



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

**TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS DA INDÚSTRIA TÊXTIL COM
MEMBRANA CERÂMICA DE BAIXO CUSTO UTILIZANDO RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS: PREPARAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO**

WEMILLY LUCENA SILVA

CAMPINA GRANDE – PB

Agosto de 2024

WEMILLY LUCENA SILVA

**TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS DA INDÚSTRIA TÊXTIL COM
MEMBRANA CERÂMICA DE BAIXO CUSTO UTILIZANDO RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS: PREPARAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO**

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 Engenharia Química.
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Meiry Gláucia Freire Rodrigues.

Campina Grande – PB

Agosto de 2024

Wemilly Lucena Silva

**TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS DA INDÚSTRIA TÊXTIL COM
MEMBRANA CERÂMICA DE BAIXO CUSTO UTILIZANDO RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS: PREPARAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO**

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 Engenharia Química.
Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Meiry Gláucia Freire Rodrigues.

Data de aprovação 29 / 08 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



MEIRY GLAUCIA FREIRE RODRIGUES

Data: 12/09/2024 11:13:43-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Meiry Gláucia Freire Rodrigues – UFCG

Orientadora

Documento assinado digitalmente



ANA REGINA NASCIMENTO CAMPOS

Data: 13/09/2024 14:01:23-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Ana Regina Nascimento Campos – UFCG

Membro Interno

Documento assinado digitalmente



Antonio Jose Ferreira Gadelha

Data: 12/09/2024 20:47:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Antonio José Ferreira Gadelha – IFPB

Membro Externo

Documento assinado digitalmente



ANTUSIA DOS SANTOS BARBOSA

Data: 12/09/2024 09:42:55-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr^ª. Antusia dos Santos Barbosa

Membro Externo



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
UNIDADE ACADEMICA DE ENGENHARIA QUIMICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900
Telefone: (83) 2101-1100
Site: <http://cct.ufcg.edu.br>

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO **GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA**,
REALIZADA EM 29 DE AGOSTO DE 2024

(Nº 534)

CANDIDATO(A): **Wemilly Lucena Silva**. COMISSÃO EXAMINADORA: Meiry Glauca Freire Rodrigues , Profª. Drª., UFCG, **Orientador**, Ana Regina Nascimento Campos, Profª. Drª., UFCG/ Examinadora Interna, Antusia dos Santos Barbosa, Pesq. Drª., UFCG / Examinadora Interna, Antonio José Ferreira Gadelha, Prof. Dr. Examinador Externo/ IFPB. TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “Tratamento de Águas Residuais da Indústria Têxtil com Membrana Cerâmica de Baixo Custo Utilizando Resíduos Agroindustriais: Preparação, Caracterização e Avaliação”. ÁREA DE CONCENTRAÇÃO Desenvolvimento de Processos Químicos. HORA DE INÍCIO: **14:00 Horas** – LOCAL: Auditório I Bloco CW II. Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, o(a) candidato(a) **Wemilly Lucena Silva** foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua dissertação, obtendo conceito **APROVADO**. Face à aprovação, declara o(a) orientador, achar-se a examinada, legalmente habilitado(a) a receber o **Grau de Mestre Engenharia Química**, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como de direito, providenciar a expedição do Diploma, a que o(a) mesmo(a) faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, Maricé Pereira de Araújo – Secretária do PPGEQ, os membros da Comissão Examinadora e o(a) candidato(a). Campina Grande, 29 de agosto de 2024.

Maricé Pereira de Araújo

Secretária

Meiry Glauca Freire Rodrigues , Profª. Drª., UFCG

Orientadora

Ana Regina Nascimento Campos, Profª. Drª., UFCG

Examinadora Interna

Antusia dos Santos Barbosa, Pesq. Drª., UFCG

Examinadora Interna

Antonio José Ferreira Gadelha, Prof. Dr., IFPB

Examinador Externo

Wemilly Lucena Silva

Candidata



Documento assinado eletronicamente por **MEIRY GLAUCIA FREIRE RODRIGUES, PROFESSOR 3 GRAU**, em 02/09/2024, às 15:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio José Ferreira Gadelha, Usuário Externo**, em 02/09/2024, às 15:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antusia dos Santos Barbosa Araujo, Usuário Externo**, em 02/09/2024, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARICE PEREIRA DA SILVA, SECRETÁRIA**, em 02/09/2024, às 16:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANA REGINA NASCIMENTO CAMPOS, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/09/2024, às 17:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wemilly Lucena Silva, Usuário Externo**, em 03/09/2024, às 10:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4760375** e o código CRC **3C481C22**.

S586t

Silva, Wemilly Lucena.

Tratamento de águas residuais da indústria têxtil com membrana cerâmica de baixo custo utilizando resíduos agroindustriais: preparação, caracterização e avaliação / Wemilly Lucena Silva. – Campina Grande, 2024.

123 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

"Orientação: Profa. Dra. Meiry Gláucia Freire Rodrigues".

Referências.

1. Tratamento de Efluente – Indústria Têxtil. 2. Membrana Cerâmica. 3. Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar. 4. Baixa Temperatura de Sinterização. 5. Azul de Metileno. 6. Reciclabilidade. 7. Estimativa de Custos. I. Rodrigues, Meiry Gláucia Freire. II. Título.

CDU 628.3.034.2:677(043)

Em especial, dedico este trabalho

*A Deus, por todas as vezes que em que Ele me
fez forte.*

*Em memória da minha avó, Bernadete de
Albuquerque Silva e da minha prima, Yasmin
Ellen Lopes de Albuquerque.*

Mãe, pai, eu amo vocês.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo do mestrado e da realização deste trabalho.

A minha mãe, Maria Angela de Lucena Silva, por toda a paciência, carinho, força, ensinamentos e conselhos, me tornando uma pessoa melhor e mais sabia, não sendo nem metade do que a senhora é.

Ao meu pai, Wellington Albuquerque da Silva, por ser calma diante de mim e um pilar onde tenho todo o apoio e total atenção. Obrigada por sempre incentivar a constante busca pela estabilidade e novos desafios.

Aos dois, obrigada pelo amor e incentivo durante todos os momentos, eu tenho orgulho de ser filha de vocês.

Ao meu irmão, Wesley, por sempre acreditar em mim, pelo apoio e paciência. Você está ao meu lado durante todas as etapas me deixou mais segura e leve.

À orientadora Prof.^a Dr.^a Meiry Gláucia Freire Rodrigues por aceitar me orientar, sendo sempre solícita e possuindo ensinamentos ao decorrer dos dois anos de trabalho. Agradeço também pelo apoio demonstrado, que foi fundamental para a realização desta pesquisa.

Aos professores avaliadores da banca examinadora, meu sincero agradecimento por todas as valiosas contribuições e sugestões, que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

A meus companheiros de LABNOV, pelas conversas, desabafos e momentos que tornaram a caminhada leve e divertida. Aos professores, Dr. Laércio Gomes e Dr. Vimário Simões, por serem apoiadores e encorajadores deste trabalho.

A fundação de apoio à pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ/PB), pela concessão da bolsa.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, o meu muito obrigado. Por fim, me dou os parabéns por ter conseguido chegar até aqui. Várias vezes pensei em desistir, mas consegui ser mais forte e chegar aonde estou agora.

RESUMO

Diante da grande demanda por recursos hídricos na indústria têxtil e da crescente preocupação com a sustentabilidade, novos métodos para o tratamento de águas residuais têm emergido nos últimos anos. A utilização de membranas para o tratamento desses efluentes destaca-se como uma alternativa eficaz e promissora, devido às suas excelentes propriedades físicas e químicas. Neste contexto, o estudo de matérias-primas acessíveis e de baixo custo para a produção de membranas cerâmicas torna-se essencial para o desenvolvimento de soluções sustentáveis e econômicas para o tratamento de efluentes têxteis. Neste trabalho foi desenvolvida membranas cerâmicas de baixo custo, utilizando argila chocobofe, cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) e caulim, com o objetivo de tratar efluentes têxteis. As matérias-primas foram caracterizadas por técnicas como difração de raios X (DRX), espectrofotometria de fluorescência de raios X (FRX), análise termogravimétrica (TGA), análise de tamanho e distribuição de partículas. As membranas foram então produzidas com proporções de CBCA variando entre 0 e 50 %, por meio de prensagem uniaxial a seco em prensa hidráulica, sob pressão de 1 tonelada e tempo de moldagem de 60 segundos, seguidos de sinterização a 650 °C por 3 horas. As membranas cerâmicas resultantes foram caracterizadas por uma série de técnicas: DRX, retração linear do diâmetro, perda de massa, densidade, porosidade aparente, absorção de água, resistência mecânica, ângulo de contato e fluxo de água pura. Também foram avaliadas quanto à eficiência na rejeição da solução do corante azul de metileno e à reciclabilidade. As membranas cerâmicas apresentaram porosidade entre 41,45 e 44,82 %, sugerindo que a adição de CBCA teve pouca influência nessa propriedade, e raio médio dos poros variou de 0,23 a 0,27 μm . Na resistência mecânica das membranas observou-se uma diminuição, que passou de 40,05 para 10,36 MPa à medida que a CBCA foi inserida na composição. O fluxo de água pura e o fluxo de permeado aumentaram com a maior concentração de CBCA nas membranas. Na rejeição do corante azul de metileno, todas as membranas cerâmicas demonstraram alta eficiência, com índices de rejeição variando entre 99,90 e 97,70 %. O teste de reciclabilidade avaliou as membranas cerâmicas C30 e C50 no desempenho ao longo de um período prolongado, indicando melhor resultado na membrana C30. A estimativa preliminar de custo mostrou que o valor das matérias-primas variou entre R\$ 37,40 e R\$ 61,17 por metro quadrado e o custo total, incluindo o custo energético, entre R\$ 901,24 e R\$ 929,27 por metro quadrado.

Palavras-chave: membrana cerâmica; cinza do bagaço de cana-de-açúcar; baixa temperatura de sinterização; azul de metileno; tratamento de efluente têxtil; reciclabilidade; estimativa de custos.

ABSTRACT

Given the high demand for water resources in the textile industry and the growing concern for sustainability, new methods for wastewater treatment have emerged in recent years. The use of membranes for the treatment of these effluents stands out as an effective and promising alternative due to their excellent physical and chemical properties. In this context, the study of accessible and low-cost raw materials for the production of ceramic membranes becomes essential for the development of sustainable and economical solutions for textile effluent treatment. In this work, low-cost ceramic membranes were developed using chocobofoe clay, sugarcane bagasse ash (CBCA), and kaolin, with the aim of treating textile effluents. The raw materials were characterized by techniques such as X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), thermogravimetric analysis (TGA), and particle size and distribution analysis. The membranes were then produced with CBCA proportions ranging from 0 to 50%, through dry uniaxial pressing in a hydraulic press, under a pressure of 1 ton and molding time of 60 seconds, followed by sintering at 650 °C for 3 hours. The resulting ceramic membranes were characterized by a series of techniques: XRD, linear diameter shrinkage, mass loss, density, apparent porosity, water absorption, mechanical strength, contact angle, and pure water flux. They were also evaluated for their efficiency in rejecting methylene blue dye solution and recyclability. The ceramic membranes showed porosity between 41.45 and 44.82 %, suggesting that the addition of CBCA had little influence on this property, and the average pore radius ranged from 0.23 to 0.27 μm . A decrease in the mechanical strength of the membranes was observed, from 40.05 to 10.36 MPa as CBCA was added to the composition. The pure water flux and permeate flux increased with higher CBCA concentration in the membranes. In the rejection of methylene blue dye, all ceramic membranes demonstrated high efficiency, with rejection rates ranging from 99.90 to 97.70 %. The recyclability test evaluated the C30 and C50 ceramic membranes' performance over an extended period, indicating better results in the C30 membrane. A preliminary cost estimate showed that the raw material costs ranged from R\$ 37.40 to R\$ 61.17 per square meter, and the total cost, including energy costs, ranged from R\$ 901.24 to R\$ 929.27 per square meter.

Keywords: ceramic membrane; sugarcane bagasse ash; low sintering temperature; methylene blue; textile effluent treatment; recyclability; cost estimate.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 – Exportações de produtos têxteis – 2017 a 2022 (US\$ bilhões correntes).	18
Figura 2 – Etapas da utilização de água nas etapas do processo têxtil.	21
Figura 3 – Diagrama das principais tecnologias para a remoção de corantes.	24
Figura 4 – Esquema representativo de um processo de separação por membranas.	26
Figura 5 – Esquema representativo da filtração convencional (a) e tangencial (b).	26
Figura 6 – Esquema representativo das diferentes morfologias de membranas.	29
Figura 7 – Representação do ângulo de contato para membranas com material da superfície hidrofílica e hidrofóbica.	31
Figura 8 – Esquema de temperaturas para o Tratamento Térmico.	36
Figura 9 – Esquema de processamento representativo do uso de agente porogênicos.	40
Figura 10 – Evolução temporal de depósitos de patentes de “membrana cerâmica” no mundo (2004-2024).	44
Figura 11 – Principais países inventores de membranas cerâmicas (2004-2024).	45
Figura 12 – Evolução temporal de depósitos de patentes de “membrana cerâmica + cinza” no mundo (2004-2024).	46
Figura 13 – Distribuição das patentes por Domínio Tecnológico conforme plataforma Questel Orbit®.	47
Figura 14 – Imagens das matérias-primas: A) Argila chocobofo; B) Cinza do bagaço de cana-de-açúcar; C) Caulim.	50
Figura 15 – Molde para fabricação das membranas.	52
Figura 16 – Rampa de aquecimento utilizada na sinterização das membranas.	53
Figura 17 – Diagrama de preparação, caracterização e avaliação das membranas cerâmicas de baixo custo.	54
Figura 18 – Sistema utilizado para medição de fluxo de água pura.	58
Figura 19 – Módulo de aço inoxidável.	59
Figura 20 – Sistema utilizado para avaliação da rejeição de corante.	61
Figura 21 – Difratoograma de raios X da argila chocobofo.	65
Figura 22 – Difratoograma de raios X da CBCA.	66
Figura 23 – Difratoograma de raios X do caulim.	67
Figura 24 – Curvas termo analíticas da argila chocobofo.	68
Figura 25 – Curvas termo analíticas da CBCA.	69
Figura 26 – Curvas termo analíticas do caulim.	70
Figura 27 – Distribuição do tamanho das partículas das matérias-primas.	73
Figura 28 – Membranas cerâmicas não sinterizadas e sinterizadas.	74
Figura 29 – Retração linear do diâmetro das membranas cerâmicas.	75
Figura 30 – Análise da perda de massa das membranas cerâmicas.	77
Figura 31 – Porosidade aparente das membranas cerâmicas.	78
Figura 32 – Resultado da resistência a compressão (MPa).	82
Figura 33 – Difratoogramas de raios X das membranas cerâmicas não sinterizadas (E: Esmectita, C: Caulinita e Q: Quartzo).	84
Figura 34 – Difratoogramas de raios X das membranas cerâmicas sinterizadas a 650 °C (E: Esmectita e Q: Quartzo).	85
Figura 35 – Fluxo de água pura em função do tempo para as membranas cerâmicas.	86

Figura 36 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica C0.	89
Figura 37 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica C10.	90
Figura 38 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica C20.	91
Figura 39 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica C30.	92
Figura 40 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica C40.	93
Figura 41 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica C50.	94
Figura 42 – Permeados coletados após a avaliação da rejeição do corante azul de metileno para as membranas cerâmicas produzidas.	96
Figura 43 – Fluxo e rejeição do corante azul de metileno utilizando a membrana cerâmica C30.	99
Figura 44 – Fluxo e rejeição do corante azul de metileno utilizando a membrana cerâmica C50.	100

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Classificação dos corantes de acordo com sua estrutura química.	19
Tabela 2 – Classificação dos corantes conforme fixação na fibra têxtil.	20
Tabela 3 – Condições de descarte para efluentes industriais.....	23
Tabela 4 – Classificação das membranas sintéticas.	30
Tabela 5 – Características e aplicações dos processos de separação por membranas.	33
Tabela 6 – Características gerais do corante Azul de Metileno.	51
Tabela 7 – Composições das membranas cerâmicas de baixo custo.	51
Tabela 8 – Condições de moldagem das membranas cerâmicas de baixo custo.	52
Tabela 9 – Composição química da argila chocobofe.	62
Tabela 10 – Composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.	63
Tabela 11 – Composição química do caulim.....	64
Tabela 12 – Distribuição do tamanho das partículas das matérias-primas.....	73
Tabela 13 – Perda de massa das membranas cerâmicas.	76
Tabela 14 – Caracterização física das membranas cerâmicas.	78
Tabela 15 – Raio médio dos poros das membranas cerâmicas.	80
Tabela 16 – Fluxos médios das membranas cerâmicas.	87
Tabela 17 – Caracterização dos parâmetros das membranas cerâmicas produzidas.	94
Tabela 18 – Comparação das propriedades das membranas cerâmicas.	97
Tabela 19 – Preço por quilograma para as matérias-primas.....	102
Tabela 20 – Preço por batelada e preço unitário das membranas cerâmicas.....	102
Tabela 21 – Estimativa de custo energético para a preparação da membrana cerâmica de baixo custo.....	103
Tabela 22 – Análise comparativa do custo das membranas preparados com outras membranas relatadas na literatura.	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agencia nacional de águas
CBCA	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DRX	Difração de Raios X
EDX	Espectrofotometria de Raios X por Energia Dispersiva
FRX	Espectrofotometria de Fluorescência de Raios X
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LABNOV	Laboratório de Desenvolvimento de Novos Materiais
ONU	Organização das Nações Unidas
TGA	Análise Termogravimétrica
UAEQ	Unidade Acadêmica de Engenharia Química
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. OBJETIVO GERAL.....	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1. ÁGUA.....	16
3.2. INDÚSTRIA TÊXTIL.....	17
3.2.1. Panorama geral.....	17
3.2.2. Corantes.....	19
3.2.3. Efluentes da indústria têxtil.....	21
3.2.4. Legislação	23
3.2.5. Tratamento de efluentes gerados pela indústria têxtil	24
3.3. PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS	25
3.3.1. Aspectos Gerais.....	25
3.3.2. Características das membranas	27
3.3.3. Classificação das membranas	28
3.3.4. Principais processos de separação por membranas e aplicações	31
3.3.5. Processos de Fabricação das Membranas	34
3.3.5.1. Prensagem	34
3.3.5.2. Tratamento Térmico	35
3.4. MEMBRANAS CERÂMICAS	36
3.4.1. Matérias-primas utilizadas na produção das membranas.....	37
3.4.1.1. Argila	37
3.4.1.2. Caulim	38
3.4.1.3. Agentes porogênicos	39
3.5. TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS UTILIZANDO MEMBRANAS CERÂMICAS A BASE DE ARGILA	41
4. MONITORAMENTO TECNOLÓGICO	42
5. MATERIAIS E MÉTODOS	50
5.1. MATERIAIS	50
5.2. PREPARAÇÃO DA MEMBRANA CERÂMICA DE BAIXO CUSTO ..	51
5.3. CARACTERIZAÇÃO.....	55
5.3.1. Espectrofotometria de Fluorescência de Raios X (FRX)	55

5.3.2.	Difração de Raios X (DRX)	55
5.3.3.	Análise Termogravimétrica (TGA).....	55
5.3.4.	Análise do tamanho de partículas e distribuição de partículas.....	56
5.3.5.	Retração linear do diâmetro	56
5.3.6.	Determinação das características físicas das membranas cerâmicas	56
5.3.7.	Determinação do ângulo de contato.....	57
5.3.8.	Resistência mecânica	58
5.3.9.	Medida de fluxo de água pura	58
5.4.	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MEMBRANAS CERÂMICAS	60
5.4.1.	Preparo da solução sintética do corante	60
5.4.2.	Análises por espectrofotometria UV-VIS	60
5.4.3.	Tratamento do efluente têxtil	60
5.4.4.	Reciclabilidade	61
5.5.	ESTIMATIVA PRELIMINAR DE CUSTOS.....	62
6.	RESULTADOS	62
6.1.	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	62
6.1.1.	Espectrofotometria de Fluorescência de Raios X (FRX)	62
6.1.2.	Difração de Raios X (DRX)	65
6.1.3.	Análise Termogravimétrica (TGA).....	68
6.1.4.	Análise do tamanho de partículas e distribuição de partículas.....	72
6.2.	CARACTERIZAÇÃO DAS MEMBRANAS	74
6.2.1.	Fluxo de água pura	86
6.2.2.	Tratamento do efluente têxtil	88
6.2.3.	Reciclabilidade	98
7.	ESTIMATIVA PRELIMINAR DE CUSTOS.....	101
8.	CONCLUSÕES.....	106
9.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

1. INTRODUÇÃO

A água é uma substância indispensável para a manutenção da vida (Texeira; Ponzilacqua, 2024). A grande abrangência desse recurso faz com que ocorra uma dependência em diversas atividades humanas, onde se destacam, entre outros, o abastecimento público e industrial, a irrigação agrícola, a produção de energia elétrica e as atividades de lazer e recreação (Lima *et al.*, 1999).

