high concentrations of pollutants represents one of today's major environmental challenges. In this context, ceramic membrane separation technology stands out as a promising alternative for wastewater treatment due to its high chemical stability, mechanical strength, durability, and potential for production from low-cost raw materials. Thus, this study aimed to develop and characterize sustainable ceramic membranes based on kaolin and eggshell, using starch and carboxymethylcellulose (CMC) as pore-forming agents, and to evaluate the influence of these formulations on physicochemical and mechanical properties as well as microfiltration performance for the removal of methylene blue from synthetic effluent. Two formulations were prepared: MCO1 (kaolin, eggshell, and starch) and MCO2 (kaolin, eggshell, and CMC); these were shaped via uniaxial dry pressing and sintered at 650 °C. Both membranes exhibited hydrophilic behavior—a characteristic favorable to aqueous solution permeation—and high chemical stability; the MCO2 formulation was particularly notable, showing a mass loss of only 0.46% in NaOH solution. The MCO1 membrane exhibited higher flexural strength (20.94 MPa), attributed to its denser structure, whereas MCO2 showed lower mechanical strength (11.19 MPa) due to the increased porosity promoted by the CMC. In microfiltration tests, MCO1 showed an apparent porosity of 41.47%, a permeate flux of 107.83 $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, and an average methylene blue rejection rate of 83.21%, demonstrating superior selectivity. In contrast, MCO2 exhibited a porosity of 50.42% and a permeate flux of 362.94 $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$—approximately three times higher than that of MCO1—albeit with a reduction in average rejection to 68.60%, highlighting the trade-off between permeability and separation efficiency. Recyclability tests demonstrated that the membranes maintained their structural integrity across successive filtration cycles, despite a gradual decline in performance due to fouling, thereby confirming their suitability for wastewater treatment applications. The results indicate that incorporating eggshell, combined with the use of various pore-forming agents, is an effective strategy for producing low-cost ceramic membranes, allowing for the tailoring of the material's structural and hydraulic properties to specific applications. Furthermore, the estimated manufacturing cost of less than R$ 1.00 per unit underscores the technical, economic, and environmental viability of these membranes for industrial wastewater treatment processes.

Keywords: Ceramic membranes; Microfiltration; Eggshell; Kaolin; Carboxymethylcellulose; Methylene blue; Wastewater treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exportações de produtos têxteis – 2021 a 2024 (US$ bilhões correntes).....19
Figura 2 - Fluxograma do processamento têxtil, etapas e produção.....20
Figura 3 - Uma visão geral das técnicas de filtração baseadas em membranas.....40
Figura 4 - Representação do método de separação, utilizando uma membranas.....42
Figura 5 - Classificação morfológica das membranas simétricas e assimétricas.....46
Figura 6 - Esquema representativo da filtração convencional e tangencial.....50
Figura 7 - Representação gráfica das interações entre moléculas de corante e a superfície da membrana.....51
Figura 8 - Etapas do processo de obtenção de membranas cerâmicas porosas.....52
Figura 9 – Etapas do tratamento da matéria-prima: coleta, lavagem, secagem térmica, trituração. 61
Figura 10 – Imagens das matérias-primas: a) Caulim; b) Casca de Ovo; c) Carboximetilcelulose; d) Amido.....62
Figura 11 – Molde para fabricação das membranas.....63
Figura 12 – Rampa de aquecimento utilizada na sinterização das membranas.....64
Figura 13 – Diagrama de preparação das membranas cerâmicas de baixo custo.....65
Figura 14 – Sistema utilizado para medição de fluxo.....71
Figura 15 – Módulo de aço inoxidável.....72
Figura 16 - Espectros FTIR das amostras: Cascas de ovos: (a) pós lavagem, secagem.....75
Figura 17 – Imagens das cascas de ovo em diferentes temperaturas……76
Figura 18 - apresenta os espectros FTIR da caulinita e da caulinita termicamente ativada a 650 ºC.....77
Figura 19 - Difratograma casca de ovo após lavagem, secagem, trituração e peneiramento...80
Figura 20 - Difratograma do caulim e do caulim termicamente ativado.....81
Figura 21 – Curvas termoanalíticas da casca de ovo após lavagem, secagem, trituração.....83
Figura 22 – Curvas termoanalíticas do caulim……...85
Figura 23 - Análise microscópica da casca de ovo nas ampliações……86
Figura 24 - Imagens da casca de ovo nas ampliações x200, x1.000, x2.000 e x15.000.....85
Figura 25 - Espectro de energia dispersiva de raios-X (EDS) da amostra de casca de ovo8 8
Figura 26 – Membranas cerâmicas não sinterizadas.....92
Figura 27 – Retração linear do diâmetro das membranas cerâmicas.....93
Figura 28 - Difratogramas de raios X das amostras MCO1 (superior) e MCO2 (inferior).....94
Figura 29 - Micrografias de MEV da membrana MCO1 com ampliações……95
Figura 30 - Micrografias de MEV da membrana MCO2 com ampliações de 1.000x……95
Figura 31 – Fluxo de água pura em função do tempo para a membrana cerâmica MCO1……98
Figura 32 – Fluxo de água pura em função do tempo para as membrana cerâmica MCO2…..98
Figura 33 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo (MCO1)..98
Figura 34 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo (MCO2)..99
Figura 35 - Fluxo e rejeição do corante azul de metileno para a membrana cerâmica MCO1..99
Figura 36 - Fluxo e rejeição do corante azul de metileno para a membrana cerâmica MCO2.100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – 10 maiores fabricantes mundiais de têxteis, da produção de 2019 a 2022 (US$)...19
Tabela 2 - Consumo de água, energia e produtos químicos nas principais seções de processamento da indústria.....21
Tabela 3 - Principais características dos corantes classificados de acordo com sua estrutura..21
Tabela 4 - Classificação dos corantes têxteis de acordo com o método de aplicação na fibra..21
Tabela 5 - Vantagens e desvantagens da membrana cerâmica.....45
Tabela 6 – Características gerais do corante Azul de Metileno.....62
Tabela 7 - Proporções em massa dos constituintes das membranas cerâmicas de baixo custo.63
Tabela 8 – Condições de moldagem das membranas cerâmicas de baixo custo.....63
Tabela 9 - Composição Elementar (EDS).....88
Tabela 10 - Propriedades das membranas cerâmicas: diâmetro dos poros, porosidade, absorção de água.....62
Tabela 11 - Perdas de massas das membranas em meio básico e ácido.....97
Tabela 12 – Comparação das propriedades das membranas cerâmicas.....99
Tabela 13 – Estimativas de custos das matérias-primas das membranas cerâmicas de baixo custo (MCO1).....100
Tabela 14 – Estimativas de custos das matérias-primas das membranas cerâmicas de baixo custo (MCO2).....100
Tabela 15 – Custos de produção por lote e valor individual das membranas cerâmicas.....100
Tabela 16 – Previsão dos gastos com energia elétrica para a produção de membranas cerâmicas econômicas…….....100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA - Absorção de Água
ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CMC - Carboximetilcelulose
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
DA - Densidade Aparente
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO - Demanda Química de Oxigênio
DRX - Difração de Raios X
EDS - Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia
EDX - Espectrofotometria de Raios X por Energia Dispersiva
ETAR - Estação de Tratamento de Águas Residuais
FTIR - Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura
MF - Microfiltração
ODS - Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
OI - Osmose Inversa
OR - Osmose Reversa
PA - Porosidade Aparente
PIB - Produto Interno Bruto
PM - Perda de Massa
REP - Responsabilidade Estendida do Produtor
RSU - Resíduos Sólidos Urbanos
TG / TGA - Análise Termogravimétrica
UF - Ultrafiltração
UNIDO - United Nations Industrial Development Organization

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12

2 OBJETIVOS 13

2.1 GERAL 13

2.2 ESPECÍFICOS 14

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 14

3.1 RECURSOS HÍDRICOS 14

3.2 INDÚSTRIA TÊXTIL 15

3.2.1 O Setor Têxtil, Corantes Sintéticos e a Geração de Efluentes 15

3.3. RESÍDUOS 23

3.3.1. Geração de resíduos sólidos e líquidos 23

3.3.2. Legislações ambientais pertinentes 24

3.4. MEMBRANAS CERAMICAS 25

3.4.1. Processo de separação por membranas 25

3.4.2. Características das Membranas Cerâmicas 27

3.4.3. Classificação morfológica das membranas 30

3.4.4. Classificação das membranas quanto ao tamanho de poro 32

3.2.1 Membranas Cerâmicas e suas Propriedades Hidráulicas 34

3.4.6. Mecanismos de Retenção de Corantes por Membranas Cerâmicas 35

3.4.7. Matérias-Primas Precursoras e Mecanismos de Formação de Poros 36

3.4.8. Membranas cerâmicas de baixo custo 39

3.4.9. Caulim 39

3.5.1. O Caulim e os Efeitos do Processamento Térmico 41

3.5.2. Casca de ovo 42

4. MATERIAIS E MÉTODOS 44

4.1. MATERIAIS 44

3.3 PREPARAÇÃO DA MEMBRANA CERÂMICA DE BAIXO CUSTO.....46

4.2. CARACTERIZAÇÃO.....50

4.2.1. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) 50

4.2.2. Difração de Raios X (DRX).....50

4.3.3. Análise Termogravimétrica (TGA).....51

4.3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura - Raios X por Dispersão de Energia.....51

4.3.5. Retração linear do diâmetro.....52

4.3.6. Determinação das características físicas das membranas cerâmicas 52

4.3.7. Resistência mecânica.....53

4.3.8. Resistência química.....54

4.3.9. Determinação do ângulo de contato.....55

4.4.1. Medida de fluxo de água pura.....56

4.2. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MEMBRANAS CERÂMICAS.....57

4.2.1. Preparo da solução sintética do corante.....57

4.2.2. Análises por espectrofotometria UV-VIS.....58

4.2.3. Tratamento do efluente têxtil.....58

4.2.4. Reciclabilidade.....58

4.2.5. ESTIMATIVA PRELIMINAR DE CUSTOS.....59

5. RESULTADOS.....59

5.1. CARACTERÍSTICAS DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....59

5.1.1 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....59

5.1.2. Difração de Raios X (DRX).....63

5.1.3. Análise Termogravimétrica (TGA).....66

5.1.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) - Raios X por Dispersão de Energia (EDS).....70

5.1.5. Ângulo de Contato.....75

5.2. CARACTERÍSTICAS DAS MEMBRANAS.....76

5.2.1 Difração de Raios X (DRX) 82
5.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 84
5.2.3 Resistência Química das Membranas 85
5.2.4 Fluxo de água pura 87
5.2.5 Tratamento do efluente têxtil 89
5.2.6 Reciclabilidade 94
6. ESTIMATIVA PRELIMINAR DE CUSTOS 96
7. CONCLUSÕES 100
8. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS 101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 101

1 INTRODUÇÃO

A escassez de água doce atingiu níveis alarmantes em escala global, impulsionada pelo crescimento populacional e pelas contínuas mudanças climáticas, o que exige a adoção urgente de estratégias de gestão sustentável e o investimento em novas soluções tecnológicas (Shemer; Wald; Semiat, 2023). As consequências desse déficit são profundas e geram um ciclo de impactos em diversas esferas da sociedade, abrangendo desde a elevação dos custos de captação e abastecimento até prejuízos diretos em setores vitais, como a agricultura, além de provocar a degradação acelerada dos ecossistemas naturais e a perda de biodiversidade (Ingrao et al., 2023).

No cenário global, o setor de fabricação de tecidos se destaca como um dos maiores consumidores de recursos hídricos, sendo responsável por produzir um grande volume de resíduos líquidos. Esses despejos industriais carregam uma mistura perigosa de substâncias, incluindo corantes, inúmeros produtos químicos, compostos orgânicos e altos índices de carga poluidora, tecnicamente medidos pela demanda química e bioquímica de oxigênio. Infelizmente, boa parte das fábricas têxteis libera esses resíduos diretamente no meio ambiente sem realizar o tratamento necessário. Essa prática contamina lençóis freáticos e diversos corpos d'água, gerando consequências severas tanto para o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos quanto para o bem-estar e a saúde das populações humanas (Kasavan *et al*., 2021).

Para mitigar esse problema, a produção de membranas cerâmicas tem passado por uma evolução notável, motivada pela busca por tecnologias de filtração que sejam eficientes e de baixo custo (Nouira et al., 2025). Nesse contexto, o caulim destacasse na literatura como uma matéria-prima com elevada estabilidade química e térmica. No entanto, membranas compostas exclusivamente por caulim frequentemente apresentam limitações operacionais, como estruturas excessivamente densas e baixa permeabilidade, exigindo a incorporação de agentes porogênicos para viabilizar o fluxo de tratamento hídrico (Kyrii, 2023; Obada et al., 2017; Hedfi et al., 2014).

Paralelamente, o crescimento mundial na produção de ovos gerou um grande volume de cascas descartadas (Seikh et al., 2025). A literatura recente tem demonstrado que este resíduo, rico em carbonato de cálcio, possui um vasto potencial quando aplicado em matrizes cerâmicas. Durante o processo de sinterização, a casca de ovo não apenas atua como um

eficiente agente porogênico devido à liberação de gases que formam caminhos permeáveis, mas também contribui estruturalmente para a matriz, substituindo insumos sintéticos de alto custo (Tchakouté et al., 2020).

Apesar do potencial comprovado desses materiais de forma isolada (Melikoglu 2026; Ayalew 2023) a literatura ainda carece de investigações aprofundadas sobre o caulim e a casca de ovo na conformação de membranas aplicadas ao tratamento de efluentes têxteis. As proporções ideais para equilibrar resistência mecânica e eficiência de remoção de corantes específicos, permanecem como uma lacuna tecnológica que limita a aplicação desses materiais em escala real.

Nesse contexto, a presente pesquisa investigou a produção de membranas cerâmicas de baixo custo a partir de matérias-primas amplamente disponíveis, com destaque para caulim, associado à utilização de casca de ovo, um resíduo de origem agroindustrial e doméstica empregado como agente porogênico e auxiliar estrutural. A incorporação desses materiais contribui para a redução dos custos de fabricação em comparação às membranas comerciais à base de alumina, ao mesmo tempo em que favorece a valorização de resíduos sólidos e o aproveitamento de subprodutos, em consonância com os princípios da economia circular e da sustentabilidade no desenvolvimento de materiais para tratamento hídrico.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Desenvolver e caracterizar membranas cerâmicas de baixo custo produzidas a partir de caulim e casca de ovo, utilizando diferentes agentes formadores de poros (amido e carboximetilcelulose), e avaliar a influência da composição nas propriedades estruturais, mecânicas, físico-químicas e hidráulicas, bem como no desempenho de microfiltração para a remoção de azul de metileno de efluentes sintéticos, visando à obtenção de materiais sustentáveis e tecnicamente viáveis para aplicações no tratamento de águas residuais.

2.2 ESPECÍFICOS

- Desenvolver membranas cerâmicas de baixo custo utilizando caulim, casca de ovo e diferentes agentes formadores de poros (amido e carboximetilcelulose).
- Processar as membranas por conformação via prensagem uniaxial seguida de sinterização a 650 °C.
- Caracterizar as propriedades estruturais, físicas e superficiais das membranas obtidas, correlacionando a composição com a formação da estrutura porosa.
- Avaliar as propriedades mecânicas e a estabilidade química das membranas em diferentes meios de exposição.
- Investigar o desempenho hidráulico das membranas por meio da determinação da porosidade, fluxo de permeado e molhabilidade.
- Avaliar a eficiência das membranas na remoção do corante azul de metileno de efluente sintético, determinando a rejeição do contaminante.
- Analisar a influência da substituição do amido por carboximetilcelulose na relação entre permeabilidade e seletividade das membranas.
- Avaliar a reutilização das membranas por meio de ensaios de reciclabilidade e estabilidade operacional em ciclos sucessivos de filtração.
- Verificar a viabilidade técnica e econômica da produção de membranas cerâmicas sustentáveis utilizando resíduos como matérias-primas alternativas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 RECURSOS HÍDRICOS

A água é um recurso finito e essencial cujo equilíbrio e disponibilidade universal enfrentam pressões crescentes decorrentes do crescimento populacional, das mudanças climáticas e da expansão das atividades antrópicas (Weerasooriya et al., 2021; Jesus, 2024). Contudo, a integridade desses habitats está sob risco devido à pressão constante exercida pelas intervenções humanas. Tais ameaças, que se manifestam de formas variadas e persistentes, impõem a necessidade imediata de estratégias de mitigação e preservação para reverter o quadro de degradação atual (Nimma *et al*., 2025). Projeções globais indicam um crescimento acentuado na demanda hídrica pelo setor industrial nas próximas décadas, o que implica diretamente no aumento proporcional do volume de águas residuárias geradas (Unesco, 2018; Nunes, 2019).

O panorama nacional sobre recursos hídricos abrange dados acerca da qualidade, disponibilidade e os impactos das variações climáticas, além de estratégias para a manutenção da segurança hídrica. Em 2022, Segundo dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2024), o volume total de captação de água no território brasileiro atingiu a marca

de 2.035,2 m³/s, o que equivale a aproximadamente 64,18 trilhões de litros anuais. A análise setorial revela que a vasta maioria desse montante, cerca de 84 %, é distribuído em três setores principais, a atividade irrigada (50,5 %), o consumo urbano (23,9 %) e o setor industrial (9,4 %). As demais demandas distribuíram-se entre pecuária (8 %), usinas termelétricas (5 %), consumo rural (1,6 %) e a mineração (1,6 %) (ANA, 2024).

Diante desse panorama de vulnerabilidade e da necessidade de cumprir as metas de segurança hídrica estabelecidas pela Agenda 2030 (ODS 6), torna-se necessário adotar estratégias transformadoras de gestão que priorizem o tratamento avançado e o reúso de efluentes, reduzindo a degradação dos ecossistemas receptores (Baggio; Qadir; Smakhtin, 2021; Arora e Mishra, 2022).

Para viabilizar o gerenciamento e avaliar o impacto ambiental desses descartes, o monitoramento sistemático de indicadores físico-químicos e biológicos constitui uma ferramenta indispensável de diagnóstico (Melo, 2023). A avaliação da potabilidade da água exige o monitoramento rigoroso de variáveis físico-químicas e biológicas, fundamentais para assegurar que o recurso esteja livre de agentes patogênicos ou químicos prejudiciais. Parâmetros como oxigênio dissolvido, cor e a presença de bactérias heterotróficas e coliformes termotolerantes são critérios determinantes para validar a conformidade com as exigências legais (Xavier; Quadros; Silva, 2022; Singh *et al*., 2024).

3.2 INDÚSTRIA TÊXTIL

3.2.1 O Setor Têxtil, Corantes Sintéticos e a Geração de Efluentes

A indústria têxtil destaca-se por sua expressiva representatividade, impulsionada pela alta capacidade de geração de empregos e pela forte conectividade com diversas cadeias produtivas em escalas local e global, consolidando-se como um dos setores de maior expansão e relevância na atualidade (Adane; Adugna; Alemayehu, 2021).

Os dados da UNIDO United Nations Industrial Development Organization mostram que o mercado têxtil mundial é amplamente dominado por países asiáticos, contudo, o Brasil consolida-se na 10ª posição global, atingindo uma produção de US$ 15,5 bilhões em 2022 de acordo com a Tabela 1. A presença brasileira entre os maiores fabricantes mundiais demonstra a força da indústria nacional, mas também expõe um desafio ambiental significativo para o país. O elevado volume de produção têxtil nacional resulta na geração de grandes quantidades de

efluentes complexos. Assim, a busca por métodos de tratamento de efluentes que sejam eficientes e utilizem materiais de baixo custo é de extrema relevância estratégica e ambiental para a sustentabilidade do setor têxtil no Brasil.

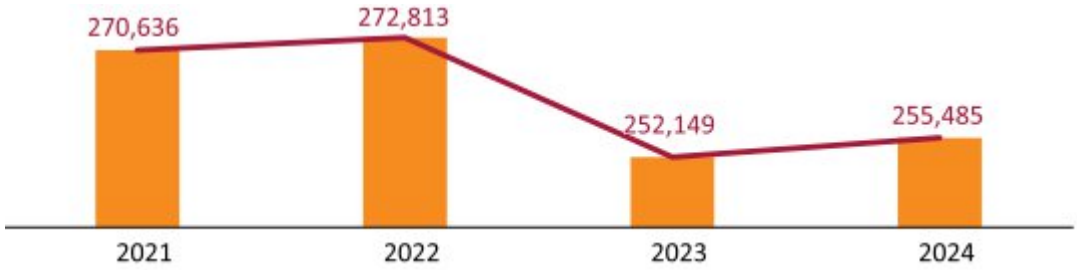
Tabela 1 – 10 maiores fabricantes mundiais de têxteis, da produção de 2019 a 2022 (US$)

Ranking	País	2019	2020	2021	2022
1	China	438,667	455,805	579,573	584,775
2	Índia	56,439	49,572	73,397	76,578
3	Turquia	35,360	33,428	46,869	48,525
4	Indonésia	28,112	26,983	28,875	30,412
5	Japão	33,888	32,334	33,094	28,271
6	Itália	22,910	18,597	24,159	23,048
7	Vietnã	14,447	15,200	16,031	19,703
8	Alemanha	13,643	13,637	18,056	17,498
9	Coreia do Sul	16,300	16,744	17,156	16,194
10	Brasil	12,392	9,562	13,656	15,532

Fonte: Elaborado pelo BNB/Etene, com dados da UNIDO (2022)

A evolução e o desempenho do mercado internacional de produtos têxteis, entre os anos de 2021 e 2024, são apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Exportações de produtos têxteis – 2021 a 2024 (US$ bilhões correntes)

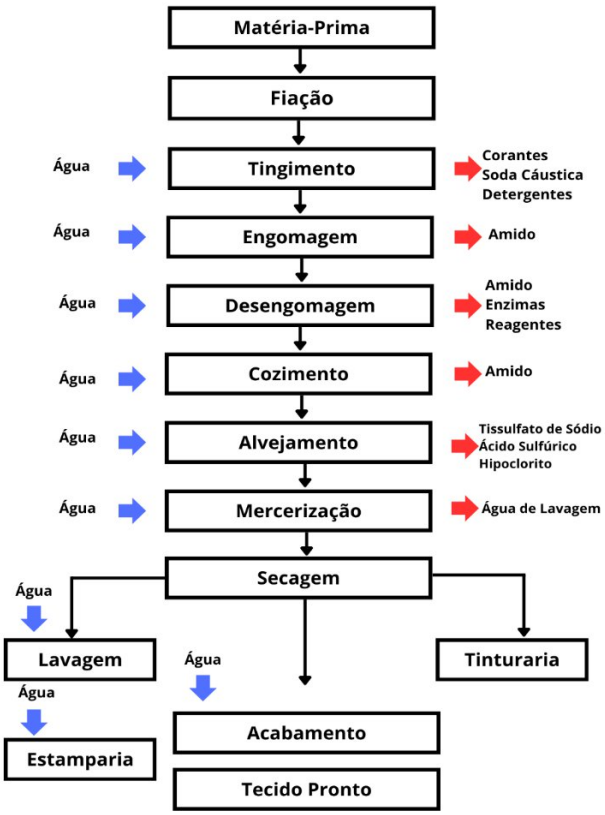


Fonte: Adaptado ETENE (2025)

Com base nos dados ilustrados, observa-se que o setor apresentou oscilações significativas no período, influenciado diretamente pelos efeitos da crise sanitária global. O mercado enfrentou um declínio de 5,6 % no montante exportado, recuando de US$ 270,6 bilhões (2021) para US$ 255,4 bilhões (2024). Contudo, essa retração não ocorreu de forma linear. Após a fase inicial de aquecimento econômico em 2021, as vendas externas subiram para um patamar máximo de US$ 272,8 bilhões no ano seguinte. Após esse ápice em 2022, houve uma redução considerável no comércio global em 2023, quando os valores baixaram para US$ 252,1 bilhões. Esse cenário começou a se estabilizar em 2024, apresentando uma sutil recuperação ao atingir a marca de US$ 255,4 bilhões (Adaptado de ETENE, 2025).

No entanto, a cadeia produtiva, cujas etapas operacionais estão esquematizadas na Figura 2, demanda um consumo intensivo de recursos naturais. As etapas de processamento a úmido que englobam a desengomagem, o alvejamento, o tingimento e o acabamento são as principais responsáveis pelo elevado gasto hídrico, energético e químico da indústria. Nessas fases, ocorre a liberação de compostos alcalinos, e variados insumos tóxicos, gerando efluentes complexos que impõem desafios críticos para as estações de tratamento (Holkar et al., 2016).

Figura 2 - Fluxograma do processamento têxtil, etapas e produção.



Fonte: Adaptado Barbosa (2014).

A demanda por recursos energéticos no segmento têxtil varia de acordo com as características de cada etapa de fabricação, destacando-se por um gasto expressivo de água e energia ao longo de toda a cadeia. Na fase de fiação, a força motriz provém predominantemente da matriz elétrica, embora também haja o uso de combustíveis fósseis para manter os sistemas de iluminação, ar comprimido e controle de umidade. Um cenário semelhante ocorre na tecelagem, onde a eletricidade atua como base principal, enquanto os derivados de petróleo são direcionados para a climatização e o processo de engomagem. Por outro lado, a confecção de malhas depende quase exclusivamente da energia elétrica. Contudo, é a etapa de processamento a úmido que se consolida como a maior consumidora de recursos de toda a indústria, sendo o gasto hídrico o seu maior encargo financeiro. Dentro dessa área, procedimentos como a preparação das fibras, o alvejamento, a coloração e as lavagens de finalização demandam uma quantidade muito superior de energia térmica obtida por meio de vapor gerado pela queima de combustíveis fósseis quando comparados aos demais setores produtivos (Farhana *et al*., 2022).

Os dados referentes ao gasto de água, compostos químicos e recursos energéticos nas fases essenciais da fabricação têxtil estão sumarizados na Tabela 2.

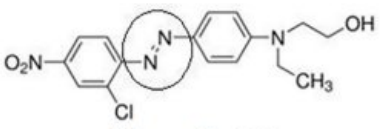
Tabela 2 - Consumo de água, energia e produtos químicos nas principais seções de processamento da indústria têxtil.

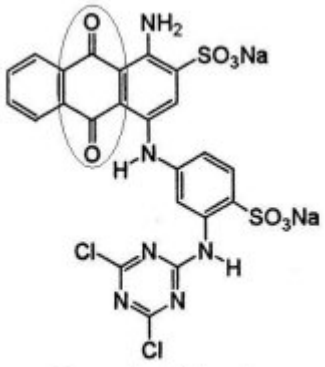
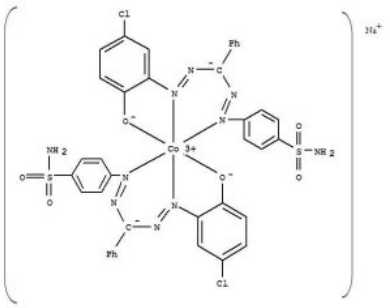
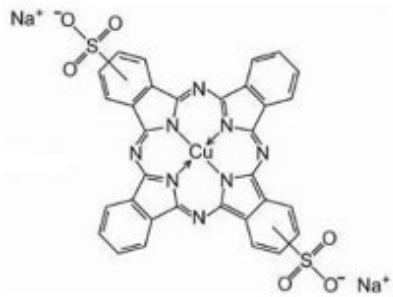
Processo	Água (% de consumo)	Energia (% consumo)	Produtos químicos (% de consumo)
Produção de fios	2	8	22
Produção de tecido	10	8	12
Processamento úmido (tingimento/estampagem /acabamento)	86	79	65
Produção de vestuário	2	5	1
Total	100	100	100

Fonte: Adaptado Uddin (2019).

A dificuldade na remediação dessas águas residuárias está intimamente ligada à presença de corantes sintéticos. Essas moléculas orgânicas são projetadas estruturalmente para possuir elevada afinidade com as fibras e notável resistência à fotodegradação e à oxidação química (Zanoni e Yamanaka, 2016). A Tabela 3 apresenta as principais classes estruturais desses compostos, enquanto a Tabela 4 detalha seus métodos de aplicação na fibra e os grupos cromóforos associados. O descarte inadequado de efluentes carregados com corantes catiônicos e reativos altera severamente o pH, eleva a turbidez e bloqueia a penetração da radiação solar nos mananciais (Selvaraj et al., 2021).

Tabela 3 - Principais características dos corantes classificados de acordo com sua estrutura

Classes	Estrutura Química	Principais propriedades
Azo	 Disperse Red 13	Ampla variedade de cores, resistência à exposição luminosa, brilho, boa relação custo-benefício.

Antraquinona	 Reactive Blue 4	Brilho, estabilidade, resistência à exposição luminosa, ampla variedade de cores, baixo custo benefício em função da baixa fixação.
Metalizados	 Acid Black 180	Resistência à exposição luminosa, resistência à lavagem , pouco brilho, maior toxicidade, cores com tonalidades mais fortes.
Ftalocianina	 Direct Blue 86	Resistência ao calor e exposição luminosa, brilho e boa fixação, boa relação custo benefício, cores intensas.

Fonte: Zanoni & Yamanaka (2016).

Tabela 4 - Classificação dos corantes têxteis de acordo com o método de aplicação na fibra

Classe	**Fibra têxtil**	**Método de aplicação**	**Grupo cromóforo**
Reativos	Algodão, lã, seda e poliamida	A fixação do corante ocorre mediante a formação de ligações covalentes entre seus sítios reativos e os grupos funcionais da fibra, processo	azo, antraquinona, ftalocianina, formazana e oxazina

		governado pela temperatura e pelo pH	
Diretos	Algodão, viscose, seda e poliamida	O processo de tingimento ocorre por adsorção mediante interações de Van der Waals, sendo conduzido em meio neutro ou levemente alcalino na presença de eletrólitos ou mordentes	azo, diazo, ftalocianina, oxazina, metalizados e estilbenzeno
Azoicos	Algodão, viscose, acetato de celulose e poliéster	Corantes insolúveis em água são formados diretamente nos poros da fibra pela reação entre um agente de acoplamento solúvel e um sal de diazônio também solúvel	azo
Dispersos	Poliéster, acetato de celulose, acrílico e poliamida	O tingimento utiliza finas dispersões aquosas com agentes dispersantes, fixadas por alta temperatura e pressão ou termofixação	azo, antraquinona, nitro, estirílico, benzodifuranona
Ácidos ou aniônicos	Poliamida, lã, seda, couro e acrílico modificado	A fixação do corante ocorre em meio neutro ou ácido, ligando-se aos sítios catiônicos da fibra mediante interações iônicas,	azo (inclusive azo metalizado), antraquinona, trifenilmetano, triarilmetano, azina, xanteno, nitro e

		forças de Van der Waals ou pontes de hidrogênio	nitroso
Pré-metalizados	Lã, couro	A fixação é viabilizada por mordentes à base de cromo, que unem quimicamente o corante à fibra, compensando sua falta de afinidade	azo e antraquinona
Catiônicos	Lã, seda, algodão, couro e fibras acrílicas. Pouca afinidade com fibras celulósicas	A fixação do corante à fibra acontece através dos sítios catiônicos do corante com os sítios aniônicos da fibra via interação de van der Waals ou pontes de hidrogênio. O tingimento ocorre empregando usualmente ácido acético que colabora para fixação do corante à fibra e solubilidade em água	polimetina, di e triarilmetina, antraquinona e azo

Fonte: Adaptado Alcântara e Daltin (1996); Christie (2014); Guaratini e Zanoni (2000); Gordon e Gregory (1987); Hunger (2003); Zollinger (1991).

A pressão por sustentabilidade, torna-se necessário romper com a lógica de produção linear onde a economia circular propõe o reaproveitamento sistemático de resíduos e a extensão do ciclo de vida dos materiais (Calvosa, 2025). Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias avançadas de separação como as membranas cerâmicas formuladas a partir de argilas e resíduos sólidos apresenta-se como uma solução viável. Essa abordagem viabiliza a

retenção eficiente dos corantes para a recuperação e o reúso da água industrial, ao mesmo tempo em que reintegra subprodutos à cadeia produtiva como matéria-prima de alto valor agregado, atendendo plenamente aos preceitos ecológicos do setor (Chen et al., 2022; Leal Filho et al., 2024).

3.3.RESÍDUOS

3.3.1. Geração de resíduos sólidos e líquidos

A disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) em território brasileiro configurasse como risco ambiental, atingindo severamente os corpos hídricos. Estima-se que mais de 70 % das águas superficiais e mananciais subterrâneos localizados nas proximidades desses depósitos sofram algum tipo de degradação, um fenômeno que ocorre independentemente de variáveis geológicas, climáticas ou do nível de vulnerabilidade natural do terreno. Diante desse cenário, torna-se imperativo que as esferas governamentais locais implementem estratégias rigorosas de vigilância para resguardar a saúde da população. Entre os indicadores críticos de contaminação, a presença de chumbo (Pb) e de coliformes destaca-se como parâmetro essencial de análise, dado que esses elementos frequentemente excedem os limites de segurança em regiões adjacentes aos lixões e aterros (Morita *et al*., 2021).

A relevância econômica da cadeia têxtil é impulsionada por uma ampla gama de matérias-primas e insumos, que incluem desde fibras naturais, como lã e algodão, até materiais sintéticos, além de uma variedade de corantes, componentes químicos e o uso intensivo de recursos hídricos. No que diz respeito à fabricação, essas indústrias costumam ser classificadas em duas vertentes fundamentais, o processamento seco e o processamento úmido. A distinção entre ambos é essencial para compreender o impacto ambiental de cada etapa, visto que o método a seco é o principal responsável pela produção de resíduos sólidos, ao passo que as fases de processamento úmido concentram a maior geração de efluentes líquidos (Adane; Adugna; Alemayehu, 2021).

Nesse contexto, observa-se que o ciclo de fabricação têxtil gera, em suas variadas fases, uma gama de subprodutos que exercem impactos ambientais negativos, manifestando-se nas formas sólida, líquida ou gasosa. A natureza e o volume desses detritos são condicionados diretamente pelas operações executadas e pelos métodos adotados na linha de produção. Além disso, fatores como o tipo de maquinário utilizado, a escolha das matérias-primas e a variedade

de insumos químicos aplicados durante o processo fabril são determinantes na caracterização dos resíduos gerados (Cruz, 2021).

Dificilmente os resíduos são aplicados em seu estado bruto para a descontaminação de efluentes, o que torna indispensável o uso de técnicas eficazes que os convertam em insumos funcionais. Na atualidade, diferentes subprodutos sólidos, líquidos e gasosos com características físicas e químicas distintas, como diferentes umidades, formatos e densidades têm sido processados para atuar no tratamento de águas residuais. Entre os principais métodos empregados para essa finalidade, destacam-se a pirólise, a calcinação, a síntese hidrotérmica, o processo sol-gel, a coprecipitação e a moagem de bolas. Além da descrição dessas estratégias, é fundamental considerar a análise dos fatores experimentais determinantes, que afetam diretamente o desempenho e as propriedades dos materiais originados a partir desses resíduos (Chen *et al*., 2022).

3.3.2. Legislações ambientais pertinentes

No Brasil, as normas jurídicas desempenham um papel fundamental na gestão do descarte de resíduos líquidos em fontes de água. Elas servem como guia tanto para a fiscalização por parte do governo quanto para a conduta de empresas e instituições públicas. Atualmente, nota-se um movimento global em direção a exigências ambientais cada vez mais severas (Acselrad *et al*., 2014). De acordo com as normas ambientais vigentes, é obrigatório que os resíduos provenientes de atividades industriais passem por processos de tratamento. O objetivo é garantir que as propriedades físico-químicas desses efluentes estejam em estrita conformidade com os limites definidos pela Resolução nº 357/2006 do Conama (Conselho Nacional do Meio Ambiente).