A contaminação/poluição desse recurso teve o seu auge a partir da revolução industrial, quando as indústrias começaram a despejar os resíduos em rios, prejudicando o ecossistema. Os resíduos após serem despejados faziam com que os rios apresentassem mudanças em suas características físicas, químicas e biológicas, tornando a água imprópria para o consumo humano, também chamada de águas residuais (Whelan *et al.*, 2022).

Até 1970 o termo poluição era incomum em publicações e debates. Com a exploração intensiva da natureza, motivada pela revolução verde e pelo crescimento do capitalismo, provocou-se uma degradação do meio ambiente através da emissão progressiva de elementos em excesso na natureza. A partir disso surgiu uma preocupação ambiental principalmente nos países desenvolvidos (Basso, 2022).

A poluição ambiental é um dos fenômenos globais mais importantes devido aos seus graves efeitos adversos sobre as águas subterrâneas e superficiais, saúde humana, plantas/agricultura e animais. Os problemas de poluição são em grande parte devido a industrialização e urbanização. Devido à introdução de demasiados efluentes orgânicos e industriais no ambiente, isso aumentou o problema da poluição da água e do solo (Panhwar *et al.*, 2024).

Durante as últimas décadas é notório o crescimento do ramo industrial ligado a produção têxtil. Embora o setor têxtil seja bem conhecido por suas muitas contribuições positivas para a economia, também é conhecido por seus consideráveis problemas ambientais quando se trata de sustentabilidade a longo prazo (Roy *et al.*, 2020). Existem várias preocupações ambientais, incluindo o fato de que esta indústria consome muita energia e emite uma grande quantidade de poluentes.

Água, combustível e produtos químicos são comumente usados como recursos essenciais no negócio têxtil e são utilizados em grandes quantidades. Os produtos químicos emitidos no meio ambiente a partir de atividades de tratamento e tingimento de

têxteis são responsáveis por aproximadamente um terço de todos os produtos químicos liberados no meio ambiente (Harsanto *et al.*, 2023). Os efluentes têxteis, em sua maioria são prejudiciais à saúde humana e afetam a vida aquática da região que são despejados.

Quando se trata do descarte desses materiais existem normas técnicas que regulamentam os parâmetros adequados para que esse subproduto possa ser lançado no ambiente, no Brasil essa regulamentação é feita pelo CONAMA. De acordo com a Resolução CONAMA 430/2011, o Art. 16º determina que os efluentes somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições padrões e exigências definidas por lei (CONAMA, 2011).

Dentre várias técnicas de despoluição da água, o processo de filtração por membrana tem atraído cada vez mais a atenção de químicos, engenheiros e biotécnicos pois apresenta várias vantagens, especialmente sua simplicidade, alta eficiência e confiabilidade econômica (Barbosa *et al.*, 2012). Para que o processo ocorra é necessária uma membrana específica que possibilite a retenção de moléculas e íons de diferentes substâncias, fazendo com que ocorra a filtração.

As membranas cerâmicas são amplamente conhecidas devido a sua alta estabilidade química e térmica, além de viabilizar operações em altas temperaturas e alto pH. Elas também possuem a possibilidade de regeneração, podendo ser utilizadas em vários ciclos. Todavia, os materiais sintéticos utilizados para sua produção demandam um elevado investimento financeiro (Jarvis *et al.*, 2022).

Por essa razão, vários esforços tem sido realizados nos últimos anos no desenvolvimento de membranas cerâmicas a partir de matérias-primas alternativas, de fácil acesso e de baixo custo (Lorente-Ayza *et al.*, 2015). Para o desenvolvimento de poros nas membranas cerâmicas são introduzidos agentes formadores de poros, normalmente de natureza orgânica, que promovem ganho de porosidade e conseqüentemente na permeabilidade, mas, acabam diminuindo a resistência mecânica da membrana podendo chegar ao ponto de sua inutilização (Zhu *et al.*, 2015).

Neste contexto, explorou-se a fabricação de membranas cerâmicas empregando matérias-primas locais, como argila e caulim, e um agente porogênico obtido de resíduos agroindustriais, como a cinza do bagaço de cana-de-açúcar para o tratamento de efluentes

têxteis. Essas membranas têm relevância significativa para a indústria, sendo amplamente utilizadas como técnica de separação e, em particular, no tratamento de águas residuais.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e produzir membranas cerâmicas a partir de matérias-primas de baixo custo para o tratamento de efluentes têxteis.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a argila, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar e o caulim utilizando as técnicas de difração de raios X, espectrofotometria por fluorescência de raios X, análise termogravimétrica, tamanho de partículas e distribuição de partículas.
- Preparar membranas cerâmicas via método de prensagem uniaxial, utilizando diferentes proporções de matérias-primas, e sinterizá-las a 650 °C.
- Caracterizar as membranas cerâmicas de baixo custo a partir das técnicas de difração de raios X, perda de massa, densidade, porosidade aparente, absorção de água, retração linear do diâmetro, resistência mecânica, ângulo de contato e fluxo de água pura.
- Avaliar a influência da concentração da cinza do bagaço de cana-de-açúcar nas características das membranas cerâmicas.
- Avaliar a eficiência das membranas cerâmicas produzidas no processo de microfiltração utilizando o corante azul de metileno.
- Avaliar a reciclabilidade das membranas cerâmicas selecionadas para verificar sua capacidade de reutilização.
- Realizar uma estimativa preliminar dos custos para a produção das membranas cerâmicas em escala laboratorial.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. ÁGUA

No ano de 2010, a Organização das Nações Unidas (ONU), determinou que o acesso a água potável e ao saneamento básico fossem vistos como um direito humano. Antes da adoção da Resolução A/RES/64/292 (United Nations, 2010), o acesso à água potável era frequentemente tratado como uma questão de desenvolvimento ou política pública.

O reconhecimento da água como um direito humano implica um compromisso com o objetivo de garantir acesso universal. Isso significa que os governos têm a responsabilidade de adotar medidas para garantir que todas as pessoas, independentemente de sua condição socioeconômica, tenham acesso a esses serviços básicos (Heller, 2022).

De acordo com o Programa Conjunto de Monitorização do Abastecimento de Água, Saneamento e Higiene (Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene - JMP), em 2022, cerca de 2,2 bilhões de pessoas ainda não tinham acesso à água potável e 3,5 bilhões viviam sem o acesso à saneamento de qualidade, em níveis globais (United Nations Children's Fund/World Health Organization, 2023).

Muitas fontes de água estão se tornando mais poluídas e ecossistemas que provêm água estão desaparecendo. As mudanças climáticas estão afetando drasticamente o ciclo da água, tornando as secas e inundações mais extremas e frequentes, e diminuindo o armazenamento natural de água no gelo e na neve. O aumento da temperatura e a variabilidade nos padrões de fluxo dos corpos d'água também afetam fortemente a qualidade da água, tanto nas águas superficiais quanto nas subterrâneas (Artaxo, 2022).

A chamada crise da água, tem como causa muitos fatores, que estão além do alcance da racionalidade humana, dentre os quais, a ação climática já existente no Planeta desde sua formação (Silva; Cunha, 2020). Em associação com a mudanças naturais, a emissão de gases de efeito estufa, causados principalmente pela queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), acelera o processo.

Por mais que seja de consenso natural a diminuição do recurso hídrico, diversos setores ainda possuem grande dependência da utilização de água. No Brasil, a água é utilizada principalmente para irrigação de lavouras, abastecimento público, atividades industriais, geração de energia, extração mineral, aquicultura, navegação, turismo e lazer.

Cada uso depende e pode afetar condições específicas de quantidade e de qualidade das águas (ANA, 2024).

A poluição pode ser definida como a “degradação da qualidade ambiental” que, direta ou indiretamente, afeta as populações (Brasil, 1981). Embora danos letais estejam relacionados com grandes concentrações de poluentes e fontes pontuais de emissão, distúrbios podem ser observados mesmo em pequenas concentrações, afetando o equilíbrio ambiental.

Efluentes domésticos e industriais são denominados de poluição pontual, passíveis de controle e monitoramento previsto pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (CONAMA, 2011). Devido a isso, sistemas de coleta e tratamento foram cada vez mais estudados e desenvolvidos para que ocorra a reutilização da água. Contudo, as fontes de poluição difusa (ou poluição não pontual) são muitas vezes negligenciadas e/ou não consideradas dentro do aspecto da gestão de recursos hídricos por possuírem um aspecto intermitente e de difícil identificação e monitoramento (Kozak, 2022).

3.2. INDÚSTRIA TÊXTIL

3.2.1. Panorama geral

A produção industrial mundial foi alterada drasticamente ao longo dos últimos anos, e as cadeias produtivas foram transformadas em modelos colaborativos. Ou seja, linhas de produção antes formadas apenas por colaboradores passam a ser um modelo onde as máquinas trabalham junto com as pessoas em um mesmo cenário (Jamrus *et al.*, 2020).

Diante disso, a cadeia de produção têxtil que é uma das primeiras indústrias nascidas ainda na Primeira Revolução Industrial sofreu impactos desta reconfiguração tecnológica. Com características propícias ao desenvolvimento inicial da mecanização com as máquinas de tear, responsáveis por fazer as tramas dos tecidos, já que são dotadas de tecnologia simples, esta cadeia já passou por profundas alterações em termos de matérias, organização produtiva interna e até mesmo geográfica (Filleti; Boldrin, 2020).

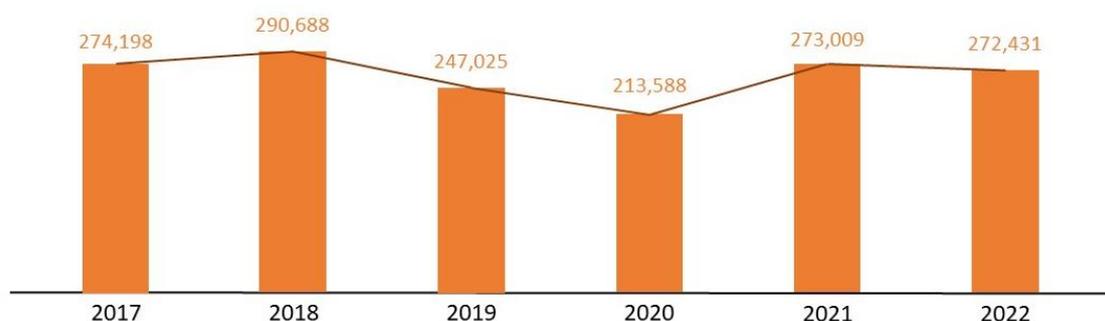
Conforme a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT), responsável por representar os interesses das empresas no ramo têxtil, a indústria têxtil é um conjunto de atividades econômicas relacionadas à produção de fibras, fios, tecidos e

produtos têxteis, incluindo confecções. Essa definição abrange desde a produção das matérias-primas (como algodão, poliéster, nylon, entre outros), passando pela fiação, tecelagem, tinturaria e acabamento dos tecidos, até a fabricação de artigos de vestuário e outros produtos têxteis (ABIT, 2024).

A indústria têxtil além de registrar a história através da evolução de suas peças e meios de produção, esse ramo assume um papel essencial para a economia mundial, pois também proporciona muitos empregos. A China é o maior participante da indústria têxtil e de confecção, pois além de ser o maior produtor mundial de têxtil e de vestuário, é também um dos maiores importadores da cadeia, uma vez que a produção depende das fibras, que são importadas de outros países para cobrir a crescente produção chinesa. Além disso, a economia chinesa e de alguns países asiáticos detêm uma grande vantagem competitiva na mão de obra, já que esta é abundante e barata (Ideies, 2020).

Em sequência de maiores produtores temos, a Índia, E.U.A., Turquia e Japão. O Brasil foi o 13º maior produtor mundial de têxteis. No Mundo, as exportações de têxteis cresceram mesmo sentindo o impacto da pandemia da Covid-19. Na Figura 1, está apresentado os dados de exportação mundial, dos últimos anos, expresso em bilhões de dólares (ETENE, 2023).

Figura 1 – Exportações de produtos têxteis – 2017 a 2022 (US\$ bilhões correntes).



Fonte: Adaptado ETENE (2023).

No Brasil existem mais de 50 faculdades de moda espalhadas em 11 estados. Nos seus 200 anos de atuação, apresenta a maior cadeia têxtil completa do ocidente. Segundo notícia publicada no site da ABIT em 2022, a indústria têxtil e de confecção faturou R\$ 194 bilhões em 2021, sendo observado um crescimento de 20 % em relação aos R\$ 161 bilhões do ano de 2020. Na comparação com 2020, a produção de têxteis (insumos) aumentou 12,1 % e para confecções (15,1 %). O varejo de roupas cresceu 16,9 %. No

entanto, essa expansão não apresenta crescimento quando comparado aos números de 2019 (pré-pandemia). Mesmo com o crescimento observado em 2021 quando comparado a 2020, o saldo da balança comercial setorial ficou negativo em US\$ 4,10 bilhões (ETENE, 2023).

Portanto, por ter um grande impacto mundialmente não se pode esquecer dos processos que acontecem durante a fabricação dos tecidos. O processo de tingimento e acabamento da indústria têxtil é muito tóxico e uma grande ameaça ao meio ambiente, pois utiliza muitos produtos químicos e corantes que não são fáceis de processar (Panhwar, 2024).

3.2.2. Corantes

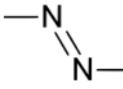
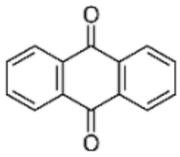
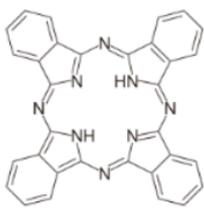
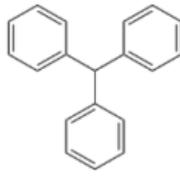
De acordo com os autores (Saufi *et al.*, 2020), os corantes têxteis, são compostos orgânicos ou inorgânicos, obtidos através de fontes naturais ou sintéticas, que têm por finalidade dar cor às fibras sob condições de processos predeterminado, sendo utilizados nas indústrias têxteis possuindo natureza complexa e representam aproximadamente dois terços do mercado de corantes, sendo considerados, portanto, importantes componentes da indústria química e têxtil. A produção de corantes sintéticos está excedendo 700.000 toneladas, com mais de 100.000 corantes disponíveis comercialmente em todo o mundo.

Os corantes estão classificados de acordo com sua estrutura química ou pelo modo com que o mesmo é fixado à fibra têxtil, porém, as mesmas características que conferem aos corantes a capacidade de interagir com a superfície do material e permanecer ali inalterado por períodos prolongados, podem ser responsáveis pela sua recalcitrância e toxicidade (Banat *et al.*, 1996).

Os corantes apresentam estruturas químicas complexas. Possuem anéis aromáticos e/ou duplas ligações responsáveis pela cor, chamados cromóforos, e também o grupo dos auxocromos, que funcionam como doadores ou aceptores de elétrons, que provocam ou intensificam a cor dos cromóforos. Ou seja, são responsáveis pela fixação do corante à fibra (Santos *et al.*, 2007). As classificações dos corantes de acordo com sua estrutura química estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos corantes de acordo com sua estrutura química.

Classe	Características
--------	-----------------

<p>Corantes Azo</p> 	<p>Substâncias que contém o grupamento (-N=N-) como grupo cromóforo. Podem ser descritos como monoazo, diazo, triazo e poliazo, de acordo com o número de grupamentos azo.</p>
<p>Antraquinona</p> 	<p>Estrutura composta por anéis aromáticos e grupos carbonílicos como grupo cromóforo. Apresentam brilho e estabilidade, incluindo resistência à luz, porém são caros.</p>
<p>Ftalocianina</p> 	<p>Compostos de coordenação macrocíclicos, conjugados constituídos por quatro anéis isoindóis, que são a junção de um anel benzênico com um anel pirrol. Assim, o cromóforo constitui de um sistema planar tetra-aza derivado de uma benzotetraporfirina.</p>
<p>Triarilmetano</p> 	<p>Compostos de coordenação macrocíclicos, conjugados constituídos por quatro anéis isoindóis. Onde esses anéis é a junção de um anel benzênico com um anel pirrol. Assim, o cromóforo constitui de um sistema planar tetra-aza derivado de uma benzotetraporfirina.</p>

Fonte: Santos (2019).

Os corantes também podem ser classificados com base no seu modo de fixação às fibras, conforme mostrado na Tabela 2. Nesta tabela, é apresentada a relação entre o substrato, a classe de corantes e seu método de aplicação.

Tabela 2 – Classificação dos corantes conforme fixação na fibra têxtil.

Grupo de corante	Solubilidade em água	Fibra têxtil	Principal grupo cromóforo
Corantes reativo	Elevada solubilidade	Fibras celulósicas (algodão e viscose) e fibras proteicas (seda e lã)	Azo e antraquinona
Corantes ácidos	Solúveis	Fibras proteicas e de poliamida	Azo, antraquinona, triarilmetano

Corantes dispersos	Praticamente insolúveis	Fibras hidrofóbicas (poliéster)	-
Corantes diretos	Solúveis	Fibras celulósicas	Azo
Corantes de cuba	Praticamente insolúveis	Fibras celulósicas	Índigo, antraquinona
Corantes sulfurosos	Insolúveis	Fibras celulósicas	-
Corantes metálicos	-	Fibras proteicas, poliamida	Azo
Corantes básicos	Solúveis	Fibras acrílicas e proteicas	-

Fonte: Adaptado Benkhaya *et al.* (2020).

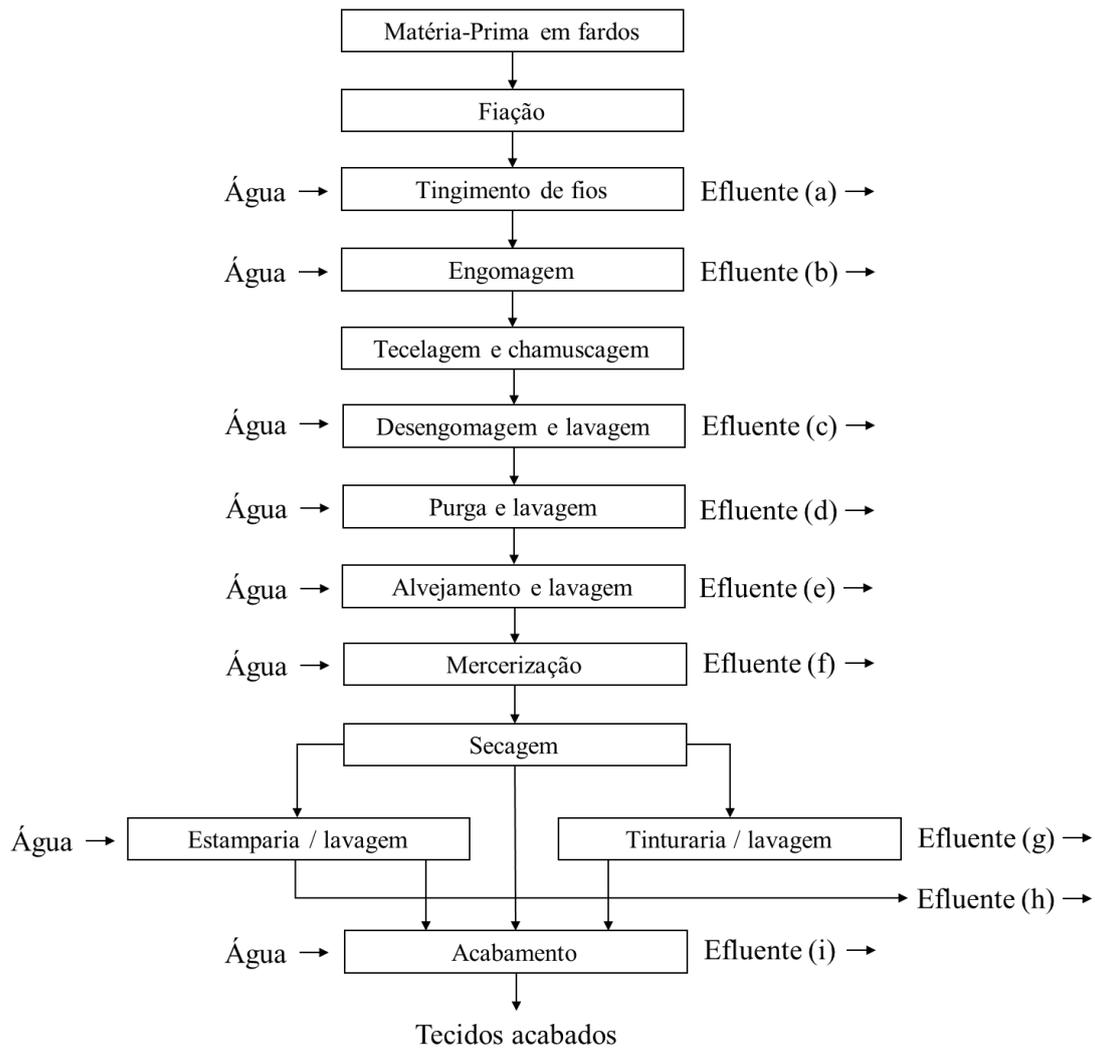
3.2.3. Efluentes da indústria têxtil

Segundo os autores (Ambika; Scirilekh, 2021), 20 % de poluição das águas industriais é proveniente da indústria têxtil, isso se dá devido aos grandes volumes de águas residuais produzidas, o que faz com que esse setor seja considerado uma das maiores fontes de poluição de água. Devido aos seus processos intensivos em água, a indústria têxtil acaba causando o acúmulo de poluentes durante seus diferentes estágios.

Os resíduos líquidos caracterizam-se por conter alta concentração de corantes naturais e sintéticos, que podem conter metais pesados, além de elevada DBO e sólidos totais (Almeida *et al.*, 2016). Além disso, possuem baixos níveis de degradação, apresentando assim grande potencial de poluição, principalmente dos mananciais, pois as suas características químicas lhe conferem grande estabilidade, tornando-os muito persistentes no meio ambiente.

As águas de rios, lagos e lagoas sofreram crescente contaminação e passaram a ser a principal fonte de poluição no país. Isso se dá pela ampla utilização da água nos processos. A Figura 2 mostra a utilização de água nas etapas do processamento têxtil, a geração de efluentes e sua caracterização.

Figura 2 – Etapas da utilização de água nas etapas do processo têxtil.



Fonte: Braile e Cavalcanti (1993).

Sendo que, na Figura 2: (a) DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) elevada, alto teor de sólidos e pH de neutro a alcalino; (b) e (c) pH neutro, temperatura, DBO e teor de sólidos totais elevados; (d) temperatura elevada e altos teores de DBO, alcalinidade e teor de sólidos totais; (e) DBO elevada; pH alcalino e alto teor de sólidos; (f) DBO baixa, pH fortemente alcalino e baixo teor de sólidos/ (g) pH neutro a alcalino, alto teor de sólidos e elevada DBO; (h) elevada DBO, pH alcalino; (i) elevada DBO e pH alcalino (Braile e Cavalcanti, 1993).

O tingimento têxtil gera um dos efluentes que mais agridem o meio ambiente, na maioria das vezes são tóxicos e não biodegradáveis, além de serem resistentes a digestão aeróbia. Esses poluentes são prejudiciais à saúde humana, uma vez que são altamente cancerígenos, portanto, é essencial que esses efluentes sejam tratados antes de serem lançados no meio ambiente (Uygun *et al.*, 2021).

3.2.4. Legislação

Para que os efluentes industriais sejam descartados em corpos hídricos, é crucial que atendam aos padrões estabelecidos pela legislação. Assim, é fundamental que a legislação defina claramente os critérios e que haja fiscalização por parte dos órgãos ambientais para assegurar a conformidade com a lei.

No Brasil, o CONAMA é o principal órgão responsável por regular os padrões dos efluentes a serem lançados. Entre suas competências estão deliberações, sob a forma de resoluções, proposições, recomendações e moções, visando o cumprimento dos objetivos da Política Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2024).

A Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997, lista a indústria têxtil como uma das atividades que necessita de licenciamento ambiental devido a seu potencial poluidor e de degradação ao meio ambiente. Diante disto, uma das resoluções que pode ser citada para tratar da disposição de efluentes líquidos é a Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Esta resolução determina as condições, parâmetros, padrões e diretrizes para o lançamento de efluentes em corpos de água receptores, que só deverá acontecer após o devido tratamento, e vem para complementar a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005 (CONAMA, 2011).

Um ponto muito importante sobre os efluentes que serão lançados é que não poderão conferir às águas receptoras características capazes de causar efeitos letais ou alteração de comportamento, reprodução ou fisiologia da vida, bem como de restringir seus usos previstos, o que é destacado no artigo 34 desta Resolução (CONAMA, 2011).

São abordadas, então, as condições que devem ser obedecidas para o lançamento dos efluentes diretamente nos corpos hídricos receptores. Algumas destas condições são dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições de descarte para efluentes industriais.

Parâmetro analisado	Condições de descarte
pH	5 < pH < 9
Temperatura	Inferior a 40 °C
Materiais sedimentares	Até 1 ml.L ⁻¹

Regime de lançamento	Vazão máxima de até 1,5 vez a vazão média de atividade do efluente
DBO (5 dias a 20 °C)	Remoção mínima de 60% de DBO

Fonte: CONAMA (2011).

A resolução ainda determina que os próprios responsáveis pela fonte poluidora deverão realizar o controle e monitoramento dos efluentes lançados nos corpos receptores. Entretanto, as coletas de amostras e as análises deverão ser feitas por laboratórios acreditados pelo Instituto Nacional de Metrologia e Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO (CONAMA, 2011).

3.2.5. Tratamento de efluentes gerados pela indústria têxtil

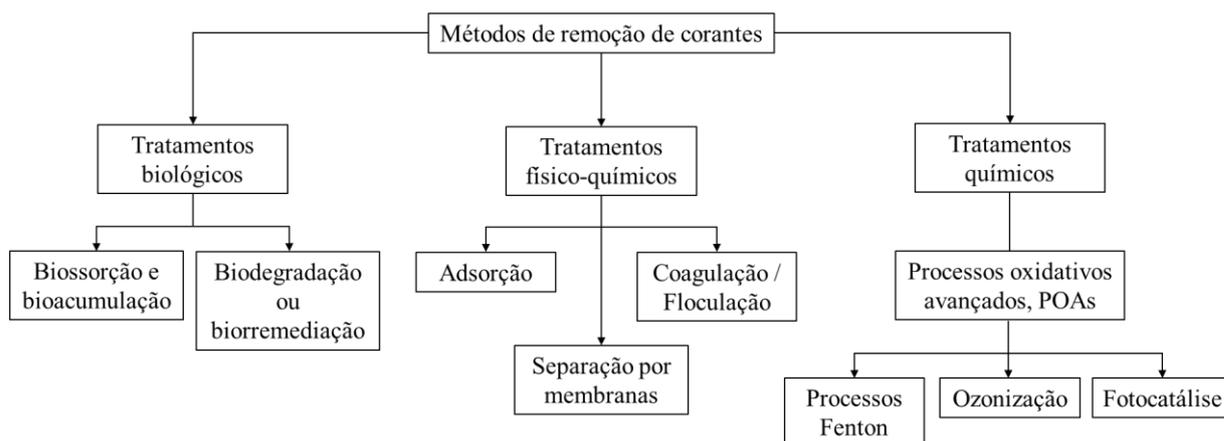
Devido ao aumento da demanda de água, as águas residuais provenientes das indústrias devem ser tratadas e reutilizadas, e não descartadas, sendo dessa forma, um novo recurso hídrico (Sahinkaya *et al.*, 2018).

A remoção dos corantes é a principal preocupação das indústrias têxteis, devido principalmente a sua baixa degradabilidade. A presença de corantes nessas águas impede a penetração da luz solar nas camadas mais profundas, alterando a atividade fotossintética do meio, resultando em deterioração da qualidade dessa água, diminuindo a solubilidade de oxigênio, e resultando em efeitos tóxicos sobre a fauna e flora aquática (Kumar *et al.*, 2021).

As principais tecnologias para o tratamento de efluente são divididas em métodos físico-químicos, químicos e biológicos (Ahmed *et al.*, 2021). De maneira geral, a indústria têxtil utiliza como método para tratamento dos efluentes a operação conjunta de sistemas físico-químicos de precipitação e coagulação seguido de tratamento biológico utilizando de lodos ativados (Ramos *et al.*, 2021). Dessa forma é essencial a busca de novos tratamentos para os efluentes têxteis que combinem eficiência, sem a geração de resíduos adicionais e com baixos custos.

Os tratamentos são divididos em biológicos, químicos e físico-químicos, de modo que pode haver a integração ou não entre eles, e os tipos principais estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama das principais tecnologias para a remoção de corantes.



Fonte: Adaptado Guaratini e Zanoni (2000).

A remoção dos corantes do efluente têxtil é considerada complexa em virtude das particularidades do efluente como a de possuir sólidos suspensos, alta demanda biológica de oxigênio, alta demanda química de oxigênio, a sua estabilidade e a sua baixa biodegradabilidade. Por isso o tratamento deste efluente em estações de tratamento convencionais é considerado inviável (Piaskowski *et al.*, 2018).

3.3. PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

3.3.1. Aspectos Gerais

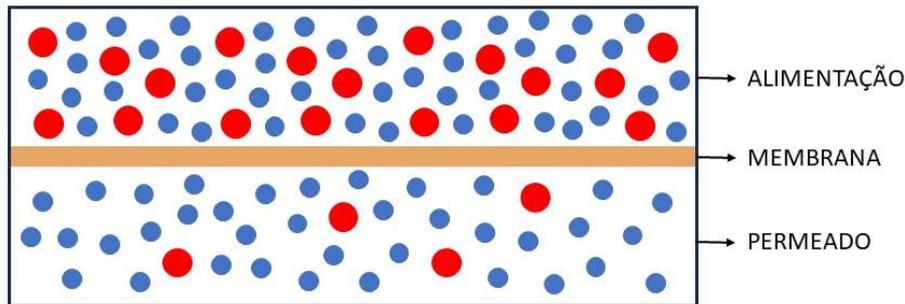
Obtendo cada vez mais mercado, o processo de separação por membranas possui aplicações em diversos setores como na indústria química, de alimentos e farmacêutica. Por possuir alta seletividade e menor demanda de energia para o processo, visto que não envolve o fenômeno de mudança de fase, apresenta vantagem econômica quando comparada com processos de separação convencionais (destilação, adsorção, absorção, extração e cristalização) (Rocha *et al.*, 2021).

Além disso, os processos que utilizam a tecnologia de membranas oferecem ainda simplicidade de operação (não necessitam de mão-de-obra intensiva) e escalonamento, e são adequados para a separação de compostos termolábeis (Habert *et al.*, 2006).

O autor (Cheryan, 1998) define membrana como uma barreira seletiva, a qual permite a passagem de certos componentes e retém outros componentes de uma mistura. Em outras palavras o princípio é baseado em aplicar uma barreira (membrana) para restringir total ou parcialmente o transporte de uma ou mais espécies de interesse, com o objetivo de concentrar, separar e/ou purificar componentes de interesse em uma corrente

de alimentação. Como mostrado na Figura 4, para que ocorra a separação, uma ou mais espécies presentes inicialmente na corrente de alimentação atravessam a membrana (denominado permeado ou filtrado) enquanto outra fração é retida (concentrado ou retido).

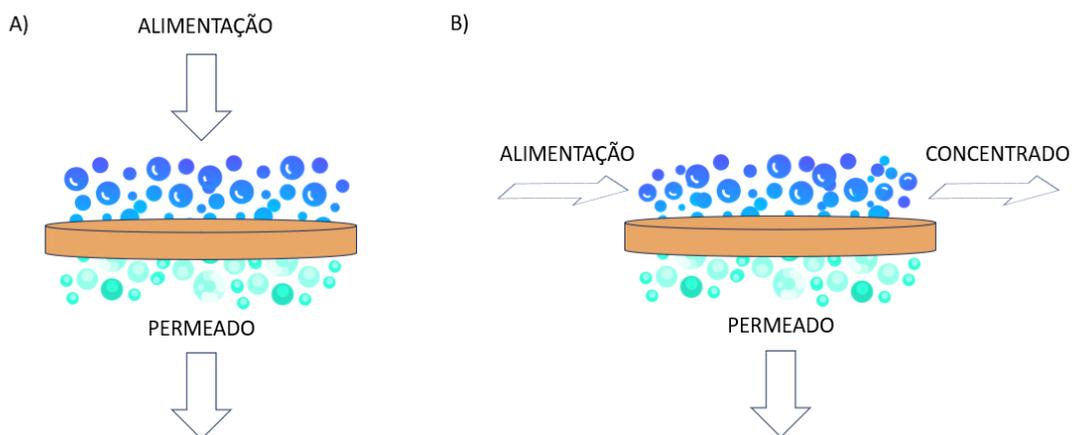
Figura 4 – Esquema representativo de um processo de separação por membranas.



Fonte: Adaptado Burggraaf (1996).

Para que uma espécie seja transportada através da membrana, é necessária a existência de uma força motriz, como gradiente de pressão, temperatura ou de concentração (Mulder, 1991). Ainda, um processo de separação por membranas pode ser operado em duas diferentes configurações de escoamento, como mostrado na Figura 5: convencional (*dead-end*) (Figura 5.a) ou tangencial (*crossflow*) (Figura 5.b).

Figura 5 – Esquema representativo da filtração convencional (a) e tangencial (b).



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

A operação no modo convencional ocorre de forma que a solução esco perpendicularmente à superfície da membrana, enquanto no modo tangencial esse

escoamento ocorre de forma paralela. O processo realizado de modo tangencial é mais eficiente devido ao menor acúmulo de substâncias próximo à superfície da membrana (Mulder, 1991).

3.3.2. Características das membranas

Determinar as características físicas das membranas é crucial para garantir o desempenho e a eficiência dos processos de separação, filtração ou purificação em que são utilizadas. Características como espessura, porosidade, seletividade e permeabilidade influenciam diretamente na membrana e na sua capacidade de resistir ao desgaste e à degradação ao longo do tempo (Habert *et al.*, 2006).

Além disso, compreender essas propriedades é essencial para otimizar o processo de fabricação das membranas, garantindo a produção de produtos de alta qualidade de maneira eficiente, podendo melhorar a economia e na sustentabilidade dos processos, contribuindo para uma operação mais econômica e ambientalmente amigável (Meng; Wang, 2020).

- a) Espessura: É a profundidade do filme sólido onde ocorre o processo de separação. E em membranas homogêneas, quanto maior é essa subcamada, maior será a resistência à filtração ou ao fluxo, e com isso menor é a taxa de permeação. Já em membranas sintetizadas em suporte macroporoso (diâmetros de poros maiores), a resistência ao fluxo decresce. Esta camada também é, na maioria das vezes, denominada de pele.
- b) Porosidade: Volume ocupado pelos vazios (poros) dividido pela superfície da membrana, expressa em volume de poros por metro quadrado.
- c) Seletividade: Definida como a capacidade da membrana em reter ou não determinadas substâncias, ou seja, qual o diâmetro de corte do processo de separação. Esta propriedade depende da distribuição dos diâmetros dos poros da membrana, sendo que o diâmetro de corte é um valor médio de uma distribuição de tamanhos de poros.
- d) Permeabilidade: É considerada como a relação entre a vazão do permeado pela área da membrana e a força motriz aplicada, sendo que a vazão é a somatória das taxas volumétricas ou mássicas de cada poro que se comporta como vários

capilares de escoamento. O transporte efetuado através da membrana depende da força motriz, que pode ser: mecânica, química, elétrica e térmica.

A membrana ideal deve ter elevadas seletividade e permeabilidade, entretanto quando se maximiza a seletividade, geralmente diminui-se a permeabilidade e vice-versa. A eficiência do processo de separação por membrana depende do fluxo e da seletividade (Alique *et al.*, 2018).

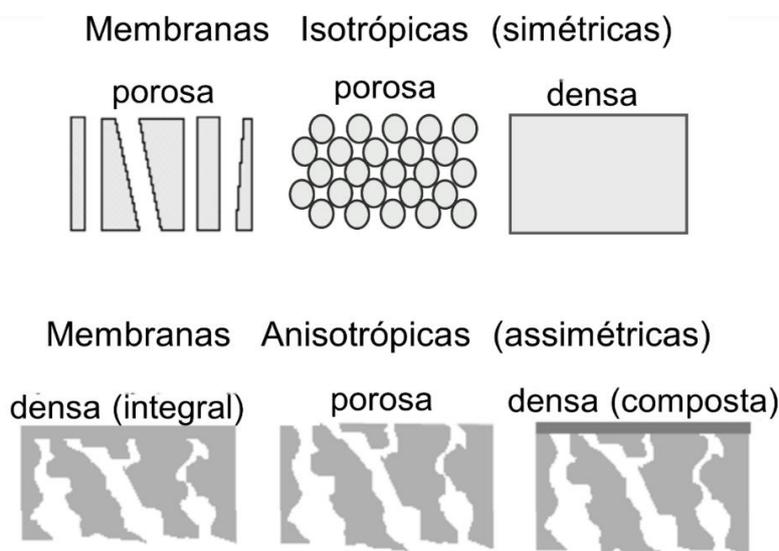
3.3.3. Classificação das membranas

As membranas podem ser categorizadas por diferentes critérios, como morfologia, material, hidrofobicidade e integridade. Essas categorizações ajudam a entender as características e o desempenho das membranas em diferentes aplicações e processos de separação. A escolha da membrana mais adequada dependerá dos requisitos específicos da aplicação (Mulder e Nunes, 2019).

Em função das aplicações a que se destinam, as membranas apresentam diferentes morfologias. De um modo geral, as membranas podem ser classificadas em duas grandes categorias: densas e porosas. Nas densas, a transferência molecular é feita pelo mecanismo de solução-difusão. Já as membranas porosas, apresentam poros fixos e boa resistência mecânica. As características da superfície da membrana que estão em contato com a solução a ser separada é que vão definir a utilização de uma membrana densa ou porosa (Habert *et al.*, 2006).

Tanto as membranas densas quanto as porosas (mostrada na Figura 6), podem ser classificadas como isotrópicas ou anisotrópicas, as anisotrópicas se caracterizam por uma região superior muito fina, mais fechada sendo com ou sem poros, quando as duas regiões são constituídas por um único material a membrana será do tipo anisotrópica integral, se os materiais forem diferentes a membrana será do tipo anisotrópica composta (Habert *et al.*, 2006).

Figura 6 – Esquema representativo das diferentes morfologias de membranas.



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

A separação dos solutos é feita da seguinte forma: (i) todas as partículas maiores do que os poros maiores são completamente rejeitadas; (ii) as partículas com diâmetros intermediários (menores do que os poros maiores e maiores do que os menores) são rejeitadas de forma parcial, de acordo com a distribuição do tamanho dos poros da membrana e (iii) as partículas menores do que os menores poros irão passar através da membrana. Assim, o processo de separação de solutos através das membranas porosas é principalmente função do tamanho molecular e da distribuição de tamanho dos poros. Em geral, apenas as moléculas que diferem consideravelmente de tamanho podem ser separadas eficazmente por membrana porosa. As membranas isotrópicas densas são formadas por um filme denso onde o permeado é transferido por difusão. Já as membranas isotrópicas eletricamente carregadas podem ser densas ou porosas e impregnadas de íons positivos e negativos ((Habert *et al.*, 2006).

Ainda de acordo com os autores (Habert *et al.*, 2006), as membranas podem ser naturais ou sintéticas, as membranas sintéticas são divididas em dois grupos como mostra a Tabela 4. Normalmente as membranas de natureza orgânica apresentam menor custo de produção do que as inorgânicas. No entanto, estas últimas apresentam uma maior vida útil e permitem limpezas mais eficientes.

Tabela 4 – Classificação das membranas sintéticas.

Poliméricas	Inorgânicas
Acetato de celulose	Cerâmicas
Poli(sulfona)	Carbono
Poli (éter sulfona)	Óxidos metálicos
Poli (acrilonitrila)	Metais
Poli (éter imida)	
Poli (carbonato)	

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

As membranas poliméricas são usadas em muitos processos industriais. Uma gama de polímeros pode ser usada, como derivados de celulose, polivinildenodifluoresto (PVDF), polissulfona (PS), poliéter sulfona (PES), poliacrilonitrila (PAN), politetrafluoroetileno (PTFE) e policloreto de vinila (PVC). Essas membranas podem ser adaptadas às especificidades do processo em que são utilizadas, tornando mais eficaz a separação seletiva. Selecionar uma membrana polimérica para uma determinada tarefa não é tão simples, pois o polímero deve ter afinidade e deve suportar as condições severas da separação (Dickhout *et al.*, 2017).