No Brasil, a regulamentação do lançamento de efluentes industriais em corpos hídricos é regida prioritariamente pelas Resoluções nº 357/2005 e nº 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). A Resolução CONAMA nº 357 dispõe sobre a classificação dos corpos de água e estabelece as diretrizes ambientais gerais para o seu enquadramento, enquanto a Resolução CONAMA nº 430 atua de forma complementar, definindo de maneira específica as condições, parâmetros e padrões de lançamento de efluentes.

Para que o descarte direto seja autorizado, o efluente tratado deve atender a limites rigorosos referentes a diversos indicadores físico-químicos e biológicos, como pH (entre 5,0 e

9,0), temperatura (inferior a 40 °C), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e ausência de toxicidade para os organismos aquáticos. No contexto de efluentes complexos e com alta carga recalcitrante, a legislação impõe restrições adicionais severas, especialmente quanto à alteração da coloração natural do corpo receptor e à presença de substâncias tóxicas. Dessa forma, o desenvolvimento e a otimização de sistemas avançados de remediação são etapas obrigatórias para garantir a conformidade legal e mitigar os impactos das atividades industriais (CONAMA, 2011).

3.4.MEMBRANAS CERAMICAS

3.4.1. Processo de separação por membranas

A gestão de resíduos líquidos no setor têxtil demanda um monitoramento rigoroso, dado o elevado potencial de degradação ambiental que esses efluentes apresentam. O potencial de alterar parâmetros físico-químicos do efluente receptor. Atualmente, o setor enfrenta obstáculos significativos devido à escassez de tecnologias de processamento avançadas que sejam viáveis tanto em escala experimental quanto industrial. Embora existam diversas abordagens tradicionais físicas, químicas e biológicas e novos métodos emergentes, ainda não há uma solução única que neutralize totalmente limitações como o elevado consumo energético, os custos de operação elevados, a lentidão dos processos e a geração de resíduos secundários tóxicos (Srivastava e Bandhu, 2022).

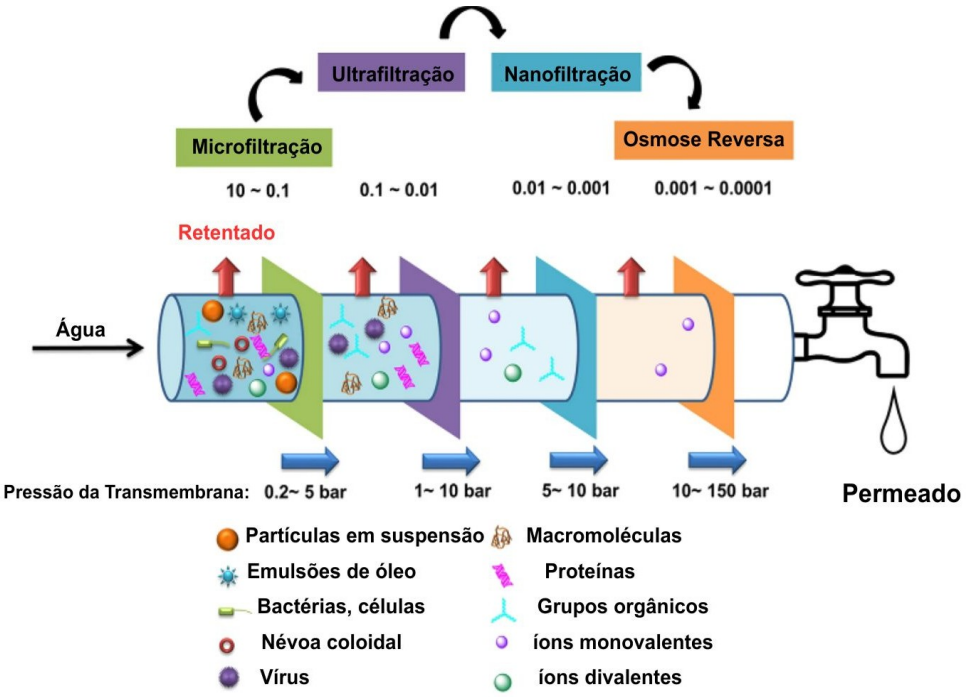
A produção têxtil é caracterizada pelo consumo intensivo de recursos hídricos, o que resulta na geração de grandes volumes de efluentes carregados de corantes e diversos insumos químicos. A persistência dessas substâncias coloridas nas águas residuais representa um sério problema ambiental devido ao seu potencial tóxico. Em resposta a esse cenário, diversas metodologias de degradação vêm sendo exploradas, embora cada uma apresente restrições específicas em sua aplicação. A complexidade das estruturas moleculares dos corantes torna sua remoção um desafio técnico considerável, uma vez que são projetados para serem resistentes à degradação. Portanto, a seleção de uma estratégia de tratamento deve equilibrar fatores como eficácia, viabilidade econômica, simplicidade operacional e as propriedades físico-químicas do efluente em questão (Chaves; Carvalho; Oliveira, 2022).

No âmbito da indústria têxtil, o emprego de tecnologias baseadas em membranas apresenta uma vasta versatilidade de uso. Esse processo destaca-se por demandar uma menor quantidade de insumos químicos, maquinários complexos e consumo energético, além de exigir

um investimento inicial reduzido. Por meio dessa técnica, é possível extrair diversos tipos de pigmentos e agentes poluentes dos efluentes, viabilizando a recuperação e o reuso de um volume significativo de água no ciclo produtivo (Jahan *et al*., 2022).

Para saber qual método de filtragem funciona melhor, é preciso primeiro observar de onde a água vem. A técnica de osmose reversa (OR), por exemplo, é excelente para tirar sais e minerais, sendo muito usada na prática para aproveitar a água do mar. Por outro lado, quando a água vem do subsolo, as opções mais indicadas costumam ser a microfiltração (MF) e a ultrafiltração (UF), pois são ótimas para barrar pequenos organismos e limpar sujeiras (Aziz *et al*., 2024). Um resumo visual de como esses métodos de membrana funcionam está disponível na Figura 3.

Figura 3 - Uma visão geral da eficácia das técnicas de filtração baseadas em membranas



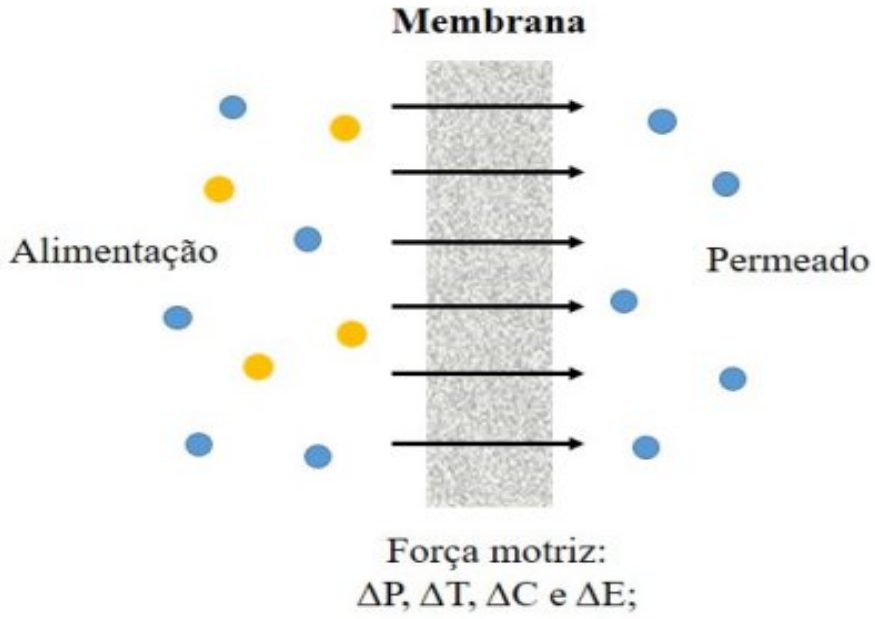
Fonte: Adaptado Liao *et al*. (2018).

A viabilidade do desenvolvimento de Processos de Separação por Membranas é sustentada por múltiplos benefícios técnicos e operacionais. Essas tecnologias destacam-se pela simplicidade de execução, facilidade de controle e eficiência energética, além de resultarem em um efluente de alta qualidade, o que favorece diretamente a sua reintegração ao ciclo produtivo industrial. Somado a isso, os custos relacionados à operação e manutenção são

reduzidos, visto que esses sistemas possuem poucos componentes móveis e demandam baixa intervenção humana constante. Nesse contexto, as membranas configuram-se como uma solução promissora para o tratamento dos descartes líquidos da indústria têxtil (Drumond, 2025).

A Figura 4 demonstra de forma simples como ocorre a filtração. A mistura a ser tratada (alimentação) é empurrada contra a membrana devido a uma força motriz, que geralmente é uma diferença de pressão, temperatura ou concentração. Em comparação aos métodos de separação tradicionais, essa tecnologia destaca-se por sua elevada eficiência na remoção de contaminantes, versatilidade operacional e uma relação econômica vantajosa. Somado a isso, o baixo consumo energético e a facilidade de obtenção de insumos para a fabricação das membranas reforçam o potencial dessa alternativa como uma solução viável e próspera (Jhaveri e Murthy, 2016).

Figura 4 - Representação do método de separação, utilizando uma membrana.



Fonte: Bessa (2022)

3.4.2. Características das Membranas Cerâmicas

As membranas cerâmicas inorgânicas consolidaram-se como elementos fundamentais no desenvolvimento de materiais de alta performance, apresentando perspectivas de evolução

cada vez mais favoráveis. No entanto, o avanço científico e tecnológico evidenciou que as propriedades das cerâmicas convencionais e os processos tradicionais de moldagem já não são suficientes para suprir as demandas contemporâneas. Com o contínuo aperfeiçoamento das técnicas de fabricação, os materiais cerâmicos expandiram sua presença em diversas aplicações, o que elevou o nível de exigência quanto ao seu desempenho funcional. Nesse contexto, as variadas metodologias de síntese apresentam restrições específicas, resultando em cerâmicas de alumina porosa com microestruturas e características distintas. Por essa razão, a seleção do método de preparação deve ser criteriosamente fundamentada nas necessidades técnicas e nos objetivos finais da aplicação pretendida (Zhang *et a*l., 2023).

A aplicação de tecnologias de membranas tem promovido uma transformação progressiva no tratamento de águas e efluentes industriais. Apesar do vasto volume de pesquisas acumuladas ao longo das décadas, subsistem lacunas que demandam aperfeiçoamento técnico. O fenômeno da incrustação e o elevado consumo energético permanecem como obstáculos críticos em sistemas operados sob pressão fora do equilíbrio. Diante disso, a busca por soluções definitivas requer investigações contínuas, seja pela implementação de etapas de pré-tratamento que aliem rigor técnico e viabilidade econômica, seja pela síntese de materiais com propriedades intrínsecas de resistência à incrustação. No campo específico da destilação por membranas, a literatura aponta a necessidade de estudos aprofundados para a compreensão plena da polarização térmica. O domínio desse conceito é fundamental para o desenvolvimento de membranas especializadas que possam mitigar perdas de eficiência, tornando o processo tecnicamente robusto e economicamente viável para operações em escala industrial (Ezugbe e Rathilal, 2020).

A utilização de membranas como método de separação demonstra uma opção estratégica para os processos de fracionamento e purificação. No âmbito da biotecnologia, a etapa de purificação de bioprodutos é um componente crítico, chegando a comprometer entre 80% e 90% do custo total de fabricação. Diante desse impacto financeiro, torna-se essencial o desenvolvimento de metodologias que aliem alta performance a custos reduzidos. Nesse contexto, os Processos de Separação por Membranas alinham-se aos princípios da sustentabilidade industrial. Isso se deve ao fato de serem tecnologias de baixo consumo energético, permitirem a reutilização dos módulos em diversos ciclos operacionais e, fundamentalmente, não resultarem na formação de resíduos ou poluentes secundários (Oliveira, 2022).

A adoção dos Processos de Separação por Membranas no setor industrial apresenta-se como uma estratégia relevante para promover sistemas produtivos com menor pegada ambiental, especialmente devido à sua superioridade em eficiência energética frente aos métodos tradicionais. Essa tecnologia viabiliza a obtenção de produtos com elevado padrão qualitativo, além de permitir o resgate de substâncias com alto valor agregado que, de outra forma, seriam descartadas. Uma característica distintiva desses processos é a operação sob temperaturas reduzidas, o que configura uma alternativa vantajosa aos métodos térmicos, como a destilação e a evaporação, que podem degradar componentes sensíveis. Somado a isso, as separações por membranas destacam-se pela alta seletividade, pela facilidade de integração em sistemas híbridos e pela redução drástica na produção de resíduos químicos. Tais atributos consolidam essa tecnologia como uma rota tecnicamente viável e ecologicamente sustentável para a indústria (Hupsel et al., 2020).

As membranas cerâmicas distinguem-se das opções poliméricas e de outras variedades inorgânicas por apresentarem um conjunto de benefícios superiores, destacando-se por sua notável estabilidade nos âmbitos químico, térmico, mecânico e físico. Tais dispositivos exibem uma durabilidade excepcional, sendo capazes de operar sob condições extremas, como temperaturas elevadas, variações rigorosas de pH e pressões de trabalho que atingem até 10 bar, sem sofrer processos de inchaço ou compactação. Essas propriedades permitem sua aplicação em cenários onde outros materiais seriam tecnicamente inviáveis. Além da robustez estrutural, as cerâmicas proporcionam uma separação altamente eficiente e possuem uma vida útil prolongada, configurando-se, frequentemente, como uma alternativa mais sustentável frente a outros métodos de filtragem. Outro diferencial relevante é a capacidade de realizar alterações seletivas sem a necessidade de mudanças de fase. Adicionalmente, essas membranas suportam procedimentos rigorosos de limpeza química em altas temperaturas, utilizando agentes como ozônio, cloro, peróxido de hidrogênio, substâncias cáusticas e ácidos inorgânicos. Processos de esterilização por vapor e retrolavagem também são perfeitamente aplicáveis, o que amplia a versatilidade operacional dessa tecnologia (Kyrii, 2023).

As membranas do tipo cerâmica são caracterizadas pela integração de dois ou mais materiais dessa natureza em uma camada funcional única. Nesse contexto, a configuração refere-se especificamente à camada ativa superior, a qual é constituída por um compósito cerâmico. Quando confrontadas com as estruturas monolíticas, as membranas compósitas demonstram uma performance mais elevada ou agregam funcionalidades extras, tornando-as

mais eficazes para processos de tratamento de águas e efluentes (He *et al*., 2019). Na Tabela 5 demonstra as vantagens e desvantagens das membranas cerâmicas.

Tabela 5 - Vantagens e desvantagens da membrana cerâmica

Vantagens	Desvantagens
Capaz de resistir a altas temperaturas de até 280 °C. Um desenvolvimento especial em módulos e sistemas pode atingir até 700 °C.	Frágil. Requer manuseio muito cuidadoso.
Excelente resistência à corrosão (em relação a solventes orgânicos e uma ampla faixa de pH).	A maioria das membranas cerâmicas tem formato de disco ou tubular e
Adequado para limpeza e esterilização a vapor.	possui baixa relação área/volume.
Alta resistência mecânica.	O custo de investimento em membrana cerâmica é muito alto.
Capaz de suportar condições adversas, como soluções altamente ácidas ou alcalinas.	
Possuir longa vida útil.	
Alto fluxo de membrana para membrana porosa.	

Fonte: Scott (1995).

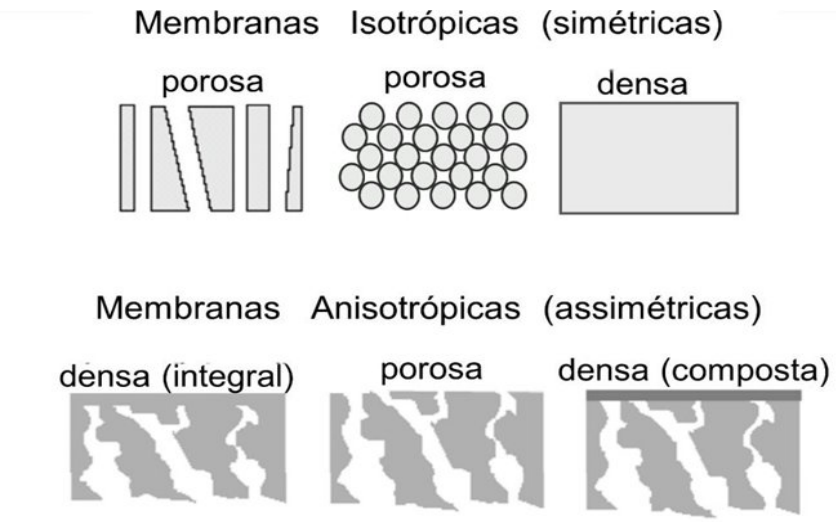
3.4.3. Classificação morfológica das membranas

Entende-se por membranas os obstáculos seletivos posicionados entre duas fases distintas, cuja função é restringir, de forma total ou parcial, a passagem de determinadas substâncias. Esse mecanismo de isolamento é aplicável tanto em sistemas gasosos quanto em composições líquidas. A organização desses elementos ocorre com base em sua composição e morfologia. No que se refere à origem, as membranas são segmentadas entre as versões naturais e sintéticas, por sua vez, podem possuir base orgânica como polímeros e fluidos ou inorgânica exemplificadas por cerâmicas e metais. Já sob a ótica estrutural, elas são categorizadas conforme a densidade podendo ser porosas ou compactas e conforme a geometria interna, sendo definidas como simétricas ou assimétricas (Duarte, 2022).

A viabilidade de fabricar membranas cerâmicas em escala industrial depende, fundamentalmente, da descoberta de insumos acessíveis e processos produtivos economicamente viáveis. Esse desafio tem impulsionado investigações científicas focadas no desenvolvimento de tecnologias de baixo custo. Dentro dessa área, as membranas compósitas surgem como uma vertente das estruturas assimétricas, sendo desenvolvidas a partir da combinação de diversos precursores inorgânicos. Por outro lado, as membranas assimétricas tradicionais costumam ser fabricadas a partir de um único componente, seja ele cerâmico ou polimérico, o que limita sua produção a volumes reduzidos. O grande obstáculo dessas versões simplificadas reside no elevado investimento necessário para customizar suas estruturas, entretanto, o emprego de membranas compósitas apresenta-se como uma solução eficaz para mitigar esses custos operacionais e otimizar o desempenho do material (Behroozi e Ataabadi, 2021).

De maneira ampla, as membranas cerâmicas são classificadas em duas categorias principais, as porosas e as densas. As variantes porosas têm despertado grande interesse acadêmico e industrial, com aplicações predominantes em processos de purificação hídrica e como base para suporte de outros materiais. É comum que esses componentes apresentem uma conformação em múltiplas camadas, composta por diferentes tipos de cerâmicas, o que caracteriza uma estrutura do tipo assimétrica. Essa configuração é geralmente composta por uma base macroporosa, responsável por conferir resistência mecânica ao conjunto, seguida por camadas intermediárias de natureza mesoporosa. A separação efetiva das substâncias ocorre na camada superior, de estrutura microporosa ou densa. Em razão dessa complexidade estrutural, o processo de fabricação dessas membranas demanda a execução de diversos estágios sucessivos de produção (Hubadillah *et al*., 2018). Na Figura 5 é possível analisar classificação das membranas.

Figura 5 - Classificação morfológica das membranas simétricas e assimétricas, destacando suas subcategorias porosas e densa



Fonte: Habert *et al*. (2006).

3.4.4. Classificação das membranas quanto ao tamanho de poro

As membranas de microfiltração (MF) caracterizam-se por possuírem aberturas que variam entre 0,05 e 20 μm, operando usualmente sob pressões que oscilam de 0,01 a 0,2 MPa. Esse processo é eficaz na retenção de partículas com diâmetros situados na faixa de 0,1 a 10 μm. Estruturalmente, essas membranas apresentam uma porosidade homogênea e bem definida. Sob o gradiente de pressão, ocorre a separação física onde os componentes menores que os orifícios da membrana atravessam a barreira, enquanto elementos maiores são bloqueados. Devido à alta densidade de poros estimada entre 10^7 e 10^{11} unidades por centímetro quadrado e a uma porosidade que compromete de 65 % a 85 % do seu volume total, o sistema oferece baixa resistência ao fluxo, resultando em taxas de filtração elevadas. Consensualmente, define-se o mecanismo de exclusão da microfiltração como um processo de peneiramento, no qual a configuração física da membrana é o fator determinante para a seletividade. No entanto, é importante considerar que fenômenos de adsorção e interações eletrostáticas também exercem influência na capacidade de interceptação de substâncias (LI, 2021).

De modo geral, o emprego da microfiltração como técnica isolada demonstra eficiência na eliminação de colóides, sólidos suspensos, bactérias e compostos orgânicos de elevada massa molecular, contribuindo diretamente para o decréscimo da turbidez do efluente. Em contrapartida, a ultrafiltração (UF) oferece um espectro de separação mais abrangente quando comparada à MF. Devido à presença de poros com dimensões mais reduzidas, as membranas

de UF possuem uma competência superior na retenção de partículas e agentes coloidais. Destaca-se, ainda, a sua performance elevada na exclusão de bactérias e a capacidade adicional de interceptar vírus, garantindo um nível de purificação mais rigoroso (Yang *et al*., 2020).

A técnica de microfiltração atua na exclusão de partículas e agentes biológicos cujas dimensões variam entre 0,025 μm e 10,0 μm, utilizando, para isso, um meio filtrante microporoso. É importante observar que, embora substâncias micrométricas possam ser retidas por materiais de camada profunda ou meios fibrosos não membranosos, a garantia de uma retenção quantitativa e rigorosa é exclusividade das membranas. Isso ocorre devido à sua conformação estrutural, que apresenta poros com diâmetros precisamente delimitados, assegurando que o processo de separação ocorra de forma previsível e controlada (El Batouti; Al-Harby; Elewa, 2021).

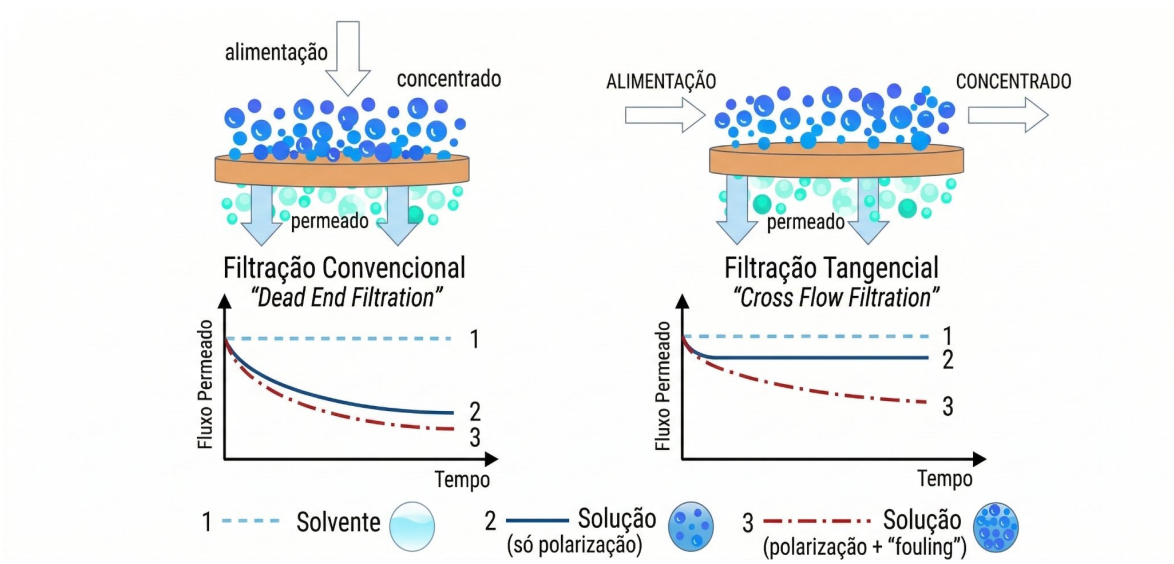
As operações de filtragem por membranas que dependem da pressão como fator impulsionador dividem-se, essencialmente, em duas categorias, frontal e tangencial. No método frontal, a solução de alimentação é direcionada de forma perpendicular à superfície da membrana. Nesse sistema, o fluido é forçado diretamente contra a barreira, resultando em apenas uma corrente de saída, que corresponde ao material filtrado. Já na configuração tangencial, a dinâmica é distinta, o líquido de alimentação percorre a extensão da membrana paralelamente à sua superfície. Essa característica gera duas correntes de saída distintas ao final do processo, o permeado, que atravessou a barreira, e o concentrado, que retém as substâncias separadas (Bessa, 2022).

No contexto do tratamento e purificação de misturas diluídas, especialmente em meios aquosos, a pressão atua como mecanismo propulsor para separar ou concentrar substâncias. Essa tecnologia abrange uma escala que vai da microfiltração (MF) à osmose inversa (OI), passando pela ultrafiltração (UF) e nanofiltração (NF). Esses métodos funcionam como uma evolução da filtragem tradicional, diferenciando-se principalmente pela seletividade do meio filtrante. Conforme se avança da microfiltração em direção à osmose inversa, as membranas tornam-se progressivamente mais densas, apresentando poros com dimensões reduzidas que restringem a passagem de partículas cada vez menores (Paschoal, 2021).

No processo de filtração frontal, o permeado atravessa a estrutura da membrana enquanto os sólidos ou solutos são barrados, gerando um acúmulo progressivo de material sobre a superfície filtrante. Por essa razão, tal operação possui natureza transiente, visto que a

densidade de partículas junto à barreira aumenta continuamente com o tempo. Esse fenômeno, observado em processos como a microfiltração, assemelha-se ao mecanismo da filtração comum, onde a deposição de resíduos culmina na estruturação de uma camada conhecida como torta de filtração. Diferentemente desse modelo, a filtração por escoamento tangencial fundamenta-se na passagem da solução paralelamente à superfície da membrana, enquanto o transporte do permeado ocorre de maneira perpendicular. Essa movimentação paralela é estratégica, pois limita a deposição excessiva de material retido, possibilitando que o sistema atinja um regime estabelecido de transferência de massa. Na prática, isso permite que o fluxo de permeado se estabilize ao longo da operação, ainda que apresente um desempenho inferior ao do solvente puro sob as mesmas pressões, devido à resistência adicional causada pela maior concentração de espécies na interface. Conforme apontado por Habert *et al*. (2006), embora a polarização de concentração na superfície seja inevitável, seus impactos podem ser controlados e minimizados por meio de ajustes na hidrodinâmica da corrente de alimentação, conforme ilustrado no esquema representativo da Figura 6.

Figura 6 - Esquema representativo da filtração convencional e tangencial.



Fonte: Adaptado Habert *et al.* (2006).

3.2.1 Membranas Cerâmicas e suas Propriedades Hidráulicas

Os processos de separação por membranas cerâmicas, especialmente na faixa da microfiltração, fundamentam-se no mecanismo de exclusão por tamanho, onde a matriz porosa atua como uma barreira física que retém partículas suspensas, macromoléculas e agregados de corantes, permitindo a passagem do permeado (Hakami *et al*., 2020; Mallah *et al*., 2024).

O desempenho hidráulico de uma membrana cerâmica não é determinado unicamente pela sua porosidade aparente total, mas substancialmente pela morfologia dessa rede porosa (Font *et al*., 1996; Almandoz et al., 2015). Para que se obtenha uma elevada permeabilidade hidráulica, é imprescindível que os poros sejam abertos e altamente interconectados, apresentando baixa tortuosidade, o que minimiza a resistência ao escoamento do fluido ao longo da seção transversal da membrana (Lee *et al*., 2023).

Além dos fatores estruturais, as propriedades físico-químicas da superfície exercem um papel determinante no fluxo permeado, com destaque para a molhabilidade. Matrizes cerâmicas que apresentam superfícies superhidrofílicas evidenciadas por baixos ângulos de contato possuem alta afinidade com a água. Essa hidrofilicidade intensifica as forças capilares no interior dos poros, promovendo uma rápida absorção e passagem do fluido, o que reduz o arraste hidrodinâmico e eleva a eficiência operacional do sistema (Paidi *et al*., 2022).

3.4.6. Mecanismos de Retenção de Corantes por Membranas Cerâmicas

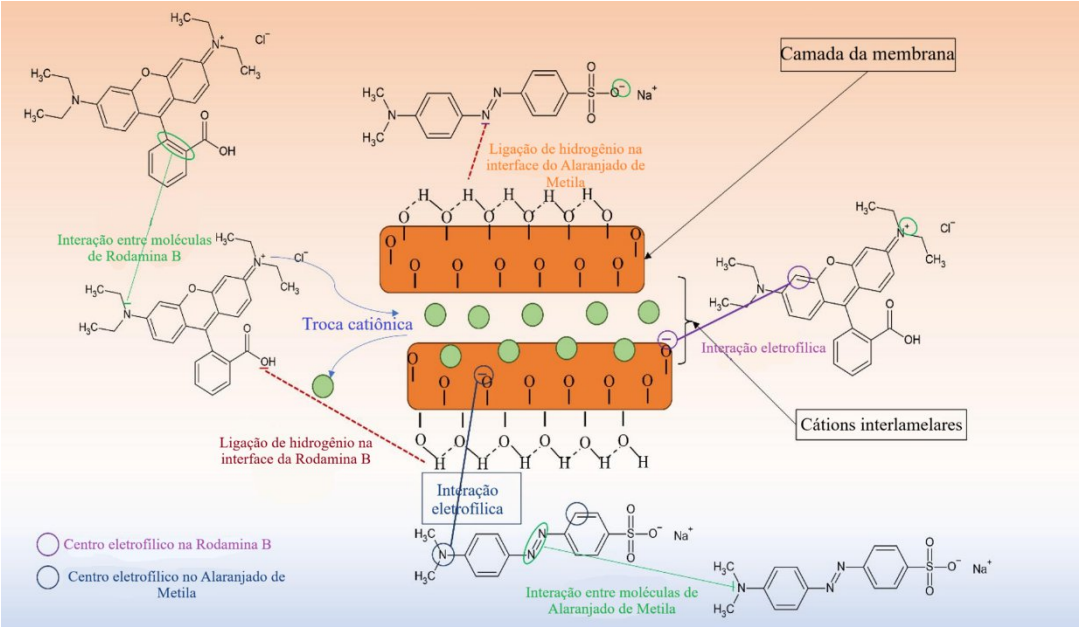
A retenção de corantes em sistemas que envolvem membranas cerâmicas ocorre por duas vias principais: exclusão por tamanho de partículas e adsorção. A exclusão atua pelo bloqueio físico, visto que os poros da matriz apresentam diâmetro inferior ao das moléculas, mantendo o soluto na superfície. Em processos, onde o tamanho dos poros é superior à molécula do efluente analisado, a retenção em altas taxas é garantida pelo fenômeno de adsorção, potencializado pela natureza das matérias-primas utilizadas na formulação (Lin *et al*., 2023).

A adsorção é uma operação de transferência de massa, a qual estuda a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos. Uma vez que os componentes adsorvidos concentram-se sobre a superfície externa, quanto maior essa superfície externa por unidade de massa sólida, tanto mais favorável será a adsorção. Por isso, geralmente os adsorventes são sólidos com partículas porosas (Ruthven, 1984; Nascimento *et al*., 2020). A espécie que se acumula na interface do material é normalmente denominada de adsorvato ou adsorbato, e a superfície sólida na qual o adsorvato se acumula chama-se adsorvente ou adsorbente (Ruthven, 1984).

A Figura 7 representa de forma esquemática como a camada da membrana interage para reter os solutos, usando a Rodamina B e o Alaranjado de Metila como modelos práticos. O processo de captura inicia pela diferença de cargas. Quando o pH do meio ultrapassa 6,39, a

superfície do material adquire carga negativa e passa a atrair as porções positivas dos compostos. Essa atração provoca uma troca de íons, que acabam se acomodando no espaço livre entre as camadas da membrana. Além dessa dinâmica de cargas, ocorre também uma interação direta entre os átomos, o oxigênio da matriz compartilha elétrons com os anéis de carbono das substâncias, o que gera as ligações do tipo n–π que são apontadas no esquema como interações eletrofílicas. O sistema conta ainda com ligações de hidrogênio, que se formam nas áreas de contato direto entre o líquido e o filtro. A união dessas interações químicas com a estrutura física da superfície e as forças de van der Waals garante a separação e a remoção final da substância da água (Rakcho et al., 2025).

Figura 7 - Representação gráfica das interações entre moléculas de corante e a superfície da membrana.



Fonte: Adaptado Rakcho *et al.* (2025).

3.4.7. Matérias-Primas Precursoras e Mecanismos de Formação de Poros

A busca por insumos acessíveis impulsiona o desenvolvimento de processos para a descontaminação de efluentes. As investigações concentram-se em otimizar a estrutura dos adsorventes, o que abrange a adequação das texturas, a expansão dos poros e o aumento da superfície de contato. O propósito dessas intervenções físicas é a formulação de nanomateriais que apresentem índices superiores de captura de solutos (Rashid *et al*., 2021).

As características físicas e mecânicas das membranas cerâmicas dependem da adição de agentes porogênicos durante a síntese, variando conforme a dosagem e a composição desses

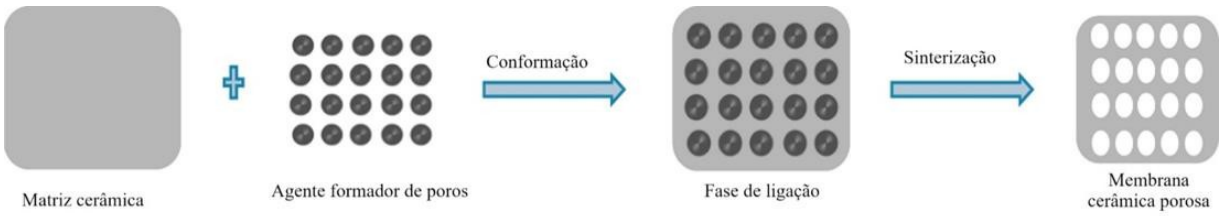
elementos. O controle dessas variáveis de processamento permite modificações na estrutura dos poros na membrana. O domínio sobre essa etapa de fabricação garante o ajuste estrutural do filtro, determinando o desempenho operacional e a viabilidade de aplicação dessas membranas em sistemas de separação (Olorunnisola *et al*., 2025).

O controle microestrutural em membranas cerâmicas é projetado a partir da seleção criteriosa das matérias-primas e da dinâmica de suas transformações durante o processamento. A formação da porosidade ocorre em duas etapas fundamentais, o empacotamento das partículas durante a conformação, que gera a porosidade inicial, e as reações termoquímicas durante a sinterização (Silveira *et al*., 2025; Xiao *et al*., 2022).

A classificação dos aditivos porogênicos divide-se em inorgânicos e orgânicos. O primeiro grupo compreende sais e compostos baseados em carbono suscetíveis à degradação térmica, a exemplo do carbonato de cálcio, grafite e negro de fumo. A segunda categoria engloba polímeros sintéticos, como poliestireno (PS) e polimetilmetacrilato (PMMA), além de fibras de origem natural, tais como exemplo, amido e serragem. Submetidos a temperaturas elevadas, os compostos inorgânicos convertem-se em óxidos que integram à matriz primária e auxiliam no processo de sinterização, entretanto, esses resíduos modificam a composição da fase cristalina do material base. Em contraste, os materiais porogênicos orgânicos sofrem volatilização completa, convertendo-se em vapores e água, mecanismo que evita a retenção de elementos não previstos no suporte (Wang *et al*., 2008; Liang *et al*., 2021).

A síntese de membranas cerâmicas mediante o uso de aditivos porogênicos engloba rotas como liofilização, moldagem em gel e por barbotina, prensagem a seco e isostática, síntese por combustão, deposição eletroforética e sinterização parcial. A sinterização parcial configura o método de processamento mais adotado em virtude de sua viabilidade técnica e de manufatura. A dificuldade inerente a esse procedimento reside na calibração exata da dimensão e da distribuição das cavidades geradas. A função dos aditivos porogênicos consiste em estruturar os vazios internos e interferir na inércia química do suporte. Assim, a definição do componente porogênico exige análise físico-química para garantir a funcionalidade do material em escala industrial (Chakraborty e Uppaluri, 2020).

Figura 8 - Etapas do processo de obtenção de membranas cerâmicas porosas por meio da adição de agentes formadores de poros.



Fonte: Adaptado Dele-Afolabi *et al.* (2017).

A Figura 8 ilustra esquematicamente a formação de porosidade em matriz cerâmica, processo iniciado pela mistura e conformação da matriz cerâmica com o agente porogênico. Na etapa de sinterização, ocorre a densificação da matriz simultaneamente à degradação térmica ou combustão dos aditivos. A completa eliminação física desse material é responsável por estruturar a rede de vazios da membrana. Na literatura já existe a utilização tanto de compostos inorgânicos quanto orgânicos para essa finalidade (Li et al. 2020; Yang et al. 2020; Xavier et al. 2019).

A aplicação de aditivos porogênicos orgânicos, a exemplo do amido de milho, amido de mandioca catiônico e casca de arroz, tem sido reportada como estratégia para modificar o tamanho médio dos poros e a fração de vazios nos suportes cerâmicos (Lorente-Ayza *et al*., 2015). As evidências apontam que a natureza térmica e estrutural dos agentes porogênicos, independentemente de sua classificação como inorgânicos ou orgânicos, determina a arquitetura morfológica final das matrizes, controlando diretamente os parâmetros de porosidade (Horri *et al*., 2012; Haugen *et al*., 2018).

O amido, como material de origem natural, apresenta uma ampla gama de características que influenciam seu papel como formador de poros em membranas cerâmicas de microfiltração (Lorente-Ayza *et al*., 2015). Antes da sinterização, estes biopolímeros atuam como agentes ligantes, conferindo plasticidade à massa e aumentando a resistência mecânica da membrana antes da queima, evitando a formação de microfissuras. Durante o ciclo térmico, à medida que a temperatura se eleva, estes compostos orgânicos sofrem degradação e combustão completa. A volatilização dos seus subprodutos orgânicos deixa espaços vazios na matriz cerâmica, atuando efetivamente como agentes porogênicos e gerando poros interconectados, fundamentais para garantir a permeabilidade da membrana (Liu *et al*., 2022).

3.4.8. Membranas cerâmicas de baixo custo

As membranas cerâmicas comerciais tradicionais, fabricadas predominantemente a partir de óxidos de alta pureza como a alumina, zircônia e titânia, são amplamente reconhecidas por sua excepcional estabilidade térmica, química e elevada resistência mecânica. Contudo, a produção dessas membranas exige temperaturas de sinterização elevadas, o que confere à tecnologia um elevado custo de capital, restringindo sua aplicação em larga escala. Surgindo como uma nova alternativa, a formulação de membranas cerâmicas de baixo custo destaca-se como uma rota promissora, substituindo os precursores sintéticos por argilominerais abundantes e subprodutos agroindustriais, além de operar sob temperaturas de queima significativamente menores (Alessandro e Macedonio., 2025).

A aplicação em larga escala de membranas cerâmicas no tratamento de água enfrenta desafios operacionais relacionados aos altos custos e à necessidade de otimizar a eficiência. Para contornar essas limitações, pesquisas recentes buscam ajustar os processos de fabricação, como a conformação e a sinterização, com foco no desenvolvimento de suportes a partir de matérias-primas alternativas. A substituição de óxidos de alta pureza por minerais naturais e resíduos sólidos permite criar membranas com desempenho semelhante ao dos sistemas tradicionais em escala laboratorial. Contudo, a composição química desses materiais varia dependendo de sua origem, o que pode gerar instabilidade na estrutura final da membrana. Somado à dificuldade em controlar o tamanho das partículas, essa variação representa um obstáculo direto para a produção industrial. Dessa forma, para viabilizar a fabricação em massa e garantir a reprodutibilidade técnica, é fundamental superar as oscilações dessas matérias-primas (Dong *et al*., 2022).

Sob a perspectiva operacional, as membranas cerâmicas de baixo custo preservam a estabilidade e a eficiência intrínsecas aos sistemas convencionais. A versatilidade desses materiais viabiliza sua aplicação direta na remediação de matrizes complexas, englobando a separação de emulsões oleosas, a retenção de metais pesados e a clarificação de efluentes da indústria têxtil e de tingimento. Consequentemente, essas matrizes alternativas conseguem suprir, com eficácia correspondente, o mesmo espectro de aplicações das membranas tradicionais nos processos de descontaminação de águas residuárias (Fu *et al*., 2024).

3.4.9. Caulim

Com elevada importância econômica, o caulim se destaca pela enorme disponibilidade na natureza, é considerado um dos seis minerais mais comuns na camada mais superficial do nosso planeta. Há séculos atrás, os primeiros setores a explorarem o caulim industrialmente foram os fabricantes de cerâmicas e porcelanas. Apenas na década de 1920 ele passou a ser adotado na produção de papel, um pouco depois da indústria da borracha também começar a aproveitá-lo. O caulim se transformou em uma matéria-prima extremamente versátil, marcando presença na fabricação de plásticos, pesticidas, fertilizantes e rações animais, além de ser usado em alimentos e medicamentos (Silva, 2001)

A organização estrutural da caulinita presente no caulim é bastante regular, o que contrasta com o formato encontrado nas argilas plásticas, marcado por uma maior desordem. Mesmo que ambas compartilhem uma base cristalina parecida, o mineral nas argilas plásticas sofre um escorregamento natural de suas camadas na direção do eixo cristalográfico *b*, o que gera essa irregularidade. Para quantificar essa característica, utiliza-se o índice de Hinckley, que costuma registrar valores de 0,1 a 0,9 nesses materiais. Além disso, essa falta de ordenação estrutural facilita a entrada de ferro na composição da argila, ocasionando uma tonalidade mais suave após a queima. Em contrapartida, essa mesma alteração garante uma capacidade de moldagem superior e uma maior firmeza física enquanto a peça ainda está na fase crua (Hubadillah e*t al.*, 2022).

O principal elemento que forma o caulim é a caulinita, um tipo de mineral de argila classificado como silicato de alumínio hidratado. A estrutura química básica dessa substância é representada pela fórmula $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$. Em um cenário ideal, sua composição é dividida em 46,54 % de SiO_2 (sílica), 39,50 % de Al_2O3 (alumina) e 13,96 % de água H_2O. Na prática, porém, é normal que essas proporções sofram leves alterações. Segundo Luz *et al.* (2008), o padrão de qualidade do caulim cai bastante quando ele está misturado com outros tipos de minerais na natureza. A contaminação por substâncias como quartzo, feldspato, pirita, moscovita, biotita e várias outras gera consequências negativas para o material. Essas impurezas prejudicam características vitais para a indústria, diminuindo o quão branco e puro o caulim aparenta ser, além de piorar a sua fluidez e aumentar o desgaste que ele provoca.

Embora a caulinita seja a principal substância formadora do caulim e seja uma argila bastante comum na natureza, é raro encontrar jazidas com material puro o bastante para que a exploração comercial valha a pena. Ainda assim, as características físicas e químicas desse mineral o tornam um recurso extremamente valioso para vários setores. O grande trunfo da

caulinita é ser um material menos reativo quando adicionado a outras fórmulas industriais. É justamente essa estabilidade que garante o seu sucesso, principalmente se a compararmos com outros minerais argilosos, como a sepiolita, a paligorskita e as esmectitas. Segundo Murray (2006), uma forma simples de perceber como esses minerais agem de maneiras diferentes é observar como cada um altera a fluidez ao ser misturado na água. Na prática, detalhes como a sua cor branca natural, o formato dos seus grãos e a sua baixa capacidade de interagir eletricamente ou trocar íons em sua superfície são vantagens enormes. Graças a isso, a caulinita atua como um material de excelência para dar cor e volume na produção de tintas, na cobertura de papéis e na criação de diversos produtos especiais.

3.5.1. O Caulim e os Efeitos do Processamento Térmico

O caulim é um argilomineral amplamente utilizado na indústria cerâmica, constituído predominantemente pela caulinita, um filossilicato de alumínio hidratado com estrutura lamelar do tipo 1:1, caracterizada pela sobreposição de folhas de tetraedros de sílica e octaedros de alumina. O comportamento hidráulico das membranas à base de caulim está diretamente relacionado às transformações de fase que ocorrem durante o processo de sinterização do material. Ao ser submetido ao aquecimento, a caulinita passa por eventos térmicos críticos. Na faixa de temperatura compreendida entre 500 °C e 700 °C, ocorre o fenômeno endotérmico de desidroxilação, no qual as hidroxilas estruturais da rede cristalina são eliminadas na forma de vapor de água (Alves *et al*., 2017).

O processo de desidroxilação promove o colapso da estrutura cristalina original da caulinita, transformando em metacaulinita, uma fase de natureza amorfa e com elevada reatividade superficial. A seleção de uma temperatura de sinterização próxima a 700 °C consiste em uma abordagem planejada para obter a união parcial das partículas. Ao operar nessa faixa térmica, garante-se a conversão para o metacaulim e a queima total dos agentes orgânicos que se degradam nessa faixa, promovendo a coesão das partículas e a estabilidade da membrana no meio aquoso (Xavier *et al*., 2019).

Na fabricação de membranas cerâmicas, o processamento térmico do caulim é determinante para a formação da estrutura porosa e para o ganho de resistência mecânica. Durante o aquecimento controlado, ocorre a transformação da caulinita em metacaulim, processo este caracterizado pela desidroxilação e amorfização do mineral, especialmente na faixa de 400 °C a 600 °. Essa etapa térmica é determinante para o desempenho da membrana, uma vez que a liberação das hidroxilas contribui intrinsecamente para a geração de porosidade

na matriz, enquanto a elevada reatividade da fase amorfa recém-formada viabiliza a consolidação inicial das partículas sem promover uma densificação excessiva. essa evolução estrutural é evidenciada pela atenuação dos grupos hidroxila e pela eliminação dos picos cristalinos da caulinita, confirmando o desenvolvimento de uma matriz de menor ordenamento estrutural e otimizada para o sistema filtrante (Azizi *et al*., 2024).

As modificações estruturais decorrentes da amorfização conferem ao metacaulim propriedades que potencializam a durabilidade e a resistência mecânica de compósitos. De fato, a transição de uma estrutura cristalina bem ordenada para uma estrutura amorfa aumenta a área superficial específica do material, potencializando sua atividade. Em conclusão, o estado amorfo do metacaulim, alcançado por meio do processo de deshidroxilação, desempenha um papel fundamental no aprimoramento do desempenho de compósitos à base de cimento, oferecendo maior integridade estrutural e resistência química. Essa compreensão aprofundada da transição dos estados cristalino para o amorfo abre perspectivas para o desenvolvimento de materiais inovadores e de alto desempenho, adaptados por meio de processos de tratamento térmico precisamente controlados, A resistência mecânica e a estabilidade química também aumentaram com o aumento do teor de caulim (Rawat e Bulasara, 2018).

As modificações estruturais resultantes da amorfização conferem ao metacaulim propriedades que ampliam a durabilidade e a resistência mecânica das matrizes cerâmicas. A transição da estrutura cristalina para a amorfa, impulsionada pela desidroxilação, eleva a área superficial específica e a reatividade do material, fatores essenciais para a integridade estrutural e a estabilidade química. O controle preciso do tratamento térmico viabiliza o desenvolvimento de membranas de alto desempenho, sendo que o aumento do teor de caulim na composição contribui diretamente para a otimização estrutural e o incremento da resistência mecânica do sistema filtrante (Rawat e Bulasara, 2018).

3.5.2. Casca de ovo

A conscientização sobre práticas sustentáveis tem motivado a busca por estratégias eficientes de reutilização de materiais descartados pelas atividades humanas, uma vez que a diminuição na geração de resíduos é fundamental para a conservação ecológica. A busca por novas alternativas viáveis para dar um novo destino a os resíduos gerados pelo beneficiamento na indústria de ovos. O propósito dessa iniciativa é minimizar as consequências negativas ao ecossistema, transformando esse material descartado em um recurso útil e com maior valor agregado (Meneses, 2024).

Apesar de gerarem um grande volume de descarte, as cascas de ovos apresentam um baixo valor comercial. O reaproveitamento desse material em larga escala é dificultado pelos altos gastos logísticos e operacionais que envolvem as etapas de coleta, desidratação, tratamento, armazenamento e transporte. Como consequência, a maior parte desse resíduo acaba sendo depositada em aterros sanitários, o que agrava diversas questões ambientais e de saúde pública. Para tentar reverter esse cenário, pesquisas científicas apontam que a incorporação das cascas de ovos em matrizes poliméricas e metálicas surge como uma solução bastante promissora. A adição desse resíduo é capaz de otimizar o desempenho térmico, mecânico, físico e químico dos materiais compósitos gerados. Assim, o desenvolvimento de novos produtos baseados na reutilização de fontes renováveis ajuda a consolidar práticas mais sustentáveis em diferentes setores da indústria (Maziero; Castro; Rubio, 2019).

Por ser uma fonte abundante de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) um composto já consagrado na produção de cerâmicas, a casca de ovo apresenta um grande potencial para ser reaproveitada como agente porogênico na síntese de membranas inorgânicas. Ao longo da etapa de sinterização, a degradação térmica desse resíduo cria os espaços vazios estruturais que são fundamentais para elevar os níveis de porosidade e a capacidade de permeação da peça. Dessa forma, a aplicação desse biomaterial se revela uma vertente científica muito promissora para a concepção de novos elementos filtrantes. Sua estrutura é configurada como uma biocerâmica natural, sendo composta majoritariamente por carbonato de cálcio ($CaCO_3$) cristalizado na forma de calcita, totalizando cerca de 94% de sua massa, além de frações menores de fosfato de cálcio, carbonato de magnésio e uma rede orgânica. No contexto da formulação de membranas inorgânicas de baixo custo, a utilização da casca de ovo moída substitui a adição de carbonatos comerciais puros, alinhando a eficiência técnica aos preceitos da economia circular ao converter um prejuízo ambiental em um precursor tecnológico (Xavier, 2018).

De acordo com os autores (Babalola e Wilson, 2024), essa abordagem investigativa ganha destaque na literatura porque a maior parte dos estudos de revisão sobre a casca de ovo costuma focar em apenas duas grandes áreas de aproveitamento, o setor industrial, que envolve o desenvolvimento de catalisadores para biodiesel e matrizes estruturais, e o campo da saúde, com aplicações na odontologia, ortopedia e nutrição. Em contrapartida, o trabalho reúne os avanços dos últimos dez anos voltados para a utilização de biocompósitos desse material especificamente na captação de contaminantes ambientais, como corantes, metais e inseticidas. Os autores reforçam ainda que as análises de cinética, termodinâmica e equilíbrio comprovam

que esses materiais sustentáveis são altamente eficientes e viáveis para atuar como adsorventes no tratamento de diversas substâncias tóxicas.

A literatura aponta que a extração de óxido de cálcio (CaO) a partir de cascas de ovo constitui uma alternativa promissora em relação à síntese convencional desse catalisador. Essa rota de valorização de resíduos evidencia-se por sua simplicidade e elevado caráter sustentável, uma vez que a conversão do material ocorre sem a necessidade de solventes ou aditivos químicos complementares. Além do benefício ecológico atrelado ao reaproveitamento, esse composto de origem residual demonstrou notável eficiência ao ser empregado no tratamento de efluentes, atuando com sucesso na descontaminação de corantes e metais pesados (Sree *et al*., 2020).

O desempenho físico-hidráulico das membranas cerâmicas está ligado as transformações térmicas que a casca de ovo sofre durante a etapa de sinterização. Durante o aquecimento, a parcela orgânica presente na estrutura da casca sofre combustão em temperaturas relativamente baixas, atuando de forma complementar na geração de microporos. Contudo, o aspecto mais relevante reside no comportamento da fase inorgânica. O $CaCO_3$ apresenta elevada estabilidade térmica, iniciando sua decomposição endotérmica em óxido de cálcio (CaO) e gás carbônico (CO_2) apenas em temperaturas adjacentes ou superiores a 750 °C (Baláž et al., 2021; Aziz et al., 2024).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos ocorreram nas dependências do Laboratório de Desenvolvimento de Novos Materiais (LABNOV). O laboratório integra a Unidade Acadêmica de Engenharia Química, pertencente ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UAEQ/CCT/UFCG), Brasil.

4.1. MATERIAIS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, utilizou-se o caulim fornecido pela unidade de beneficiamento Soleminas, situada no município de Soledade, Paraíba. A casca de ovo será utilizada como agente formador de poros, sendo empregado o carbonato de cálcio residual, proveniente de cascas de ovos descartadas em ambientes domésticos na cidade de Campina Grande (PB). A carboximetilcelulose (CMC) utilizada foi adquirida da Indústria Química

Anastácio S/A (Brasil), sendo originalmente fabricada por Changshu Wealthy Science and Technology Co., Ltd. (China).

O preparo desse material envolveu etapas físicas preliminares, iniciando-se com a higienização das cascas em água corrente, seguida pela secagem em estufa a 100°C por um período de 60 minutos. Posteriormente, o material foi processado em um liquidificador e submetido a peneiramento em malha de 200 mesh. O fluxograma das etapas do tratamento físico das cascas de ovos é ilustrado na Figura 9.

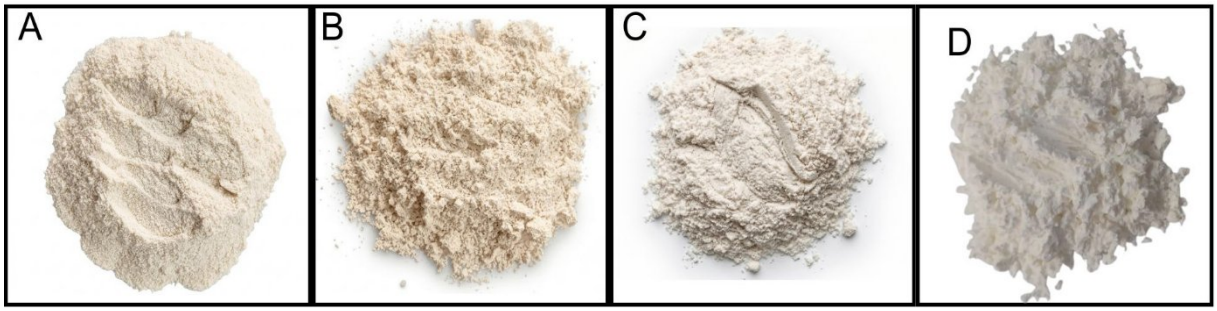
Figura 9– Etapas do tratamento da matéria-prima: coleta, lavagem, secagem térmica, trituração e padronização granulométrica.



Fonte: Própria (2024).

Na Figura 10 estão apresentadas as imagens das matérias-primas.

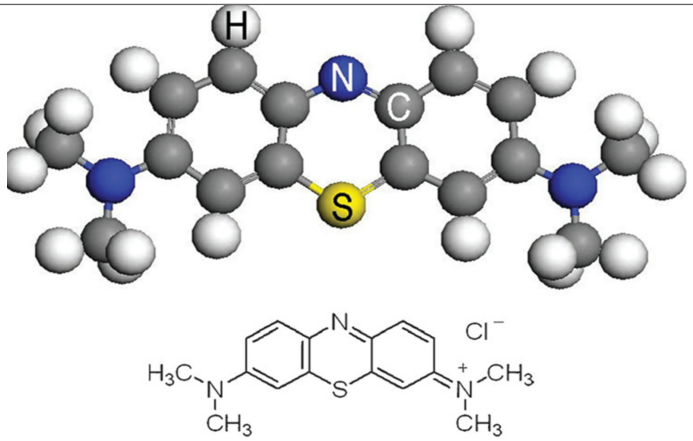
Figura 10 – Imagens das matérias-primas: a) Caulim; b) Casca de Ovo; c) Carboximetilcelulose; d) Amido



Fonte: Própria (2024).

O corante utilizado para simular o efluente sintético é o Azul de Metileno da NEON. Na Tabela 6, constam as características gerais do corante utilizado.

Tabela 6 – Características gerais do corante Azul de Metileno.

Propriedades do Corante	
Nome	Azul de Metileno
Fórmula química	$C_{16}H_{18}N_3SCl$
Estrutura Química	
Absorbância – λ máx.	664 nm
Massa Molecular (g.mol-1)	319,86
Classe química	Catiônico

Fonte: Própria (2026).

3.3 PREPARAÇÃO DA MEMBRANA CERÂMICA DE BAIXO CUSTO

O desenvolvimento das membranas cerâmicas fundamentou-se em duas formulações a membrana MCO1 com a combinação de caulim, cascas de ovos e amido e a membrana MCO2 composta por caulim, cascas de ovo e carboximetilcelulose (CMC). O desenvolvimento das formulações fundamentou-se em ensaios preliminares de laboratório. Os critérios de seleção para a escolha destas proporções específicas basearam-se na otimização da plasticidade da massa, na integridade estrutural das peças após a sinterização e na viabilidade de conformação sem a presença de defeitos visíveis. As formulações específicas, bem como as proporções relativas em massa empregadas em cada sistema experimental, encontram-se detalhadas e categorizadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Proporções em massa dos constituintes das membranas cerâmicas de baixo custo.

Matéria-Prima (%)	**Membrana MCO1**	**Membrana MCO2**
Caulim	90	90
Casca de Ovo	5	5
Amido	5	-
CMC	-	5

Fonte: Própria (2026).

Para garantir a homogeneidade da mistura das matérias-primas na elaboração da massa, os componentes foram processados em um moinho de bolas por um período de duas horas, seguindo as proporções previamente definidas (Ribeiro *et al*., 2001).

Para a moldagem das amostras, porções de 3,5 gramas da massa foram transferidas para um molde de aço inoxidável demostrado na Figura 11 e compactadas por meio de prensagem uniaxial a seco em uma prensa hidráulica, conforme os parâmetros detalhados na Tabela 8. O resultado desse procedimento foi a obtenção de membranas cerâmicas em formato de disco, apresentando dimensões aproximadas de 29,37 mm de diâmetro e 3,0 mm de espessura. Cada lote de produção, com massa total de 100 gramas, resultou na obtenção de 28 membranas.

Figura 11 – Molde para fabricação das membranas.



Fonte: Própria (2026)

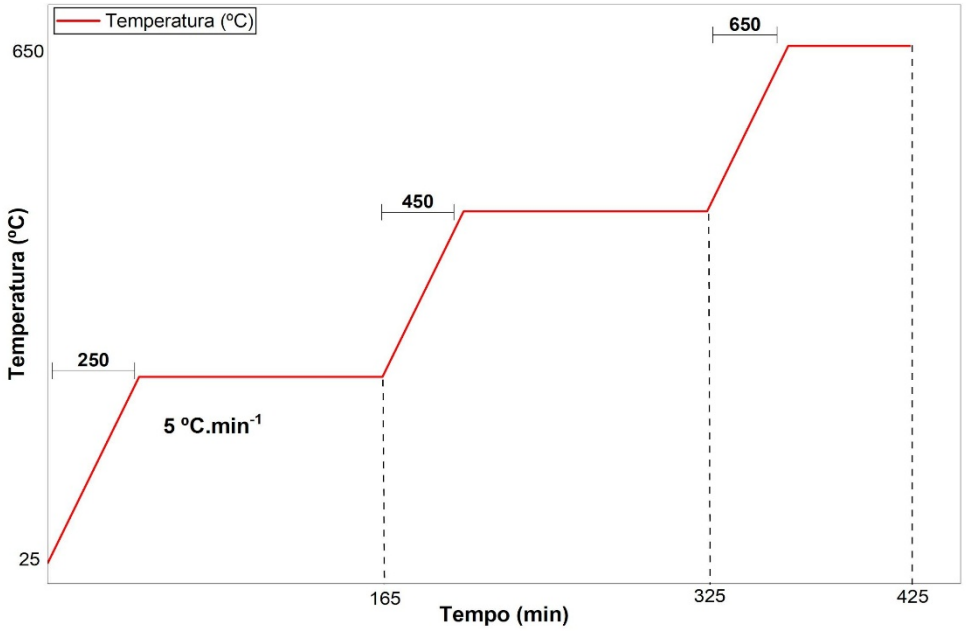
Tabela 8 – Condições de moldagem das membranas cerâmicas de baixo custo.

Tempo de moldagem (s)	60
Pressão de moldagem (MPa)	2

Fonte: Própria (2026)

Finalizado o processo de moldagem, as membranas cerâmicas foram submetidas aos processos de secagem e sinterização, em estufa durante 24 horas, com a temperatura subindo gradativamente até atingir 100 °C, e posterior sinterização em um forno mufla. Conforme a rampa de aquecimento apresentada na Figura 13, o processo de sinterização ocorreu em ar atmosférico sob uma taxa de aquecimento constante de 5 °C.min^{-1} e foi estruturado em três patamares isotérmicos: o primeiro a 250 °C mantido por 120 minutos, o segundo a 450 °C também mantido por 120 minutos, e o terceiro na temperatura final de 650 °C, com permanência 120 minutos, totalizando um ciclo de 425 minutos. A metodologia utilizada baseia-se na descrita pelo autor (Carmo, 2022).

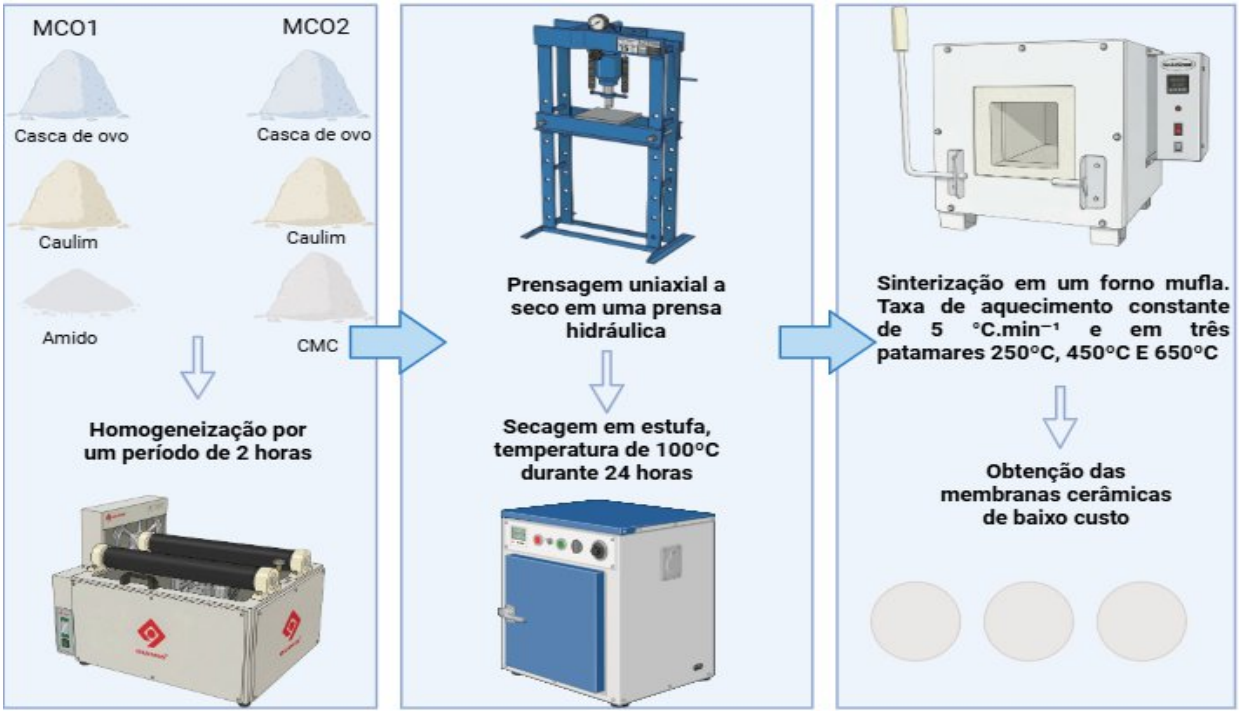
Figura 12 – Rampa de aquecimento utilizada na sinterização das membranas.



Fonte: Própria (2026)

Após os processos de fabricação, obtêm-se as membranas cerâmicas de baixo custo em suas diversas formulações. O roteiro completo, abrangendo as etapas de confecção, está detalhado esquematicamente na Figura 13.

Figura 13 – Diagrama de preparação das membranas cerâmicas de baixo custo.



Fonte: Própria (2026)

4.2. CARACTERIZAÇÃO

4.2.1. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A técnica de espectroscopia FTIR opera por meio da incidência de radiação infravermelha (IV) em variadas faixas de comprimento de onda sobre o material analisado. Durante esse processo, a amostra retém seletivamente determinadas frequências energéticas, permitindo a passagem das demais. Os dados brutos, obtidos na forma de padrões de interferência, são processados através de um cálculo matemático denominado transformada de Fourier. Essa operação converte as informações coletadas em um espectro de infravermelho, que correlaciona os níveis de absorção e transmissão de energia. A análise desse gráfico final é fundamental para determinar a estrutura molecular da amostra, permitindo o reconhecimento preciso dos grupos funcionais presentes na substância (Nada *et al*., 2025). Uma das maiores utilidades da espectroscopia FTIR na análise de estruturas é a sua independência em relação ao estado físico do material estudado. Essa versatilidade permite que as amostras sejam examinadas com facilidade em diversas condições (Jackson e Mantsch, 1995). As propriedades vibracionais da amostra foram investigadas por meio de espectroscopia no infravermelho, utilizando o equipamento INVENIO-S (Bruker). Para garantir a precisão dos resultados, as leituras foram configuradas com uma resolução de 4 cm^{-1}, abrangendo a região espectral de 4000 a 400 cm^{-1}.

4.2.2. Difração de Raios X (DRX)

A difração de raios X (DRX) é uma ferramenta essencial e amplamente utilizada tanto em pesquisas científicas quanto no setor industrial para a análise de materiais. Essa técnica se destaca por ser versátil e não causar danos às amostras, permitindo identificar e medir os componentes de um material com grande precisão e riqueza de detalhes. No entanto, o método apresenta uma limitação específica, ele não pode ser aplicado em materiais que possuem estrutura amorfa ou que apresentam um nível de cristalização muito baixo (Foner e Adan, 1983; Ribeiro, 2005; Surdu e Győrgy, 2023). É considerada o método fundamental para o estudo da organização dos átomos em materiais sólidos com estrutura cristalina. Devido à sua importância, essa ferramenta tornou-se um dos procedimentos de laboratório mais comuns e

essenciais para a análise de materiais (Adams *et al*., 2005). O equipamento utilizado nas análises foi o Difratômetro de Raios-X, modelo 6000, de fabricação da SHIMADZU.

4.3.3. Análise Termogravimétrica (TGA)

A Análise Termogravimétrica (TGA) consiste em uma técnica de caracterização térmica que monitora a variação da massa de um material, em função do tempo ou da temperatura, sob uma taxa de aquecimento controlada e constante. Do ponto de vista instrumental, o ensaio pode ser configurado de duas maneiras principais por carga superior, onde a amostra é posicionada acima da balança analítica por meio de uma haste de suporte, ou por carga inferior, configuração na qual o material permanece suspenso abaixo do sistema de pesagem. A aplicação da TGA é fundamental para a compreensão do comportamento térmico dos materiais e as mudanças de fase, pois permite não apenas identificar a composição química do sistema, mas também estimar sua estabilidade térmica e os intervalos de decomposição (Carrasco, 1993; Faraj *et al.*, 2021). As análises de TG para as matérias-primas foram realizadas no equipamento TGA 55, da marca TA Instruments. As amostras foram submetidas a uma taxa de aquecimento de 10ºC.min-1 de 24 °C até 600 ºC em atmosfera de nitrogênio.

4.3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura - Raios X por Dispersão de Energia

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) consolidou-se globalmente como uma ferramenta versátil e de alta precisão, aplicada no estudo de materiais de naturezas orgânica e inorgânica. Sua eficácia reside na capacidade de observar estruturas em escalas que variam do micrométrico ao nanométrico, permitindo níveis de ampliação que podem atingir de 300.000 a 1.000.000 de vezes em equipamentos de última geração. Complementarmente ao imageamento de alta resolução, a Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (EDS) atua de forma integrada ao MEV para realizar o mapeamento químico da amostra. Essa associação permite obter dados qualitativos e semiquantitativos sobre a distribuição elementar na superfície do material. Juntas, essas técnicas fornecem informações estruturais e composicionais que superam as limitações de ensaios laboratoriais convencionais, sendo fundamentais para o entendimento detalhado da morfologia e da constituição química da amostra. Outra vantagem importante deste método é a capacidade de medir o tamanho das partículas e identificar contaminantes minúsculos como os óxidos de zircônio, titânio e ferro que muitas vezes passam despercebidos em análises de difração de raios X (Mohammed e

Abdullah, 2018; Gomes 1988). O estudo microestrutural, foi realizado pelo equipamento JEOL, modelo JSM-6701F.

4.3.5. Retração linear do diâmetro

A determinação da retração linear é um procedimento fundamental para monitorar a variação dimensional de corpos cerâmicos durante as etapas de processamento térmico. No contexto da fabricação de membranas, esse parâmetro quantifica a redução do volume macroscópico resultante da perda de umidade e da densificação estrutural (Delgado e Guerrero, 2007).

O cálculo da retração linear do diâmetro (R_d) foi efetuado em termos percentuais, conforme estabelecido pela Equação 1. Este parâmetro quantifica a redução dimensional da amostra após o processo de secagem ou sinterização, relacionando a variação da medida diametral à sua dimensão inicial. A aplicação desta fórmula permite avaliar o comportamento volumétrico do material e sua estabilidade estrutural durante as etapas de processamento térmico.

$$R_d(\%) = \frac{d_i - d_f}{d_i} \cdot 100 \qquad (1)$$

Em que, o d_i o diâmetro inicial da amostra e d_f o diâmetro após a sinterização.

4.3.6. Determinação das características físicas das membranas cerâmicas

A caracterização física das amostras compreendeu a determinação da absorção de água (AA), da porosidade aparente (PA) e da densidade aparente (DA). Para a análise da absorção, seguiu-se as diretrizes da norma ASTM D570, enquanto a porosidade e a densidade foram fundamentadas no Princípio de Arquimedes, conforme as recomendações da norma ASTM C 20 (2000). Esta última propriedade (DA) quantifica a massa do material em relação ao seu volume total, contabilizando inclusive os espaços vazios presentes entre as partículas constituintes.