As membranas inorgânicas são constituídas em sua maioria por óxidos tais como sílica, titânia, zircônia e alumina. Outras matérias-primas como mulita e cordierita também têm sido mencionadas para a preparação membranas porosas, que podem ser utilizados isoladamente ou combinados, como é o caso das membranas compósitas (Chuah *et al.*, 2020).

As membranas de cerâmica apresentam boa resistência química e física, suportam altas temperaturas e operam em faixas mais abrangentes de pH, porém devido ao seu alto custo de produção e às necessidades operacionais de altas pressões, bem como a exigência de grande consumo de energia elétrica, somente são usadas em casos muito específicos de tratamento de efluentes industriais (Asif; Zhang, 2021).

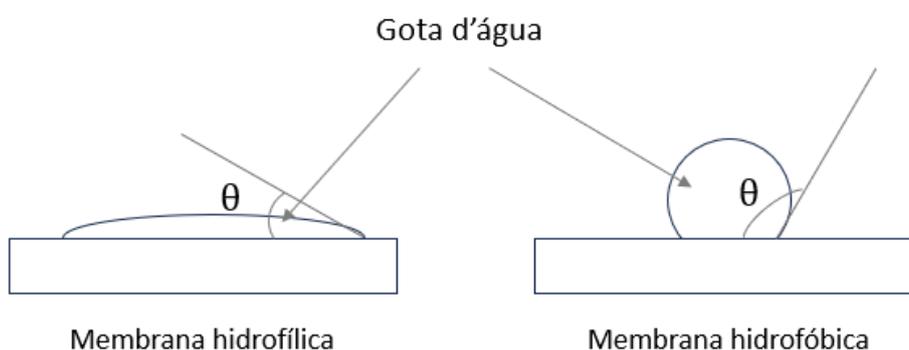
Para soluções aquosas alimentadas aos processos de separação com membranas, como o tratamento de efluentes da indústria têxtil, o ideal é que a membrana seja hidrofílica, ou seja, tenha atração pela água. Se o material da membrana for hidrofóbico,

terá a capacidade de adsorver componentes que são hidrofóbicos ou anfotéricos, resultando em incrustação (Cheryan, 1998).

A medida da hidrofiliicidade relativa de uma membrana é determinada pela observação do ângulo de contato com uma gota d'água (Cheryan, 1998). O instrumento que tem a finalidade de medir a capacidade de umedecimento de uma superfície é chamado de Goniômetro. A Figura 7, ilustra essa medição.

Observa-se que a gota de água colocada sobre um material completamente hidrófilo se espalha sobre a superfície, o que resulta em um ângulo (θ) de contato baixo ou praticamente nulo. Um material hidrofóbico, por outro lado, faz com que a gota d'água tenha o mínimo de contato com a superfície possível, resultando num elevado ângulo (θ).

Figura 7 – Representação do ângulo de contato para membranas com material da superfície hidrofílica e hidrofóbica.



Fonte: Adaptado Cheryan (1998).

3.3.4. Principais processos de separação por membranas e aplicações

Para definir o tipo de processo no qual determinada membrana poderá ser utilizada, é necessário conhecer características como porosidade, tamanho dos poros e morfologia inerentes a esta. O processo de microfiltração (MF), assim como a ultrafiltração (UF), utiliza membrana do tipo microporosa (Gitis; Rothenberg, 2016), enquanto a membrana utilizada na nanofiltração (NF) pode ser porosa ou com uma fina camada densa sobre um suporte poroso. Ainda, as membranas utilizadas nos processos de osmose inversa, separação de gases e pervaporação, são principalmente do tipo densa composta (Baker; Richard, 2012).

O transporte de espécies através das membranas ocorre, na maioria dos processos, sob a força motriz de um gradiente de potencial químico (gradiente de pressão ou de

concentração) ou de potencial elétrico (Biron *et al.*, 2017). As características de cada um dos processos são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características e aplicações dos processos de separação por membranas.

Processo	Força motriz	Material retido	Material que permeia	Aplicações
Microfiltração (MF)	ΔP (0,5 – 2 atm)	Material em suspensão, bactérias. Massa molar > 500 kDa (0,01 μm).	Água e sólidos dissolvidos	Esterilização bacteriana; clarificação de vinhos e cervejas; concentração de células; oxigenação de sangue.
Ultrafiltração (UF)	ΔP (1 – 7 atm)	Coloides, macromoléculas. Massa molar > 5 kDa	Água (solvente), sais solúveis de baixa massa molar	Fracionamento/concentração de proteínas, recuperação de pigmentos/óleos.
Nanofiltração (NF)	ΔP (5 – 25 atm)	Moléculas de massa molar média $500 < MM < 2 \text{ kDa}$	Água, sais e moléculas de baixa massa molar	Purificação de enzimas; biorreatores a membrana.
Osmose inversa (OI)	ΔP (15 – 80 atm)	Todo material solúvel ou em suspensão	Água (solvente)	Dessalinização de águas; concentração de suco de frutas; desmineralização de águas
Diálise (D)	ΔC	Moléculas de massa molar > 5 kDa	Íons e orgânicos de baixa massa molar	Hemodiálise; rim artificial; recuperação de NaOH.
Eletrodiálise (ED)	ΔE	Macromoléculas e compostos não iônicos	Íons	Concentração de soluções salinas; purificação de águas.
Permeação de gases (PG)	$\Delta P \rightarrow \Delta C$	Gás menos permeável	Gás mais permeável	Recuperação de hidrogênio; separação CO_2/CH_4 ; fracionamento do ar
Pervaporação (PV)	Pressão de vapor	Líquido menos permeável	Líquido mais permeável	Desidratação de álcoois; eliminação de VOC da água.

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

Geralmente, há mais de um processo que pode ser utilizado para realização de uma operação de separação, sendo que a seleção do processo adequado depende de vários fatores, como a natureza dos constituintes de uma mistura, o volume a ser processado, o grau de separação necessário e o custo do processo (Strathmann, 1981).

3.3.5. Processos de Fabricação das Membranas

Há vários métodos que podem ser utilizados nos processos de fabricação das membranas cerâmicas, que consistem basicamente na conformação e no tratamento térmico.

3.3.5.1. Prensagem

O processo de conformação mais utilizado, tanto pelo processo por via úmida quanto pelo processo por via seca, para revestimentos cerâmicos porosos é a prensagem. Considera-se a prensagem uma etapa importantíssima na fase do processo produtivo de revestimento cerâmico, pois uma compactação mal feita pode proporcionar vários defeitos ao produto final, comprometendo sensivelmente sua qualidade (Soares *et al.*, 2010).

A prensagem consiste na compactação da massa cerâmica contida no interior de uma matriz rígida ou flexível (molde), com aplicação de uma pressão. A processo tem por finalidade produzir peças uniformes de acordo com as dimensões e geometria pré-estabelecidas e contribuir na obtenção de microestruturas adequadas às características finais pretendidas (Lot *et al.*, 2018)

Segundo os autores (Sanchez e Monfort, 2003), à medida que se aumenta a pressão de compactação e a umidade, a resistência mecânica das peças em estado verde também aumenta. O processo de prensagem pode ser uniaxial ou isostático. A prensagem uniaxial produz a falta de uniformidade da pressão dentro do molde, provocando diferenças de densidade ao longo do corpo cerâmico produzido. Entretanto, há várias possibilidades de produzir peças cerâmicas das mais variadas formas, podendo também haver automação no sistema para aumento da taxa de produção (Silva, 2009).

No processo de prensagem isostática, a pressão é aplicada em várias direções para obter maior uniformidade de compactação e aumentar a capacidade de forma em

comparação com a prensagem uniaxial, pode ser feita a frio ou quente (Rahaman, 2003). O processo promove um melhor empacotamento das partículas e conseqüentemente, uma maior densidade, distribuição uniforme dos poros das membranas e a compactação ocorre no interior de uma matriz flexível sobre o qual atua um fluido pressurizado (Esposito; Piancastelli, 2009).

3.3.5.2. Tratamento Térmico

Após o processo de moldagem e obtenção da peça cerâmica crua, é necessário realizar o tratamento térmico, no qual serão atribuídas as propriedades finais da membrana ou da camada depositada quando o processo é feito camada por camada. O tratamento térmico é dividido em três etapas – secagem, calcinação e sinterização – as quais são realizadas em temperaturas diferentes e com rampas de aquecimento para evitar defeitos e para que a etapa ocorra por completo (Gitis; Rothenberg, 2016).

A primeira etapa, a secagem, é relativamente simples. Os autores (Soares *et al.*, 2010) advertem que esta etapa deve ser realizada com muito cuidado para evitar defeitos na peça compactada. A secagem é a etapa em que ocorre a evaporação do solvente, enquanto a rede de grãos é mantida em ordem, apenas os aproximando pela perda do solvente, através de uma evaporação progressiva. Nesta etapa, percebe-se que, à medida que a água é evaporada, ocorre a densificação da peça crua e, conseqüentemente, um aumento da resistência mecânica. Isto é atribuído ao empacotamento e à atração entre as partículas que promovem o aumento das forças de ligação entre elas (de Oliveira e Hotza, 2011).

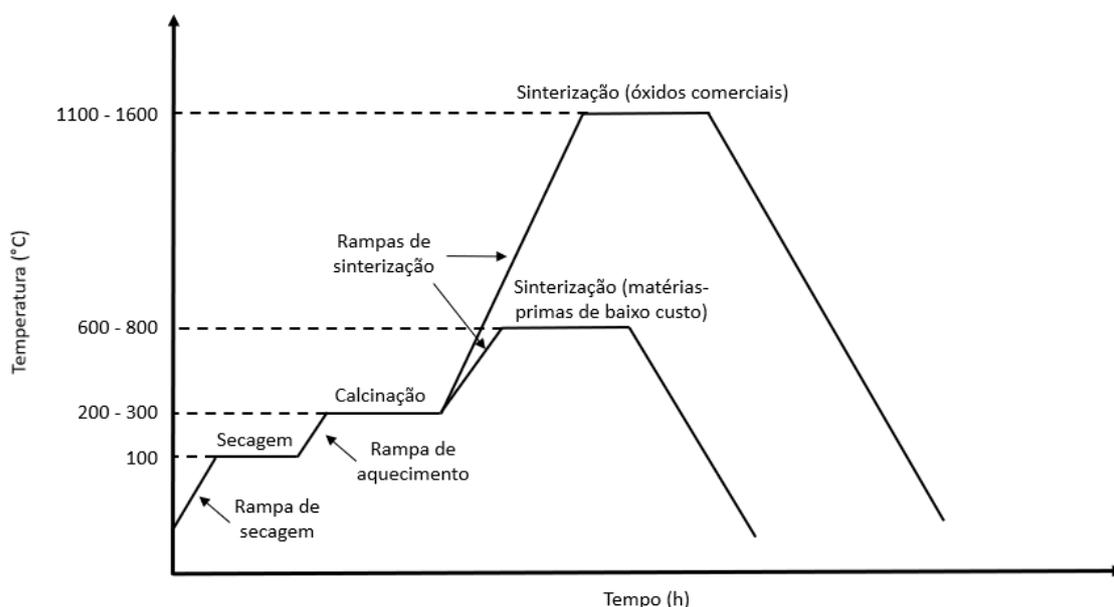
Na sequência, passa-se para a etapa de calcinação, na qual serão removidos os aditivos orgânicos, como ligantes, dispersantes e agentes formadores de poros. A remoção incompleta ou incorreta destes aditivos pode gerar defeitos na membrana (Baker, 2012)

A sinterização é a etapa final da fabricação de uma membrana cerâmica, tem como objetivo estabilizar a estrutura cristalográfica e morfológica da membrana. A temperatura de calcinação determina as estabilidades térmica, mecânica e define a estrutura de uma membrana. Nesta última etapa, ocorre a consolidação do material cerâmico através do aquecimento da peça cerâmica crua a temperaturas por volta de 50 a 90% da temperatura de fusão dos grãos na ausência de um líquido (Gitis; Rothenberg, 2016).

A temperatura de sinterização é determinada com base nas matérias-primas de partida usadas para a fabricação das membranas, nas características desejadas (tamanho e distribuição de tamanhos dos poros) e o custo envolvido para a fabricação da membrana. (Monash *et al.*, 2013).

Nos últimos anos, grandes esforços têm sido feitos no campo da tecnologia de membranas para desenvolver novos materiais cerâmicos porosos baseados em matérias-primas de baixo custo que requerem temperaturas de sinterização significativamente mais baixas do que aquelas usadas em membranas de óxido comerciais, reduzindo assim o custo de processamento (Mestre, 2019). A comparação é mostrada na Figura 8.

Figura 8 – Esquema de temperaturas para o Tratamento Térmico.



Fonte: Própria (2024).

A secagem ocorre em torno de 100 °C, para remover a água dos precursores da membrana. A calcinação é a etapa em que todos os componentes orgânicos do precursor da membrana são removidos. A etapa final de sinterização é necessária para obter alterações na porosidade e tamanho dos poros da membrana criando a forma final da membrana com a resistência mecânica adequada (Kayvani Fard *et al.*, 2018).

3.4. MEMBRANAS CERÂMICAS

As membranas cerâmicas são abundantemente empregadas em diversos processos de separação e em diversas áreas de setores industriais, como processamento de alimentos, tratamento de rejeitos industriais, tratamento de águas e efluentes industriais, processos

biométricos, têxtil, químicos, dessalinização da água de mar, retenção de bactérias, soro residual do processamento do queijo, separação de óleo e água, esterilização da água do coco verde e no tratamento de água potável (Soria, 1995).

O crescimento dos processos de separações por membranas cerâmicas está relacionado com uma série de vantagens que as mesmas apresentam em relação as membranas poliméricas e aos processos clássicos de separação, desde os mais complexos (destilação e centrifugação), e outros processos relacionados às membranas poliméricas (Silva; Lira, 2006). As membranas cerâmicas apresentam uma ampla competitividade em relação às poliméricas, por apresentarem características superiores, tais como: maior estabilidade térmica, inércia química, estabilidade biológica, resistência mecânica, vida útil elevada, ocupação de pouco espaço físico, facilidade de limpeza, menor consumo de energia, maior seletividade e simplicidade de operação (Crespo; Boddeker, 1994).

Segundo os autores (Uhlhorn *et al.*, 1992), as aplicações das membranas cerâmicas ainda são restritas, apesar de ter um amplo conhecimento de suas aplicações. Mas de acordo com os autores (Silva e Lira, 2006), mesmo com essas restrições estima-se que os processos de separação por membranas cerâmicas crescem aproximadamente 15 %. Atualmente a problematização está relacionada ao custo de produção e substituição dos sistemas convencionais por essa tecnologia das membranas cerâmicas.

3.4.1. Matérias-primas utilizadas na produção das membranas

3.4.1.1. Argila

Utilizada em diversos setores tecnológicos e industriais, como indústrias de cosméticos, petróleo e gás, construção e de tratamento de água, as argilas podem ser definidas como material terroso, facilmente encontrada na natureza, de baixo custo de extração e processamento, de granulação fina que, geralmente, adquirem plasticidade quando entram em contato com água (Souza Santos, 1992; Novo *et al.*, 2021).

As argilas são compostas por materiais inorgânicos denominados de argilominerais, que são formados quimicamente por silicatos hidratados de alumínio ou magnésio. Os argilominerais são compostos por partículas extremamente pequenas, podendo conter matéria orgânica, sais solúveis, partículas de quartzo, pirita, calcita, outros minerais residuais assim como também minerais amorfos (Souza Santos, 1992).

Em geral, são materiais heterogêneos cujas características dependem de sua formação geológica e do local de extração. Desta forma, um mesmo depósito de argila pode conter muitos tipos de minerais ligeiramente diferentes. Logo, estudos de caracterização são imprescindíveis quando se quer obter um melhor conhecimento do potencial industrial de uma jazida de forma a otimizar a extração, o processamento dos materiais argilosos e encontrar novos campos para aplicação da matéria extraída (Magalhães *et al.*, 2021).

A argila esmectita é um dos mais importantes grupos de argilas encontrados em solos e sedimentos, também pode ser conhecida como montmorilonitas e bentonitas, caracterizando-se por possuírem uma alta capacidade de troca catiônica, é uma das matérias-primas mais baratas da membrana disponível no Brasil, pois são abundantes na natureza e possuem um baixo custo (Souza Santos, 1992).

Vários pesquisadores relataram o uso de argila como material de partida com outros aditivos para produção de membranas (Carmo *et al.*, 2022; Barbosa, 2024; Khalil, 2024; Khedidja, 2024).

3.4.1.2. Caulim

O caulim é um dos minerais mais abundantes que encontramos na crosta terrestre. O termo caulim denomina a rocha que contém a caulinita assim como para o produto resultante do seu beneficiamento. É formado essencialmente pela caulinita, apresentando cor branca ou quase branca, devido ao baixo teor de ferro (Mendonça *et al.*, 2021).

Em função do conjunto de características positivas, o caulim é versátil e aplicado nas indústrias de cerâmica, em formulações de produtos medicinais, cosméticos, creme dental, aditivo alimentar, como difusor de luz em lâmpadas incandescentes brancas, dentre outros (de Matos Roda *et al.*, 2023).

O caulim vem sendo bastante utilizado ao longo dos anos devido a suas excelentes características, como, baixa temperatura de sinterização, baixa plasticidade, altas propriedades refratárias e desempenho hidrofílico. Como as partículas de caulim contêm Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , K_2O , Na_2O , ele atua como auxiliar de sinterização para reduzir a temperatura de sinterização dos suportes cerâmicos finais uma vez que esses óxidos de metal podem reagir com Al_2O_3 e SiO_2 , aumentando a resistência à flexão em temperaturas de sinterização mais baixas (Zou; Fan, 2021).

3.4.1.3. Agentes porogênicos

Sistemas cerâmicos porosos com estruturas de poros personalizadas têm sido amplamente utilizados em aplicações industriais, incluindo filtração de metal fundido, tratamento de águas residuais, implantes biomédicos, isolamento térmico e suportes de catalisadores, devido à sua excelente resistência ao choque térmico, estabilidade química e propriedades mecânicas (Ketov *et al.*, 2021).

Ao contrário de materiais porosos produzidos a partir de polímeros que são hidrofóbicos, cerâmicas são altamente hidrofílicas. Portanto, sua preferência sobre os equivalentes poliméricos nas áreas de aplicação mencionadas acima. Consequentemente, o desenvolvimento de técnicas viáveis ou novos materiais para a fabricação de cerâmicas porosas robustas e confiáveis tornou-se uma tendência de pesquisa líder nos últimos anos (Dele-Afolabi *et al.*, 2022).

Além dos poros naturalmente presentes, formados entre as partículas do material que compõe a estrutura da membrana, é possível adicionar agentes formadores de poros, para aumentar a porosidade e consequentemente gerar um ganho na permeabilidade. Porém, esse aumento na porosidade pode gerar menor resistência mecânica, chegando até na inutilização da membrana (Zhao *et al.*, 2020). Portanto, o uso desses agentes porogênicos deve ser feito de forma bastante controlada.

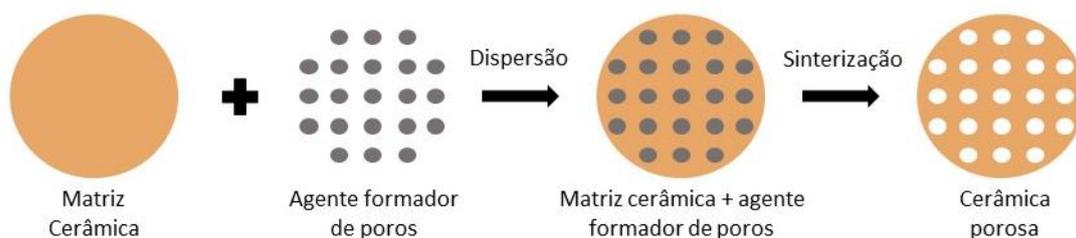
Diferentes materiais podem ser utilizados como agentes formadores de poros dentre os resíduos oriundos de diferentes atividades, os agroindustriais mais utilizados têm sido fibras naturais (coco, carnaúba, sisal e juta), resíduos de carvão vegetal, cinzas de cascas de arroz e cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (Andrade Neto *et al.*, 2021).