O protocolo experimental foi executado pelo método de imersão, utilizando água destilada como fluido de saturação e uma balança analítica de precisão com resolução de três

casas decimais para as pesagens. Os ensaios foram realizados em triplicata para cada composição, garantindo a reprodutibilidade dos dados. A partir da obtenção das massas das amostras nos estados seco, imerso e saturado (massa úmida), procedeu-se ao cálculo das propriedades físicas por meio das Equações 2, 3 e 4, respectivamente.

$$AA = \frac{Mu - Ms}{Um} \cdot 100 \quad (2)$$

$$PA = \frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} \cdot 100 \quad (3)$$

$$DA = \frac{Ms}{Mu - Mi} \quad (4)$$

Em que, Mu é a massa úmida (g), Ms é a massa seca (g) e Mi é a massa imersa (g).

A perda de massa (PM), frequentemente denominada perda ao fogo, é um parâmetro que quantifica a redução ponderal do corpo cerâmico durante o tratamento térmico. Esse fenômeno está intrinsecamente ligado à volatilização de constituintes, como a liberação de água adsorvida nas superfícies das partículas, a desidratação de hidróxidos e a decomposição térmica de carbonatos e da matéria orgânica presente na composição. A determinação quantitativa desse índice é realizada por meio da Equação 5, que correlaciona as massas inicial e final após a queima.

$$PM = \frac{Ms - Mq}{Ms} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que, Ms é a massa seca (g) e Mq é a massa queimada (g).

4.3.7. Resistência mecânica

A caracterização do comportamento mecânico dos materiais é uma etapa essencial. Nesse contexto, a resistência mecânica define a capacidade de um material suportar a aplicação de forças externas sem apresentar falhas estruturais. Para determinar essa propriedade com precisão, empregam-se ensaios específicos que submetem corpos de prova a condições controladas de carga. Durante a execução desses testes, é possível mapear a resposta do material sob tensão e identificar limites críticos, desde a transição da deformação elástica para a plástica

permanente, até o ponto de ruptura final (Huda, 2022). Consequentemente, a obtenção desses dados é indispensável para garantir a viabilidade e a segurança das estruturas aplicadas.

A avaliação da resistência à flexão dos corpos de prova foi conduzida por meio do ensaio de flexão em três pontos. Os testes foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaios (Texturômetro modelo TA.XT Plus), utilizando amostras padronizadas com 29 mm de diâmetro e 3 mm de espessura. A partir dos dados mecânicos obtidos, a resistência à flexão (σ), expressa em MPa, foi calculada através da Equação 6.

$$\frac{3Fl}{2bt^2} \qquad (6)$$

Onde, F é a força aplicada no ponto de fratura (N) e l representa o comprimento do vão (mm). Por outro lado, b representa a largura da membrana (mm) e t a espessura (mm).

4.3.8. Resistência química

As membranas cerâmicas aplicadas à filtração de líquidos operam frequentemente em meios agressivos, onde a desobstrução dos poros para a recuperação do fluxo exige o uso regular de agentes químicos. Nesse contexto, a avaliação da estabilidade química das membranas frente a soluções ácidas e alcalinas torna-se indispensável (Liang *et al*., 2025).

Para este ensaio, a resistência química das membranas sinterizadas foi determinada com base na variação de massa (Rani e Kumar, 2022). Inicialmente, as amostras foram pesadas para o registro da massa inicial (*Pi*). Em seguida, foram submersas em 5 mL de soluções de teste uma contendo ácido clorídrico (HCl 0,1 M) e outra contendo hidróxido de sódio (NaOH 0,1 M), sendo mantidas em temperatura ambiente por um período de 24 horas. Após esse período, as membranas foram retiradas e limpas para a remoção do excesso dos reagentes. Na sequência, as amostras foram secas em estufa a 100 ºC por mais 24 horas e submetidas a uma nova pesagem para a obtenção da massa final (*Pf*). A estabilidade química da membrana foi quantificada em termos de perda de massa, calculada por meio da Equação 7.

$$Estabilidade\ química(\%) = \frac{Mi - Mf}{Mi} * 100 \qquad (7)$$

Em que: Mi = Massa inicial; Mf = Massa final.

4.3.9. Determinação do ângulo de contato

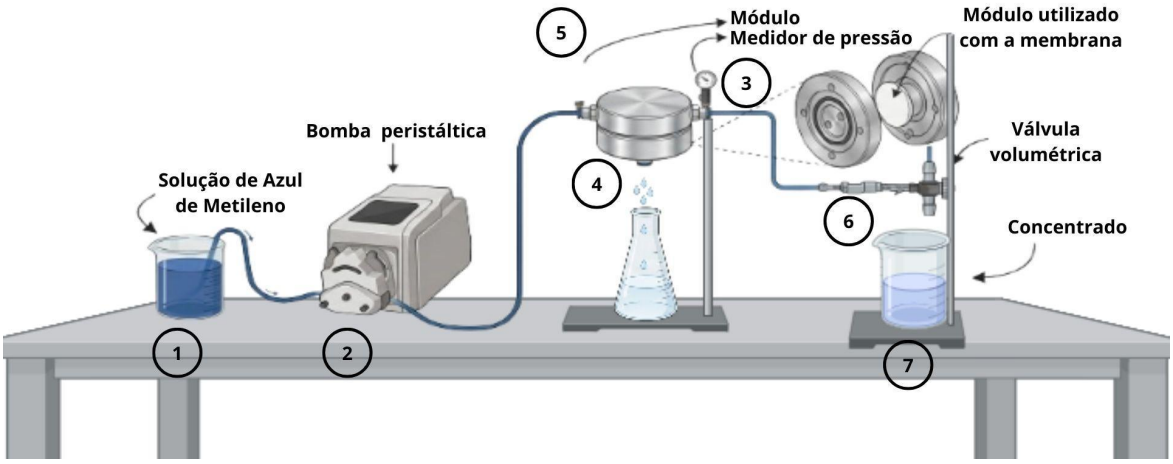
A avaliação das propriedades hidrofílicas ou hidrofóbicas de materiais sólidos é classificada pela análise do ângulo de contato estático. Do ponto de vista termodinâmico, o comportamento de uma gota de líquido repousando sobre uma superfície plana ideal é regido pelo equilíbrio mecânico das forças atuantes na linha de junção trifásica, decorrente da interação entre três tensões interfaciais (Liber-Kneć e Łagan, 2021). A técnica óptica da gota séssil destaca-se como a metodologia mais difundida para essa quantificação. O procedimento baseia-se na medição direta da tangente formada no ponto de contato da gota com o substrato, apresentando a grande vantagem de requerer frações mínimas de amostra e de fluido. Metodologicamente, deposita-se um volume controlado de água sobre a superfície e captura-se o perfil da gota fotograficamente. Para garantir a confiabilidade estatística, o protocolo padrão exige a aferição em cinco regiões distintas do corpo de prova, adotando-se a média aritmética desses pontos como o ângulo de contato estático representativo (Zhao e Jiang, 2018).

As análises propostas neste estudo foram conduzidas nas instalações do Laboratório de Desenvolvimento e Ensaios de Medicamentos da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Para a execução dos testes, empregou-se um goniômetro cinético digital (modelo AGC-002, Alcalitech, Brasil). Este instrumento é projetado para realizar a avaliação conformacional detalhada de gotículas, capturando e processando em tempo real as variações geométricas do fluido gotejado. A câmera acoplada ao sistema possui capacidade de ampliação de 50x, operando com um fator de calibração calibrado em 0,017.

4.4.1. Medida de fluxo de água pura

A Figura 14 ilustra a montagem empregada para avaliar a quantidade de água pura que atravessa as membranas cerâmicas ao longo do tempo.

Figura 14 – Sistema utilizado para medição de fluxo.



Fonte: Adaptado Silva (2024)

O suporte que acomoda a membrana, confeccionado em aço inoxidável, está ilustrado na Figura 15. Durante as análises experimentais, a temperatura foi mantida em torno de 25 ± 2 °C, empregando uma superfície útil de filtração de 3,79.10-4 m^2. Na análise experimental, antes do início do fluxo, é necessário aguardar a estabilização do sistema, o que inclui o equilíbrio da pressão e a remoção de bolhas de ar.

Figura 15 – Módulo de aço inoxidável



Fonte: Própria (2026)

O fluxo de permeado de cada membrana foi calculado utilizando a Equação 8. Através do volume coletado, do tempo da coleta e da área útil da membrana cerâmica.

$$J = \frac{V}{A \cdot \Delta t} \quad (8)$$

Em que: J = Fluxo de água ($m^3.m^{-2}.h^{-1}$); V = Volume do permeado (m^3); A = Área da membrana (m^2); Δt = Tempo de permeação (horas).A Equação de Guerout-Elford-Ferry (Eq. 9) também é utilizada para determinar o raio médio de poro da membrana (r_m) a partir dos dados de fluxo de água pura (Hamid *et al*., 2011).

$$r_m = \sqrt{\frac{(2{,}9 - 1{,}75\epsilon) \cdot 8 \cdot \eta \cdot h}{\varepsilon \cdot \Delta P} \cdot J} \quad (9)$$

onde r_m (m) é o diâmetro dos poros, J (m/s) é o fluxo médio de água, η (Pa.s) é a viscosidade da água, ε é a porosidade, ΔP (Pa) é a pressão aplicada e h (m) é a espessura da membrana.

4.2. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MEMBRANAS CERÂMICAS

4.2.1. Preparo da solução sintética do corante

A etapa de calibração do sistema analítico foi fundamentada na preparação de soluções de azul de metileno com concentração de 50 $mg.L^{-1}$, obtidas a partir da diluição sucessiva de uma solução-estoque (solução-mãe) de 1000 $mg.L^{-1}$. As alíquotas resultantes foram submetidas à análise em um espectrofotômetro de absorção molecular na região do visível, visando o registro das respectivas absorbâncias. Este procedimento é essencial para a construção da curva de calibração, que estabelece a correlação linear entre a concentração do corante e a resposta óptica do equipamento, permitindo a quantificação rigorosa das amostras experimentais

4.2.2. Análises por espectrofotometria UV-VIS

A espectrofotometria UV-Vis fundamenta-se na mensuração da quantidade de radiação absorvida por uma substância ao ser exposta a esses espectros de luz. De acordo com os autores (Albert; Todt; Davis, 2012), essa metodologia é amplamente empregada em análises quantitativas, pois permite determinar a absorbância de uma amostra em comprimentos de onda específicos. No contexto deste estudo, a técnica foi utilizada para quantificar a concentração residual de corantes em efluentes. Para isso, empregou-se o espectrofotômetro UV-Vis 1600 da marca Pró-Análise, configurado no comprimento de onda de 664 nm, ponto de máxima absorção identificado para o monitoramento do azul de metileno.

4.2.3. Tratamento do efluente têxtil

Para analisar a capacidade de retenção e o fluxo das membranas, realizou-se uma filtração tangencial utilizando uma solução de azul de metileno a 50 $mg.L^{-1}$. O ensaio durou 120 minutos, mantendo-se a pressão operante em 2 bar e a temperatura em 25 °C.

Para calcular o rendimento das membranas cerâmicas no processo, utiliza-se a Equação 10. Esse cálculo baseia-se na diferença das propriedades físico-químicas observadas no líquido antes de entrar e depois de sair do equipamento.

$$E = \frac{C_b - C_P}{C_b} \cdot 100 \qquad (10)$$

Em que: C_b = Concentração da amostra bruta; C_p = Concentração da amostra permeada.

O rendimento do processo de separação foi comparado a estudos anteriores para validar a capacidade das membranas. Durante as análises, também houve o cuidado de observar a integridade do sistema, buscando detectar problemas físicos como trincas, obstruções e incrustações.

4.2.4. Reciclabilidade

A viabilidade do uso de membranas no tratamento de águas residuais depende diretamente de sua capacidade de reciclagem, conforme destacado pelos autores (Wang *et al*.,

2021). Para avaliar esse aspecto, utilizou-se a montagem experimental detalhada na Figura 14, operando sob condições controladas de 25 °C e pressão de 2 bar. O procedimento consistiu em ciclos de 60 minutos cada, durante os quais o permeado era integralmente coletado para a posterior mensuração do fluxo e da eficiência na retenção do corante.

4.2.5. ESTIMATIVA PRELIMINAR DE CUSTOS

As membranas cerâmicas superam as tecnologias convencionais ao unir alta eficiência com impactos ambientais e operacionais reduzidos. Do ponto de vista sustentável, elas favorecem a economia de energia e a diminuição no uso de produtos químicos, gerando menos danos ambientais. Economicamente, o alto custo de fabricação representa uma barreira inicial significativa. No entanto, a viabilidade do sistema se confirma a longo prazo, já que a resistência do material diminui a frequência de manutenções e prolonga a vida útil do processo de filtração (Hosseinzadeh; Hashemi; Sarpoolaky, 2025).

As membranas cerâmicas são a escolha ideal para tratar águas residuais sob condições extremas, superando as versões poliméricas. Como apontam os autores (Lagdali *et al*., 2023), sua alta resistência térmica, biológica, química e mecânica resulta em uma vida útil prolongada e operações mais econômicas. Para estimar esses valores, adotou-se a abordagem dos autores (Vasanth; Pugazhenthi; Uppaluri, 2012), que contabiliza os custos referentes à matéria-prima, ao gasto energético e ao uso de aparelhos.

5. RESULTADOS

5.1. CARACTERÍSTICAS DAS MATÉRIAS-PRIMAS

5.1.1 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

São apresentados na Figura 16, os espectros da casca de ovo após lavagem, secagem, trituração e peneiramento e ativada termicamente a 650 ºC.

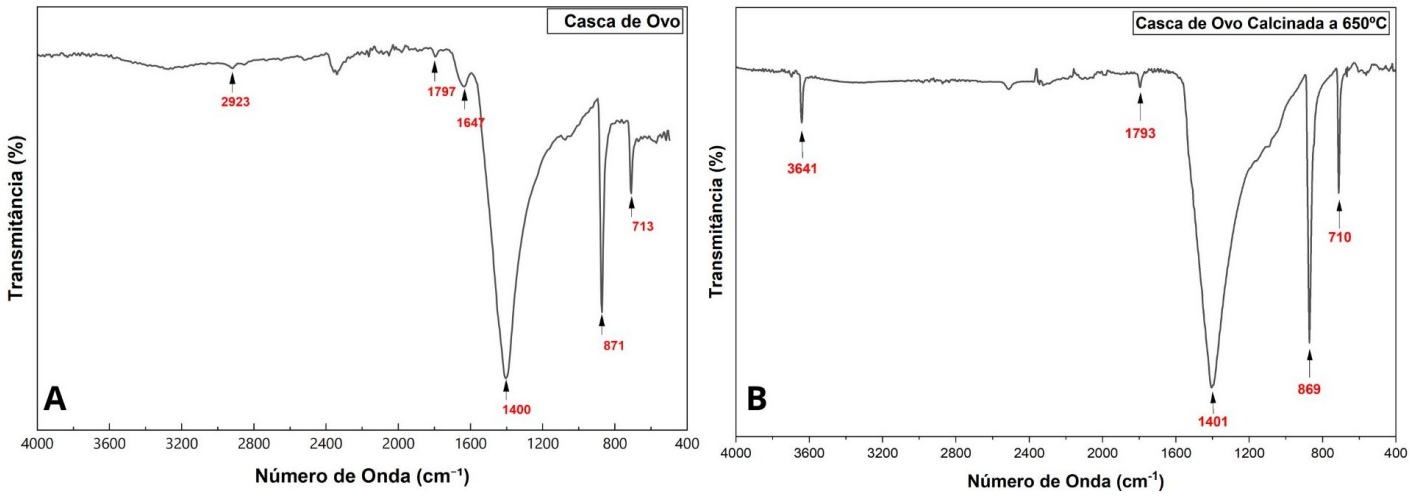
A caracterização da casca de ovo após lavagem, secagem, trituração e peneiramento revelou bandas de absorção que confirmam a predominância da calcita ($CaCO_3$) como fase mineral majoritária. Conforme observado no espectro, destacam-se três vibrações fundamentais em 1400 cm^{-1}, 871 cm^{-1} e 713 cm^{-1}. As bandas observadas em torno de 871 e 713 cm^{-1} são

atribuídas às bandas de vibração de deformação fora do plano e no plano, respectivamente, do $CaCO_3$ (Ahmed *et al*., 2022). Corroborando os modos vibracionais da calcita reportados pelos autores (Kit *et al*., 2020 e Srinath *et al*., 2025). A banda característica mais proeminente das cascas de ovos é a banda larga e intensa em 1400 cm^{-1} de vibração de estiramento do CO_3^{2-} pertencente ao carbonato, indicando a ligação entre os átomos de oxigênio e cálcio (Kinaytürk *et al*., 2021).

Além da matriz inorgânica, o espectro da casca de ovo apresentou evidências claras de componentes orgânicos, associados às membranas proteicas e lipídicas. A banda visualizada em 1647 cm^{-1} sugere a presença de vibrações de estiramento C=O (Amida I) características da estrutura proteica residual (Halici e Demirhan, 2025; Fahad *et al*., 2024). Por outro lado, a banda em 1797 cm^{-1}, embora próxima, é atribuída a uma vibração de combinação harmônica característica da própria rede cristalina da calcita, e não a grupos orgânicos. Enquanto a absorção em 2923 cm^{-1} corresponde ao estiramento assimétrico de ligações C-H (grupos metileno), indicando a presença de cadeias alifáticas de lipídios ou da estrutura carbônica das proteínas da membrana do ovo, conforme observado pelos autores (Annane; Lemlikchi; Tingry, 2023).

A espectroscopia no infravermelho (FTIR) foi empregada como ferramenta analítica para monitorar as transformações nos grupos funcionais da casca de ovo. Segundo os autores (Razali *et al*., 2021), a avaliação comparativa dos espectros em função das variáveis de tempo e temperatura é determinante para estabelecer a condição ideal de calcinação. Nos resultados obtidos, destaca-se uma banda de absorção em 3641 cm^{-1}. Conforme descrito pelos autores (Kerru *et al*., 2020), este pico é característico do estiramento de ligações hidroxila (OH^-), indicando a formação de hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$]. A presença desta fase, segundo o autor Ngayakamo (2025), está associada à higroscopicidade do material calcinado, refletindo a quimissorção de umidade atmosférica na superfície das partículas. Simultaneamente, a integridade da estrutura mineral foi monitorada pelas bandas remanescentes do carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Observou-se uma banda larga e intensa em torno de 1401 cm^{-1}, associada ao estiramento assimétrico do grupo carbonato, bem como picos de menor intensidade em 869 cm^{-1} e 710 cm^{-1}, atribuídos às vibrações de deformação da ligação C-O, corroborando as atribuições espectrais reportadas pelos autores (Alencar *et al*., 2022 e Najah *et al*., 2020).

Figura 16 - Espectros FTIR das amostras: Cascas de ovos: (a) pós lavagem, secagem, trituração e peneiramento e (b) calcinada a 650 ºC.



Fonte: Própria (2026)

A síntese do óxido de cálcio (CaO) fundamenta-se na decomposição térmica do carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Este processo, denominado calcinação, é dependente de parâmetros controlados de temperatura e tempo de residência, resultando na conversão da fase carbonato em óxido através da liberação estequiométrica de dióxido de carbono (CO_2), conforme descrito pelos autores (Banković-Ilić *et al*., 2017) e representado na Equação 11.

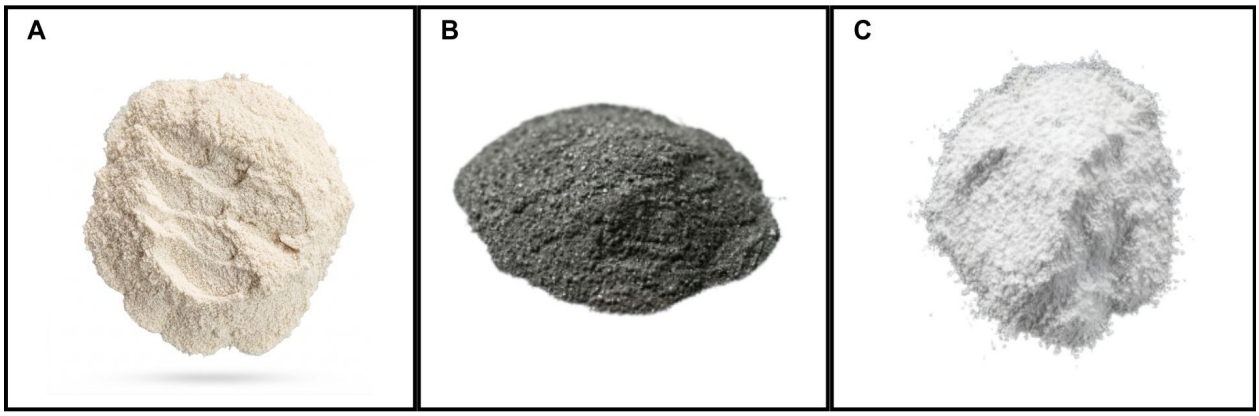
$$\mathbf{CaCO3(s)\ CaO(s) + CO2(g)} \qquad \mathbf{(11)}$$

A eficiência da decomposição térmica é regida pela correlação entre tempo de residência e temperatura. Condições insuficientes, caracterizadas por baixas temperaturas e tempos reduzidos, podem inviabilizar a formação completa da fase ativa de óxido de cálcio (CaO). A literatura estabelece que a janela térmica ideal para a obtenção de CaO de alta pureza situa-se entre 700 ºC e 900 ºC. Visualmente, essa transformação é perceptível pela coloração das amostras. Os autores (Razali *et al*., 2022) descrevem que, partindo da casca sem modificações tipicamente de coloração castanha ou bege, o processo de calcinação eficaz deve resultar em um sólido de coloração branca intensa.

Em contraste, a obtenção de pós com tonalidades escuras ou acinzentadas em temperaturas inferiores indica a presença de resíduos orgânicos carbonizados e a decomposição incompleta da matriz mineral. A brancura do material é, portanto, um indicativo qualitativo da pureza do óxido metálico formado. Conclui-se, em concordância com os resultados reportados pelos autores (Razali *et al*., 2022), que temperaturas em torno de 900 °C são requeridas para

promover a decomposição completa do $CaCO_3$. Conforme observado na Figura 17, a temperatura de 650 ºC mostrou-se insuficiente para promover a transformação integral da fase carbonato em óxido de cálcio.

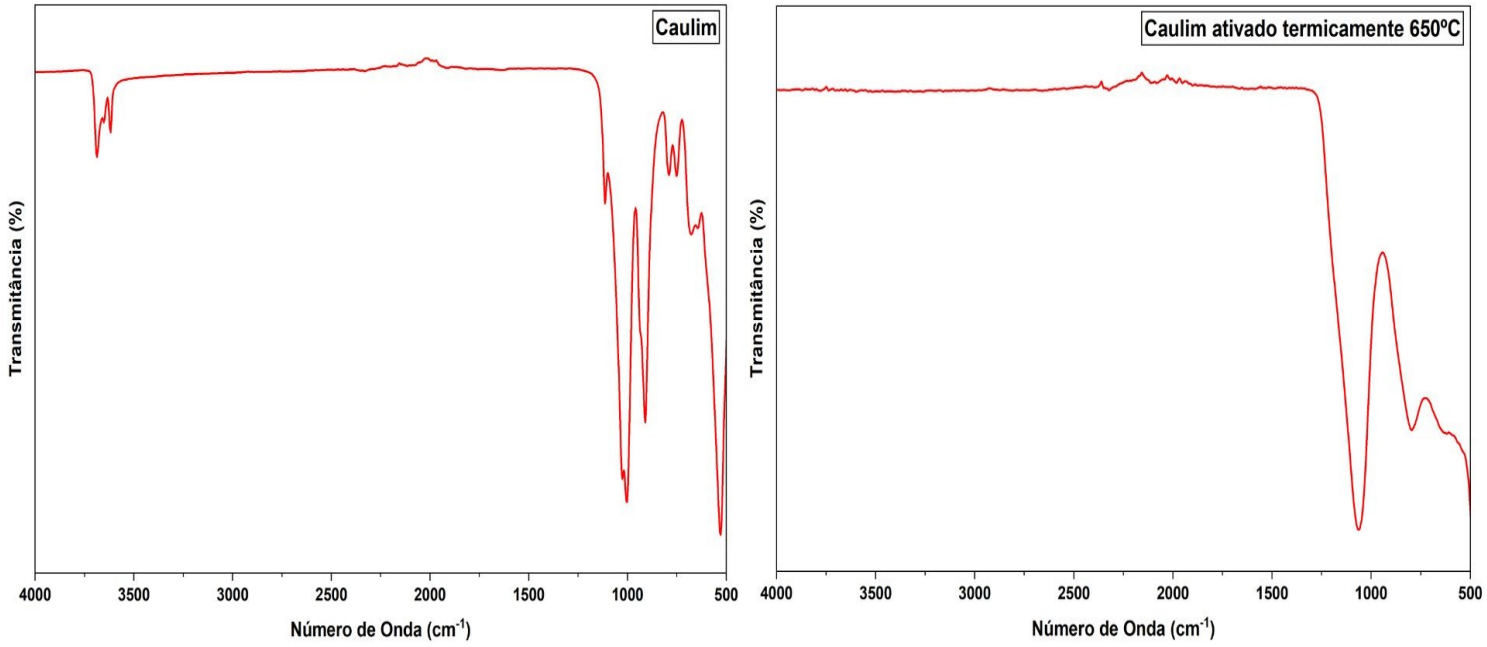
Figura 17 – Imagens das cascas de ovo em diferentes temperaturas: a) Casca de ovo; b) Casca de ovo calcinada a 650 ºC; c) Casca de ovo calcinada a 800 ºC



Fonte: Própria (2026)

São apresentados na Figura 18, os espectros da caulinita e caulinita termicamente ativada termicamente a 650 ºC.

A Figura 18 - apresenta os espectros FTIR da caulinita e da caulinita termicamente ativada a 650 ºC.



Fonte: Própria (2026).

As curvas de espectroscopia no infravermelho (FTIR) apresentadas revelam as transformações estruturais ocorridas no caulim quando submetido ao tratamento térmico. Na análise da amostra bruta, identificam-se picos nítidos em 3687, 3652, e 3621 cm^{-1}, que representam as vibrações de alongamento das hidroxilas (OH-) presentes na organização cristalina da caulinita. Adicionalmente, observa-se uma banda intensa em 910 cm^{-1}, ligada às interações Al-OH, e sinais em 1114, 1035 e 1002 cm^{-1} correspondentes às ligações Si-O, além de uma banda em 532 cm^{-1} atribuída à flexão de Si-O-Al. Com o aquecimento da amostra a 650 °C, ocorre a transição da caulinita cristalina para a fase de metacaulinita amorfa. Esse fenômeno é marcado pela desidroxilação e pela perda de água interna, resultando na redução drástica ou desaparecimento das bandas de OH- e Al-OH entre 3687, 3652, e 3621 e no pico de 914 cm^{-1}, o que sinaliza a alteração dessas ligações (Azizi *et al*., 2024; Tironi *et al*., 2012).

Essa mudança estrutural é confirmada pela simplificação do espectro, onde as bandas de Si-O da argila original 1114, 1035 e 1002 cm^{-1} fundem-se em uma única absorção larga em aproximadamente 1072 cm^{-1}, característica da sílica amorfa. Da mesma forma, as vibrações de Al-O-Si em 786 e 752 cm^{-1} convertem-se em uma banda única em 805 cm^{-1}, enquanto o sinal em 532 cm^{-1} desaparece. Portanto, o perfil espectral da amostra tratada comprova a eficácia do processo térmico na obtenção de uma fase amorfa (Marques *et al*., 2025; Tironi *et al*., 2012).

5.1.2. Difração de Raios X (DRX)

A técnica de difração de raios X em pó (DRX) constitui uma ferramenta essencial na caracterização de estruturas, permitindo a obtenção de dados fundamentais sobre a pureza, o tamanho dos cristalitos, a morfologia e a identificação de fases, os quais atuam de forma complementar às análises espectroscópicas e microscópicas (Smith, 1999).

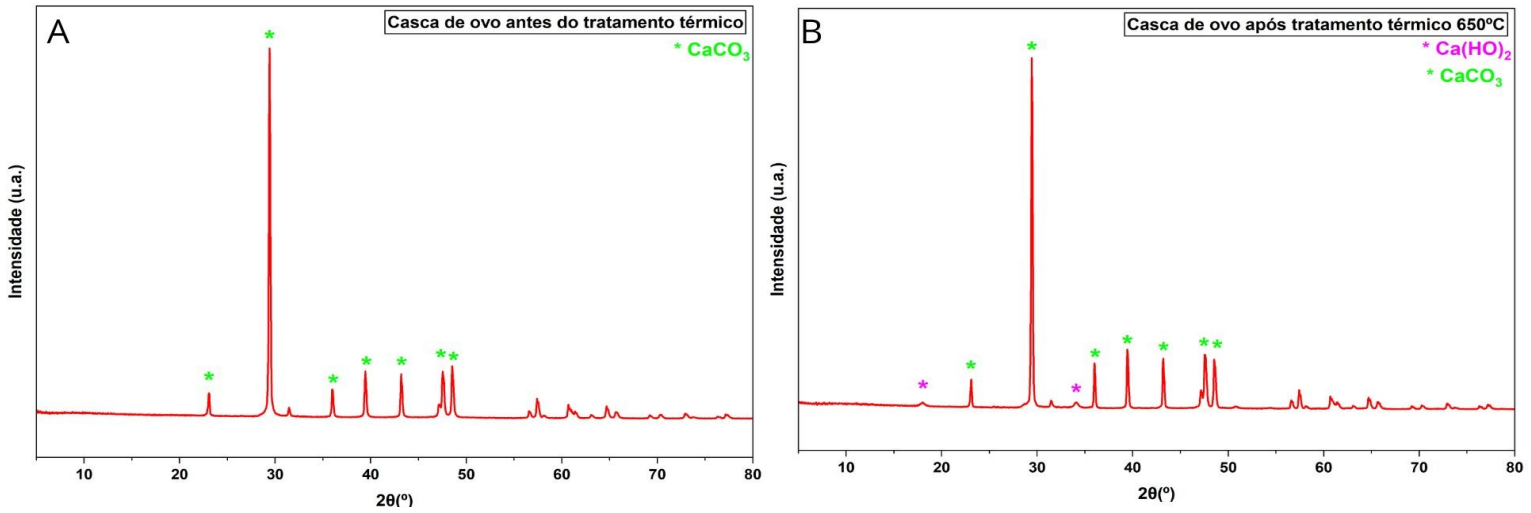
No presente estudo, a aplicação da DRX visou confirmar a mineralogia e a organização estrutural da amostra analisada. Conforme ilustrado na Figura 19, o padrão de difração obtido para as cascas de ovo antes do tratamento térmico revelou picos característicos da calcita ($CaCO_3$), que representa a fase polimórfica mais estável do carbonato de cálcio em condições de temperatura ambiente. A avaliação dos espectros confirmou a presença marcante do pico principal da calcita em $2\Theta = 29{,}58°$, o que corrobora os valores de referência estabelecidos na literatura (Kalaycı *et al*., 2025; Yadav *et al*., 2021).

A análise detalhada dos dados experimentais permitiu mapear uma série de reflexões que confirmam o predomínio da fase calcita. Os resultados indicaram picos de difração em ângulos 2θ específicos, como 23,0°; 29,4°; 31,5°; 36,0°; 39,4°; 43,2°; 47,6°; 48,6°; 56,6°; 57,5°, correspondentes aos índices de Miller (012), (104), (006), (110), (113), (202), (018), (116), (211) e (122), respectivamente (Diningsih e Rohmawati, 2022). Esse perfil de difração demonstrou uma excelente correspondência com os padrões da calcita, apresentando picos em posições e intensidades relativas altamente compatíveis com os dados cristalográficos de referência (May; Nyein; Kha, 2019; Adaikalam *et al*., 2024).

A casca de ovo após tratamento térmico a 650ºC e observado dois picos entre 18,1º e 34,17º dados como foi reportado por (Pinto, 2021), e que Segundo os autores (Mansir *et al*., 2018), essa calcinação incompleta não apenas resulta em menor atividade catalítica, mas também favorece o "envenenamento" dos sítios ativos superficiais, que se tornam suscetíveis à quimissorção de umidade e dióxido de carbono atmosférico, gerando fases de hidróxido $Ca(OH)_2$ e carbonato ($CaCO_3$)

Ademais, a calcita foi o único mineral detectado na matriz da casca de ovo. Essa dominância da fase cristalina foi corroborada por dados de EDS, que apontaram uma prevalência de cálcio (Ca) na ordem de 54% a 55% em peso para ambos os materiais. Tal consistência entre a composição química elementar e a estrutura cristalina ratifica a pureza da fase identificada, em conformidade com as evidências reportadas em estudos recentes sobre o tema (Bin Hammad; Al-asheh; Abouleish, 2025).

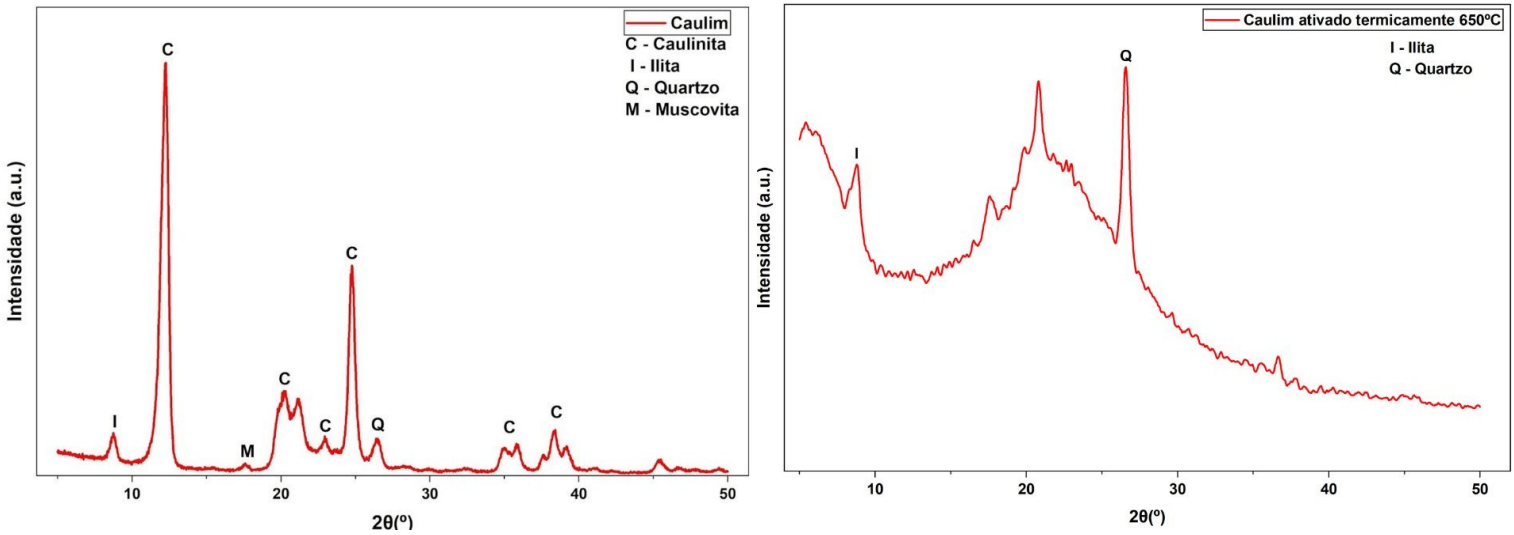
Figura 19 - a) Difratograma casca de ovo após lavagem, secagem, trituração e peneiramento; b) Após tratamento térmico a 650ºC



Fonte: Própria (2026)

Na Figura 20, observam-se os difratogramas do caulim antes e após o tratamento térmico a 650 °C.

Figura 20 - Difratograma do caulim e do caulim termicamente ativado



Fonte: Própria (2026)

A análise mineralógica conduzida por Difração de Raios X (DRX) revelou que a matriz do material é predominantemente constituída por caulinita, o que é confirmado pela presença de picos de elevada magnitude em aproximadamente 12,20º e 24,79º. De acordo com os autores (Kumar e Lingfa, 2020), a identificação dessa fase mineral majoritária é complementada por uma sucessão de reflexões secundárias distribuídas nos intervalos de 20,19º a 22,93º e de 34,95º a 38,44º. Além do componente principal, o perfil difratométrico indicou a presença de constituintes minoritários e impurezas típicas de depósitos residuais ou sedimentares, como a ilita, evidenciada por um sinal de baixa intensidade em ângulos inferiores a 10º, e a muscovita, detectada por um pico residual próximo a 17º.

A presença de quartzo também foi confirmada por meio de um pico de intensidade moderada-baixa situado logo após a segunda reflexão característica da caulinita, em torno de 26º. Tais resultados corroboram as observações dos autores (Dewi *et al*., 2018), que associam esses picos de menor expressão à existência de fases secundárias comuns em formações geológicas de argilas cauliníticas. Portanto, a composição mineralógica obtida por DRX demonstra que, embora o quartzo, a ilita e a muscovita ocorram em menores proporções, a

caulinita permanece como a fase cristalina predominante em todas as amostras analisadas, mantendo a consistência com a literatura (Sánchez-Palencia *et al*., 2022).

A análise do difratograma de raios X referente ao caulim sujeito a ativação térmica a 650 °C permite observar alterações significativas na estrutura mineralógica da amostra. O aspecto mais evidente no gráfico é a formação de um halo amorfo (uma elevação contínua e arredondada da linha de base) visível na região entre 20° (2θ) (Marques *et al*., 2025). Simultaneamente, constata-se a ausência das reflexões agudas características da caulinita, que tipicamente surgiriam em ângulos como 2θ =12,20º e 24,79º. Este padrão difratométrico evidencia a transformação da fase cristalina da argila. De acordo com a literatura, a exposição do caulim a patamares térmicos na ordem dos 600 °C a 700 °C promove o processo de desidroxilação da caulinita. Tal como demonstrado por Ilić *et al*. (2010), este tratamento térmico leva ao colapso da estrutura lamelar original da argila e ao consequente desaparecimento dos seus picos de difração típicos, resultando na formação de uma fase amorfa e desordenada conhecida como metacaulino.

Por outro lado, o espectro revela que nem todos os minerais foram afetados por este processo de calcinação. É possível identificar com clareza os picos bem definidos de ilita e quartzo. A permanência destas reflexões de forma nítida indica que a estrutura cristalina destas impurezas ou fases secundárias não foi degradada. Os minerais como a ilita e o quartzo possuem uma resistência térmica notavelmente superior à da caulinita, preservando a sua integridade estrutural e mantendo os seus picos inalterados no difratograma, mesmo quando sujeitos a temperaturas de calcinação que atingem os 650 °C (Vizcayno *et al*., 2010; Ilić *et al*., 2010).

5.1.3. Análise Termogravimétrica (TGA)

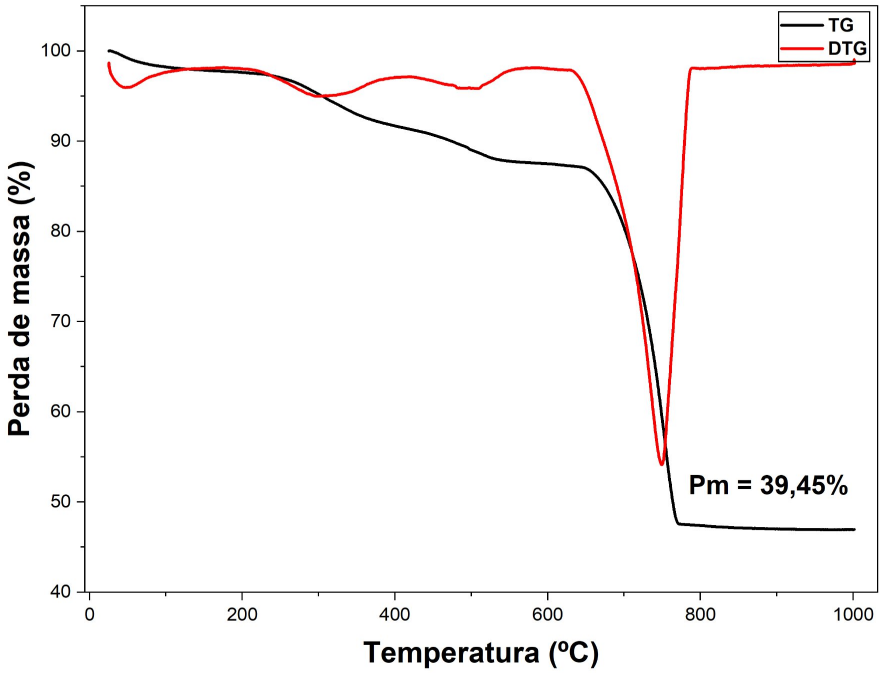
A caracterização térmica da amostra de casca de ovo foi realizada por meio de análise termogravimétrica (TGA) e sua respectiva derivada (DTG), ferramentas fundamentais para a determinação de parâmetros cinéticos em reações no estado sólido. Conforme destacado pelos autores (Bondarchuk *et al*., 2023; Kissinger *et al*., 1957), o experimento de TGA monitora a conversão da massa em função da temperatura ou do tempo sob uma taxa de aquecimento controlada. Esta metodologia de análise térmica diferencia-se de outras técnicas por permitir a medição precisa da perda de massa, apresentando vantagens operacionais como a rapidez no ensaio e a versatilidade no manejo de diferentes quantidades de amostra (Mansa e Zou, 2021). No contexto da biomassa e resíduos biogênicos, a TGA tornou-se um procedimento padrão

para a avaliação da estabilidade térmica. Os autores (Martí *et al*., 2023) ressaltam que o perfil das curvas termogravimétricas é sensível a fatores como a composição química, a granulometria das partículas, a atmosfera do ensaio e a rampa de aquecimento, exigindo uma análise criteriosa para a interpretação correta dos fenômenos observados.

Os resultados obtidos para a casca de ovo revelam um comportamento térmico segmentado em etapas distintas, conforme ilustrado na Figura 21. Inicialmente, observa-se uma primeira região de perda de massa entre 25 e 200 °C, caracterizada por um patamar de estabilidade relativa com redução de apenas 1-2% do peso inicial. Este evento é atribuído primordialmente à evaporação da umidade adsorvida e, conforme sugerido pelos autores (Rajoriya *et al.*, 2021), pode envolver a desidratação de traços de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Em uma segunda etapa, verificou-se uma perda gradual de massa entre 3% e 5% no intervalo de 250 a 550 °C, fenômeno este associado à decomposição térmica da matriz orgânica e das membranas proteicas intrínsecas à estrutura da casca (Kristl *et al*., 2019).

A partir dos 500 °C, a perda de massa entra em uma fase de transição que se estende até 650 °C, sinalizando o início da decomposição térmica dos carbonatos. O evento principal ocorre na quarta região, entre 650 e 800 °C, onde se observa uma queda acentuada na curva de massa. Este comportamento decorre da conversão acelerada do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) em óxido de cálcio (CaO), acompanhada pela liberação estequiométrica de dióxido de carbono (CO_2). Acima de 800 °C, a amostra atinge a estabilidade térmica completa, resultando em um resíduo sólido final composto majoritariamente por cal (Hachem; Hfaith; Mihoubi, 2024; Kaur e Singh, 2023). A massa residual final de 39,45% observada neste estudo apresenta excelente concordância com o rendimento teórico esperado para a calcinação de fontes de carbonato de cálcio, alinhando-se aos resultados reportados na literatura pelos autores (Engin; Demirtaş; Eken, 2006 e Silva *et al*., 2026).

Figura 21 – Curvas termoanalíticas da casca de ovo após lavagem, secagem, trituração e peneiramento.



Fonte: Própria (2026)

O comportamento termogravimétrico do caulim, é ilustrado na Figura 22, evidencia transformações físico-químicas distintas em função do gradiente térmico aplicado. Inicialmente, observou-se uma redução de massa de 0,67% pelo aquecimento até 150°C, fenômeno atribuído à dessorção de água higroscópica que foi fisicamente adsorvida. Na sequência, entre 200°C e 450°C, ocorre um evento de pré-desidratação que culmina na reorganização estrutural das camadas octaédricas, manifestando-se por um sutil efeito endotérmico em aproximadamente 300°C. Tais transições preliminares decorrem da volatilização da água de adesão simultaneamente à expansão térmica da matriz mineral. No intervalo compreendido entre 450 °C e 650°C, o perfil térmico é dominado por um expressivo evento endotérmico associado à desidroxilação da caulinita e consequente conversão em metacaulim (Arab; Araújo; Pejon, 2015). Este estágio é responsável por uma perda de massa total de 15,43%. É imperativo notar que o declínio ponderal mais acentuado ocorre na faixa de 400°C a 700 °C, refletindo o colapso da rede cristalina dos aluminossilicatos. No caso do caulim in natura, o decréscimo de 15,43% em peso aproxima-se do valor teórico, sendo a discrepância

residual creditada à presença de impurezas, notadamente o quartzo, conforme reportado em estudos análogos (Deju *et al*., 2021; Khan *et al*., 2017).

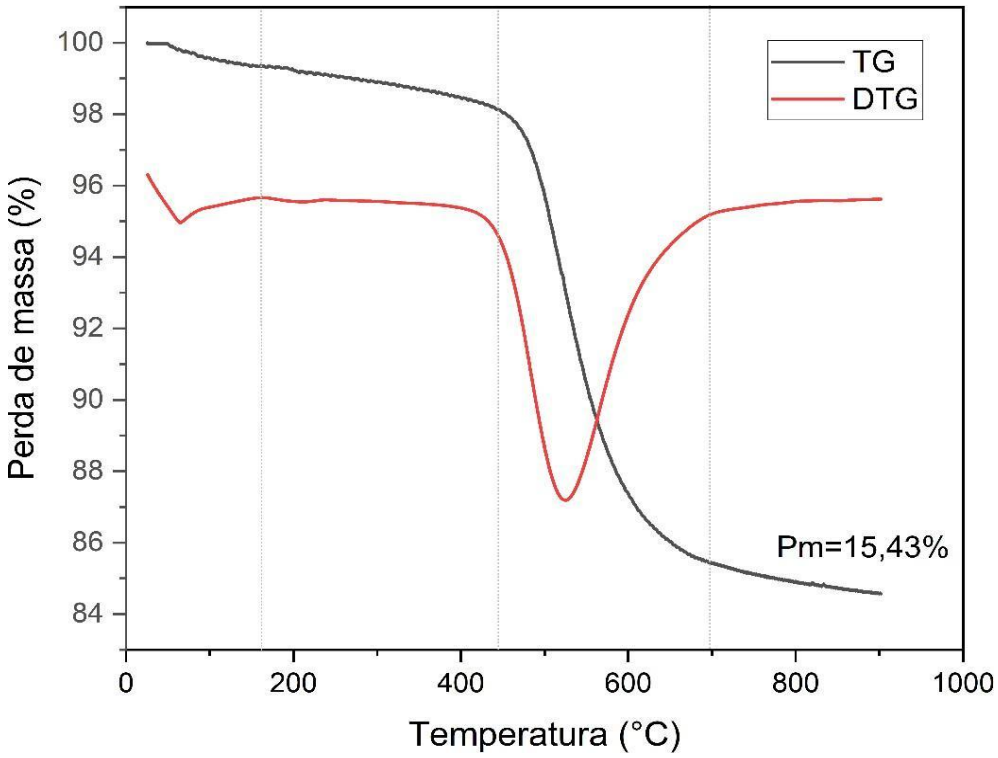
A formação da fase amorfa (metacaulim) é governada pela cinética de reação e parâmetros como temperatura, tempo de residência e razão estequiométrica Si/Al. Consequentemente, a temperatura de pico na curva de DTA referente à desidroxilação é sensível a variáveis intrínsecas e extrínsecas como granulometria do pó, compactação e orientação da amostra, fluxo de gases, pressão parcial de vapor d'água e taxa de aquecimento (Janković *et al*., 2018).

Do ponto de vista estrutural, a metacaulinização é impulsionada pela expulsão de grupamentos hidroxila intercalados nas folhas octaédricas, resultando em um arranjo atômico desordenado. A etapa final deste intervalo consiste na remoção de hidroxilas residuais da estrutura desorganizada do metacaulim (Ptacek *et al*., 2010), seguindo a estequiometria fundamental apresentada na Equação 12:

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \xrightarrow{450^{\circ}C-700^{\circ}C} Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 2H_2O(g) \qquad (12)$$

A Equação 12 descreve a principal reação química envolvida na produção do metacaulim. De acordo com os autores (Zemenová *et al.*, 2014), a transformação do caulim por meio do calor depende de vários fatores: a velocidade do aquecimento, o tamanho da amostra utilizada e a pressão do vapor de água no ambiente. Além disso, o estado de organização das partículas da argila e a presença de impurezas na matéria-prima original também influenciam diretamente esse processo.

Figura 22 – Curvas termoanalíticas do caulim.



Fonte: Própria (2026)

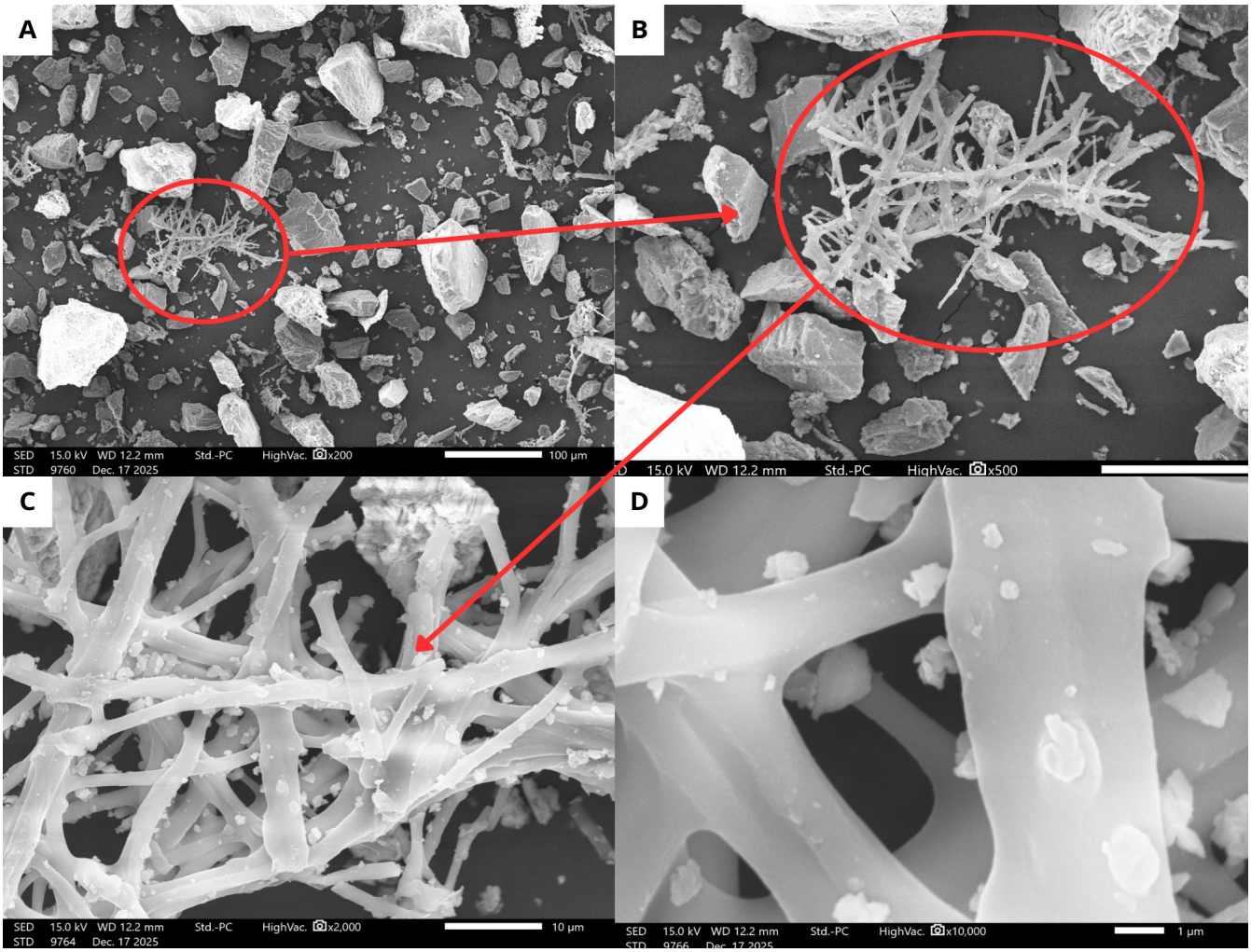
5.1.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) - Raios X por Dispersão de Energia (EDS)

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada para investigar as características morfológicas da superfície da casca de ovo. Os resultados apontam para uma estrutura de natureza porosa, constituída por partículas assimétricas e de dimensões variadas (Abdel-Khalek *et al*., 2017). A Figura 23 ilustra uma rede entrelaçada que atua como o elo de toda a arquitetura da casca, na qual também se nota a presença de poros distribuídos por toda a extensão da amostra. Em termos de composição química, esse emaranhado estrutural é formado majoritariamente por Cálcio, acompanhado por elementos secundários como Carbono, Oxigênio e Magnésio (Santos, 2019).

As imagens de microscopia da casca do ovo são exibidas nas Figuras 23a a 23d, sob diferentes fatores de aumento (x200, x500, x1000 e x2000). Através da marcação em vermelho na menor ampliação, é possível identificar uma morfologia de aspecto filamentoso que, ao ser examinada nos aumentos superiores, revela-se como uma complexa estrutura de múltiplos filamentos. O arranjo das camadas indica que as membranas associadas são subdivididas em

membrana limitante (ML), membrana interna (MI) e membrana externa (ME). Estruturalmente, esses filamentos podem se apresentar como feixes individuais, embora agrupamentos e torções também sejam frequentemente observados. O desenvolvimento dessas estruturas ocorre de maneira horizontal e com distribuição aleatória, contudo, elas mantêm-se paralelas entre si e em posição perpendicular em relação à espessura total da casca. A fusão desses filamentos em seus pontos de junção dá origem a lâminas filamentosas. Consequentemente, o entrelaçamento de todo esse conjunto compõe uma malha de padrão assimétrico, caracterizada pela presença de pequenos interstícios de formato triangular. Essa conformação representa a parte orgânica da casca do ovo, desempenha um papel fundamental, viabiliza as trocas gasosas necessárias para o interior do ovo e, simultaneamente, atua como uma barreira física contra a invasão de agentes patogênicos (Fathi e RahmatAbadi, 2024; Rodrigues e Ávila, 2017).

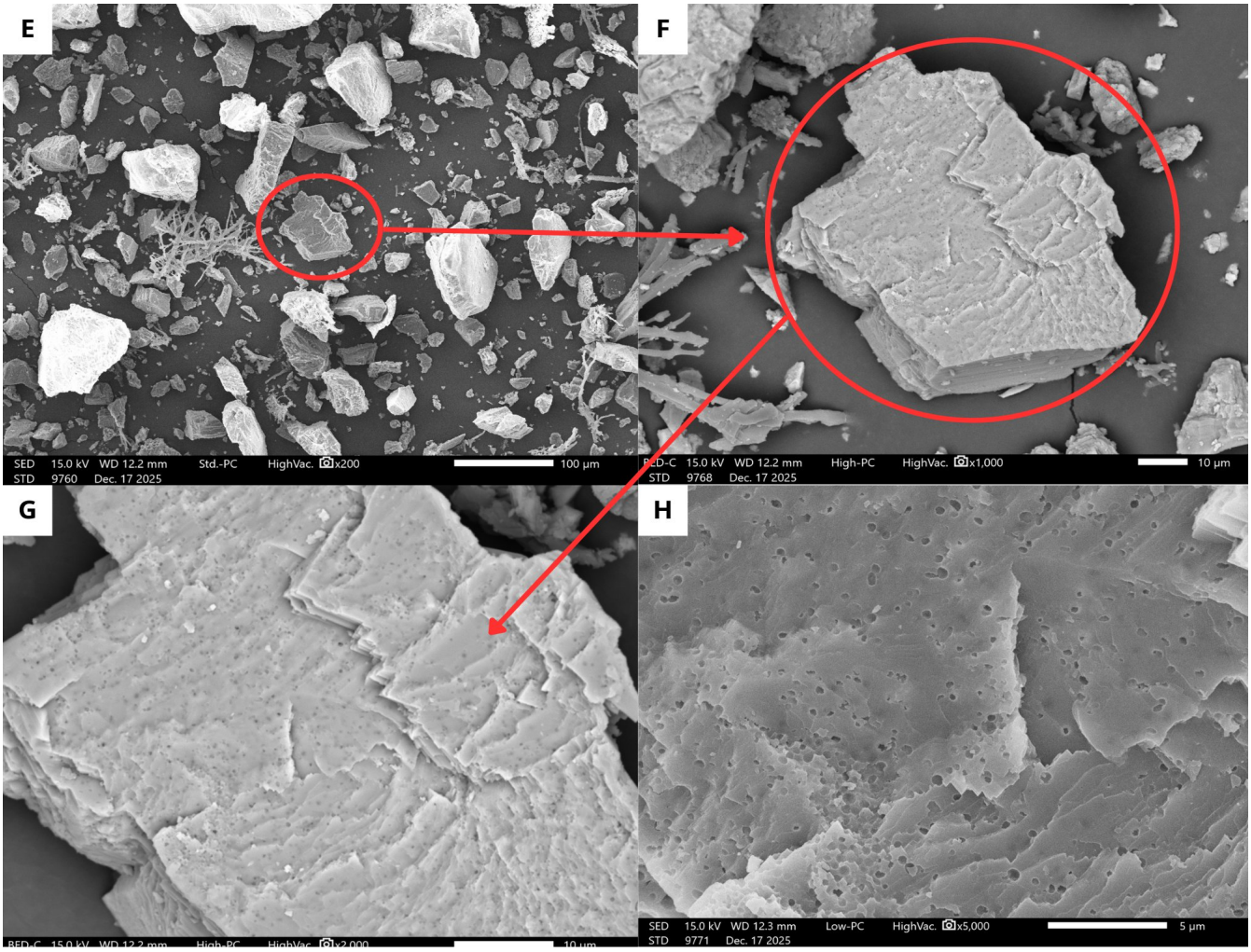
Figura 23 - Análise microscópica da casca de ovo nas ampliações x200, x500, x2.000 e x10.000



Fonte: Própria (2026)

A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do pó da casca de ovo, ilustrada na Figura 24a, revela partículas com dimensões e formatos bastante heterogêneos, além da evidente formação de aglomerados. Tais características morfológicas indicam que essas estruturas provavelmente correspondem a cristais de calcita (Júnior *et al.*, 2016). Adicionalmente, as Figuras 24e a 24h evidenciam uma superfície de aspecto rugoso, irregular e com elevada granularidade, marcada por uma notável porosidade. Biologicamente, esses poros têm a função de mediar as trocas gasosas do ovo com o meio externo. Contudo, do ponto de vista da aplicação do material, essa arquitetura porosa apresenta uma grande vantagem, ampliando consideravelmente a área de contato do sólido, otimizando a sua capacidade e eficiência na adsorção de compostos poluentes (Zonato *et al*., 2022).

Figura 24 - Imagens da casca de ovo nas ampliações x200, x1.000, x2.000 e x15.000.

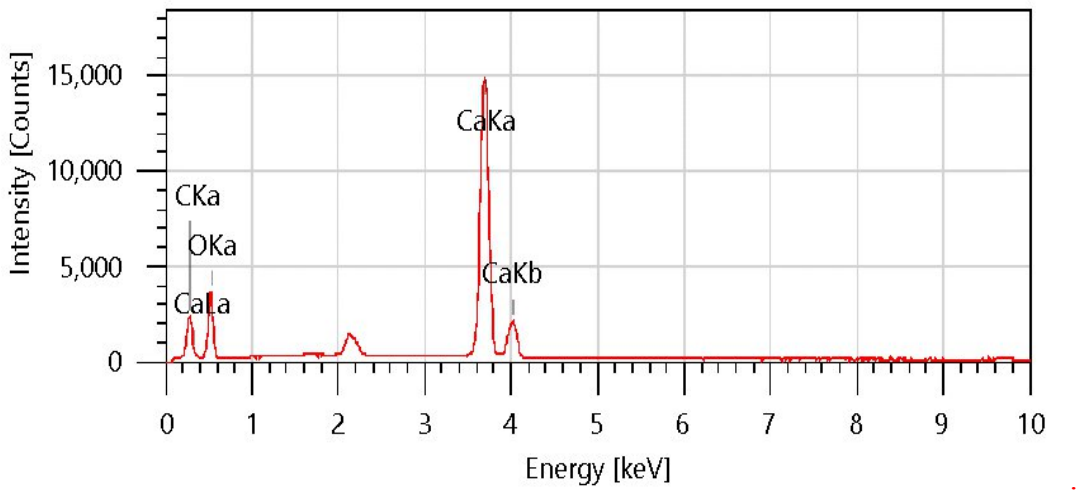


Fonte: Própria (2026)

A representação convencional de um perfil espectral de EDS correlaciona a densidade de fótons de raios X detectados (contagens) com a energia radiante, mensurada em quiloeletronvolts (keV). Tais espectros exibem picos discretos e estreitos, os quais correspondem às energias características dos fótons emitidos pelos elementos constituintes da amostra. Frequentemente, um único analito manifesta múltiplos picos, resultantes das transições eletrônicas entre diferentes camadas orbitais. Conforme postulado pelos autores (Shirley e Jarochowska, 2022), a exatidão na identificação elementar é intrinsecamente dependente tanto da natureza das emissões captadas quanto da estatística de contagem acumulada durante o processo de aquisição.

Os dados espectroscópicos obtidos apresentam plena convergência com os referenciais teóricos estabelecidos pelos autores (Gamal *et al*., 2025) acerca da caracterização química da casca de ovo. Os resultados, sintetizados na Figura 25, detalham a composição elementar do material. No eixo das abscissas, que delimita a energia em keV, as emissões detectadas alinham-se precisamente aos valores teóricos: o cálcio (Ca) exibe seu pico primário (Kα) em 3,7 keV, seguido pelas assinaturas do oxigênio (O) em 0,5 keV e do carbono (C) em 0,2 keV. No eixo das ordenadas, a magnitude da intensidade sinalética superando a marca de 14.000 contagens para o Ca ratifica a hegemonia deste metal em termos de abundância relativa e densidade atômica na superfície analisada. Esta configuração química corrobora a natureza mineral da casca de ovo aviária, constituída predominantemente por carbonato de cálcio ($CaCO_3$) em frações que variam de 94% a 97% (Pagonis *et al*., 2024). A proeminência do sinal CaKα funciona como o descritor principal da presença de calcita, sendo o diagnóstico consolidado pelas transições secundárias CaKβ 4,0 keV e CaLα em 0,3 keV, que asseguram a identificação inequívoca do elemento.

Figura 25 - Espectro de energia dispersiva de raios-X (EDS) da amostra de casca de ovo.



Fonte: Própria (2026)

A composição elementar da casca de ovo, determinada via Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), encontra-se discriminada na Tabela 9. Conforme ilustrado na Figura 25, a matriz biogênica é constituída fundamentalmente por cálcio (Ca), oxigênio (O) e carbono (C), além de traços de outros elementos. O perfil espectral reafirma o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) como a fase mineral predominante no material. Complementarmente, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelou-se um método analítico eficaz no esclarecimento da topografia do biomaterial. As micrografias obtidas por-MEV evidenciam um biomaterial caracterizado por uma arquitetura superficial porosa, irregular e aglomerada, apresentando natureza não adesiva (Borhade *et al*., 2017).

A técnica de EDS foi empregada para a quantificação e identificação dos constituintes químicos das amostras sintetizadas. Os dados experimentais revelaram que a massa do analito é composta majoritariamente por Cálcio (54,78 %), seguido por Oxigênio (35,76 %) e Carbono (9,46 %). Tais índices de concentração demonstram elevada exatidão e convergência com a literatura especializada sobre cascas de ovos galináceos, cuja rede cristalina é dominada pelo $CaCO_3$. A hegemonia do cálcio, associada às proporções significativas de oxigênio e carbono, corrobora a organização estrutural típica da calcita (Mousavi *et al*., 2025; Bingöl *et al*., 2016). Os parâmetros referentes à constituição elementar da casca de ovo encontram-se compilados na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição Elementar (EDS)

Elemento	Linha	Massa%	Atômico%
C	**K**	**9,46±0,04**	**17,94±0,07**
O	**K**	**35,76±0,20**	**50,92±0,28**
Ca	**K**	**54,78±0,15**	**31,14±0,09**
Total		**100**	**100**

Fonte: Própria (2026)

5.1.5. Ângulo de Contato

O ângulo de contato de uma gota de água é geralmente usado para estimar a resistência do filme à água líquida, refletindo as características hidrofóbicas ou hidrofílicas da superfície dos filmes (Wu *et al*., 2020). A avaliação da molhabilidade do pó da casca de ovo foi realizada por meio da medição do ângulo de contato, utilizando o método da gota séssil. Conforme observado na análise gerada pelo software, o valor do ângulo de contato obtido foi de 104,7°. Como este valor é superior a 90°, constata-se que a superfície formada pelo pó da casca de ovo exibe um caráter hidrofóbico.

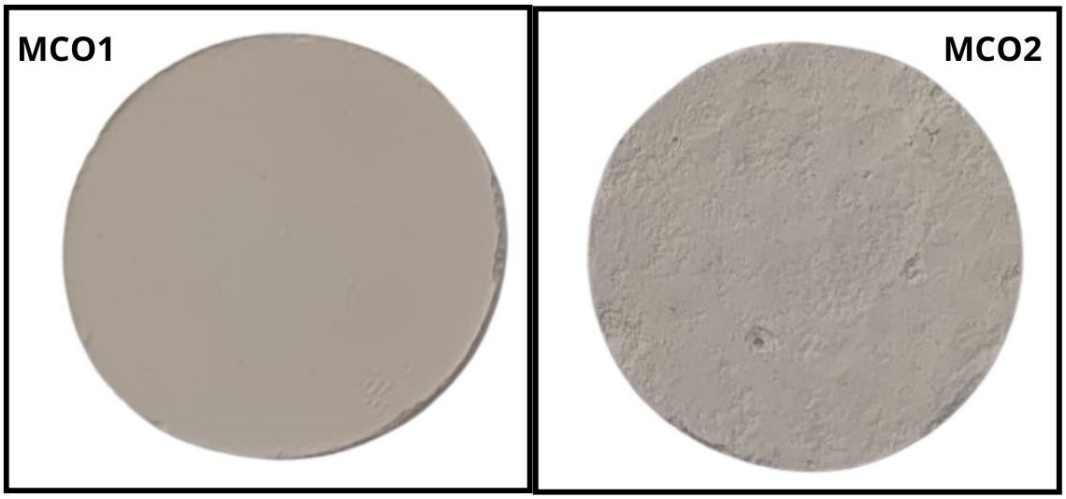
A análise de molhabilidade da carboximetilcelulose (CMC) demonstrou comportamento característico de material altamente hidrofílico, apresentando ângulo de contato igual a 0°. Observou-se, durante o ensaio, o espalhamento instantâneo da gota de água sobre a superfície do material, evidenciando molhabilidade completa da matriz.

5.2.CARACTERÍSTICAS DAS MEMBRANAS

A Tabela 7 detalha as diferentes proporções de caulim, casca de ovo, amido e carboximetilcelulose (CMC) utilizadas na elaboração das membranas cerâmicas planas (Vide Materiais e Métodos).

O estudo investigou duas formulações principais: a primeira contendo 5% de amido e a segunda com substituição deste componente por CMC, cuja incorporação teve como objetivo favorecer o escoamento do fluido durante o processo de filtração. O aspecto visual das peças obtidas após a sinterização a 650 °C é apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Membranas cerâmicas não sinterizadas



Fonte: Própria (2026).

As amostras denominadas MCO1 (Casca de ovo/Amido/Caulim) e MCO2 (Casca de ovo/CMC/Caulim) apresentaram comportamentos visivelmente distintos após o processo de moldagem e secagem, conforme observado na Figura 26.

A aplicação do amido de milho como aditivo vai além da facilidade de moldagem. Conforme apontado pelos autores (Santos *et al*., 2008), o uso desse componente em membranas de óxido de alumínio e argilas similares contribui para elevar a resistência mecânica do produto final.

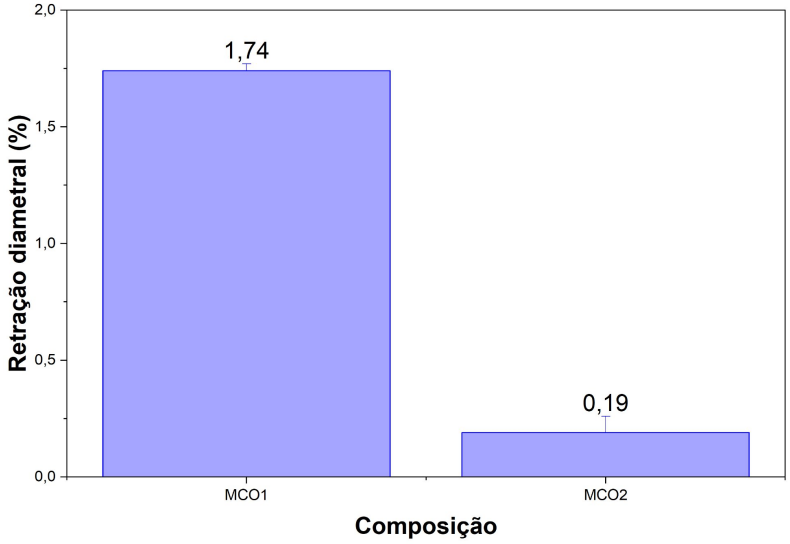
Na prática, isso explica por que a membrana MCO1 apresentou um aspecto visual mais íntegro e uniforme em comparação à amostra com CMC. Enquanto o amido ajuda a estruturar a peça e a fechar levemente a superfície durante a compactação, ele garante que a membrana suporte o manuseio e o processo térmico, resultando em um material robusto.

A carboximetilcelulose, comumente denominada CMC, consiste em um polímero derivado da celulose e se destaca como um dos modificadores químicos mais versáteis atualmente. Sua estrutura é classificada como um éter de celulose, sintetizado a partir da interação entre a celulose e o ácido cloroacético em condições de alcalinidade. Esse processo químico é responsável por inserir grupos funcionais carboximetil na estrutura molecular, o que confere ao polímero uma carga elétrica aniônica e a capacidade fundamental de se dissolver em meio aquoso (Santos *et al*., 2026). Devido a essa solubilidade e às suas propriedades de superfície, a CMC apresenta uma hidrofilicidade que pode ser ajustada, além de boa resistência mecânica e características viscosas que favorecem seu uso em larga escala. Conforme evidenciado pelos autores (Rahman *et al*., 2021), sua aplicação abrange desde as indústrias de alimentos, papel e têxtil até áreas mais complexas, como a engenharia biomédica e o tratamento de águas residuais, sendo uma matéria-prima abundante e de baixo custo de produção.