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de cana-de-açúcar seguido pela Índia e China. Para a safra brasileira atual (2023/24), estima-se que serão produzidas 677,6 milhões toneladas de cana-de-açúcar. Dos seus subprodutos, o bagaço é um dos mais atrativos e, para cada tonelada de cana processada para produção de açúcar e etanol, estima-se a geração de aproximadamente 250 a 300 kg de bagaço e aproximadamente 6 kg de cinzas do material (Andrade Neto *et al.*, 2021). Com base na produção anual, estima-se que foram geradas aproximadamente 4 mil toneladas de cinzas no país.

Os agentes porogênicos geralmente de natureza orgânica, quando submetidos ao tratamento térmico (etapa de calcinação) em temperatura entre 200 e 600 °C, se

decompõem. Portanto, os espaços antes ocupados por estes agentes, dão origem a uma rede de poros como mostrado na Figura 9 (Dele-Afolabi *et al.*, 2018).

Figura 9 – Esquema de processamento representativo do uso de agente porogênicos.



Fonte: Adaptado Dele-Afolabi *et al.* (2018).

3.4.2. Problemas inerentes na utilização de membranas

Com o tempo de uso a membrana pode ficar mais resistente à filtração, diminuindo o fluxo de permeação. Isso ocorre devido ao acúmulo de partículas dos componentes concentrados, que formam uma camada sobre a membrana e causam entupimento dos poros. Essa incrustação pode ocorrer por adsorção ou por deposição de material e é chamada de *fouling*. Além da redução de fluxo, o *fouling* também ocasiona uma maior demanda de energia, maior custo operacional, maior necessidade de manutenção e menor vida útil da membrana (Wen-Qiong *et al.*, 2019; Zou *et al.*, 2020).

As incrustações podem ser reversíveis ou irreversíveis. A resistência à incrustação de uma membrana depende de suas propriedades. Quanto maior a porosidade maior o fluxo de permeação e quanto menor a porosidade maior a tendência a incrustação. Além disso, uma maior hidrofobicidade da membrana aumenta a adesão de substâncias na sua superfície, devido as interações que ocorrem entre as partículas e a superfície da membrana (Wen-Qiong *et al.*, 2019). Quanto mais hidrofílica for a membrana, melhor será sua capacidade anti-incrustante (Zhao *et al.*, 2020; Zou *et al.*, 2020). Existem métodos para modificar a superfície da membrana para aumentar sua hidrofiliabilidade, reduzindo assim a incrustação e melhorando a seletividade e a pureza do permeado (Wen-Qiong *et al.*, 2019).

A lavagem intermediária do equipamento entre processos é necessária para reduzir os efeitos de incrustações. Existem também métodos específicos de limpeza para

restauração de fluxo: físico, químico, físico-químico e bioquímico. As três primeiras são as técnicas mais usadas. A limpeza física depende de forças mecânicas para remover sujeiras da superfície da membrana, e pode ser feita através de limpeza hidráulica, lavagem a ar e permeação de retorno de CO₂ (Wen-Qiong *et al.*, 2019).

3.5. TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS UTILIZANDO MEMBRANAS CERÂMICAS A BASE DE ARGILA

As membranas cerâmicas fabricadas a partir de argilas têm ganhado atenção crescente devido à sua durabilidade e custo acessível. Estas membranas apresentam excelente estabilidade térmica e química, tornando-se ideais para aplicações em tratamento de água e processos industriais (Chikri *et al.*, 2024).

Pesquisas recentes focam na otimização dos métodos de fabricação e na melhoria das propriedades estruturais das membranas, visando aumentar sua eficiência e durabilidade. Vários pesquisadores exploraram o uso de membranas de baixo custo no tratamento de efluentes da indústria têxtil, as quais serão descritas a seguir.

Os autores (Ahmed; Mir, 2024) fabricaram membranas cerâmicas a base de argila natural e pura da Caxemira, para a remoção do corante índigo carmim. As membranas foram preparadas a partir de diferentes tamanhos de matéria-prima (malha ASTM de -60, -80, -120 e -200), pressões de compactação (50–200 MPa) e temperaturas de sinterização (800–950 °C), para determinar o efeito das condições de fabricação nas propriedades. A membrana ótima, escolhida pelos autores, atingiu a maior rejeição de 98,54 % para uma concentração de corante de 100 ppm, pressão aplicada de 2 bares e pH 1, revelando a influência significativa do pH na eficiência de remoção do corante.

De acordo com os autores (Agarwalla *et al.*, 2022), as membranas cerâmicas podem ser produzidas a partir do caulim. Cinco composições de membrana diferentes foram escolhidas variando a quantidade de caulim e ligantes. A membrana com o maior fluxo de água apresentou uma porosidade de 34,5 %, tamanho de poro de 2,28 µm, resistência mecânica de 7,1 MPa e permeabilidade de $6,12 \times 10^{-9} \text{ m.Pa}^{-1}.\text{s}^{-1}$, sendo selecionada para microfiltração do corante azul de metileno. A remoção do corante para concentração de alimentação de 10 mg.L⁻¹ foi de 99,07%, que diminuiu para 93,45% para 100 mg.L⁻¹ a uma pressão transmembrana de 1,5 bar.

Conforme o estudo de outros autores (Manni *et al.*, 2020), membranas cerâmicas de baixo custo, para o processo de microfiltração, foram produzidas a partir magnésita natural marroquina e argila. A membrana otimizada (sinterizada a 1100 °C) possui uma porosidade de 48,15 %, um tamanho de poro de 1,12 µm, uma permeabilidade à água de 922 L.h⁻¹.m⁻².bar⁻¹ e uma resistência mecânica de 6,1 MPa. Após a caracterização, a membrana foi submetida à filtração de águas residuais têxteis industriais para avaliar seu desempenho, obtendo uma rejeição de 99,9 %.

Outro exemplo de estudo é o dos autores (Lagdali *et al.*, 2023). O objetivo do estudo foi a elaboração e caracterização de uma nova membrana cerâmica plana baseada em uma argila fengita marroquina natural, para aplicações de microfiltração. A membrana foi sinterizada a 1050 °C, tem uma porosidade de 34,5 %, um diâmetro médio de poro de 3,9 µm, permeabilidade à água de 43,50 L.h⁻¹.m⁻².bar⁻¹, resistência mecânica de 26,7 MPa e excelente resistência à corrosão química em meios ácidos e básicos. A rejeição da membrana foi de 100 %.

Também se considera a pesquisa dos autores (Rakcho *et al.*, 2023), que produziram membranas cerâmicas de argila vermelha com resíduos de chá verde de Safi, no Marrocos, a rejeição da cor, para o efluente, foi de 83,33 %. A membrana foi sinterizada a 1100 °C e apresentou tamanho médio de poro de 2,8 µm, porosidade de 39,15 %, resistência mecânica no valor de 14,81 MPa e permeabilidade de 1249 L.h⁻¹.m⁻².bar⁻¹. Os autores determinaram o sucesso da membrana e que pode ser uma ferramenta valiosa para o tratamento de águas residuais.

Em resumo, a revisão da literatura sobre membranas cerâmicas a partir de argilas demonstra um progresso significativo, evidenciando a viabilidade de utilizar materiais abundantes e de baixo custo para o tratamento de efluentes têxteis. Apesar dos avanços, desafios persistem. Assim, é necessário continuar os estudos neste campo para expandir os métodos utilizados e procurar as melhores soluções para as aplicações industriais, melhorando a eficiência e sustentabilidade.

4. MONITORAMENTO TECNOLÓGICO

Segundo os autores (de Moraes *et al.*, 2024), o monitoramento tecnológico consiste na busca em bancos de dados de patentes, para identificar caminhos que o mercado

econômico pode seguir, a fim de mapear as inovações tecnológicas com potencial de influenciar a sociedade e o setor econômico.

Buscando verificar o desenvolvimento das membranas cerâmicas, utilizando resíduos agroindustriais no tratamento de efluentes têxteis, se faz necessário estudar o desenvolvimento intelectual e técnico do setor através do estudo de documentos patentários, e analisar os dados obtidos em bases de dados. A base deve ser confiável, disponibilizar um conjunto amostral robusto, apresentar dados quanto ao país de publicação ou depósito, autor e/ou depositante e/ou inventor (Barbosa, 2020).

A metodologia utilizada para realizar um monitoramento tecnológico varia conforme o objetivo. Para um monitoramento adequado é necessário selecionar quais serão os termos de busca e as bases de busca. A estratégia utilizada para o monitoramento tecnológico foi correlacionar a utilização de palavras-chave nas bases de busca determinadas.

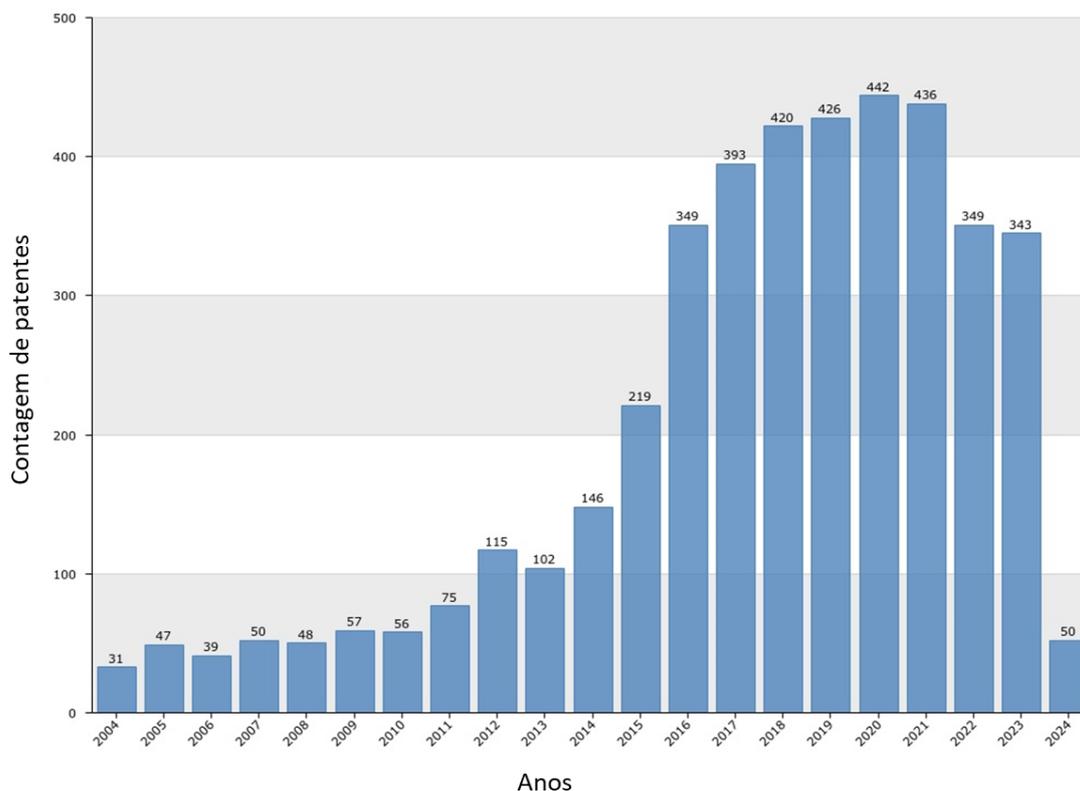
Para a obtenção das informações oriundas de patentes, a pesquisa patentária foi realizada por meio da base de dados *Questel Orbit*®, na qual se teve acesso ao conjunto de todos os bancos de dados públicos, a exemplo, do United States Patent and Trademark Office (USPTO), European Patent Office (EPO), o Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), entre outros.

Aplicando a estratégia de busca empregada na base de dados do *Questel Orbit*®, a busca foi realizada utilizando as respectivas palavras-chave em inglês: “ceramic membrane”, “ash”, “sugarcane bagasse ash” e “treatment of textile effluent” para pesquisa nos campos título (TI) e resumo (AB), acompanhado do operador de truncagem “+” a fim de recuperar resultados com variância de grau. O período delimitado para pesquisa foi de 2004 a 2024, com filtro por data de depósito e de prioridade. A combinação das palavras-chave possibilitou uma extração de informações, a dos documentos de patentes, em três níveis diferentes: macro, meso e micro.

Análise no nível macro consistiu na utilização da palavra-chave “ceramic membrane” (membrana cerâmica), com foco para o campo da tecnologia ambiental, analisando os documentos de acordo com a série histórica de depósitos/publicações, a distribuição por países, por universidades, centros de pesquisa e empresas ligadas ao conhecimento científico.

A partir dos dados ilustrados na Figura 10, foi possível avaliar a evolução temporal dos depósitos de patentes de membrana cerâmica, com foco para o campo da tecnologia ambiental.

Figura 10 – Evolução temporal de depósitos de patentes de “membrana cerâmica” no mundo (2004-2024).



Fonte: Própria (2024).

Observa-se que, entre os anos de 2004 e 2013, houve uma oscilação no número de patentes registradas. A partir do ano de 2014, o número de registros apresentou um aumento, sendo o maior registrado entre os anos de 2015 e 2016. Esse aumento no número de registros pode ser devido a implementação da primeira estação de tratamento de água utilizando membranas cerâmicas, que só foi construída em 2015, na China, efetivando esse meio de tratamento (Kinser, 2021).

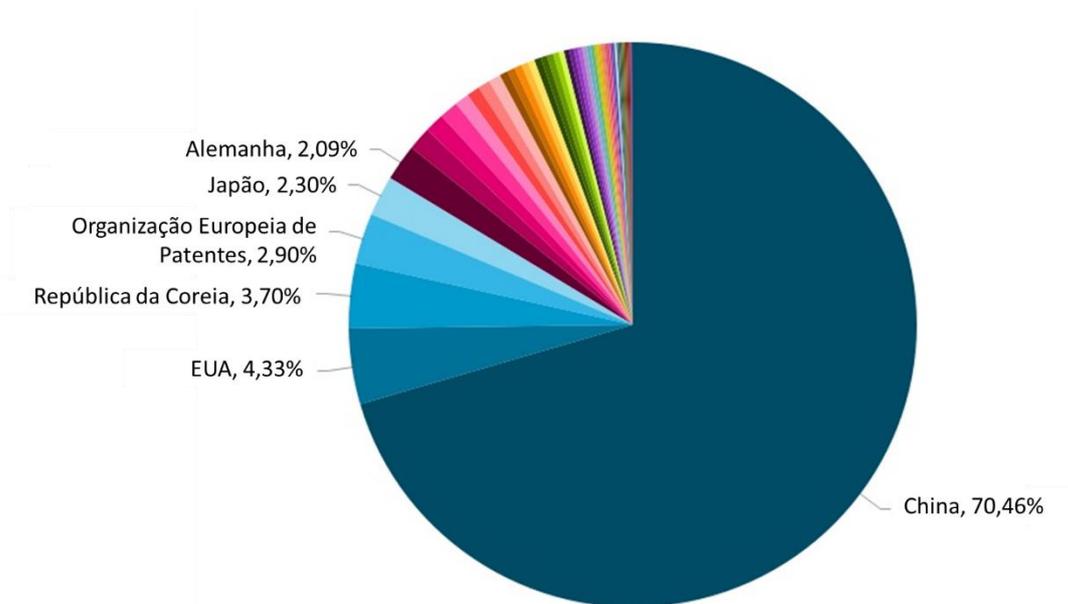
Esses dados revelam a existência de investimentos em pesquisas voltadas para o desenvolvimento das membranas cerâmicas no cenário internacional de acordo com o relatório de pesquisa de 2020 Markets and Markets, intitulado "Membranes Market by Material (Polymeric, Ceramic), Technology (RO, UF, MF, NF), Application (Water & Wastewater Treatment, Industrial Processing), Region (North America, APAC, Europe,

MEA, South America)—Global Forecast to 2024", que, por sua vez, refletem em inovações cuja propriedade intelectual é protegida através do depósito de patentes.

Destaca-se que a aparente redução em 2023 e em 2024 ocorreu, provavelmente, por conta do período de sigilo dos escritórios de patentes, o que sugere que existem pedidos que não foram contemplados na pesquisa (Hilachuk e de Paula, 2022). A redução no ano de 2022 está atrelada ao período de sigilo existente no ano de 2020, onde o mundo passou pela pandemia do COVID-19, fazendo com que pesquisas fossem pausadas ou interrompidas (Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, 2021).

Na Figura 11, estão evidenciados os países que mais depositam patentes sobre membranas cerâmicas. Vale salientar que 4701 pedidos foram realizados entre os anos de 2004 e 2024.

Figura 11 – Principais países inventores de membranas cerâmicas (2004-2024).



Fonte: Própria (2024).

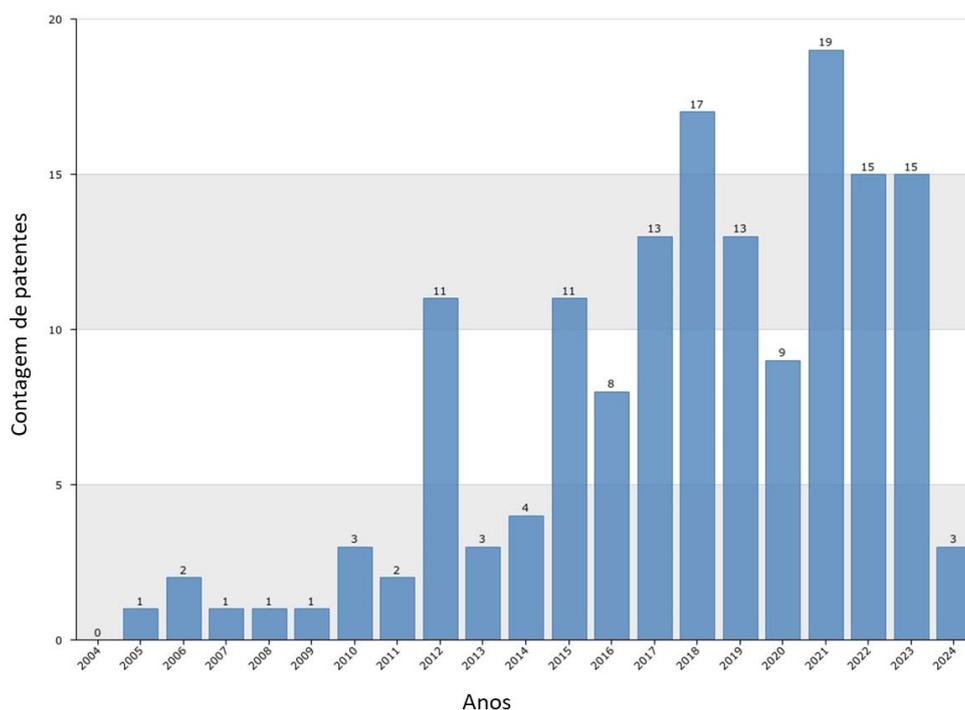
A China é a maior detentora de registros, representando 70,46 % dos pedidos de patente no mundo, correspondendo a 2359 pedidos, seguida dos Estados Unidos com 4,33 % (145) e da República da Coreia com 3,70 % (124). O Brasil é o 22º colocado, com 11 no total. A dominância da China no número de patentes pode estar associada ao fato de a China ter usado melhor o sistema internacional de patentes, com um forte aumento de

pedidos de patente, segundo a Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI) (Warner, 2015).

O aumento de invenções no Oriente é reflexo de medidas de estímulo à inovação, inclusive os depósitos originários da Ásia somam mais da metade de todos os pedidos via Tratado de Cooperação de Patentes (PCT, sigla em inglês). Em 2019, a China se tornou o principal requerente de patentes internacionais, com 58.990 depósitos, junto à Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI), ultrapassando os Estados Unidos (57.840), que, até então, era o principal usuário do Sistema PCT (Cornell University; Insead; Wipo, 2020).

Na análise meso, as palavras-chave utilizadas foram “membrane ceramic” (membrana cerâmica) e “ash” (cinza). Para este ponto da pesquisa não foram identificados o tipo de cinza utilizadas. A Figura 12, apresenta a quantidade de patentes nos últimos 20 anos.

Figura 12 – Evolução temporal de depósitos de patentes de “membrana cerâmica + cinza” no mundo (2004-2024).