Segundo a literatura (Feddersen e Thorp, 1993; Nóbrega *et al*., 2019), a CMC possui uma habilidade ímpar de manter a estabilidade de suspensões minerais e evitar a perda excessiva de fluido em estruturas porosas. Essa característica justifica a textura mais irregular observada na amostra MCO2. A CMC organiza as partículas de modo a criar uma rede interna de poros mais conectados. Embora visualmente a superfície pareça menos uniforme que a do amido, essa estrutura é tecnicamente superior para a melhoria do fluxo de líquidos ou seja ela trabalha como um agente estratégico para abrir o caminho do filtrado, tornando o dispositivo mais eficiente em termos de permeabilidade.

A Figura 27 apresenta a retração linear do diâmetro em cada membrana.

Figura 27 – Retração linear do diâmetro das membranas cerâmicas.



Fonte: Própria (2026).

A redução de tamanho das peças durante o aquecimento geralmente ocorre por causa da perda de material ou pela reorganização de suas partículas internas, fenômenos provocados por evaporação, queima ou decomposição térmica (Bahrouni *et al*., 2025). Conforme ilustrado na Figura 27, nota-se que, após o processo de sinterização, as membranas tiveram encolhimentos médios muito baixos, sendo de 1,74 % para a amostra MCO1 e de apenas 0,19 % para a MCO2. Essas mudanças de tamanho, percebidas ao comparar as peças antes e depois da sinterização, representam principalmente a eliminação das partes orgânicas que foram consumidas pelo aquecimento. O fato das amostras terem encolhido tão pouco é um ótimo sinal, pois demonstra que esses materiais são bastante estáveis estruturalmente quando submetidos a altas temperaturas (Guimarães *et al*., 2023).

A análise conjunta da retração diametral e da porosidade aparente revela diferenças substanciais nos mecanismos de consolidação das membranas cerâmicas conforme o aditivo orgânico utilizado. A membrana formulada com amido (MCO1) apresentou uma maior retração

após a sinterização, o que se refletiu diretamente na sua menor porosidade aparente (41,46%). O amido, ao sofrer combustão, gera vazios em sua estrutura. Contudo, ao longo do tratamento térmico, estes espaços livres funcionaram como facilitadores para o rearranjo e aproximação das partículas inorgânicas. Quando a peça vai a mufla, o calor faz com que os materiais menos resistentes ao fogo comecem a derreter, criando uma fase líquida no seu interior. Conforme a temperatura aumenta, a quantidade desse líquido cresce e ele fica mais fluido, perdendo a sua viscosidade inicial. Essa fluidez permite que o líquido escorra com bastante facilidade para dentro dos poros devido ao que chamamos de forças de capilaridade. Ao se espalhar por esses espaços vazios, esse líquido aproxima as partículas sólidas umas das outras. É justamente essa aproximação contínua que reduz a quantidade de poros e causa o encolhimento, ou retração, final da peça, conforme aponta o autor (Medeiros, 2010).

Em contrapartida, a formulação com CMC (MCO2) exibiu uma estabilidade dimensional assinalável, com uma retração mínima, resultando numa porosidade aparente significativamente superior (50,42%). O CMC, devido à sua natureza de aglutinante polimérico, estabelece uma rede estrutural rígida que estabiliza a conformação inicial da peça (Maleš *et al*., 2020).

Estudar a superfície de uma membrana é uma tarefa bastante prática quando se utiliza o método do ângulo de contato. Essa técnica atua de forma independente e consegue revelar, de uma única vez, diversas características do material. Entre esses detalhes estão a tensão, a carga da camada externa, as forças de interação presentes e o nível de afinidade com líquidos, sendo que o valor numérico obtido nessa análise é o que define o estado e o comportamento da superfície (Ismail *et al*., 2022). Como exemplo prático, quando o ângulo formado entre o material e uma gota de água pura é inferior a 45 graus, a superfície é classificada como hidrofílica, o que indica uma forte atração pela água (Lee *et al*., 2007).

A análise de molhabilidade das membranas cerâmicas MCO1 (composta por caulim, casca de ovo e amido) e MCO2 (caulim, casca de ovo e CMC) revelou um ângulo de contato de 0° para ambas as formulações. Durante o ensaio, observou-se que a gota de água depositada na superfície das membranas foi imediata e completamente absorvida, classificando ambos os materiais finais como superhidrofílicos (Drelich *et al*., 2011). Além da composição química, o fator determinante para o ângulo de contato nulo é a morfologia superficial das membranas.

Os valores de porosidade, diâmetro médio dos poros, absorção de água, resistência mecânica, fluxo de água pura das membranas de baixo custo (Composição da membrana MCO1: 90%Caulim/5%casca de ovo/5% amido) e MCO2: (90%Caulim/5%casca de ovo/5% Carboximetilcelulose) estão resumidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades das membranas cerâmicas: diâmetro dos poros, porosidade, absorção de água, resistência mecânica e fluxo de água.

Membrana $T_{sintering}$ (°C)	**Diâmetro de poro (µm)**	**Porosidade (%)**	**Absorção de água (%)**	**Resistência Mecânica (MPa)**	**Fluxo de água pura ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)**	**Ref.**
MCO1/650	0,360	41,47	22,64	20,94	141,48	Este trabalho
MCO2/650	0,560	50,42	30,09	11,19	492,28	Este trabalho
M2/650	0,495	41,48	31,47	10,68	469,93	Marques *et al*., 2025
M3/650	0,622	40,99	33,22	6,18	732,89	Marques *et al*., 2025

Fonte: Própria (2026).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 10 é possível observar que a incorporação de diferentes agentes orgânicos formadores de poros exerceu influência decisiva sobre a microestrutura e o desempenho hidráulico das membranas cerâmicas de baixo custo produzidas a 650 °C. A membrana MCO1/650, apresentou diâmetro médio de poro de 0,360 µm, porosidade de 41,47 %, absorção de água de 22,64 % e uma notável resistência mecânica de 20,94 MPa, resultando em fluxo de água pura de 141,48 $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$. Esses valores indicam uma estrutura relativamente menos aberta, sugerindo que a decomposição térmica do amido gerou poros menores e possivelmente menos interconectados. Contudo, essa menor geração de vazios foi fundamental para garantir uma consolidação estrutural superior da matriz, refletindo diretamente no alto valor de resistência à flexão obtido. Segundo os autores (Mulder, 1996; Baker, 2012) em membranas porosas a permeabilidade hidráulica depende não apenas da porosidade global, mas sobretudo da conectividade interna e da distribuição de tamanho de poros, fatores que controlam diretamente a resistência ao escoamento através da membrana. Assim, mesmo apresentando porosidade intermediária, a MCO1 revelou fluxo significativamente inferior, indicando elevada resistência hidráulica interna.

Na membrana MCO2/650, em que o amido foi substituído por carboximetilcelulose (CMC), observou-se aumento expressivo no diâmetro médio de poro (0,560 μm), porosidade (50,42 %) e absorção de água (30,09 %), acompanhado de fluxo de água pura de 492,28 $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$. Como consequência direta do aumento da fração de vazios na microestrutura, a resistência mecânica da membrana MCO2 apresentou redução, atingindo o valor de 11,19 MPa. Esse comportamento evidencia que a CMC favoreceu a formação de uma rede porosa mais aberta e com maior interligação entre canais permeáveis. A CMC apresenta elevada capacidade de retenção de água durante o processamento e decomposição térmica relativamente homogênea, o que tende a produzir vazios mais uniformemente distribuídos após a sinterização. Conforme descrito pelo autor (Baker, 2012) materiais orgânicos hidrossolúveis empregados como porogênicos frequentemente promovem maior uniformidade estrutural, reduzindo heterogeneidades locais e favorecendo a formação de poros conectados, condição essencial para aumento do fluxo permeado.

A comparação com as membranas M2/650 e M3/650 reforça a importância do diâmetro de poro como parâmetro dominante na permeabilidade hidráulica. Embora a membrana M2/650 apresente porosidade praticamente idêntica à MCO1 (41,48 %), seu diâmetro médio de poro superior (0,495 μm) elevou o fluxo para 469,93 $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, exibindo uma resistência mecânica de 10,68 Mpa. Enquanto a membrana M3/650 apresentou o maior diâmetro de poro (0,622 μm) e o maior fluxo de água pura (732,89 $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$), sua resistência mecânica sofreu a queda mais drástica, registrando o menor valor do estudo comparativo (6,18 MPa), mesmo mantendo porosidade semelhante às demais (40,99 %). Esse comportamento é coerente com a teoria clássica de transporte em meios porosos, na qual o fluxo convectivo é altamente sensível ao raio hidráulico dos poros, de forma que pequenas ampliações no tamanho médio produzem aumentos significativos na permeabilidade ao passo que fragilizam a estrutura de suporte. Segundo os autores (Ismail e David, 2001) em membranas cerâmicas de microfiltração, a permeabilidade está fortemente associada à presença de poros abertos de maior diâmetro e baixa tortuosidade estrutural.

Os resultados de absorção de água acompanham a tendência observada para porosidade e diâmetro de poro. A MCO1 apresentou o menor valor (22,64 %), enquanto M3 alcançou valor de 33,22 %, indicando maior volume de poros acessíveis à penetração de água. Esse parâmetro está diretamente relacionado à porosidade aberta, sendo frequentemente utilizado como indicador indireto da acessibilidade hidráulica da matriz cerâmica. De acordo com os autores (Othman *et al*., 2015) valores elevados de absorção refletem maior conectividade entre poros e menor grau de densificação da estrutura, especialmente em temperaturas de sinterização

moderadas como 650 °C, nas quais os mecanismos de fechamento de poros ainda não são predominantes.

Além disso, a presença de casca de ovo como aditivo mineral provavelmente contribuiu para a geração de poros adicionais devido à decomposição do carbonato de cálcio presente nesse resíduo, liberando CO_2 durante o aquecimento e favorecendo a formação de vazios internos. Esse efeito tem sido relatado em membranas cerâmicas sustentáveis contendo resíduos ricos em carbonato, nos quais a decomposição térmica atua simultaneamente como agente formador de poros e modificador microestrutural. Assim, os resultados confirmam que a combinação entre Caulim, casca de ovo e CMC mostrou-se particularmente promissora para obtenção de membranas de maior desempenho hidráulico. É importante ressaltar que, embora a incorporação de CMC tenha gerado um decréscimo mecânico na MCO2 (11,19 MPa) frente à formulação com amido (20,94 MPa), a resistência alcançada pela MCO2 ainda se manteve superior às membranas M2 e M3 da literatura, atestando a robustez física da matriz desenvolvida para potencial aplicação em processos de microfiltração de baixo custo.

5.2.1 Difração de Raios X (DRX)

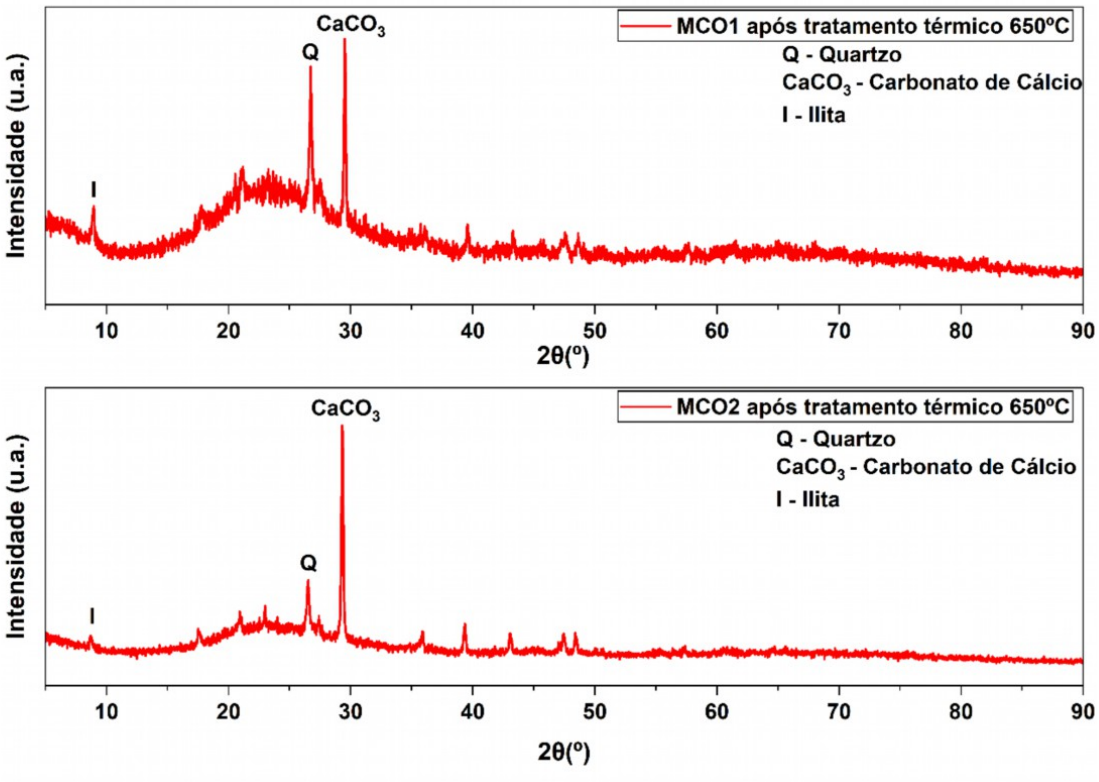
A Figura 28 apresenta os difratogramas de raios X (DRX) das membranas cerâmicas MCO1 e MCO2 após o tratamento térmico a 650 °C. A análise comparativa dos espectros revela que a substituição do agente porogênico não alterou significativamente a composição mineralógica final das membranas, uma vez que os picos cristalinos identificados são idênticos em ambos os casos. A partir dos difratogramas, é possível visualizar a formação de Metacaulinita a ausência dos picos característicos da caulinita geralmente encontrados em 2θ próximos a 12° e 25°. Isso ocorre porque a temperatura de sinterização de 650 °C é suficiente para promover a desidroxilação completa da argila, transformando a caulinita em metacaulinita. Essa fase é evidenciada pelo uma elevação da linha base do gráfico na região entre 20° e 30° (Jarvis et al., 2022). Os picos referentes ao Quartzo (Q) e à Ilita (I) permanecem bem definidos. Estes minerais são impurezas naturais comumente associadas ao caulim e possuem estabilidade térmica superior a 650°C, não sofrendo alterações de fase nesta temperatura.

O difratograma apresenta picos de alta intensidade referentes ao Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$), proveniente da adição de casca de ovo. Na literatura, a decomposição térmica do $CaCO_3$ em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2) ocorre tipicamente em temperaturas mais elevadas. A forte presença dessa fase cristalina confirma que, a 650 °C, a

casca de ovo permanece estruturalmente estável e ainda não reagiu termicamente com a matriz aluminossilicatada para formar novas fases como anortita (Avelino et al., 2023; Ivanović et al., 2023).

O amido e o CMC não apresentam picos cristalinos nos difratogramas pós-sinterização. Os resultados obtidos são consistentes com a literatura, que demonstra que, a 650 °C, ocorre a degradação térmica e a volatilização dos compostos orgânicos, levando à sua completa remoção, cumprindo sua função exclusiva de agentes porogênicos ou aglomerantes, deixando apenas porosidade na matriz cerâmica sem interferir nas fases minerais resultantes (Sahnoun e Baklouti., 2013; Churam *et al*., 2024; Rasid *et al*., 2021).

Figura 28 - Difratogramas de raios X das amostras MCO1 (superior) e MCO2 (inferior) após tratamento térmico a 650°C.

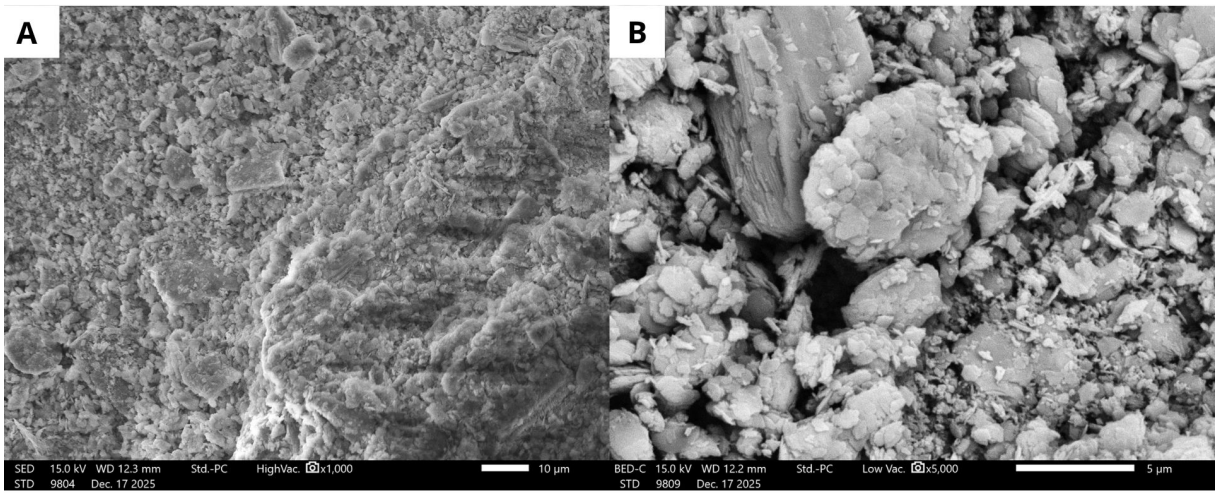


Fonte: Própria (2026)

5.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

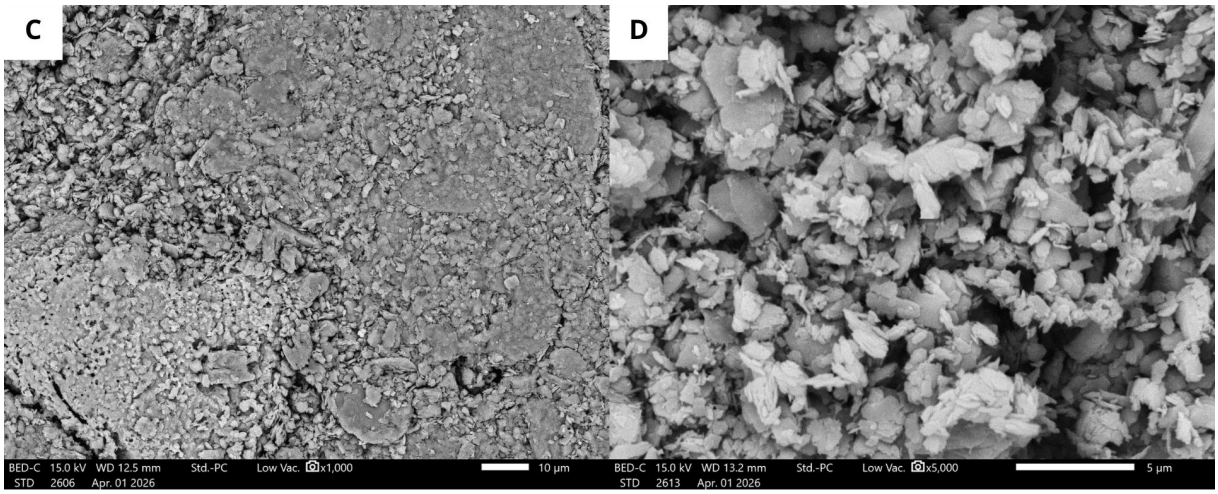
A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma ferramenta essencial para analisar a textura e a morfologia de membranas (Rani e Kumar, 2022). As Figuras 29 e 30 exibem micrografias das amostras com ampliações de 1.000x e 5.000x, revelando matrizes estruturais íntegras, homogêneas e isentas de defeitos (Alqaheem e Alomair, 2020). Compreender essa morfologia é crucial, pois a eficiência dos processos de separação depende diretamente da distribuição, do tamanho e da conectividade dos poros, características que governam o fluxo de permeado e a capacidade de retenção mecânica do material.

Figura 29 - Micrografias de MEV da membrana MCO1 com ampliações de 1.000x (A) e 5.000x (B).



Fonte: Própria (2026)

Figura 30 - Micrografias de MEV da membrana MCO2 com ampliações de 1.000x (C) e 5.000x (D).



Fonte: Própria (2026)

Na membrana MCO1 (Figura 29, Imagens A e B), observa-se uma estrutura porosa consolidada. Essa configuração é fruto da matriz de caulim associada à degradação térmica da matéria orgânica da casca de ovo e do amido. O amido entra em combustão durante o tratamento térmico, originando cavidades no interior da membrana cerâmica. Embora os poros apresentem uma distribuição característica, as micrografias também revelam regiões de maior densificação na matriz, o que resulta em uma menor interconectividade entre os canais formados (Lorente-Ayza et al., 2015).

Por outro lado, a Figura 30 detalha a membrana MCO2, formulada com 90 % de caulim, 5 % de casca de ovo e 5 % de carboximetilcelulose (CMC), após passar por sinterização a 650 °C. Em menor ampliação (Figura 30C), nota-se uma microestrutura rugosa e heterogênea, marcada por uma rede de poros interconectados. Sob maior aumento (Figura 30D), a morfologia lamelar torna-se evidente. A preservação dessa arquitetura indica que a temperatura branda de 650 °C foi adequada para promover a transformação do caulim em metacaulim, sem atingir o ponto de vitrificação que causaria o colapso estrutural dos grãos (Obada et al., 2023).

Nessa composição, a carboximetilcelulose (CMC) atua inicialmente como aglutinante e, durante o tratamento térmico, como agente porogênico. A degradação e combustão de suas cadeias poliméricas liberam gases, deixando vazios que conferem alta porosidade à estrutura final (Han *et al*., 2013). O controle preciso dessa microestrutura é indispensável para garantir a permeabilidade hidráulica da membrana, uma propriedade fundamental para viabilizar sua aplicação futura na filtração e no tratamento de efluentes.

5.2.3 Resistência Química das Membranas

Os ensaios de resistência química são um fator fundamental para determinar as condições operacionais às quais as membranas podem ser submetidas, bem como para identificar os tipos de soluções de limpeza que podem ser aplicadas sem que haja a degradação do material (Cunha, 2017). Antes da utilização prática das membranas cerâmicas, é imprescindível compreender o seu comportamento do ponto de vista da estabilidade química. Para que fosse possível essa avaliação, foi necessário submeter as membranas a testes que simulassem as condições extremas de uso às quais elas poderiam estar expostas durante a sua vida útil (Li *et al*., 2020).

Na Tabela 11 estão apresentados os resultados de perda de massa para as membranas cerâmicas MCO1 (formulada com 5 % de amido) e MCO2 (formulada com 5 % de CMC)

quando submetidas a diferentes soluções químicas: ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH).

Tabela 11 - Perdas de massas das membranas em meio básico e ácido.

Soluções Químicas	**Perda de Massa (%)**	
	MCO1	**MCO2**
NaOH	0,46	2,12
HCl	6,22	8,33

Fonte: Própria (2026)

Analisando os resultados, observa-se que a membrana MCO1 apresentou um desempenho superior em termos de resistência química comparado com a membrana MCO2 em ambos os meios. A MCO1 obteve uma perda de massa de apenas 0,46 % em meio básico e 6,22 % em meio ácido, enquanto a MCO2 apresentou perdas mais acentuadas, da ordem de 2,12 % e 8,33 %, respectivamente. Esse resultado indica que a substituição da carboximetilcelulose (CMC) pelo o do amido na formulação da MCO1 favoreceu uma melhor consolidação estrutural da cerâmica, conferindo-lhe uma maior estabilidade e resistência ao ataque químico. Além da diferença entre as formulações, nota-se um comportamento característico de ambas as membranas, a degradação é consideravelmente menor no meio alcalino (NaOH) em comparação ao meio ácido (HCl). Este comportamento está em consonância com a literatura. Os autores (Obada et al., 2017) avaliaram a resistência à corrosão química de membranas cerâmicas e observaram uma melhor resistência à corrosão alcalina, com perdas de massa menores do que as registradas após a corrosão ácida. Segundo os autores, isso pode ser explicado pelo alto teor de álcalis presente nos compactos cerâmicos convencionais. Essa constatação assemelha-se ao comportamento de outros materiais de membrana descritos na literatura, que apresentam excelente resistência à corrosão por álcalis fortes, mas tendem a apresentar menor resistência a ácidos fortes.

Apesar de a perda de massa ser maior no meio ácido, os valores encontrados, as duas formulações das membranas, demonstram uma resistência altamente satisfatória quando comparados aos padrões de suportes de separação. Em estudos correlatos, como o dos autores (Obada et al., 2023), amostras consideradas ideais apresentaram uma perda de massa de aproximadamente 5 %, enquanto suas amostras de controle perderam cerca de 6 % após imersão em solução de HCl. Os autores concluíram que esses valores revelam uma boa resistência à

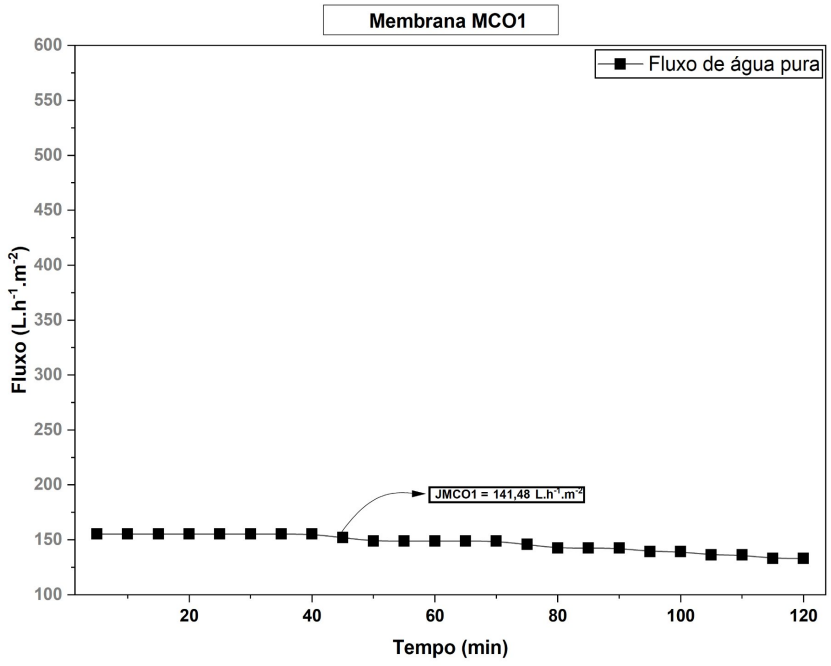
corrosão em meio ácido, o que torna as membranas promissoras para suportar ambientes agressivos.

Portanto, os resultados observados de perda de massa durante os testes sugerem que as membranas preparadas neste estudo, possuem boa estabilidade química. Elas se mostram adequadas e com potencial promissor para aplicações em meios básicos e ácidos, suportando ambientes e ciclos de limpeza quimicamente agressivos sem comprometer drasticamente sua integridade estrutural.

5.2.4 Fluxo de água pura

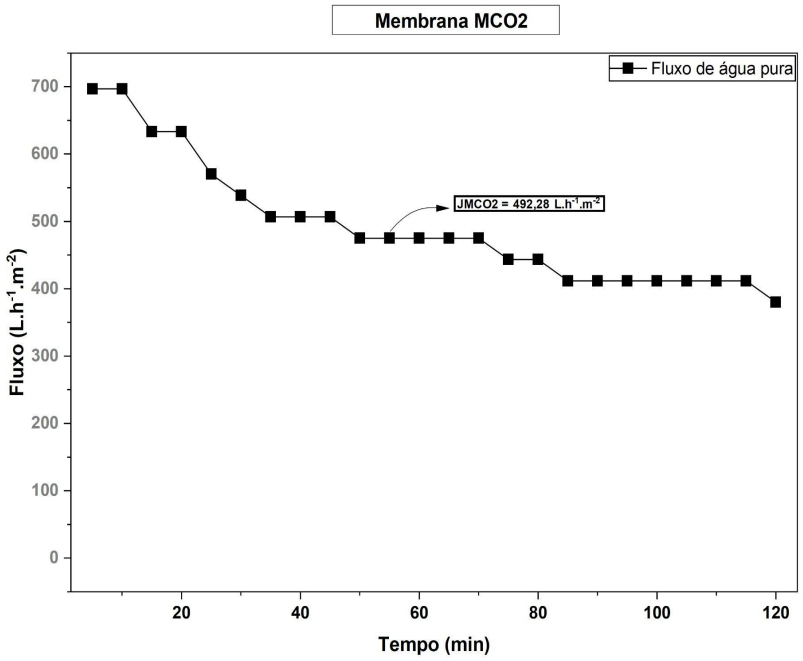
As Figuras 31 e 32, apresentam os fluxos de água pura para as membranas MCO1 e MCO2.

Figura 31 – Fluxo de água pura em função do tempo para a membrana cerâmica MCO1.



Fonte: Própria (2026).

Figura 32 – Fluxo de água pura em função do tempo para a membrana cerâmica MCO2.



Fonte: Própria (2026).

É possível definir as propriedades de uma membrana analisando sua capacidade de permeação sob variados cenários de trabalho, como mudanças na temperatura e na pressão do material de entrada. Além disso, observar o volume de líquido que atravessa a membrana serve como um método para identificar as particularidades de filtros fabricados por meio de diferentes técnicas ou parâmetros de produção (Rafe e Razavi, 2009).

Para a membrana MCO1, observa-se que o fluxo de água pura permanece praticamente constante ao longo do tempo experimental, apresentando apenas uma leve redução após aproximadamente 45 minutos de operação. Inicialmente, os valores situam-se em torno de 150 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$, mantendo-se relativamente estáveis até o final do ensaio, quando atingem valores próximos de 135 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$. Esse comportamento indica boa estabilidade hidráulica da membrana sob filtração com água pura.

A membrana MCO2 apresenta comportamento distinto, com fluxos significativamente mais elevados em relação à MCO1. O fluxo de água pura inicia próximo de 700 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$, sofrendo reduções graduais em etapas ao longo do tempo até atingir aproximadamente 380–410

$L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ no final do ensaio. Essa diminuição sugere acomodação estrutural do sistema de filtração ou aumento progressivo da resistência hidráulica.

Comparando-se ambas as membranas, verifica-se que a MCO2 apresenta desempenho hidráulico superior, com fluxos médios aproximadamente 3 a 4 vezes maiores que os observados para a MCO1. Esse resultado indica que a MCO2 possui maior permeabilidade, possivelmente associada à maior porosidade efetiva, melhor interconectividade de poros ou menor resistência ao escoamento.

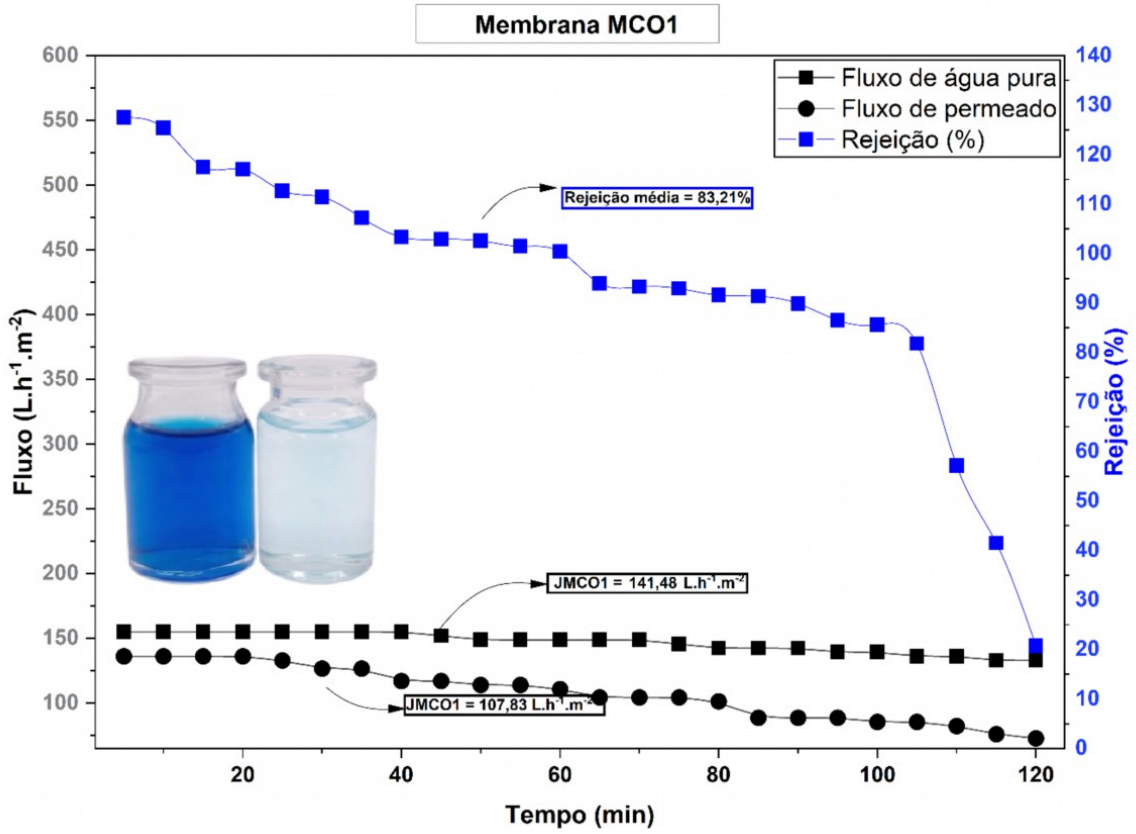
Por outro lado, a MCO1 apresenta maior estabilidade temporal, uma vez que seus fluxos variam muito pouco durante o ensaio, enquanto a MCO2 sofre reduções mais acentuadas ao longo do tempo. Isso sugere que, embora a MCO2 possua maior capacidade de transporte de fluido, ela também pode estar mais suscetível a efeitos de compactação, polarização por concentração ou reorganização do fluxo interno.

5.2.5 Tratamento do efluente têxtil

Após as análises das propriedades estruturais, as membranas cerâmicas de baixo custo foram aplicadas no sistema de separação a partir da solução de azul de metileno (50 $mg \cdot L^{-1}$) para a determinação do fluxo de permeado. Os ensaios de microfiltração foram realizados em temperatura ambiente (25 °C), sob pressão de 2 bar, ao longo de 120 minutos de operação contínua.

Os resultados experimentais referentes à filtração do azul de metileno pelas membranas cerâmicas de baixo custo estão representados graficamente nas Figuras 33 e 34.

Figura 33 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica MCO1.



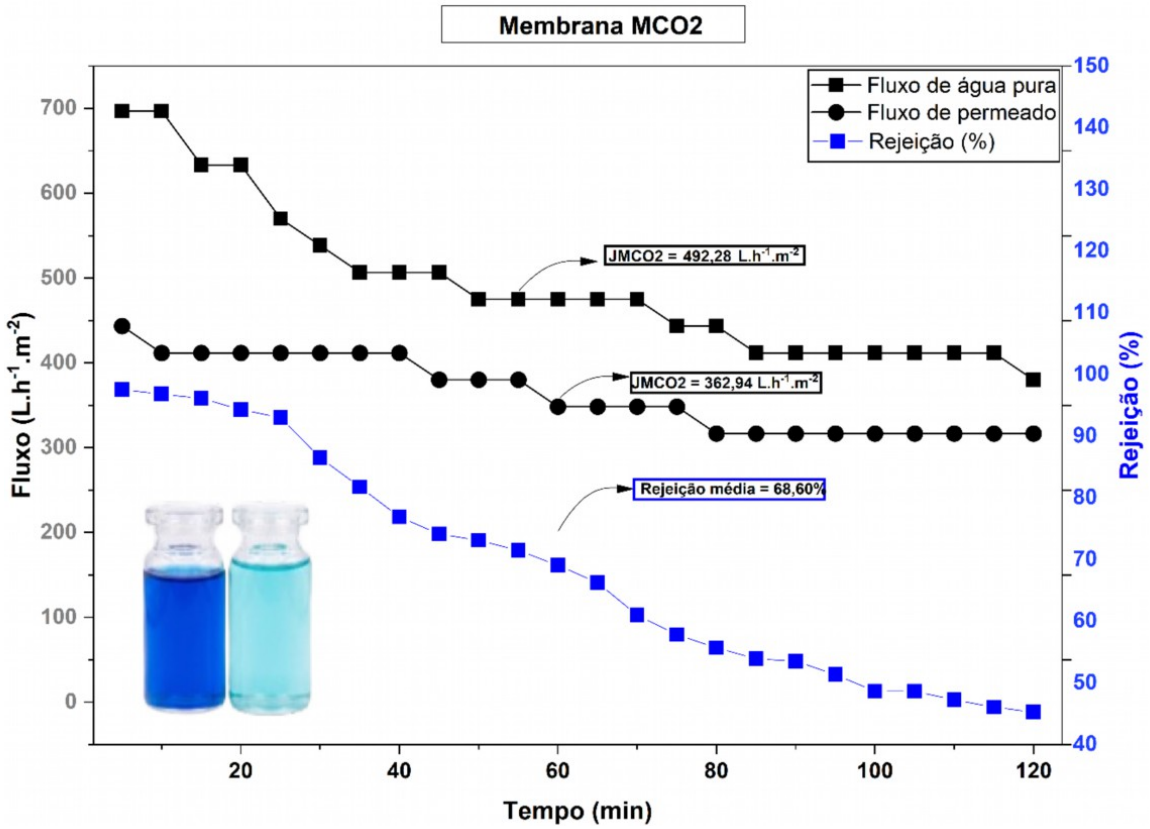
Fonte: Própria (2026).

Observa-se que, na Figura 33, o fluxo de água pura apresentou considerável estabilidade, registrando um valor médio de 141,48 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$. Em contrapartida, o fluxo de permeado exibiu um patamar inferior, com média de 107,83 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$. Essa diferença e o declínio gradual de ambas as curvas ao longo do tempo representam um comportamento característico aos sistemas de filtração. Como discutido pelos autores (Abu-Zurayk et al., 2023), o fenômeno de incrustação (fouling) é desencadeado pela deposição e pelo acúmulo indesejável de partículas, coloides e sólidos suspensos na superfície da membrana neste caso, o depósito das moléculas do corante azul de metileno, o que reduz a capacidade de remoção e a permeabilidade do sistema.

Em relação a seletividade, a membrana MCO1 obteve uma rejeição média expressiva de 83,21 %. O gráfico demonstra que a retenção do soluto inicia em patamares elevados e sofre um decréscimo contínuo e suave durante a maior parte do ensaio. Contudo, após 100 minutos de operação, nota-se uma queda brusca na curva de rejeição, atingindo valores mínimos, próximos a 20 %, ao término de 120 minutos. Esse comportamento sugere o esgotamento da

capacidade de retenção do material, que pode estar associado à saturação dos sítios ativos, ao alargamento dos poros sob pressão prolongada ou à penetração severa do soluto na matriz cerâmica (Mallah et al., 2024).

Figura 34 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica MCO2



Fonte: Própria (2026).

Na Figura 34 inicialmente a membrana MCO2 demonstra, altos fluxos, situando-se na faixa de 700 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ para água pura e atingindo aproximadamente 440 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ para o permeado nos primeiros minutos. No entanto, ambas as curvas apresentam um declínio rápido e contínuo ao longo dos 120 minutos de ensaio. Esse comportamento indica uma vulnerabilidade à incrustação mais elevada do que a observada para a MCO1. Os valores médios obtidos para a MCO2 492,28 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ (água pura) e 362,94 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ (permeado) evidenciam uma redução substancial em relação às taxas iniciais. O padrão de declínio sugere períodos de estabilização seguidos de novos aumentos na resistência à permeação, possivelmente devido à consolidação de uma camada de polarização na superfície da membrana.

Quanto à seletividade, nota-se uma redução rápida e progressiva durante todo o teste. A MCO2 exibe uma degradação linear de sua capacidade de retenção, atingindo níveis inferiores a 50 % no final do processo e resultando em uma rejeição média de 68,60 %, valor consideravelmente menor que o da MCO1. Esse padrão de perda acelerada de desempenho corrobora os dados obtidos de porosidade e de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), indicando que a matriz possui uma estrutura com poros maiores, o que permite a passagem contínua e crescente do soluto (azul de metileno).

A Tabela 12 apresenta um comparativo entre as membranas desenvolvidas e publicações recentes, visando contextualizar seus desempenhos hidráulico e separativo frente às tecnologias atuais.

Tabela 12 – Comparação das propriedades das membranas cerâmicas.

Membrana $T_{sintering}$ (°C)	**Material**	**PA (%)**	**Fluxo de permeado ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)**	**Rejeição (%)**	**Efluente**	**Ref.**
MCO1/650	Caulim, Casca de ovo e Amido	41,47	107,83	83,21	Azul de Metileno- 50mg/L	Este estudo
MCO2/650	Caulim, Casca de ovo e CMC	50,42	362,94	68,60	Azul de Metileno- 50mg/L	Este estudo
Cenosfera/700	Cenosfera e $CaCO_3$	28,22	0,136	99,61	Azul de Metileno - 10 mg/L	(Ramteke et al., 2025)
MK-900/900	Caulim , Cal e Casca de amêndoa	29,70	46,00	78,00	Azul Índigo - 25 mg/L	(Bahrouni et al., 2025)
MK-950/950	Caulim, Cal e Casca de amêndoa	27,40	35,00	92,00	Azul Índigo - 25 mg/L	(Bahrouni et al., 2025)

Fonte: Própria (2026).

A Tabela 12, evidencia uma relação direta entre a composição estrutural, as temperaturas de consolidação, permeabilidade e seletividade. Nota-se que a formulação das membranas MCO1 e MCO2 permitiu a formação de estruturas com porosidades

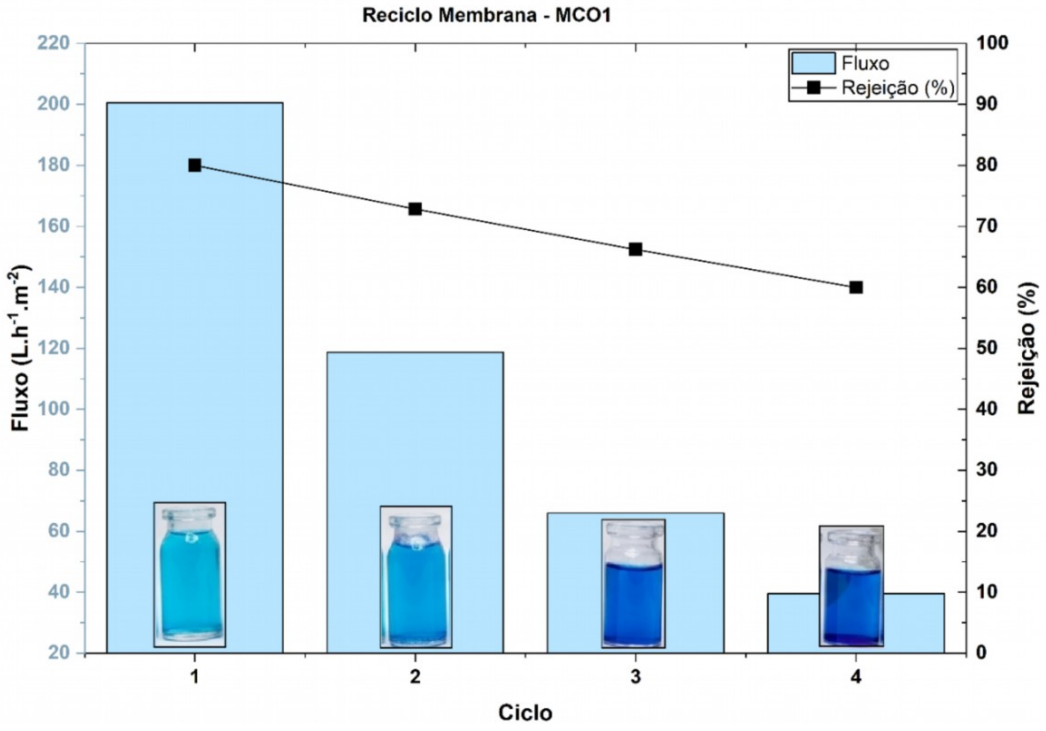
significativamente maiores (41,47 % para a MCO1 e 50,42 % para a MCO2) empregando uma temperatura de sinterização consideravelmente mais branda (650 °C). Em contrapartida, as membranas de referência exigiram um maior gasto energético na sinterização (700 a 950 °C) e, ainda assim, resultaram em matrizes mais densas, com a porosidade aparente limitando-se à faixa de 27 % a 30 %.

Esse diferencial estrutural reflete-se expressivamente no desempenho hidráulico. A elevada porosidade da membrana MCO2 promoveu o maior fluxo de permeado do estudo (362,94 $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$), contudo, resultou em uma menor taxa de rejeição (68,60 %), indicando que a expansão excessiva da rede de poros facilitou a passagem das moléculas do corante. Por outro lado, a membrana MCO1 estabeleceu um excelente compromisso operacional. Sua estrutura moderadamente porosa garantiu um fluxo (107,83 $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$) que supera amplamente as membranas da literatura testadas em concentrações similares, ao mesmo tempo em que reteve 83,21 % do Azul de Metileno, um desempenho competitivo que ultrapassa, por exemplo, a eficiência de remoção da membrana MK-900 (78,00 %).

5.2.6 Reciclabilidade

A avaliação da reciclabilidade das membranas cerâmicas foi realizada repetindo-se o procedimento ilustrado na Figura 20 em ciclos sequenciais com duração de 60 minutos cada. Ao término de cada ciclo, mensurou-se o volume do permeado para a determinação do fluxo, além de proceder-se à coleta de alíquotas para a quantificação da concentração via espectroscopia no UV-Vis. Os perfis de fluxo e de rejeição obtidos para a membrana MCO1 ao longo de 4 ciclos operacionais, juntamente com o aspecto visual do permeado em cada etapa, estão apresentados na Figura 35.

Figura- 35 Fluxo e rejeição do corante azul de metileno para a membrana cerâmica MCO1



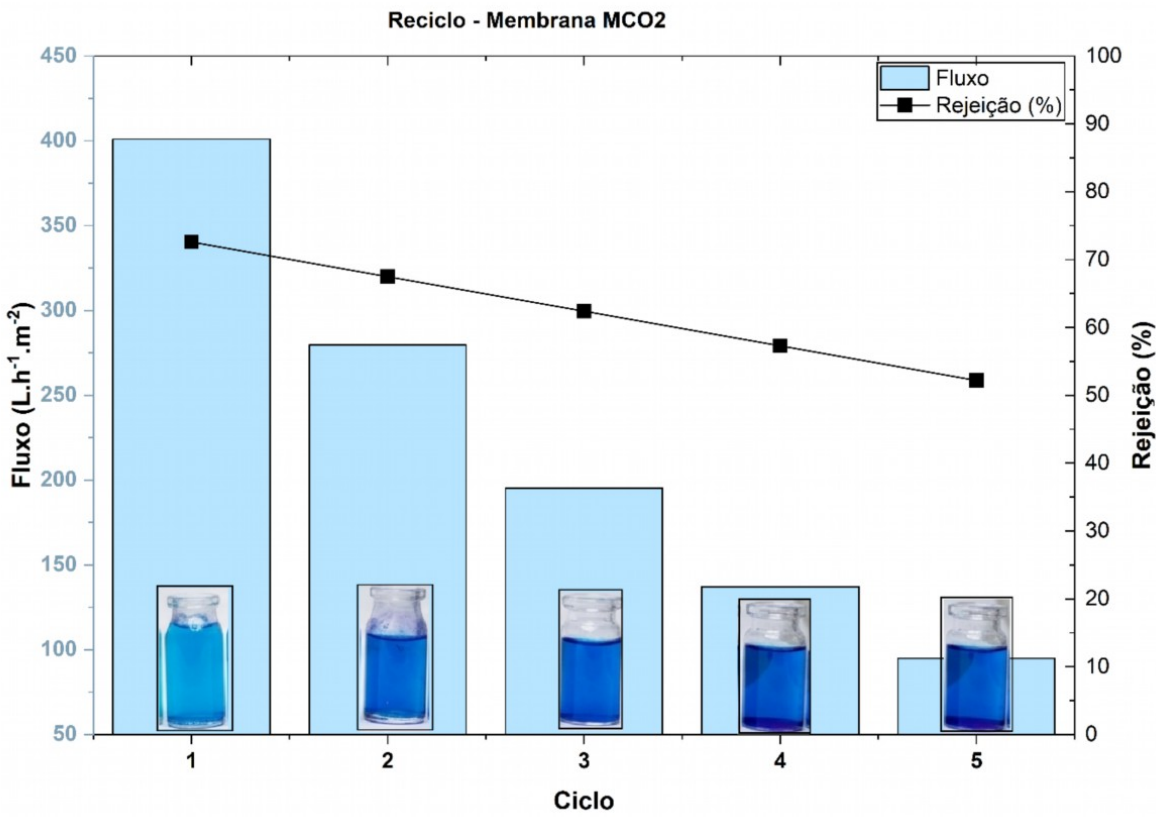
Fonte: Própria (2026).

O estudo da capacidade de reúso da membrana MCO1 foi conduzido ao longo de quatro ciclos sucessivos de filtração utilizando o efluente contendo o corante azul de metileno. Conforme apresentado na Figura 35, a MCO1 exibiu um fluxo permeado inicial de aproximadamente 200 $L.h^{-1}.m^{-2}$. No entanto, um decréscimo acentuado na permeabilidade foi registrado logo no segundo ciclo operacional, com o fluxo reduzindo para cerca de 118 $L.h^{-1}.m^{-2}$. Nos ciclos subsequentes (3º e 4º), a redução prosseguiu de forma mais gradual, atingindo valores próximos a 66 $L.h^{-1}.m^{-2}$ e 40 $L.h^{-1}.m^{-2}$, respectivamente. Esse

comportamento de declínio acentuado é característico do fenômeno de incrustração (*fouling*), no qual o bloqueio progressivo dos poros obstruiu a passagem do fluido. Paralelamente, a taxa de rejeição inicial da MCO1 foi de 80 %, sofrendo uma redução linear ao longo dos ensaios, decaindo para 72,84 % no segundo ciclo, 66,20 % no terceiro e finalizando o quarto ciclo com uma eficiência de retendo de 60 %. Essa perda gradual na capacidade de separação é corroborada pela característica visual dos frascos de permeado inseridos no gráfico, nos quais se observa o aumento progressivo da intensidade da coloração azul a cada ciclo.

O comportamento de reciclabilidade da membrana MCO2, evidenciando as variações de fluxo e rejeição ao longo de cinco ciclos operacionais, está ilustrado na Figura 36.

Figura- 36 Fluxo e rejeição do corante azul de metileno para a membrana cerâmica MCO2.



Fonte: Própria (2026).

Para a membrana MCO2, a avaliação de reciclabilidade foi estendida por cinco ciclos consecutivos de filtração sob as mesmas condições operacionais. Os resultados dispostos na Figura 36 indicam que a MCO2 apresentou um elevado fluxo inicial, alcançando a marca de 400 L. $h^{-1}.m^{-2}$. Contudo, a variação do fluxo seguiu uma tendência descendente semelhante à

observada na formulação anterior, registrando aproximadamente 280 L. $h^{-1}.m^{-2}$ no segundo ciclo, 195 L. $h^{-1}.m^{-2}$ no terceiro, 138 L. $h^{-1}.m^{-2}$ no quarto e finalizando o quinto ciclo operacional com cerca de 95 L. $h^{-1}.m^{-2}$. No que tange à eficiência de separação, a MCO2 iniciou o processo com uma taxa de rejeição de 72,60 % no primeiro ciclo. A capacidade de retenção declinou de maneira constante nas etapas subsequentes, apresentando valores de 67,50 %, 62,40 % e 57,30 %, até atingir 52,2 % de rejeição ao término do quinto ciclo. O gradiente visual de coloração nas alíquotas coletadas também confirma o aumento da passagem do corante para o permeado com o decorrer dos ciclos.

Ao confrontar o desempenho de ambas as matrizes cerâmicas, evidenciam-se distinções significativas provocadas pelas diferentes características microestruturais de cada formulação. A membrana MCO2 demonstrou uma permeabilidade nitidamente superior, mantendo, mesmo em seu quinto ciclo de uso (95 L. $h^{-1}.m^{-2}$), um fluxo próximo ao apresentado pela MCO1 logo no seu segundo ciclo (118 L. $h^{-1}.m^{-2}$). Esse comportamento indica que a estrutura interna da MCO2 possui uma porosidade mais aberta ou com maior interconectividade de canais vazios.

Por outro lado, essa maior permeabilidade da MCO2 resultou em um decréscimo na capacidade de retenção do azul de metileno (72 % inicial) quando comparada à MCO1, que alcançou 80 % de rejeição no ciclo de abertura devido a uma provável distribuição de poros menores e mais seletivos. Apesar das diferenças de magnitude nos valores de fluxo e retenção, o mecanismo de saturação ocorreu de forma análoga em ambos os materiais.

6. ESTIMATIVA PRELIMINAR DE CUSTOS

Para que uma tecnologia possa ser aplicada na indústria, ela precisa atender a dois requisitos fundamentais: ser eficaz na prática e financeiramente vantajosa. Segundo o autor (Carmo, 2021), diversas pesquisas têm confirmado que a fabricação de filtros cerâmicos mais acessíveis é tecnicamente possível. Nesse contexto, os autores (Suresh *et al*., 2016) reforçam que as despesas de produção são determinantes para o sucesso do projeto, devendo-se calcular com rigor os gastos com insumos básicos, eletricidade e maquinário.

Para a estimativa dos custos associados ao caulim, à carboximetilcelulose (CMC) e ao amido, foram realizadas consultas de preços em portais eletrônicos especializados. No caso da casca de ovo, não foi atribuído valor econômico, tendo em vista que o material foi obtido por

meio de doações provenientes de descartes domésticos. Ressalta-se que, embora todos os insumos empregados nesta pesquisa tenham sido disponibilizados gratuitamente ao LABNOV, adotaram-se como referência as cotações de mercado, com o objetivo de tornar a estimativa de custos mais representativa de condições reais de produção e potencialmente aplicável como parâmetro comparativo em outros contextos produtivos.

As Tabelas 13 a 16 detalham a análise dos gastos estimados com os insumos necessários para a fabricação de membranas cerâmicas.

Tabela 13 – Estimativas de custos das matérias-primas das membranas cerâmicas de baixo custo (MCO1).

Matéria-prima	**Valor da matéria-prima (kg)**
Casca de Ovo	-
Caulim	37,01
Amido	29,15
Custo total da matéria-prima (R$)	66,16

Fonte: Própria (2026).

Tabela 14 – Estimativas de custos das matérias-primas das membranas cerâmicas de baixo custo (MCO2).

Matéria-prima	**Valor da matéria-prima (kg)**
Casca de Ovo	-
Caulim	37,01
Carboximetilcelulose (CMC)	70,00
Custo total da matéria-prima (R$)	107,01

Fonte: Própria (2026).

Cada lote de produção é composto por uma massa total de 100 gramas. Como as membranas cerâmicas detalhadas neste trabalho possuem formulações distintas conforme indicado na Tabela 7, os cálculos foram ajustados proporcionalmente para cada mistura, com os resultados consolidados na Tabela 15.

Tabela 15 – Custos de produção por lote e valor individual das membranas cerâmicas.

Membranas	**Valor por batelada (100 g)**	**Valor por unidade (3,5 g)**
MCO1	3,47	0,1214
MCO2	3,68	0,1288

Fonte: Própria (2026).

Os gastos com insumos para a fabricação das membranas oscilaram entre R$3,47 e R$3,68 por lote de 28 unidades, o que representa um valor individual entre R$0,11 e R$0,13.

A estimativa das despesas energéticas para a produção está detalhada na Tabela 14, considerando as etapas de moagem, secagem e sinterização. O cálculo do gasto elétrico foi realizado por meio da Equação 13:

$$C = T \cdot P \cdot t \qquad \textbf{(13)}$$

Em que:

- C: custo da energia consumida (R$);
- T: tarifa de consumo sem impostos (R$/kWh);
- P: potência do equipamento (kW);
- t: tempo de operação (horas).
-

Ao analisar os custos, as despesas com materiais e o consumo elétrico foram tratados de forma isolada. Conforme apontado por Santos *et al*. (2026), essa separação facilita a visualização de quais fatores possuem maior impacto no custo final de fabricação.

Tabela 16 – Previsão dos gastos com energia elétrica para a produção de membranas cerâmicas econômicas.

Equipamento	Potência (Kw/h)	Tempo de uso (h)	**Tarifa (R$/Kw/h)**	**Custo Energetico (R$)**
Liquidificador	0,55	0,30	0,588	0,097
Estufa	0,82	24	0,588	11,57
Mufla	2,5	8	0,588	11,76
Moinho de bolas	0,15	2	0,588	0,176
Custo total energético (R$)				23,61

Fonte: Própria (2026).

O preparo de 28 unidades demanda um investimento energético de R$23,61, o que equivale a um custo individual de R$0,85. Somando-se as despesas com insumos aos gastos de energia nos processos de moagem, secagem e sinterização, o valor total por lote variou entre R$ 27,08 e R$ 27,29, resultando em um custo de fabricação por membrana entre R$ 0,96 e R$ 0,98.

Historicamente, o uso de matérias-primas tradicionais, como alumina, zircônia e titânia, aliado ao elevado consumo elétrico na sinterização, gera custos de produção elevados. Segundo os autores (DeFriend *et al*., 2003) e (Yoshino *et al*., 2005), esse cenário limita a viabilidade das membranas cerâmicas convencionais a sistemas de pequena escala, dificultando sua expansão industrial.

Para viabilizar o tratamento de água em grandes volumes, cresce o interesse em desenvolver membranas econômicas utilizando recursos naturais e resíduos. O grande desafio dessa abordagem é criar estruturas que apresentem uma porosidade microscópica eficiente para reter poluentes, mas que preservem a resistência mecânica e um bom fluxo de passagem. Diversas pesquisas têm explorado materiais como argilas, cinzas e minerais brutos para alcançar esse equilíbrio. Nesses casos, a microestrutura, a durabilidade e a capacidade de filtração de membranas feitas com insumos menos puros podem ser otimizadas pelo uso de aditivos, como agentes porogênicos e ligantes. Além disso, a escolha de técnicas de

processamento e tratamentos térmicos adequados é fundamental para garantir tanto a eficácia do filtro quanto a redução dos custos operacionais do sistema (Abdullayev *et al.*, 2019).

7. CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram que a utilização de caulim e casca de ovo como matérias-primas para a produção de membranas cerâmicas constitui uma alternativa tecnicamente viável, sustentável e de baixo custo para aplicações no tratamento de efluentes industriais. A incorporação de diferentes agentes formadores de poros influenciou significativamente a microestrutura e, consequentemente, as propriedades mecânicas e hidráulicas das membranas.

A membrana MCO1, formulada com amido, apresentou maior resistência mecânica e maior eficiência na rejeição do azul de metileno, evidenciando maior seletividade durante o processo de microfiltração. Em contrapartida, a membrana MCO2, contendo carboximetilcelulose, desenvolveu uma estrutura mais porosa e interconectada, resultando em maior fluxo de permeado, embora com redução da eficiência de rejeição, caracterizando o compromisso entre permeabilidade e seletividade inerente aos processos de separação por membranas.

Ambas as formulações apresentaram caráter hidrofílico, elevada estabilidade química e capacidade de reutilização por cinco ciclos consecutivos de filtração, preservando sua integridade estrutural, o que demonstra seu potencial para aplicações contínuas.

Os ensaios de reciclabilidade demonstraram que ambas as membranas mantiveram sua integridade estrutural durante ciclos sucessivos de microfiltração, embora tenham apresentado redução gradual do fluxo de permeado e da eficiência de rejeição devido ao fenômeno de incrustração (fouling). A membrana MCO1 destacou-se pela maior seletividade, enquanto a MCO2 apresentou maior permeabilidade, evidenciando o compromisso entre eficiência de separação e fluxo. Esses resultados confirmam o potencial das membranas para aplicações no tratamento de efluentes, desde que sejam adotadas estratégias de regeneração para minimizar os efeitos do fouling e prolongar sua vida útil operacional.

Além do desempenho satisfatório, o baixo custo de fabricação, estimado em menos de R$ 1,00 por unidade, associado ao aproveitamento de resíduos como a casca de ovo, reforça a viabilidade econômica e ambiental da tecnologia desenvolvida. Dessa forma, as membranas produzidas apresentam elevado potencial para utilização em processos de microfiltração de

efluentes, contribuindo para o desenvolvimento de materiais sustentáveis voltados ao tratamento e reúso de águas.

8. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, identificaram-se parâmetros relevantes que não fizeram parte dessa análise. Tais lacunas decorrem das delimitações inerentes ao escopo deste estudo, bem como de novos questionamentos que emergiram a partir dos resultados obtidos. Portanto, para complementar e expandir os achados documentados neste trabalho, propõem-se as seguintes diretrizes para investigações futuras:

- Testar novas formulações com maior proporção de casca de ovo, avaliando o limite que preserva a resistência estrutural da membrana.
- Aplicar as membranas no tratamento de efluentes têxteis reais, metais pesados e diferentes tipos de corantes industriais.
- Sinterizar as membranas cerâmicas em outras temperaturas para analisar a influência térmica nas propriedades finais do material.
- Investigar a influência da transformação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio na eficiência de remoção dos contaminantes.
- Incorporar outros materiais à matriz estrutural cerâmica com o objetivo de melhorar a resistência mecânica e aumentar os ciclos de reúso das membranas.
- Desenvolver protocolos de limpeza química e física para recuperar a eficiência da membrana e mitigar o fenômeno de incrustação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-KHALEK, M. A. *et al*. Exploring the adsorption behavior of cationic and anionic dyes on industrial waste shells of egg. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 1, p. 319-327, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.11.043.

ABDULLAYEV, A.; BEKHEET, M.; HANAOR, D.; GURLO, A. Materials and Applications for Low-Cost Ceramic Membranes. **Membranes**, v. 9, n. 105, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/membranes9090105

ABU-ZURAYK, R.; ALNAIRAT, N.; KHALAF, A.; IBRAHIM, A. A.; HALAWEH, G. Cellulose Acetate Membranes: Fouling Types and Antifouling Strategies—A Brief Review. **Processes**, v. 11, n. 489, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/pr11020489.

ACSELRAD, H. *et al*. **Conflitos ambientais no Brasil**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2014.

ADAIKALAM, K. *et al*. Eco-Friendly Facile Conversion of Waste Eggshells into CaO Nanoparticles for Environmental Applications. **Nanomaterials**, v. 14, 1620, 2024.

ADAMS, F. X-ray absorption and diffraction: Overview. In: WORSFOLD, P.; TOWNSHEND, A.; POOLE, C. (Ed.). **Encyclopedia of Analytical Science**. 2. ed. Elsevier, p. 365-377, 2005.

ADANE, T.; ADUGNA, A. T.; ALEMAYEHU, E. Textile Industry Effluent Treatment Techniques. **Journal of Chemistry**, 5314404, 14 p., 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023: informe anual**. Brasília: ANA, 2024.

AHMED, N. S. *et al*. Calcium carbonate nanoparticles of quail's egg shells: Synthesis and characterizations. **Journal of the Mechanical Behavior of Materials**, v. 31, n. 1, p. 1-7, 2022.

ALBERT, D. R.; TODT, M. A.; DAVIS, H. F. A low-cost quantitative absorption spectrophotometer. **Journal of Chemical Education**, v. 89, n. 11, p. 1432-1435, 2012.

ALCÂNTARA, M. R.; DALTIN, D. A química do processamento têxtil. **Química Nova**, v. 19, n. 3, p. 320-330, 1996.

ALENCAR, A. O. *et al*. Síntese e Caracterização Físico-Química do Biomaterial CaO Obtido de Cascas de Ovos de Galinha. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, e45311830807, 2022.

ALESSANDRO, F.; MACEDONIO, F. A Critical Review of Membrane Distillation Using Ceramic Membranes: Advances, and Challenges. **Materials**, v. *18*, p. 3296, 2015. DOI: https://doi.org/10.3390/ma18143296

ALMANDOZ, M. C.; PAGLIERO, C. L.; OCHOA, N. A.; MARCHESE, J. Composite ceramic membranes from natural aluminosilicates for microfiltration applications. **Ceramics International**, v. 41, n. 4, p. 5621-5633, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.144.

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, H. P. A.; RUBENS JUNIOR, A.; CAMPOS, L. F. A.; DUTRA, R. P. S.; GRILO, J. P. F.; LOUREIRO, F. J. A.; MACEDO, D. A. Structural study of mullite based ceramics derived from a mica-rich kaolin waste. **Ceramics International**, v. 43, n. 4, p. 3919-3922, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.12.035.

ANNANE, K.; LEMLIKCHI, W.; TINGRY, S. Efficiency of eggshell as a low-cost adsorbent for removal of cadmium: kinetic and isotherm studies. **Biomass Conv. Bioref.**, v. 13, p. 6163–6174, 2023.

ARAB, P. B.; ARAÚJO, T. P.; PEJON, O. J. Identification of clay minerals in mixtures subjected to differential thermal and thermogravimetry analyses and methylene blue adsorption tests. **Applied Clay Science**, v. 114, p. 133-140, 2015.

ARORA, N. K.; MISHRA, I. Sustainable development goal 6: Global Water Security. **Environmental Sustainability**, v. 5, p. 271–275, 2022.

AVELINO, F. P.; SOARES, R. A.; PENA-GARCIA, R.; LOBO, A. The Effect of the Addition of Eggshell Residues in Mass Formulation for Ceramic Coating. **Minerals**, v. 13, n. 9, 1123, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/min13091123.

AYALEW, A. A. Comparative adsorptive performance of adsorbents developed from kaolin clay and limestone for de-fluoridation of groundwater. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 44, p. 1-13, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.11.002.

AZIZ, S. *et al*. A comprehensive review of membrane-based water filtration techniques. **Appl Water Sci**, v. 14, 169, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s13201-024-02226-y

AZIZI, K. *et al*. Thermal Transformation of Kaolinite Clays: Analyzing Dehydroxylation and Amorphization for Improved Pozzolanic Performance. **International Journal of Chemical and Biochemical Sciences**, v. 25, 2024.

BABALOLA, B. M.; WILSON, L. D. Valorization of Eggshell as Renewable Materials for Sustainable Biocomposite Adsorbents—An Overview. **Journal of Composites Science**, v. 8, n. 414, 2024.

BAGGIO, G.; QADIR, M.; SMAKHTIN, V. Freshwater availability status across countries for human and ecosystem needs. **Science of The Total Environment**, v. 792, 148230, 2021.

BAHROUNI, J. *et al*. Green and Sustainable Clay Ceramic Membrane Preparation and Application to Textile Wastewater Treatment for Color Removal. **Membranes**, v. 15, 292, 2025.

BAKER, R. W. **Membrane Technology and Applications**. 3. ed. Chichester: Wiley, 2012.

BALÁŽ, M.; BOLDYREVA, E. V.; RYBIN, D.; PAVLOVIĆ, S.; RODRÍGUEZ-PADRÓN, D.; MUDRINIĆ, T.; LUQUE, R. State-of-the-Art of Eggshell Waste in Materials Science: Recent Advances in Catalysis, Pharmaceutical Applications, and Mechanochemistry. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 8, 612567, 2021. DOI: 10.3389/fbioe.2020.612567.

BANKOVIĆ–ILIĆ, I. B. *et al*. Application of nano CaO-based catalysts in biodiesel synthesis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 746-760, 2017.

BEHROOZI, A. H.; ATAABADI, M. R. Improvement in microfiltration process of oily wastewater: A comprehensive review over two decades. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 1, 104981, 2021.

BESSA, L. P. **Fabricação de fibras ocas a partir de diferentes materiais cerâmicos e aplicação no tratamento de águas oleosas.** 2022. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. DOI http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.309.

BIN HAMMAD, M.; AL-ASHEH, S.; ABOULEISH, M. Removal of Ciprofloxacin from Pharmaceutical Wastewater Using Untreated and Treated Eggshells as Biosorbents. **Water**, v. 17, 2656, 2025.

BİNGÖL, S. *et al*. Comparison between goose (Anser anser) and chicken (Gallus gallus domesticus) eggshells during embryonic development by scanning electron microscopy. **Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi**, v. 22, n. 6, 2016.

BONDARCHUK, I. *et al*. Advanced Fitting Method for the Kinetic Analysis of Thermogravimetric Data. **Molecules**, v. 28, 424, 2023.

BORHADE, A. V.; KALE, A. S. Calcined eggshell as a cost effective material for removal of dyes from aqueous solution. **Applied Water Science**, v. 7, p. 4255–4268, 2017.

CALVOSA, M. Resenha Crítica: 'Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos - Uma Introdução' e suas contribuições para a sustentabilidade e economia circular. **REUNIR Revista de Administração Contabilidade e Sustentabilidade**, *[S. l.]*, v. 15, n. 1, p. 116–121, 2025. DOI: 10.18696/reunir.v15i1.1933.

CARMO, A.; ANGÉLICA, R.; PAZ, S. Ageing characteristics related to cation exchange and interlayer spacing of some Brazilian bentonites. **Heliyon**, v. 7, n. 2, 2021.

CARMO, E. S. do *et al*. **Produção de membranas cerâmicas de baixo custo para remoção de corantes**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

CARRASCO, F. The evaluation of kinetic parameters from thermogravimetric data: comparison between established methods and the general analytical equation. **Thermochimica Acta**, v. 213, p. 115-134, 1993.

CHAKRABORTY, S.; UPPALURI, R.; DAS, C. Effect of pore former (saw dust) characteristics on the properties of sub-micron range low-cost ceramic membranes. **International Journal of Ceramic Engineering & Science**, v. 2, p. 243–253, 2020. DOI: https://doi.org/10.1002/ces2.10061.

CHAVES, N. O.; CARVALHO, L. C. F.; OLIVEIRA, R. M. P. B. As principais técnicas utilizadas para remoção de corantes das águas residuais da indústria têxtil: uma revisão. **Perspectivas da ciência e tecnologia**, Instituto federal de educação ciência e tecnologia, v. 14, 2022.

CHEN, Z.; WEI, W.; CHEN, H.; NI, B.-J. Recent advances in waste-derived functional materials for wastewater remediation. **Eco-Environment & Health**, v. 1, p. 86-104, 2022.

CHRISTIE, R. **Colour chemistry**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2014.

CHURAM, T.; USUBHARATANA, P.; PHUNGRASSAMI, H. Sustainable Production of Carboxymethyl Cellulose: A Biopolymer Alternative from Sugarcane (Saccharum officinarum L.) Leaves. **Sustainability**, v. 16, n. 6, 2352, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su16062352.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2011.

CRUZ, E. M. **Impactos ambientais na indústria têxtil**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Tecnologia de Americana, Americana, 2021.