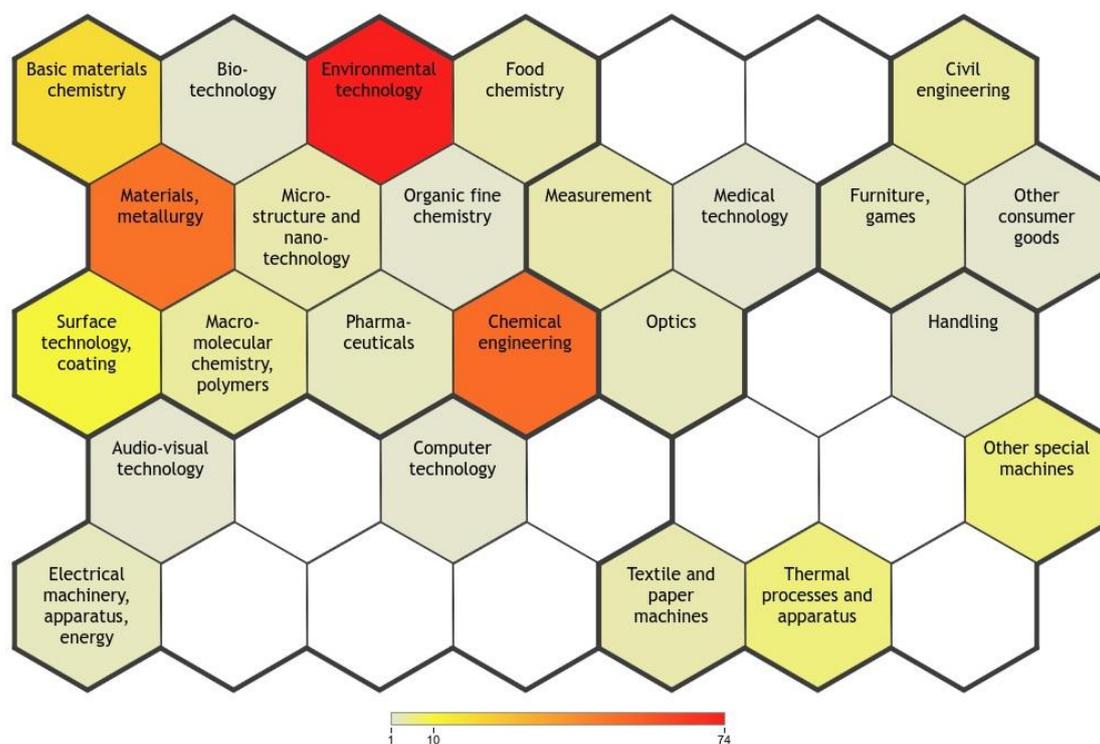


Fonte: Própria (2024).

Observa-se um total de 152 patentes registradas, nos últimos 20 anos. O maior número de patentes (19) foi no ano de 2021, provando que logo após a pandemia do

COVID-19 o tema foi bastante estudado em diversas áreas de aplicação, como mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Distribuição das patentes por Domínio Tecnológico conforme plataforma Questel Orbit®.



Fonte: Própria (2024).

A Figura 13, facilita a identificação das patentes em um domínio e em um campo que pode existir múltiplos usos. Pode ser uma boa maneira de identificar novos usos para patentes já registradas. Analisando as palavras-chave inseridas juntamente com o tema central do trabalho, pode-se observar que a parte de engenharia química e tecnologia ambiental está presente, reforçando a utilização de membranas cerâmicas com cinzas neste meio.

Por fim, para a análise micro, foram identificadas as particularidades e detalhamentos de cinza da análise meso. Utilizando a especificação da cinza, foram inseridas as palavras-chave “ceramic membrane” (membrana cerâmica) e “sugarcane bagasse ash” (cinza do bagaço de cana-de-açúcar). Durante a busca, foi encontrado apenas uma patente.

O autor (Laxman, 2010) desenvolveu uma composição e um método de fabricação de uma membrana cerâmica semipermeável para a utilização em células de membranas. A composição inclui partículas finas de folhas extraídas da planta *Camellia sinensis*, pó de tijolo, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, bem como componentes inorgânicos como caulim, quartzo, carbonato de cálcio, carbonato de sódio e ácido bórico, possuindo tamanho de partículas entre 0,3-0,4 µm e partículas grossas com tamanho entre 0,9-1,2 µm, respectivamente. A temperatura utilizada para a sinterização durante a fabricação da membrana variou de 700 a 1100 °C. Por fim, as membranas foram caracterizadas por DRX, TGA, MEV, distribuição do tamanho de poros, porosidade, tamanho médio de poros, permeação de gás, permeação de líquido e estabilidade química para avaliar as características estruturais, de permeação e químicas.

Por possuir apenas uma patente na análise anterior e não especificando qual a área de aplicação, uma segunda análise Micro foi realizada. Desta vez utilizou-se as palavras-chave: “ceramic membrane” (membrana cerâmica) e “textile effluent treatment” (tratamento de efluente têxtil). A nova análise apontou quatro documentos de patentes.

A detentora da primeira patente, mostrada na análise, é a Universidade Hassan II, situada no Marrocos. Os autores (Saad *et al.*, 2018), patentearam uma ‘Nova membrana cerâmica de microfiltração à base de magnesita natural de baixo custo para tratamento de águas residuais’. A magnesita natural utilizada foi caracterizada de diversas formas demonstrando que possui um alto grau de pureza em termos de mineral de magnesita. Em seguida, uma membrana plana de magnesita foi preparada através de prensagem uniaxial e métodos de sinterização. A influência da sinterização nas propriedades essenciais da membrana, especialmente na morfologia, porosidade, tamanho de poro, permeabilidade e resistência mecânica, foi estudada na faixa de 900 a 1200 °C.

Os resultados apresentados foram que, nesta faixa de temperatura, a porosidade diminui de 51,0 % para 48,15 %, com um tamanho de poro de 1,12 µm, e a permeabilidade à água diminui de 4209 para 2107 L.h⁻¹.m⁻².bar⁻¹, enquanto a resistência mecânica aumenta de 1,7 para 8,5 mPa.s. O experimento de microfiltração da membrana de magnesita nas águas residuais de têxteis industriais mostrou que ela clarificou eficientemente as águas residuais, com reduções de turbidez e demanda química de oxigênio que podem atingir 99,9 % e 69,7 %, respectivamente. Por fim, a patente determina que o uso da magnesita natural menos custosa poderia permitir a produção

industrial de membranas cerâmicas com baixo custo, ampliando as aplicações industriais de microfiltração como um processo ecológico.

A próxima patente, pertencente à TIANJIN UNITED ENVIRONMENTAL ENGINEERING DESIGN CO LTD, que divulga um modelo de dispositivo de recuperação de PVA (álcool polivinílico) para águas residuais de desengomagem têxtil, que compreende um filtro autolimpante, um tanque de ajuste, um reator de enzimas imobilizadas, uma membrana cerâmica dinâmica, um tanque de produção de água e um tanque de filtro de carbono conectados em sequência e outros equipamentos. O método é caracterizado por um reator de enzimas imobilizadas, que adota um modo de operação contínua e consiste em um tanque de reação, um agitador e um dispositivo de preservação de calor, sendo que o dispositivo de preservação de calor está posicionado fora do tanque de reação, e o agitador está posicionado no centro dentro do tanque de reação.

A membrana cerâmica dinâmica, desenvolvida na patente, é composta por um filtro de membrana cerâmica e um tanque de pré-revestimento, e a relação de conexão é que o tanque de pré-revestimento e o filtro de membrana cerâmica formam um sistema de circulação fechada através de uma bomba de entrada de líquido. Logo, observando atentamente a patente, a mesma não segue o mesmo mecanismo desenvolvido neste presente trabalho não podendo ser realizada uma comparação direta.

O titular de duas das patentes observadas, é a empresa BASF, que está no ramo de aditivos e emulsões poliméricas para o mercado de tintas (BASF, 2024). As patentes são análogas, mencionando o método de produção das polietileniminas livres de cloreto. Durante o resumo das patentes é mencionado que polietileniminas são utilizadas em diversas áreas como no tratamento de águas, no ramo têxtil, no ramo das cerâmicas e no ramo da tecnologia de membranas, porém não faz relação com membranas cerâmicas no tratamento de efluentes têxteis, fazendo assim, com que as duas patentes sejam descartadas deste estudo.

Por fim, durante este estudo, foi possível constatar o surgimento de inovações envolvendo membranas cerâmicas. Entretanto, muitos processos podem estar sendo realizados na área de tratamento de efluente têxtil, utilizando membranas cerâmicas, e não sendo patenteados, devendo assim, ter um maior investimento em pesquisa e desenvolvimento nesta área que é bastante promissora (Samaei *et al.*, 2018).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Desenvolvimento de Novos Materiais (LABNOV), situado na Unidade Acadêmica de Engenharia Química, no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UAEQ/CCT/UFCG), Paraíba, Brasil.

5.1. MATERIAIS

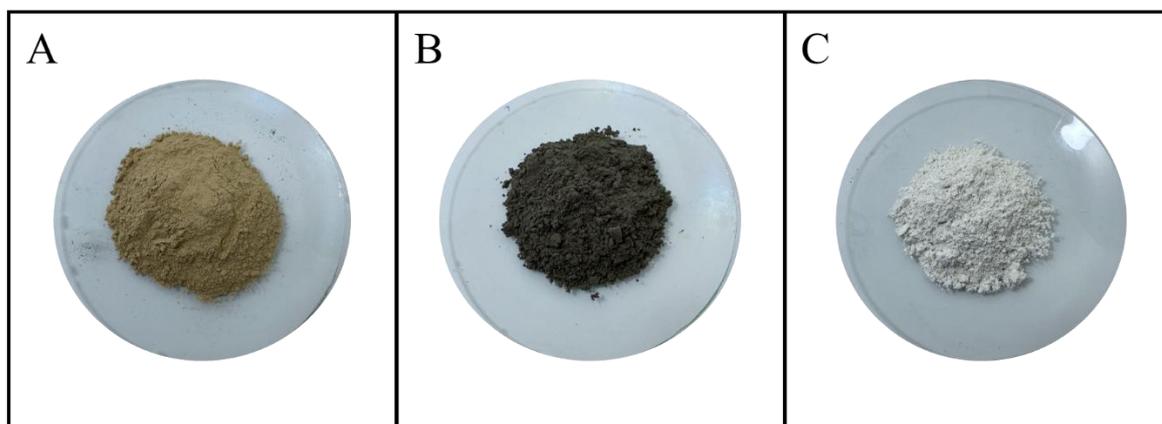
O material base para a produção da membrana cerâmica de baixo custo é a argila chocobofo. Proveniente da empresa BENTONISA – Bentonita do Nordeste S.A., situada no município de Boa Vista, estado da Paraíba, numa região que corresponde por 74,4 % da produção brasileira (Oliveira, 2018).

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), foi utilizada como agente formador de poros, a partir da técnica da matriz de sacrifício (adição e eliminação por queima de agentes porogênicos) (Fernandes; Morelli, 2017). A cinza foi proveniente do Engenho Triunfo de Areia na Paraíba (PB).

O caulim, é um importante precursor devido as suas propriedades de resistência à abrasão quando submetido a processos de calcinação, o que o torna adequado para o desenvolvimento de cerâmicas porosas (Lima *et al.*, 2018). O caulim utilizado neste trabalho, foi proveniente da região de Caiçara, estado do Rio Grande do Norte (RN).

Na Figura 14 estão apresentadas as imagens das matérias-primas.

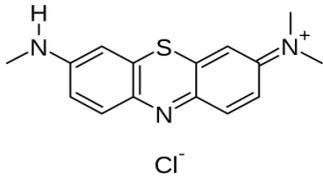
Figura 14 – Imagens das matérias-primas: A) Argila chocobofo; B) Cinza do bagaço de cana-de-açúcar; C) Caulim.



Fonte: Própria (2024).

O corante utilizado para simular o efluente sintético foi o azul de metileno da TEXPAL Química. Na Tabela 6, constam as características gerais do corante utilizado.

Tabela 6 – Características gerais do corante Azul de Metileno.

Características do Corante	
Nome	Azul de Metileno
N° CAS	61-73-4
N° CI	52015
Fórmula química	$C_{16}H_{18}N_3SCl$
Estrutura Química	
Absorbância – λ máx.	664 nm
Massa Molecular ($g \cdot mol^{-1}$)	319,86
Classe química	Catiônico
Solubilidade	Solúvel em água

Fonte: Própria (2024).

5.2. PREPARAÇÃO DA MEMBRANA CERÂMICA DE BAIXO CUSTO

Para a preparação das membranas foram utilizados, em diferentes proporções, a argila chocobofo, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar e o caulim. Na Tabela 7, estão apresentadas as proporções pré-definidas, com base em estudos preliminares (do Carmo *et al.*, 2022).

Tabela 7 – Composições das membranas cerâmicas de baixo custo.

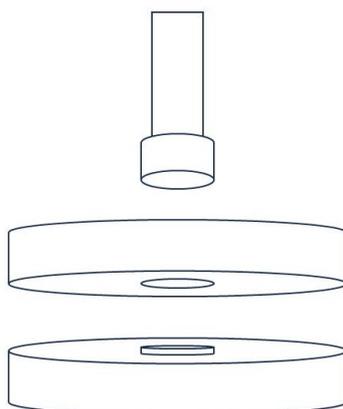
Matéria Prima (%)	Membrana C0	Membrana C10	Membrana C20	Membrana C30	Membrana C40	Membrana C50
Argila chocobofo	95	85	75	65	55	45
CBCA	-	10	20	30	40	50
Caulim	5	5	5	5	5	5

Fonte: Própria (2024).

Após as diferentes proporções terem sido estabelecidas, os materiais foram inseridos em um moinho de bolas durante 2 h. Esta etapa teve como objetivo obter uma mistura uniforme das matérias-primas durante a preparação da massa (Ribeiro *et al.*, 2001). Em seguida, as bolas cerâmicas foram lavadas com água destilada para retirar os resquícios do material, e submetidas ao processo de secagem na estufa a 100 °C para remoção da água durante 24 h.

Posteriormente foram realizadas as etapas de maceração e peneiramento (granulometria de 200 mesh). Então, 3,5 g da massa foram pesados e colocados em um molde de aço inoxidável, representado na Figura 15, para o processo de prensagem uniaxial a seco, utilizando uma prensa hidráulica com condições apresentadas na Tabela 8. As membranas cerâmicas foram produzidas em forma de disco, com 28,7 mm de diâmetro e 3,1 mm de espessura.

Figura 15 – Molde para fabricação das membranas.



Fonte: Própria (2024).

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

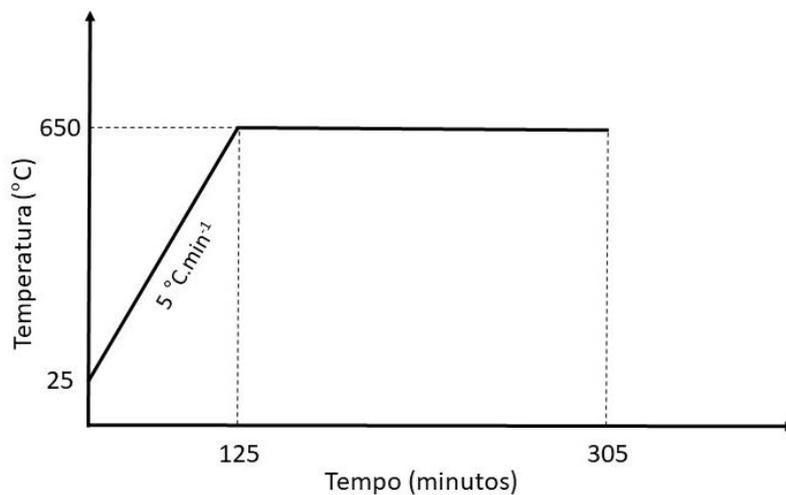
Tempo de moldagem (s)	60	60
Pressão de moldagem (t)	0,666	1

Fonte: Própria (2024).

Finalizado o processo de moldagem, as membranas cerâmicas foram submetidas aos processos de secagem em estufa durante 24 horas, com a temperatura sendo elevada gradativamente até atingir 100 °C, e sinterização, em um forno mufla com temperatura de 650 °C sob uma taxa de aquecimento de 5 °C.min⁻¹ durante 3 h. A metodologia

utilizada é a mesma descrita pelos autores (do Carmo *et al.*, 2022). A rampa de aquecimento está apresentada na Figura 16.

Figura 16 – Rampa de aquecimento utilizada na sinterização das membranas.

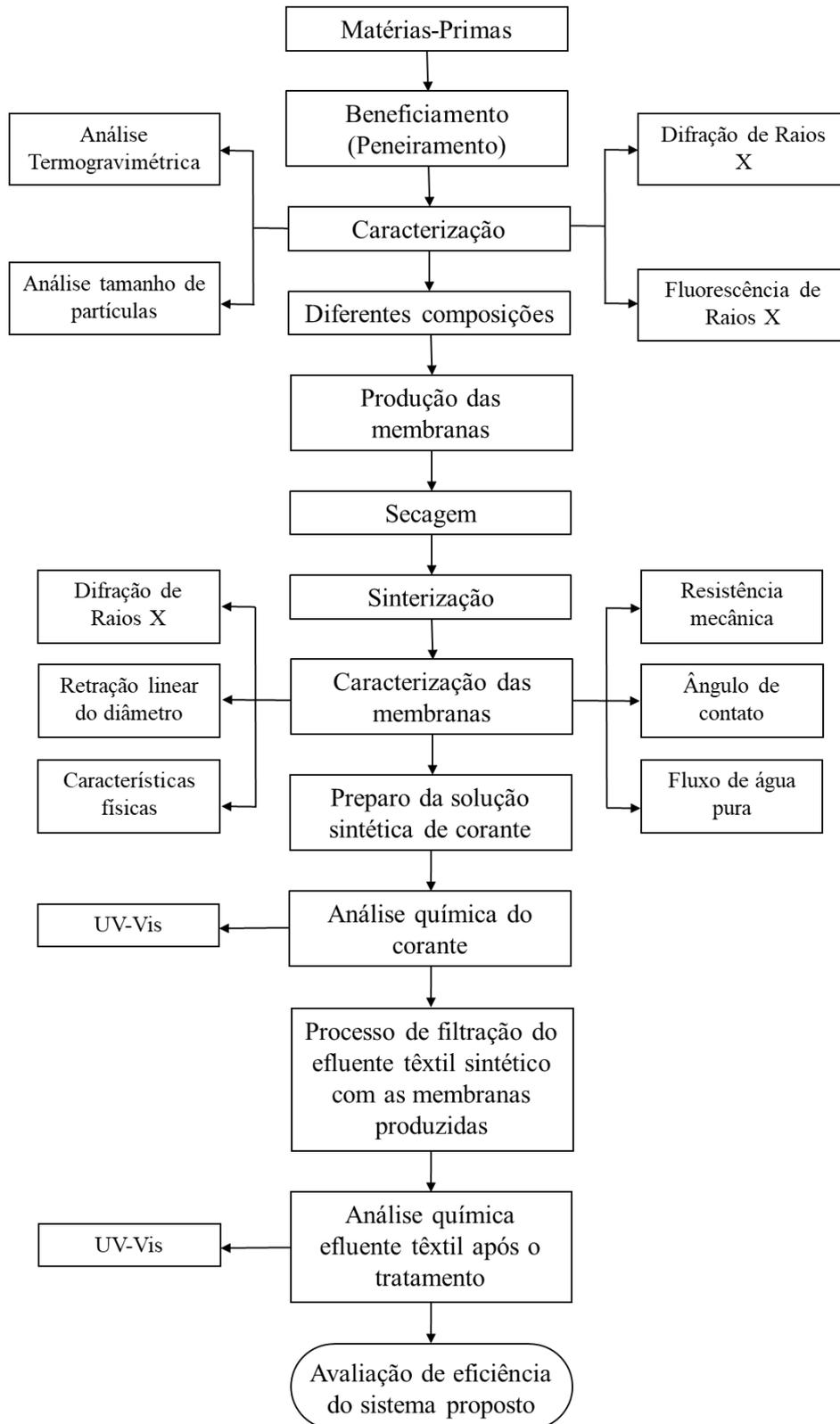


Fonte: Própria (2024).

Por fim, a membrana cerâmica de baixo custo se encontra pronta nas diferentes composições estabelecidas. Em resumo, a Figura 17 apresenta o diagrama de preparação, caracterização e avaliação das membranas cerâmicas de baixo custo.

As membranas selecionadas para fazerem parte do trabalho foram as prensadas a 1 tonelada por 60 s, já que as membranas prensadas a 0,666 toneladas não possuíram boas características iniciais e não alcançaram o objetivo do trabalho.

Figura 17 – Diagrama de preparação, caracterização e avaliação das membranas cerâmicas de baixo custo.



Fonte: Própria (2024).

5.3. CARACTERIZAÇÃO

5.3.1. Espectrofotometria de Fluorescência de Raios X (FRX)

É uma técnica extremamente poderosa e versátil, utilizada para determinar a composição química de um sólido em termos qualitativos e semiquantitativo (Silva e Alcover Neto, 2023). Emprega uma técnica analítica não destrutiva que possibilita a determinação multielementar e simultânea dos elementos da amostra.

A análise química é realizada por energia dispersiva (EDX) proporcionando maior rapidez na aquisição e visualização dos dados (Marguí *et al.*, 2014). Após o material ser homogeneizado foi levada para o EDX-720 Shimadzu, equipamento utilizado para a análise.

5.3.2. Difração de Raios X (DRX)

A difração de raios X (DRX) é uma técnica analítica usada para caracterizar fases cristalinas de uma ampla variedade de materiais, normalmente utilizada em análise mineralógica e identificação de materiais desconhecidos. Os dados de difração de pó são derivados fundamentalmente dos arranjos atômicos e moleculares explicados pela física da cristalografia (da Silva, 2020).

Para a caracterização das matérias primas, as amostras foram analisadas em forma de pó, compactadas sobre um suporte. Já as membranas cerâmicas, foram analisadas após a sinterização na sua moldagem original. O aparelho utilizado é da marca Shimadzu XRD 6000 com radiação $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40 KV, corrente de 30 mA, tamanho do passo de 0,020 em 2θ e tempo por passo de 1,0 s, com velocidade de varredura de $2^\circ (2\theta)/\text{min}$, com ângulo 2θ percorrido de 2 a 50° .

5.3.3. Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica é uma das técnicas mais utilizadas entre as análises térmicas, tendo como principal característica as mudanças físicas e químicas dos materiais com a temperatura, monitorando a sua mudança de massa (Saadatkahh *et al.*, 2020). A TGA pode determinar a estabilidade térmica dos materiais, a composição de misturas, o conteúdo de voláteis e resíduos, e a cinética de decomposição (Vyazovkin *et al.*, 2022).

As análises de TG para as matérias-primas beneficiadas, utilizadas nesse trabalho, foram realizadas no Laboratório de Desenvolvimento e Ensaio de Medicamentos na Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) utilizando o equipamento DTG-60 da Shimadzu. As amostras foram submetidas a uma taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹ de 24 °C até 900 °C em atmosfera de nitrogênio com um fluxo de 100 mL.min⁻¹.

5.3.4. Análise do tamanho de partículas e distribuição de partículas

A técnica de análise de tamanho de partículas por difração de laser é um método pelo qual as partículas são dispersas em um fluido em movimento causando discontinuidades no fluxo do fluido, que são detectadas por uma luz incidente e correlacionadas com o tamanho de partícula (Christofoletti; Moreno, 2017).

A análise do tamanho de partículas e a distribuição das partículas foi realizada pela técnica de difração de laser no equipamento Bettersize ST (Laser Particle Size Analyser). O equipamento utiliza o modelo óptico baseado na teoria de difração de Fraunhofer em seus softwares de análise (Christofoletti; Moreno, 2017).

5.3.5. Retração linear do diâmetro

A retração linear do diâmetro foi obtida relacionando as dimensões, antes e após a sinterização (Borlini *et al.*, 2006) das membranas cerâmicas produzidas com diferentes concentrações de agente porogênico (CBCA). Para a obtenção das medidas, foi utilizado um paquímetro digital.

A retração linear do diâmetro (R_d) foi obtida, em termos percentuais, através da Equação 1.

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

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

5.3.6. Determinação das características físicas das membranas cerâmicas

Foram avaliadas as propriedades físicas de absorção de água (AA), baseado na norma ASTM D570, porosidade aparente (PA) que é baseada no princípio de

Arquimedes, conforme ASTM C 20 (2000) e a densidade aparente (DA) que mede a massa de um material por unidade de volume, incluindo os vazios existentes entre as partículas. Essas características são determinadas pelo método de imersão, utilizando água como fluido, e com auxílio de uma balança analítica.

O ensaio foi realizado em triplicata para cada formulação. Após a obtenção da massa seca, imersa e úmida, dos corpos cerâmicos, foi possível calcular a absorção de água (Equação 2), porosidade aparente (Equação 3) e densidade aparente (Equação 4).

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

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

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

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

Pode-se também observar a perda em massa (PM), que está relacionada a perda de água adsorvida na superfície, estando associada a hidróxidos e a decomposição de alguns compostos e de matéria orgânica. Esse valor pode ser encontrado na Equação 5:

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

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

O experimento foi realizado em triplicata para cada membrana.

5.3.7. Determinação do ângulo de contato

O teste de ângulo de contato é uma das formas de caracterizar a hidrofiliabilidade de uma superfície sólida, ou interação entre um líquido e um sólido, se faz através do ângulo de contato entre as duas fases (Sinderski, 2020).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Desenvolvimento e Ensaio de Medicamentos na Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), utilizando o equipamento goniômetro cinético (AGC 002, Alcalitech, Brasil) com o fator de calibração de 0,017. Para tal, uma gotícula de 20 µL de água foi depositada sobre a membrana em forma de disco. As medidas foram avaliadas após 15 s, a 25±2 °C. As imagens das amostras foram registradas pela câmera do equipamento, que possui um aumento de 50x.

5.3.8. Resistência mecânica

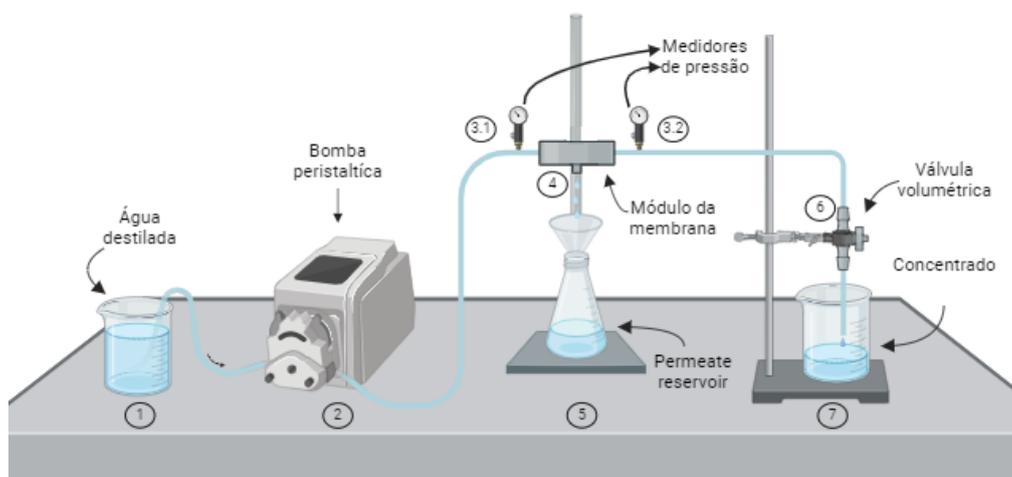
A resistência mecânica é um tipo de teste utilizado para determinar a capacidade de um material de suportar forças e cargas antes de se deformar ou romper, avaliando as propriedades mecânicas dos materiais (Huda, 2022). Mais especificamente, o ensaio de compressão avalia a capacidade do material de resistir a forças compressivas. É comumente utilizado em materiais como concreto e metais para determinar sua resistência à compressão e rigidez (Monarch Innovation, 2024).

A resistência à compressão foi medida em máquina universal de ensaio de compressão (Shimadzu-Autograph AGX-10 KN), com velocidade da travessa de 5 mm/min, no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) na Universidade Federal da Paraíba (UFPB). As membranas foram utilizadas da mesma maneira que foram confeccionadas com 28,7 mm de diâmetro e 3,1 mm de espessura.

5.3.9. Medida de fluxo de água pura

O sistema apresentado na Figura 18 é utilizado para a medição do fluxo de água pura através das membranas cerâmicas em função do tempo, a uma pressão de operação de 2 bar, durante 120 min e temperatura de 25 °C. Este é um fator importante nas aplicações de membranas, pois possibilita o estudo de parâmetros para tratar maiores quantidades de efluentes, minimizando os custos (Hsieh, 1996).

Figura 18 – Sistema utilizado para medição de fluxo de água pura.



Fonte: Própria (2024).

Onde, (1) tanque de alimentação de água destilada; (2) bomba peristáltica; (3.1) manômetro antes da entrada do módulo; (3.2) manômetro após a entrada do módulo; (4) módulo de aço inoxidável; (5) reservatório de permeado; (6) válvula volumétrica; (7) tanque de concentrado.

A Figura 19 mostra o módulo da membrana, feito de aço inoxidável. A área efetiva da membrana no módulo foi de $3,79 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Os experimentos foram realizados a temperatura de $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 19 – Módulo de aço inoxidável.



Fonte: Própria (2024).

O fluxo de permeado de cada membrana foi calculado utilizando a Equação 6. Através do volume coletado, do tempo da coleta e da área útil da membrana cerâmica.

$$J = \frac{V}{A \cdot \Delta t} \quad (6)$$

Em que: J = Fluxo de água ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); V = Volume do permeado (m^3); A = Área da membrana (m^2); Δt = Tempo de permeação (h).

O raio médio de poros das membranas foi calculado usando a equação de Guerout-Elford-Ferry, como mostrada na Equação 7 (Qu *et al.*, 2024).

$$r_m = \sqrt{\frac{(2,9 - 1,75\varepsilon) \cdot 8 \cdot \eta \cdot h}{\varepsilon \cdot \Delta P} \cdot J} \quad (7)$$

onde r_m (m) é o raio 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.

5.4. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MEMBRANAS CERÂMICAS

5.4.1. Preparo da solução sintética do corante

Realizando diluições a partir da solução-mãe do corante azul de metileno, com concentração de 1000 mg.L^{-1} , foram preparadas soluções de 50 mg.L^{-1} , cuja absorbâncias foram analisadas no espectrofotômetro para obtenção da curva de calibração.

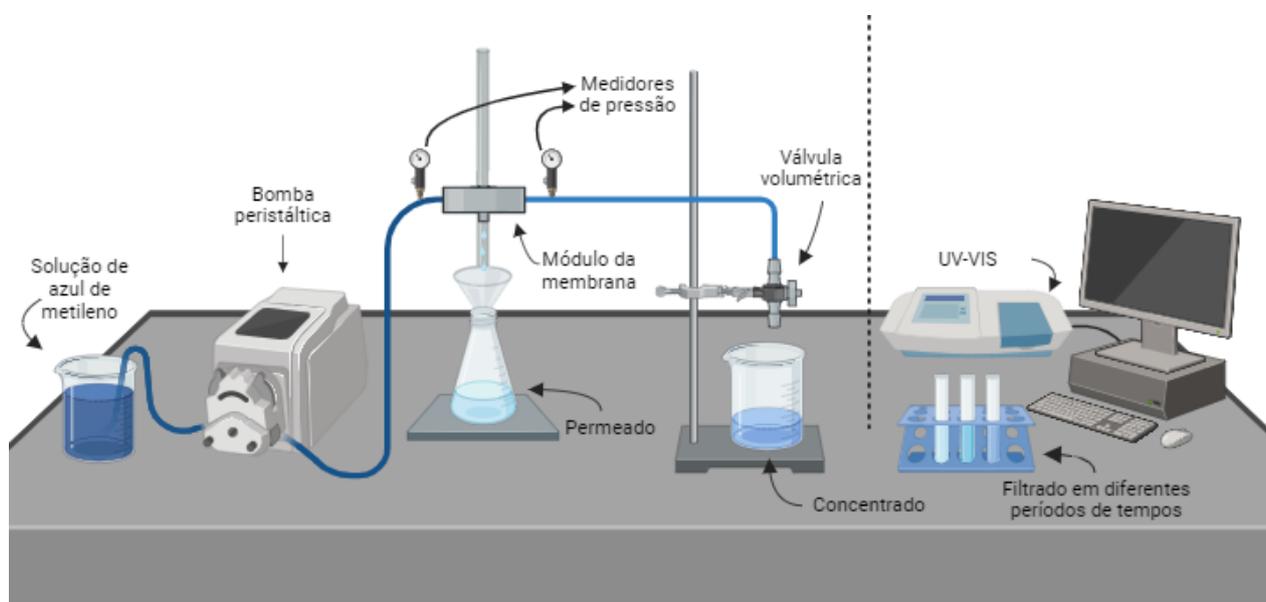
5.4.2. Análises por espectrofotometria UV-VIS

A espectrofotometria de absorção molecular na região do ultravioleta visível (UV-VIS) é uma técnica que pode ser utilizada desde a identificação até a quantificação de substâncias que absorvem radiação em comprimentos de onda específicos (Ntrallou *et al.*, 2020). Logo, concentração final do corante azul de metileno presente no efluente foi medida no espectrofotômetro UV-VIS 1600 da Pró-Análise, com o comprimento de onda 664 nm para o corante azul de metileno.

5.4.3. Tratamento do efluente têxtil

Utilizando a solução de corante azul de metileno, a concentração de 50 mg.L^{-1} e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, as membranas foram avaliadas quanto ao fluxo e rejeição do corante por meio da filtração em escoamento tangencial. O processo foi avaliado a uma pressão de 2 bar e um tempo de 120 min . A Figura 20, representa o diagrama da metodologia da avaliação da rejeição de corante.

Figura 20 – Sistema utilizado para avaliação da rejeição de corante.



Fonte: Própria (2024).

A análise da eficiência do sistema de filtração, a partir das membranas cerâmicas, é avaliada por meio do cálculo do coeficiente de rejeição, analisados em dois pontos de amostragem: antes e após a filtração, como demonstrado na Equação 8.

$$R\% = \left(\frac{C_0 - C}{C_0} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

Em que: R% = Coeficiente de rejeição (%); C_0 = Concentração inicial (mg.L^{-1}); C = Concentração final (mg.L^{-1}).

Os valores encontrados para eficiência foram comparados com dados obtidos na literatura com o propósito de avaliar a performance das membranas utilizadas. Além disso, verificou-se a ocorrência ou não de inconformidades durante o processo, como sujidades, trincas e entupimentos.

5.4.4. Reciclabilidade

Para avaliar a capacidade de reutilização da membrana cerâmica, foram realizados vários ciclos. O reciclo de membranas é uma prática importante para a sustentabilidade

ambiental e econômica, promovendo a reutilização e recuperação eficiente dos recursos, reduzindo a necessidade de produção de novas membranas (Amin *et al.*, 2016).

O sistema utilizado foi o mesmo apresentado na Figura 20. Para cada ciclo, com duração de 60 min, a permeado foi coletado determinando o fluxo e a rejeição do corante. As condições experimentais foram mantidas constantes: pressão de 2 bar e temperatura de 25 °C.

5.5. ESTIMATIVA PRELIMINAR DE CUSTOS

O tratamento de efluentes têxteis com membranas cerâmicas tem demonstrado sua eficácia em diversos estudos (Ahmed; Mir, 2024; Agarwalla *et al.*, 2022; Manni *et al.*, 2020). Existe uma ampla variedade de matérias-primas que podem ser utilizadas na produção dessas membranas, bem como diferentes métodos de fabricação disponíveis.

A análise preliminar de custos é um parâmetro crucial, pois permite avaliar a viabilidade econômica das diferentes opções de materiais e métodos de produção. A sustentabilidade e a aplicabilidade prática do tratamento de efluentes têxteis em larga escala, também precisa ser assegurada (Suresh *et al.*, 2016).

A estimativa foi realizada baseado na metodologia utilizada pelos autores (Liang *et al.*, 2021; Lagdali *et al.*, 2023), onde avaliou-se os custos dos parâmetros associados as matérias-primas, energia e equipamentos.

6. RESULTADOS

6.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

6.1.1. Espectrofotometria de Fluorescência de Raios X (FRX)

Na Tabela 9, é possível visualizar os resultados obtidos da análise química da argila chocobofo, realizados por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X.

Tabela 9 – Composição química da argila chocobofo.

Compostos (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Outros
Argila chocobofo	71,79	14,25	8,23	1,05	2,18	2,50

Fonte: Própria (2024).

Com a análise da composição química da argila chocobofe observa-se a presença de óxidos de silício (SiO_2) e alumínio (Al_2O_3) como principais constituintes dos minerais da argila, totalizando percentagem acima de 84 %, que são provavelmente provenientes dos minerais argilosos esmectita, caulinita e sílica livre (Hajjaji *et al.*, 2001). A amostra apresenta valores de Al_2O_3 inferior a 46 % que segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), classifica o material como sílico-aluminoso.

Também é possível observar a presença dos óxidos de ferro (Fe_2O_3), cálcio (CaO) e magnésio (MgO), característicos dos argilominerais nas suas formas naturais e que são referentes aos cátions trocáveis presentes na estrutura das argilas. A quantidade presente de Fe_2O_3 (8,23 %) é proveniente do reticulado cristalino dos argilominerais do grupo da esmectita (Souza Santos, 1992).

De acordo com a análise da composição química, a argila pode ser classificada como uma bentonita policatiônica, devido à presença dos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} que são relevantes para o processo de adsorção. Os cátions livres facilitam o inchamento da argila, quando estão na presença de água. Essa possibilidade de inchamento leva a designar as esmectitas pelo termo de argilas expansíveis, com um espaço interlamelar que pode variar entre 10 Å e 21 Å (Belghazdis; Hachem, 2022), que permite uma grande capacidade de absorção de água, importante propriedade para o processo de filtração por membranas. Esse tipo de argila é frequentemente a mais encontrada no Brasil (Rodrigues, 2003; Carmo *et al.*, 2021).

Na Tabela 10 observa-se os resultados obtidos da análise FRX para avaliar a composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 10 – Composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Compostos (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	K_2O	P_2O_5	Outros
Cinza do bagaço de cana-de-açúcar	49,16	17,39	1,14	9,80	5,40	4,64	3,82	8,65

Fonte: Própria (2024).

A partir da análise química, obtêm-se a composição inorgânica da cinza, verificando que é composta principalmente por SiO_2 (49,16 %), conforme mostrado na Tabela 10. Este teor de sílica é muito semelhante ao obtido para amostras de CBCA em outros trabalhos (Casas *et al.*, 2023; Cordeiro *et al.*, 2009; Subedi *et al.*, 2019, Alvarenga;

Cordeiro, 2024). O alto teor de SiO₂ possibilita a utilização da cinza na síntese de materiais cerâmicos e silicatos, uma vez que reduz a necessidade de matérias-primas adicionais, tornando o processo mais econômico e sustentável (Pérez-Casas *et al.*, 2020).

Além do SiO₂, os principais constituintes da cinza são Al₂O₃ (17,39 %), CaO (5,40 %), K₂O (4,64 %) e Fe₂O₃ (1,14 %). Estas concentrações são consideravelmente menores do que as relatadas pelos autores (Bahurudeen *et al.*, 2014), para amostras da cinza do bagaço cana-de-açúcar, indicando baixa contaminação.

Vale ressaltar que por mais baixa que a contaminação seja, a mesma ainda existe. A presença de K₂O indica fertilizantes que foram utilizados na produção de cana-de-açúcar e/ou aos nutrientes do solo (Alvarenga; Cordeiro, 2024). A cinza estudada também apresenta contaminações do solo, portanto, o produto proveniente da queima desse bagaço é uma mistura do material inorgânico (carbono residual devido a combustão incompleta da cinza) que compõe o bagaço da cana mais o quartzo, provavelmente proveniente de areia.

A composição química do caulim pela análise de FRX está apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Composição química do caulim.

Compostos (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	MgO
Caulim	50,25	47,62	0,34	0,70	0,09	0,13	0,70

Fonte: Própria (2024).

O resultado da caracterização mostra que a amostra é composta principalmente por SiO₂ e Al₂O₃ com composição de 50,25 % e 47,62 %, respectivamente. Os dados dos resultados são semelhantes aos resultados obtidos com o caulim comercial com base na teoria relatada (Eloussaief *et al.*, 2011; Garcia-Valles *et al.*, 2020), porém a amostra estudada neste trabalho é mais pura, uma vez que o teor dos outros compostos é menor que 2 %, contribuindo para que não tenha contaminação significativa e apontando o seu uso como produto nobre (de Almeida *et al.*, 2023).