CUNHA, R. S. S.; MOTA, J. D.; RODRIGUES, M. G. F.; MOTA, M. F.; SILVA, F. M. Preparation, characterization and membranes composite tubulares application de membranas compósitas tubulares compostas por nanocompósitos. **Materials Science Fórum**, 2017.

DEFRIEND, K. A. *et al*. Alumina and aluminate ultrafiltration membranes derived from alumina nanoparticles. **Journal of Membrane Science**, v. 224, p. 11–28, 2003.

DEJU, R. *et al*. Thermal characterization of kaolinitic clay. **Romanian Journal of Physics**, v. 66, p. 1-8, 2021.

DELE-AFOLABI, T. T.; AZMAH HANIM, M. A.; NORKHAIRUNNISA, M.; SOBRI, S.; CALIN, R. Research trend in the development of macroporous ceramic components by pore forming additives from natural organic matters: A short review. **Ceramics International**, v. 43, n. 2, p. 1633-1649, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.10.177.

DELGADO, C. J.; GUERRERO, C. I. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 2, p. 237-251, 2007.

DEWI, R. *et al*. Characterization of technical kaolin using XRF, SEM, XRD, FTIR and its potentials as industrial raw materials. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1116, 042010, 2018.

DININGSIH, C.; ROHMAWATI, L. Synthesis of Calcium Carbonate (CaCO3) from Eggshell by Calcination Method. **Indonesian Physical Review**, v. 5, n. 2, p. 208-215, 2022.

DONG, Y.; WU, H.; YANG, F.; GRAY, S. Cost and efficiency perspectives of ceramic membranes for water treatment. **Water Research**, v. 220, 118629, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118629.

DRELICH, Jaroslaw et al. Hydrophilic and superhydrophilic surfaces and materials. **Soft Matter**, v. 7, n. 21, p. 9804-9828, 2011.

DRUMOND, G. P. **Desenvolvimento de membranas com baixos custo e potencial de incrustação a partir de membranas de osmose inversa em final de vida, incorporando óxido de grafeno e prata**. 2025. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

DUARTE, C. B. **Avaliação do Desempenho de Membranas Cerâmicas Tubulares para Pós-Tratamento de Água Potável**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

EL BATOUTI, M.; AL-HARBY, N. F.; ELEWA, M. M. A Review on Promising Membrane Technology Approaches for Heavy Metal Removal from Water and Wastewater to Solve Water Crisis. **Water**, v. 13, 3241, 2021.

ENGIN, B.; DEMİRTAŞ, H.; EKEN, M. Temperature effects on eggshells investigated by XRD, IR and ESR techniques. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 75, n. 2, p. 268-277, 2006.

EZUGBE, E. O.; RATHILAL, S. Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review. **Membranes**, v. 10, 89, 2020.

FAHAD, M. *et al*. Spectroscopic diagnostics of eggshells plasma using LIBS with self-absorption correction in conjunction with WDXRF, EDS and FTIR techniques. **European Physical Journal D**, v. 78, n. 153, 2024.

FARAJ, K. *et al*. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications. **Journal of Energy Storage**, v. 33, 101913, 2021.

FARHANA, K. *et al*. Energy consumption, environmental impact, and implementation of renewable energy resources in global textile industries: an overview towards circularity and sustainability. **Materials Circular Economy**, v. 4, n. 15, 2022.

FATHI, M. B.; RAHMATABADI, Z. T. Eggshell microstructure, shell quality indices, mineralogy, and UV–Vis absorbance of domestic eggs of Iran. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, v. 21, 100235, 2024.

FEDDERSEN, R. L.; THORP, S. N. In: WHISTLER, R. L.; BEMILLER, J. N. (Ed.). **Industrial Gums**. San Diego: Academic Press, p. 537, 1993.

FONER, H. A.; ADAN, N. The Characterization of Papers by X-Ray Diffraction (XRD): Measurement of Cellulose Crystallinity and Determination of Mineral Composition. **Journal of the Forensic Science Society**, v. 23, n. 4, p. 313-321, 1983.

FONT, J.; CASTRO, R. P.; COHEN, Y. On the Loss of Hydraulic Permeability in Ceramic Membranes. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 181, n. 1, p. 347-350, 1996. DOI: https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0390.

FU, Z.; ZHOU, Z.; LIU, Z.; YANG, H.; CHEN, Z. Feasibility and challenges of low-cost ceramic membranes in water treatment applications. **Desalination and Water Treatment**, v. 320, 100739, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100739.

GAMAL, E. A. H. *et al*. Ammonia removal from simulated fish farms by metal organic framework ingrained by eggshell and fish bones. **Scientific Reports**, v. 15, 17086, 2025.

GOMES, C. F. Argilas: **O que são e para que servem.** Lisboa: Calouste Gulbekian, 1988.

GORDON, P. F.; GREGORY, P. **Organic Chemistry in Colour.** Berlin: SpringerVerlag, 1987.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Textile dyes. **Química Nova**, v. 23, p. 71-8, 2000.

GUIMARÃES, É. A. C. M. et al. Desenvolvimento de membrana cerâmica de microfiltração a partir de resíduo de casca de arroz e caulim e aplicação como pré-tratamento de efluente da indústria de papel. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 28, e20220242, 2023.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de separação por membranas.** E-papers Serviços Editoriais Ltda., 2006.

HAN, B.; ZHANG, D.; SHAO, Z.; KONG, L.; SHAOYI, L. Preparation and characterization of cellulose acetate/carboxymethyl cellulose acetate blend ultrafiltration membranes, **Desalination**, Volume 311, 2013, Pages 80-89, ISSN 0011-9164, https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.11.002.

HACHEM, H.; HFAITH, Y.; MIHOUBI, D. Modeling of sorption isotherms and estimation of the thermodynamic properties of calcinated eggshell powder/clay composites. **emergent mater.**, v. 7, p. 1263–1281, 2024.

HAKAMI, M. W.; ALKHUDHIRI, A.; AL-BATTY, S.; ZACHAROF, M.-P.; MADDY, J.; HILAL, N. Ceramic Microfiltration Membranes in Wastewater Treatment: Filtration Behavior, Fouling and Prevention. **Membranes**, v. 10, n. 248, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/membranes10090248.

HALICI, Z.; DEMIRHAN, E. Response surface methodology for optimizing adsorption process parameters for tadalafil removal by raw eggshell. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 15, p. 6027–6036, 2025.

HAMID, N. A. A. *et al*. Morphological and separation performance study of polysulfone/titanium dioxide (PSF/TiO2) ultrafiltration membranes for humic acid removal. **Desalination**, v. 273, n. 1, p. 85-92, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.052.

HAUGEN, A.; GEFFROY, A.; KAISER, A.; GIL, V. MgO as a non-pyrolyzable pore former in porous membrane supports. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 38, n. 9, p. 3279–3285, 2018.

HE**,** Z. *et al*. Ceramic-based membranes for water and wastewater treatment. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 578, 123513, 2019.

HEDFI, I.; HAMDI, N.; SRASRA, E.; RODRÍGUEZ, M. A. The preparation of micro porous membrane from a Tunisian kaolin. **Applied Clay Science**, v. 101, p. 574-578, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.09.021.

HOLKAR, C. R. *et al*. A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. **Journal of Environmental Management**, v. 182, p. 351-366, 2016.

HORRI, B. A.; SELOMULYA, C.; WANG, H. Characteristics of Ni/YSZ ceramic anode prepared using carbon microspheres as a pore former. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 20, p. 15311–15319, 2012.

HOSSEINZADEH, F.; HASHEMI, H.; SARPOOLAKY, H. Sustainable ceramic membrane for water and wastewater treatment: A comprehensive review of environmental, social, and economic aspects. **Desalination**, v. 615, 119231, 2025.

HUBADILLAH, S. K. et al. Fabrications and applications of low cost ceramic membrane from kaolin: A comprehensive review. **Ceramics International**, v. 44, n. 5, p. 4538-4560, 2018.

HUBADILLAH, S. K. *et al*. Recent progress on low-cost ceramic membrane for water and wastewater treatment. **Ceramics International**, v. 48, n. 17, p. 24157-24191, 2022.

HUDA, Z. Mechanical Testing and Properties of Materials. **Mechanical Behavior of Materials: Fundamentals, Analysis, and Calculations**, p. 39-61, 2022.

HUNGER, K. **Industrial dyes: chemistry, properties, applications.** Weinheim: Wiley-VCH Publishers, 2003.

HUPSEL, A. L.; BORGES, C. P.; BARBOSA, G. M.; GONZALEZ, N. Y. Combinação de processos com membranas para remoção de sulfato da água do mar para injeção em reservatórios de petróleo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 403–412, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-41522020194868.

ILIĆ, B. R. *et al*. Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin. **Hemijska industrija**, v. 64, n. 4, p. 351-356, 2010.

INGRAO, C. *et al*. Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. **Heliyon**, v. 9, n. 8, e18507, 2023.

ISMAIL, A. F.; DAVID, L. A review on the latest development of ceramic membrane for gas separation. **Journal of Membrane Science**, 2001.

ISMAIL, M. F. *et al*. Surface characterization of thin-film composite membranes using contact angle technique: Review of quantification strategies and applications. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 299, 102524, 2022.

IVANOVIĆ, M.; KNEŽEVIĆ, S.; MIRKOVIĆ, M. M.; KLJAJEVIĆ, L.; BUČEVAC, D.; PAVLOVIĆ, V. B.; NENADOVIĆ, M. Structural Characterization of Geopolymers with the Addition of Eggshell Ash. **Sustainability**, v. 15, n. 5419, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/su15065419.

JACKSON, M.; MANTSCH, H. H. The Use and Misuse of FTIR Spectroscopy in the Determination of Protein Structure. **Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology**, v. 30, p. 95–120, 1995.

JAHAN, N. *et al*. A Comprehensive Review on the Sustainable Treatment of Textile Wastewater: Zero Liquid Discharge and Resource Recovery Perspectives. **Sustainability**, v. 14, 15398, 2022.

JANKOVIĆ, B. Ž. *et al*. Thermal analysis testing and natural radioactivity characterization of kaolin as building material. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 133, p. 481–487, 2018.

JARVIS, I. P. C.; JAFARI, M.; JUDD, S. J. Ceramic vs polymeric membrane implementation for potable water treatment. **Water Research**, v. 215, 118269, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118269.

JESUS, U. R. **Reuso de água como alternativa sustentável para uma indústria de alimentos localizada em uma cidade com estresse hídrico: um estudo de caso**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2024.

JHAVERI, J. H.; MURTHY, Z. V. P. A comprehensive review on anti-fouling nanocomposite membranes for pressure driven membrane separation processes. **Desalination**, v. 379, p. 137-154, 2016.

JÚNIOR, B. O. M. **Caderno setorial ETENE**. Ano 10, n. 416, 2025. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil / ETENE.

JÚNIOR, E. A. O. *et al*. Casca de ovo de galinha caipira (Gallus gallus domesticus) como fonte de carbonato de cálcio para produção de biomateriais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS (CBECiMat), 22., 2016. **Anais** [...]. [S.l.: s.n.], 2016.

KALAYCI, T. *et al*. Characterization and potential usage of selected eggshell species. **Scientific Reports**, v. 15, 6241, 2025.

KASAVAN, S. *et al*. Global trends of textile waste research from 2005 to 2020 using bibliometric analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 44780–44794, 2021.

KAUR, N.; SINGH, K. Decompositional and chemical reaction kinetics study of eggshell powder waste for value-added materials. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 148, p. 6451–6463, 2023.

KERRU, N. *et al*. One-pot green synthesis of novel 5,10-dihydro-1 H -pyrazolo[1,2-b]phthalazine derivatives with eco-friendly biodegradable eggshell powder as efficacious catalyst. **Research on Chemical Intermediates**, v. 46, p. 3067–3083, 2020.

KHAN, M. I. *et al*. The pyrolysis kinetics of the conversion of Malaysian kaolin to metakaolin. **Applied Clay Science**, v. 146, p. 152-161, 2017.

KINAYTÜRK, N. K. *et al*. Eggshells as a biomaterial may possess sorption capacity on their surface: a spectroscopic study. **Royal Society Open Science**, v. 8, 2021.

KISSINGER, H. E. Reaction kinetics in differential thermal analysis. **Analytical Chemistry**, v. 29, p. 1702–1706, 1957.

KIT, N. H. *et al*. Removal of triphenylmethane dye from aqueous solutions through an adsorption process over waste materials. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, v. 10, n. 4, p. 5772-5779, 2020.

KRISTL, M. *et al*. Evaluation of calcium carbonate in eggshells using thermal analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 138, p. 2751–2758, 2019.

KUMAR, A.; LINGFA, P. Sodium bentonite and kaolin clays: Comparative study on their FT-IR, XRF, and XRD. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 737-742, 2020.

KYRII, S. Materiais e métodos para síntese de membrana cerâmica. Breve revisão. **Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News**, v. 35, p. 26–45, 2023.

LAGDALI, S. *et al*. Performance assessment of a phengite clay-based flat membrane for microfiltration of real-wastewater from clothes washing: Characterization, cost estimation, and regeneration. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 8, 100388, 2023.

LEAL FILHO, W. et al. Reducing the carbon footprint of the textile sector: an overview of impacts and solutions. **Textile Research Journal**, v. 94, n. 15-16, p. 1798-1814, 2024.

LEE, H. J. *et al*. Current research trends and prospects on manufacturing and development of porous ceramic membranes. **Journal of the Korean Ceramic Society**, v. 60, p. 760–780, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s43207-023-00311-7.

LEE, S. *et al*. Natural organic matter fouling due to foulant–membrane physicochemical interactions. **Desalination**, v. 202, n. 1–3, p. 377-384, 2007.

LI, C. *et al*. Ceramic nanocomposite membranes and membrane fouling: A review. **Water Research**, v. 175, 115674, 2020

LIANG, D. *et al*. Influencing factors on the performance of tubular ceramic membrane supports prepared by extrusion. **Ceramics International**, v. 47, n. 8, p. 10464-10477, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.235.

LIANG, Y. *et al.* Fabrication of mullite whisker-reinforced silicon carbide porous ceramic membranes using low-melting-point sintering aids: Enhanced mechanical properties and chemical stability. **Ceramics International**, v. 51, n. 22, Part A, p. 35517-35528, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.05.274.

LIAO, Y. *et al*. Progress in electrospun polymeric nanofibrous membranes for water treatment: fabrication, modification and applications. **Progress in Polymer Science**, v. 77, p. 69–94, 2018.

LIBER-KNEĆ, A.; ŁAGAN, S. Surface Testing of Dental Biomaterials—Determination of Contact Angle and Surface Free Energy. **Materials**, v. 14, 2716, 2021.

LIN, B.; RIETVELD, L. C.; YAO, L.; HEIJMAN, S. G. J. Adsorption and cake layer fouling in relation to Fenton cleaning of ceramic nanofiltration membranes. **Journal of Membrane Science**, v. 687, 122097, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.122097.

LIU, X.; YU, C.; QU, D. *et al*. Preparation of porous β-SiAlON ceramics using corn starch as pore-forming agent. **Journal of the Australian Ceramic Society**, v. 58, p. 531–537, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s41779-022-00708-3.

LORENTE-AYZA, M. M.; ORTS, M. J.; PÉREZ-HERRANZ, V.; MESTRE, S. Role of starch characteristics in the properties of low-cost ceramic membranes. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 35, n. 8, p. 2333-2341, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.02.026.

LUZ, A. B. D. *et al*. **Argila-caulim**. CETEM, 2008.

MALEŠ, L.; FAKIN, D.; BRAČIČ, M.; GORGIEVA, S. Efficiency of Differently Processed Membranes Based on Cellulose as Cationic Dye Adsorbents. **Nanomaterials**, v. 10, n. 642, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/nano10040642.

MALLAH, N. B.; SHAH, A. A.; PIRZADA, A. M.; ALI, I.; KHAN, M. I.; JATOI, A. S.; ULLMAN, J. L.; MAHAR, R. B. Advanced Control Strategies of Membrane Fouling in Wastewater Treatment: A Review. **Processes**, v. 12, n. 2681, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/pr12122681.

MANSA, R.; ZOU, S. Thermogravimetric analysis of microplastics: A mini review. **Environmental Advances**, v. 5, 100117, 2021.

MANSIR, N. *et al*. Efficient waste Gallus domesticus shell derived calcium-based catalyst for biodiesel production. **Fuel**, v. 211, p. 67-75, 2018.

MARQUES, A. V. S. *et al*. Development and Characterization of Sawdust-Based Ceramic Membranes for Textile Effluent Treatment. **Membranes**, v. 15, 298, 2025.

MARTÍ, V. B. *et al*. Evaluation of the Intermediate Values of the TGA Curves as Indicators of the Proximal Analysis of Biomass. **Agronomy**, v. 13, 2552, 2023.

MAY, Y.; NYEIN, O. M.; KHA, N. N. A Comparative Study on the Characteristics of Eggshell Waste for the Preparation of Calcium Acetate. **J. Myanmar Acad. Arts Sci.**, v. 17, p. 335–354, 2019.

MAZIERO, R.; CASTRO, D. B.; RUBIO, J. C. C. Aproveitamento de casca de ovo na preparação de materiais compósitos. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 2019. **Anais** [...]. [S.l.: s.n.], 2019.

MEDEIROS, L. C. D. **Adição de cascalho de perfuração da bacia potiguar em argilas para uso em materiais cerâmicos: influência da concentração e temperatura de queima**. 2010. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

MELIKOGLU, M. A multidimensional scrutiny of eggshell waste valorization: Advanced biorefinery transitions for a global circular bioeconomy. **Biomass and Bioenergy**, v. 214, 109499, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109499.

MELO, E. Estudo da qualidade da água do Rio Ipojuca, com ênfase na análise do oxigênio dissolvido, temperatura e turbidez. **Engineering Sciences**, v. 11, n. 2, p. 24-32, 2023.

MENESES, C. G. D. **Caracterização da membrana da casca do ovo de galinha para a produção de microcápsulas de hidrogel pela técnica de gelificação iônica**. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2024.

MOHAMMED, A.; ABDULLAH, A. Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review. In: **Anais da Conferência Internacional de Hidráulica e Pneumática de 2018 (HERVEX)**, Băile Govora, Romênia. p. 7-9, 2018.

MORITA, A. K. M. *et al*. Pollution threat to water and soil quality by dumpsites and non-sanitary landfills in Brazil: A review. **Waste Management**, v. 131, p. 163-176, 2021.

MOUSAVI, S. H. *et al*. Egg Shell Modified with β-Cyclodextrin, as Green Adsorbent for Dyes from Synthetic Wastewater. **International Journal of Environmental Research**, v. 19, n. 50, 2025.

MULDER, M. **Basic Principles of Membrane Technology**. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

MURRAY, H. H. Kaolin applications. **Developments in clay science**, v. 2, p. 85-109, 2006.

NASCIMENTO, A.S .; SANTOS, C.P .; MELO, F.M.C .; OLIVEIRA, V.G.A .; OLIVEIRA, R.M.P.B .; MACEDO, Z.S .; OLIVEIRA, H.A. Produção de argamassa de gesso com incorporação de resíduos de corte de granito. Journal of Cleaner Production. v. 265 , 2020.

NADA, E. A. et al. Eggshell waste as a sustainable resource for nanoparticle preparation; synthesis, characterization and applications. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 24, 101092, 2025.

NAJAH, M. I. e*t al*. Characterization of Calcium Carbonate Extracted from Eggshell Waste at Various Calcination Temperature. **International Journal of Emerging Trends in Engineering Research**, v. 8, n. 10, p. 6725 – 6731, 2020.

NGAYAKAMO, B. H. Transforming cement mortar performance: impact of eggshell powder as an eco-friendly cement substitute. **Discoveries in Concrete and Cement**, v. 1, n. 22, 2025.

NIMMA, D. *et al*. Implications of climate change on freshwater ecosystems and their biodiversity. **Desalination and Water Treatment**, v. 321, 100889, 2025.

NÓBREGA, K. C. *et al*. Influence of the chemical structure of different carboxymethylcelluloses on the performance of clay dispersions. **Cerâmica**, v. 65, n. 373, p. 28–34, 2019.

NOUIRA, A. *et al*. Transforming Waste to Water Filters: A Mini-Review of Ceramic Membranes from Upcycled Materials. **Waste**, v. 3, 29, 2025.

NUNES, G. R. **Geração e tratamento de efluentes da indústria têxtil**. 2019. Monografia – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
OBADA, D. O.; SALAMI, K. A.; ALABI, A. A. *et al*. Mechanical behaviour of porous kaolin-based ceramics for potential catalysts support applications. **Journal of the Korean Ceramic Society**, v. 60, p. 99–112, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s43207-022-00248-3.

OBADA, D. O.; DODOO-ARHIN, D.; DAUDA, M.; ANAFI, F. O.; AHMED, A. S.; AJAYI, O. A. Physico-mechanical and gas permeability characteristics of kaolin based ceramic membranes prepared with a new pore forming agent. **Applied Clay Science**, v. 150, p. 175-183, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.09.014.

OLIVEIRA, L. **Confecção e caracterização de membranas funcionalizadas com Ni-ZnO/casca de ovo para uso em processos de separação de proteínas**. 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2022.

OLORUNNISOLA, C. G.; OLORUNNISOLA, D.; ADESINA, M. O.; ALFRED, M. O.; EGBEDINA, A. O.; OLUOKUN, O. O.; OMOROGIE, M. O.; UNUABONAH, E. I.; TAUBERT, A. Clay-based photocatalytic membranes: low-cost alternative materials for water treatment. **Materials Advances**, v. 6, p. 4623-4645, 2025. DOI: http://dx.doi.org/10.1039/D5MA00313J.

OTHMAN, M. H. D. *et al*. Recent progress in inorganic membranes for gas separation. **Ceramics International**, v. 41, p. 89-106, 2015.

PAGONIS, N. *et al*. Upcycling of Eggshell Waste into Calcium Phosphates for Use in Sustainable Biomedical Engineering Applications. **Engineering**, v. 5, p. 3540-3550, 2024.

PAIDI, M. K.; POLISETTI, V.; DAMARLA, K.; SINGH, P. S.; MANDAL, S. K.; RAY, P. 3D Natural Mesoporous Biosilica-Embedded Polysulfone Made Ultrafiltration Membranes for Application in Separation Technology. **Polymers**, v. 14, n. 1750, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/polym14091750.

PASCHOAL, S. M. **Estudo da purificação de biodiesel utilizando membranas poliméricas e farelo de semente de maracujá como biossorvente**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Ponta Grossa, 2021.

PINTO, R. R.; ARAÚJO, S. R. A. P.; DANTAS, J. Preparação e caracterização de catalisador heterogêneo sintetizado a partir da casca do ovo para produção de biodiesel. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E

BIOCOMBUSTÍVEIS (CONEPETRO), 5., 2021. **Anais** [...]. Edição digital. [S. l.: s. n.], 2021. ISSN 2446-8339.

PTÁČEK, P. *et al*. Isothermal kinetic analysis of the thermal decomposition of kaolinite: The thermogravimetric study. **Thermochimica Acta**, v. 501, n. 1-2, p. 24-29, 2010.

RAFE, A.; RAZAVI, S. M. A. Water and hexane permeate flux through UF polysulfone amide membrane. **Desalination**, v. 236, p. 39-45, 2009.

RAHMAN, M. S. *et al*. Recent Developments of Carboxymethyl Cellulose. **Polymers**, v. 13, 1345, 2021.

RAJORIYA, S. *et al*. Adsorption of methyl red dye from aqueous solution onto eggshell waste material: Kinetics, isotherms and thermodynamic studies. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, v. 4, 100180, 2021.

RAKCHO, Y.; BAIDOU, M.; NABOULSI, A.; BOUAZIZI, A.; MOUIYA, M.; SEHAQUI, H.; ABOULIATIM, Y.; BENHAMMOU, A.; OUAMMOU, M.; ABOURRICHE, A.; ALAMI, J. Fabrication of low-cost ceramic nanofiltration membrane from natural resources for the removal of cationic and anionic dyes: Experimental and DFT investigations. **Chemical Engineering Journal**, v. 505, 159779, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159779.

Ramteke, P.K., Rathod, A.P., Kodape, S.M. *et al.* Development and evaluation of environmentally sustainable cenosphere ceramic membrane for the efficient separation of methylene blue dye. ***Chemical Paper***. **79**, 313–332 (2025). https://doi.org/10.1007/s11696-024-03782-y

RANI, S. L. S.; KUMAR, R. V. Fabrication and characterization of ceramic membranes derived from inexpensive raw material fuller's earth clay. **Materials Science and Engineering: B**, v. 284, 115877, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115877.

RASHID, R.; SHAFIQ, I.; AKHTER, P. *et al*. A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: the effectiveness of adsorption method. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 9050–9066, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-021-12395-x.

RASID, N. S. A.; ZAINOL, M. M.; AMIN, N. Synthesis and Characterization of Carboxymethyl Cellulose Derived from Empty Fruit Bunch. **Sains Malaysiana**, v. 50, p. 2523-2535, 2021. DOI: https://doi.org/10.17576/jsm-2021-5009-03.

RAWAT, M.; BULASARA, V. K. Synthesis and characterization of low-cost ceramic membranes from fly ash and kaolin for humic acid separation. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 35, p. 725–733, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s11814-017-0316-6.

RAZALI, Nadia et al. Production of calcium oxide from eggshell: Study on calcination temperature, raw weight and contact time. In: **RSU International Research Conference**. 2021. p. 624-37.

RAZALI, N. *et al*. Thermal decomposition of calcium carbonate in chicken eggshells: a study of temperature and contact time. **The Malaysian Journal of Analytical Sciences**, v. 26, n. 2, p. 347-359, 2022.

RIBEIRO, M. et al. Moagem em moinho de bolas: estudo de algumas variáveis e otimização energética do processo. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, p. 7-11, 2001.

RIBEIRO, O. M. S. **Desenvolvimento de um modelo cinético para a reforma catalítica do n-octano sobre o catalisador Pt/L**. 2005. Monografia (Especialização em Setor de Petróleo e Gás Natural) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

RODRIGUES, A. S.; ÁVILA, S. G. Caracterização físico-química da casca de ovo de galinha e utilização como fonte para produção compostos de cálcio. **Revista virtual de química**, v. 9, n. 4, p. 596-607, 2017.

RUTHVEN, D. M. Principles of Adsorption and Adsorption Processes, John Wiley & Sons, 1984.

SAHNOUN, R. D.; BAKLOUTI, S. Characterization of flat ceramic membrane supports prepared with kaolin-phosphoric acid-starch. **Applied Clay Science**, v. 83–84, p. 399-404, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.07.015.

SÁNCHEZ-PALENCIA, Y. *et al*. Iron Removal from Kaolin Waste Dumps by Chemical (Oxalic and Citric Acids) and Biological (Bacillus Strain) Leaching. **Clays Clay Miner.**, v. 70, p. 386–404, 2022.

SANTOS, A. G. A. *et al*. **Síntese e caracterização de hidroxiapatita obtida a partir da casca de ovo de galinha para aplicação em biocerâmicas**. Universidade Federal do Pará, 2019.

SANTOS, J. J. M. *et al*. **Obtenção, Caracterização De Membranas Cerâmicas De Al2O3 Aplicadas Para O Tratamento De Água De Produção Em Poços Petrolíferos**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

SANTOS, M. B. *et al*. Corn starch/Carboxymethyl Cellulose Films: Influence of Citric Acid on Water Susceptibility, Morphological and Tensile Properties. **ACS Omega**, v. 11, n. 4, p. 5479-5488, 2026.

SCOTT, K. Microfiltration. In: SCOTT, K. (Ed.). **Handbook of Industrial Membranes**. Elsevier Science, p. 373-429, 1995.

SEIKH, Z. *et al.* An Overview of utilization of eggshell wastes: a transformation from waste to wealth. **Journal of the Institution of Engineers (India): Series D**, p. 1-15, 2025.

SELVARAJ, V. *et al.* An over review on recently developed techniques, mechanisms and intermediate involved in the advanced azo dye degradation for industrial applications. **Journal of Molecular Structure**, v. 1224, 129195, 2021.

SHEMER, H.; WALD, S.; SEMIAT, R. Challenges and Solutions for Global Water Scarcity. **Membranes**, v. 13, 612, 2023.

SHIRLEY, B.; JAROCHOWSKA, E. Chemical characterisation is rough: the impact of topography and measurement parameters on energy-dispersive X-ray spectroscopy in biominerals. **Facies**, v. 68, n. 2, p. 7, 2022.

SILVA, J. K. O. *et al*. Determination of the Processing Route for Obtaining Calcium Acetate from Eggshell Waste. **Sustainability**, v. 18, n. 1448, 2026.

SILVA, S. P. **Caulim**. [S.l.: s.n.], 2001.

SILVA, W. L. **Tratamento de águas residuais da indústria têxtil com membrana cerâmica de baixo custo utilizando resíduos agroindustriais: preparação, caracterização e avaliação**. 2024. 121 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2024.

SILVEIRA, C.; MULINARI, J.; JUNIOR, A. D. N.; AMBROSI, A.; HOTZA, D.; DI LUCCIO, M. Low-cost ceramic membranes prepared from kaolin and quartz via tape casting using different pore formers. **Open Ceramics**, v. 22, 100765, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oceram.2025.100765.

SINGH, R. B. *et al*. HDTO-DeepAR: A novel hybrid approach to forecast surface water quality indicators. **Journal of Environmental Management**, v. 352, 120091, 2024.

SMITH, F. (Ed.). **Industrial applications of X-ray diffraction**. CRC press, 1999.

SREE, G. S. *et al*. Calcium oxide a sustainable photocatalyst derived from eggshell for efficient photo-degradation of organic pollutants. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, 122294, 2020.

SRINATH, P. *et al*. Sustainable Removal of Impurities from Recycled Al–Si Alloys Using Eggshell-Derived CaO Composite Flux. **Russ. J. Non-ferrous Metals**, v. 66, p. 476–487, 2025.

SRIVASTAVA, A.; BANDHU, S. Biotechnological advancements and challenges in textile effluents management for a sustainable bioeconomy: Indian case studies. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 5, 100186, 2022.

SURDU, V.-A.; GYŐRGY, R. X-ray Diffraction Data Analysis by Machine Learning Methods—A Review. **Applied Sciences**, v. 13, n. 9992, 2023.

SURESH, K. *et al*. Fly ash based ceramic microfiltration membranes for oil-water emulsion treatment: Parametric optimization using response surface methodology. **Journal of Water Process Engineering**, v. 13, p. 27-43, 2016.

TCHAKOUTÉ, H. K.; BEWA, C. N.; KESSENG, N. A. *et al*. Production of Porous Poly(phospho-siloxo) Networks for Thermal Insulations Using Low-Value Calcium-Rich Wastes as Pore-Forming Agents. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, p. 5857–5875, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s12649-019-00846-z.

TIRONI, A. *et al*. Thermal Treatment of Kaolin: Effect on the Pozzolanic Activity. **Procedia Materials Science**, v. 1, p. 343-350, 2012.

UDDIN, F. Concern in Circular Economy of the Textile Fiber Waste for Local Industry. **Materials Circular Economy**, v. 7, n. 47, 2025.

UDDIN, F. Environmental hazard in textile dyeing wastewater from local textile industry. **Cellulose**, v. 28, p. 10715–10739, 2021.

UDDIN, F. Introductory Chapter: Textile Manufacturing Processes. In: **Textile Manufacturing Processes**. IntechOpen, 2019.

UDDIN, M. *et al*. Evaluation of Surface Water Quality Affected by Industrial Effluents Near Tannery Industrial Area: Heavy Metal Concentrations and Ecological Toxicity Index Measurement. **Water Air Soil Pollut**, v. 236, 989, 2025.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). **The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions**. Paris: UNESCO, 2018. Disponível em: www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018/.

UNIDO – UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. **INDSTAT 2 2023, ISIC Revision 3**. 2021.

VASANTH, D.; PUGAZHENTHI, G.; UPPALURI, R. Biomass assisted microfiltration of chromium(VI) using Baker's yeast by ceramic membrane prepared from low cost raw materials. **Desalination**, v. 285, p. 239-244, 2012.

VIZCAYNO, C. *et al*. Pozzolan obtained by mechanochemical and thermal treatments of kaolin. **Applied Clay Science**, v. 49, n. 4, p. 405-413, 2010.

WANG, Q.; CHEN, Q.; ZHU, J.; HUANG, C.; DARVELL, B. W.; CHEN, Z. Effects of pore shape and porosity on the properties of porous LNKN ceramics as bone substitute. **Materials Chemistry and Physics**, v. 109, n. 2–3, p. 488-491, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.12.022.

WANG, Z. *et al*. Beneficial utilization of Al/Si/O-rich solid wastes for environment-oriented ceramic membranes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 401, 123427, 2021

WEERASOORIYA, R. R. *et al*. Industrial water conservation by water footprint and sustainable development goals: a review. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, p. 12661–12709, 2021.

WU, H. *et al*. Preparation and Properties of Biocomposite Films Based on Poly(vinyl alcohol) Incorporated with Eggshell Powder as a Biological Filler. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, p. 2020–2028, 2020.

XAVIER, L. A. **Elaboração de membranas cerâmicas a partir do aproveitamento da casca de ovo como aditivo**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

XAVIER, L. A.; OLIVEIRA, T. V.; KLITZKE, W.; MARIANO, A. B.; EIRAS, D.; VIEIRA, R. B. Influence of thermally modified clays and inexpensive pore-generating and strength improving agents on the properties of porous ceramic membrane. **Applied Clay Science**, v. 168, p. 260-268, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.11.025.

XAVIER, M. V. S.; QUADROS, H. C.; DA SILVA, M. S. S.; Parâmetros de potabilidade da água para o consumo humano: uma revisão integrativa. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento** , v. 11, n. 1, pág. e42511125118-e42511125118, 2022.

XIAO, M.; YANG, F.; IM, S.; DLAMINI, D. S.; JASSBY, D.; MAHENDRA, S.; HONDA, R.; HOEK, E. M. V. Characterizing surface porosity of porous membranes via contact angle measurements. **Journal of Membrane Science Letters**, v. 2, n. 1, 100022, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.memlet.2022.100022.

YADAV, V. K. *et al*. The Processing of Calcium Rich Agricultural and Industrial Waste for Recovery of Calcium Carbonate and Calcium Oxide and Their Application for Environmental Cleanup: A Review. **Applied Sciences**, v. 11, n. 4212, 2021.

YANG, J. et al. Membrane-Based Processes Used in Municipal Wastewater Treatment for Water Reuse: State-Of-The-Art and Performance Analysis. **Membranes**, v. 10, 131, 2020.

YOSHINO, Y. *et al*. Development of tubular substrates, silica-based membranes, and membrane modules for high-temperature hydrogen separation. **Journal of Membrane Science**, v. 267, p. 8–17, 2005.

ZANONI, M. V. B.; YAMANAKA, H. **Corantes: caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento**. 1. ed. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2016.

ZEMENOVÁ, P. *et al*. Investigation of the first and second dehydroxylation of kaolinite. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 116, p. 633–639, 2014.

ZHANG, Y. *et al*. Preparation of Ceramic Membranes and Their Application in Wastewater and Water Treatment. **Water**, v. 15, n. 3344, 2023.

ZHAO, T.; JIANG, L. Contact angle measurement of natural materials. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 161, p. 324–330, 2018.

ZOLLINGER, H. Color chemistry: syntheses, properties and applications of organic dyes and pigments. 2. ed. New York: V.C.H, 1991.

ZONATO, R. O. *et al*. Eggshell as an adsorbent for removing dyes and metallic ions in aqueous solutions. **Cleaner Chemical Engineering**, v. 2, 100023, 2022.