As razões mássicas SiO₂/Al₂O₃ e Al₂O₃/Fe₂O₃ são de 1,06 e 140,05, respectivamente. O valor baixo para a relação mássica de SiO₂/Al₂O₃, confirma a presença de estágios de caulinita branca, enquanto o valor alto para Al₂O₃/Fe₂O₃ é

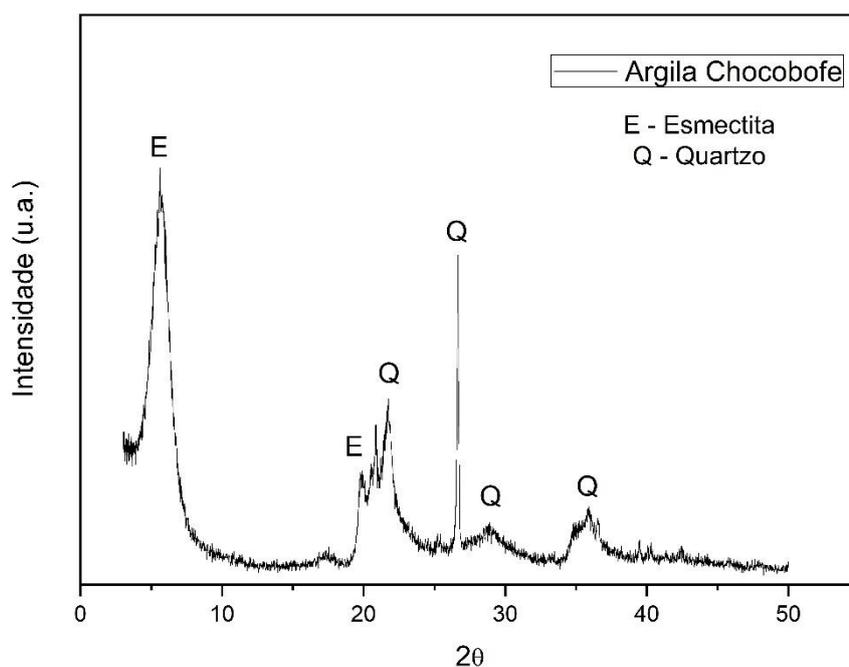
consistente com alumina rica com cor branca definida (Ayalew, 2023), podendo ser visualizado na Figura 14C.

6.1.2. Difração de Raios X (DRX)

A seguir serão apresentados os difratogramas das matérias primas (argila chocobofo, cinza do bagaço de cana-de-açúcar e caulim), usadas na confecção das membranas antes do processo de sinterização, sendo possível a identificação dos materiais presentes em cada uma das amostras sólidas.

Na Figura 21, está apresentado o difratograma da argila chocobofo.

Figura 21 – Difratograma de raios X da argila chocobofo.



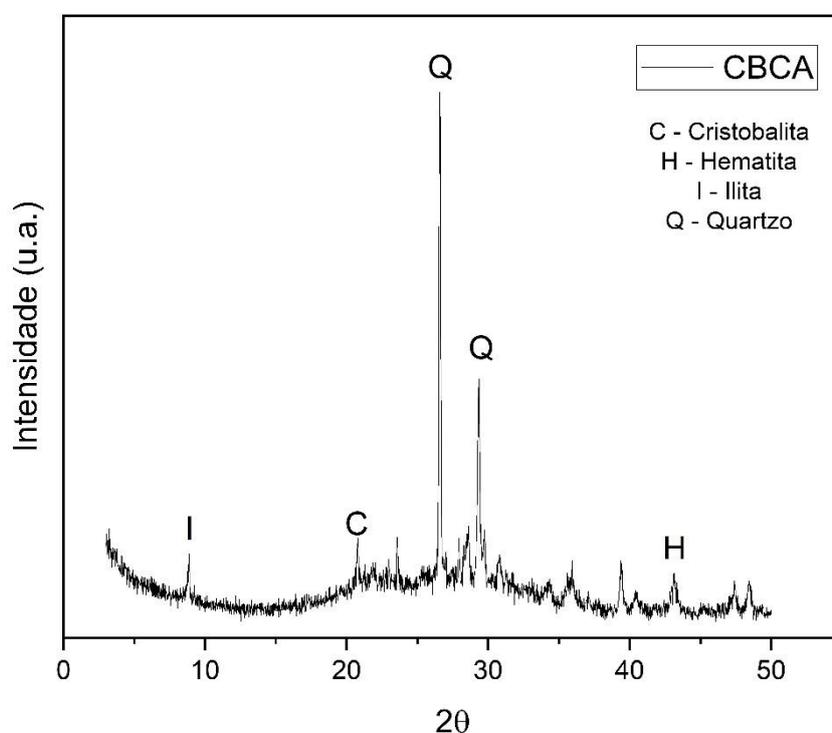
Fonte: Própria (2024).

O espaçamento interplanar d_{001} - $15,61 \text{ \AA}$ correspondendo às reflexões 001 da esmectita. Outras reflexões são observadas que correspondem ao quartzo (Q) (Wang *et al.*, 2004; Xi *et al.*, 2010). As linhas cristalinas notáveis no padrão de difração da argila chocobofo são idênticas aquelas registradas no arquivo de dados de raios-X [S-Smectite (JCPDS 00-013-0135), Q-Quartz (JCPDS 01-078-2315)] para a fase identificação.

Também é observado que a argila chocobofoe consiste em minerais de argila esmectítica (E), e os picos estão dentro da faixa apresentada por minerais de argila desse grupo (Murray, 2006). Esses resultados estão de acordo com aqueles encontrados na literatura (Hurle *et al.*, 2022).

Na Figura 22, está apresentado o difratograma da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, fornecendo informações sobre a estrutura cristalina e composição de fases do material (Patil; Katare, 2023).

Figura 22 – Difratograma de raios X da CBCA.



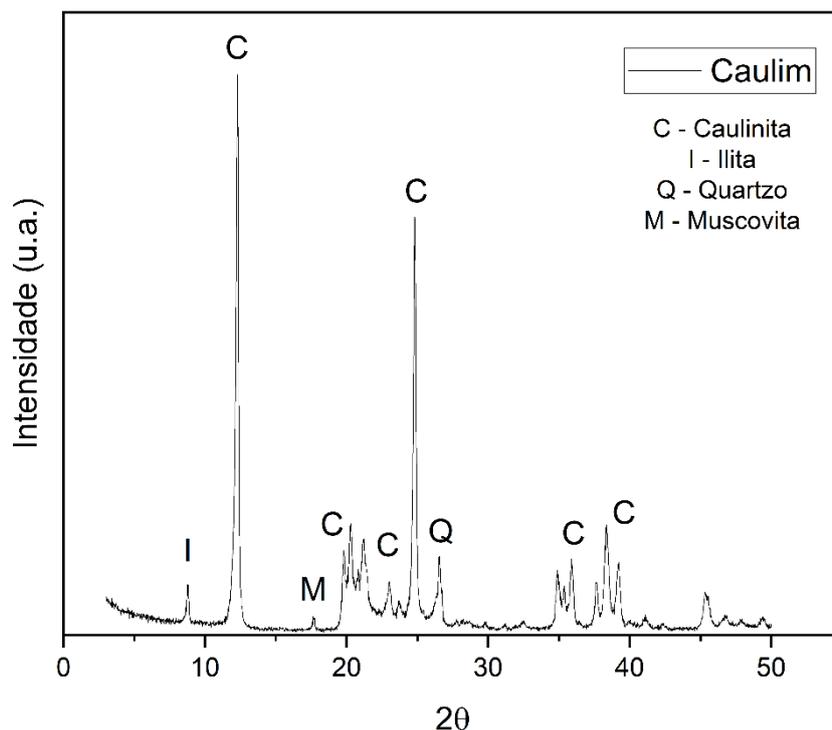
Fonte: Própria (2024).

Analisando a Figura 22, são identificadas as seguintes fases cristalinas na amostra de CBCA: quartzo, cristobalita e hematita, conforme a biblioteca JCPDS 46-1045. A presença de quartzo e cristobalita é indicativa de biomassa queimada em temperaturas elevadas (Arif *et al.*, 2016), no qual a grande porcentagem de quartzo se deve à presença de areia aderida à cana-de-açúcar durante o processo de colheita, podendo reduzir a reatividade do material (Xu *et al.*, 2019).

A cristobalita indica a fase cristalina da sílica, formada devido a elevada temperatura de combustão no processo de queima (Katare; Maduwar, 2017). Cinzas contém sílica na forma amorfa, que não foram identificadas, o que indica que o método de obtenção favoreceu a cristalização da sílica. A presença da sílica amorfa (reativa) ou cristalina (praticamente inerte) está diretamente ligada as condições de preparação: temperatura e ao método de obtenção da cinza (Moura *et al.*, 2021).

Na Figura 23, está apresentado o difratograma do caulim. Constata-se que o caulim é formado predominantemente pelo argilomineral caulínítico. A presença da caulinita no caulim foi confirmada por reflexões características em $2\theta=12,41^\circ$ e $20,21^\circ$ (reflexões múltiplas) e $25,49^\circ$, o primeiro e o último, intensa e bem definido (Khan *et al.*, 2017; Moore; Reynolds, 1989; Yang *et al.*, 2023).

Figura 23 – Difratograma de raios X do caulim.



Fonte: Própria (2024).

São observados também, picos menos intensos, outros argilominerais como o quartzo (SiO_2 – JCPDS 87-2096) e a ilita ($\text{K}_{0.65}\text{Al}_2(\text{Al}_{0.65}\text{Si}_{3.35}\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ – JCPDS 2-0056). A pequena reflexão em $2\theta=26,5^\circ$ mostrou a presença de traços de quartzo e $8,86^\circ$ da ilita (Barbosa e Rodrigues, 2024). Outro pico de baixa intensidade é o de muscovita

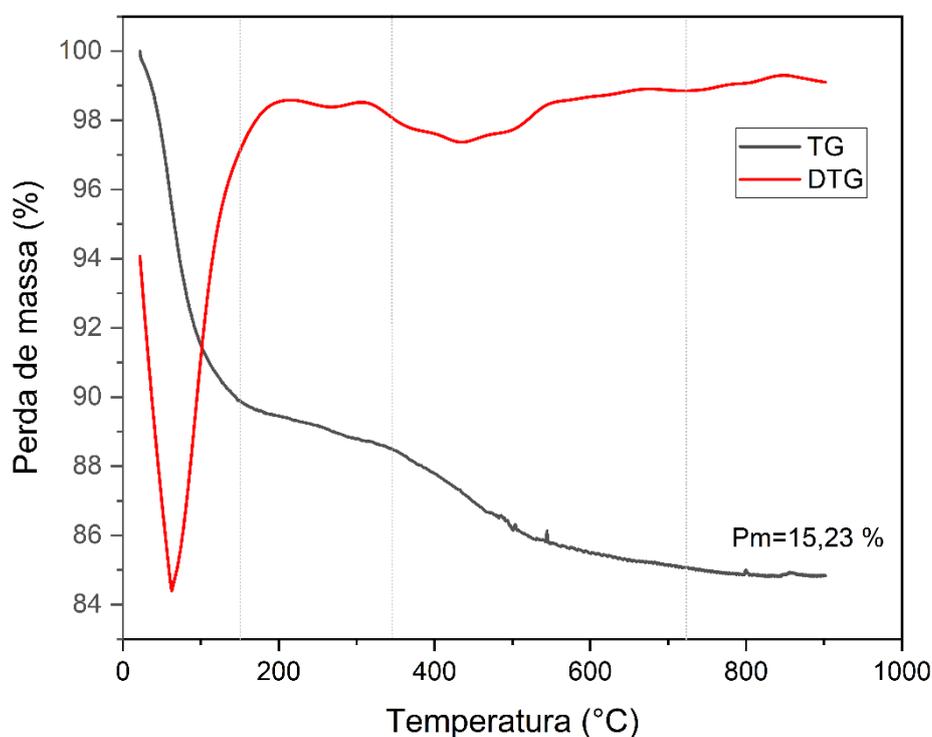
em $2\theta=17,6^\circ$ ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ – JCPDS 07-0042), como impureza. A presença de muscovita no padrão de DRX do caulim é consistente com o teor de K_2O (Pasabeyoglu *et al.*, 2023) obtido na análise química do caulim (Tabela 11). As fases cristalinas desses argilominerais foram identificadas com o auxílio da biblioteca ICDD – JCPDS (*International Centre of Powder Diffraction Standarts*) pelas fichas cristalográficas.

6.1.3. Análise Termogravimétrica (TGA)

As curvas de perda de massa (TG) e de sua derivada (DTG) em função da temperatura fornecem informações acerca dos acontecimentos quando as amostras são submetidas ao aquecimento. Cada componente se degrada de forma distinta e em faixas de temperaturas diferentes devido a variação de macrocomponentes de uma amostra para a outra, resultando, deste modo, em curvas com características distintas (Nurazzi *et al.*, 2021).

Na Figura 24, são mostradas as curvas TG e DTG da argila chocobofo.

Figura 24 – Curvas termo analíticas da argila chocobofo.



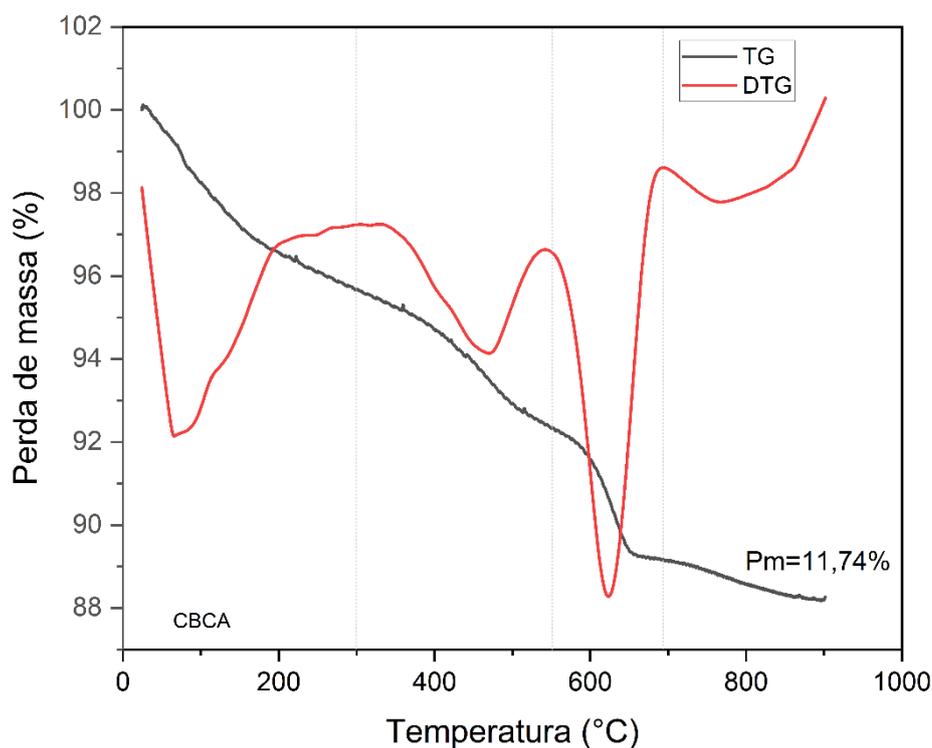
Fonte: Própria (2024).

Observando a curva termogravimétrica da argila chocobofe (Figura 24), constata-se quatro estágios de perdas de massa. No primeiro estágio, é possível observar uma perda de massa de 10,12 % correspondente à faixa de temperatura entre 24-150 °C que pode ser atribuído à perda de massa em função da evaporação da umidade e à remoção de componentes voláteis mais leves do material (Belghazdis; Hachem, 2022).

Os outros estágios presentes na curva TG não são bem definidos. Observando a DTG, que substitui a inclinação da curva por um pico (Criado *et al.*, 1978), observa-se outros dois estágios. No segundo estágio, percebe-se também uma pequena perda de massa de 1,33 % entre 150 °C e 345 °C provavelmente devido à perda de matéria orgânica presentes na argila. No terceiro estágio, outra perda de massa da ordem de 3,39 % é observada entre 345 e 724°C devido à perda de hidroxila estrutural do argilomineral (Belghazdis; Hachem, 2022), com um pico acentuado em aproximadamente 433 °C. Quando a argila esmectita apresenta um pico nesta temperatura (433 °C) é devido a alta quantidade de ferro presente na mesma (Souza Santos, 1992). Analisando os resultados da argila foi possível observar termogramas bastante semelhantes com perfil de curva característico de argilas contendo argilominerais do grupo da esmectita. A perda total de massa foi de 15,23 % para a argila chocobofe.

Na análise termogravimétrica da CBCA (cinza do bagaço de cana-de-açúcar), quatro picos são observados na curva de DTG, conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Curvas termo analíticas da CBCA.



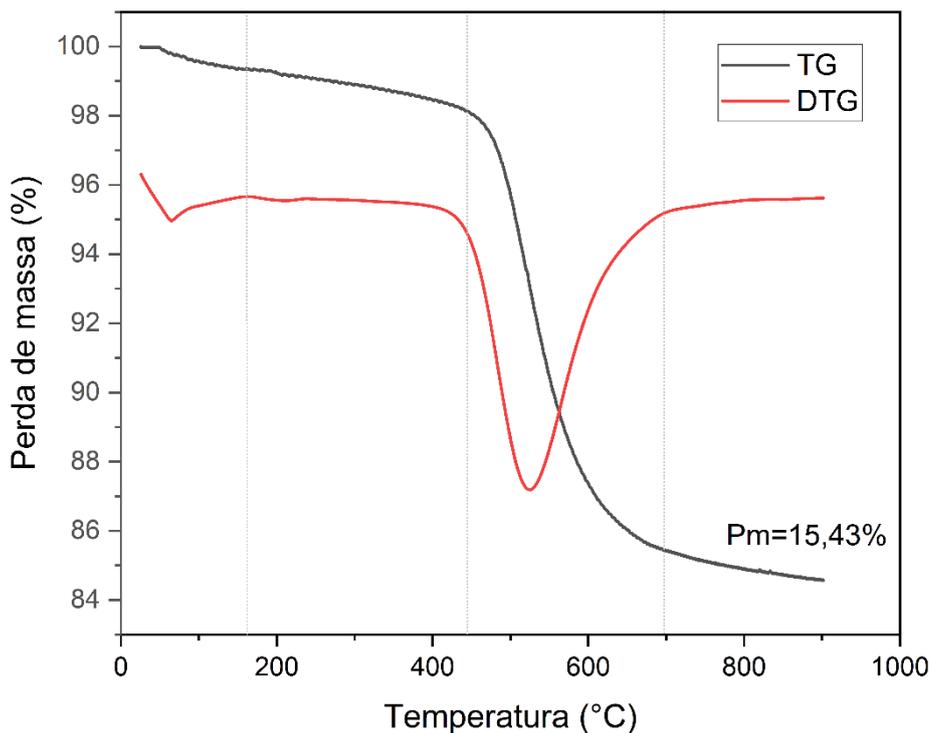
Fonte: Própria (2024).

A primeira perda de massa na curva de TG é causada pela natureza higroscópica das partículas de CBCA, ocorrendo próximo a 300 °C e mostrando uma mudança de massa de cerca de 4,32 %. A próxima perda de massa é observada entre 300 e 550 °C, no qual a massa diminui 7,65 %, do valor inicial, devido à presença de matéria orgânica.

Além disso, observando o terceiro pico na curva do DTG entre 550 e 700 °C, a perda de massa está associada à degradação oxidativa, devido à pirólise do carbono na fibra de bagaço. Essa degradação causou uma perda de massa de 3,18 %. A perda de massa final, a partir de 700 °C, é mais branda, com uma porcentagem de cerca de 0,91 %, associada à reorganização da estrutura devido à queima do mineral quartzo (Yadav *et al.*, 2020).

A análise termogravimétrica do caulim foi registrada traçando as curvas de TG e DTG na faixa de temperatura de 24 a 900 °C, como mostrado na Figura 26.

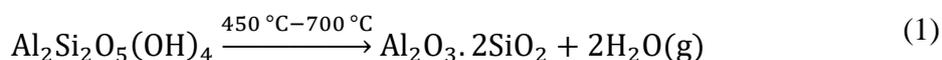
Figura 26 – Curvas termo analíticas do caulim.



Fonte: Própria (2024).

No TG, uma pequena perda de massa, de 0,67 %, é observada na faixa de temperatura de 50-160 °C que está associada à perda de água adsorvida. Em seguida, a maior perda de massa foi registrada na faixa de temperatura de 450-700 °C, representada por um pico na curva DTG. A perda total de massa observada na curva TG foi de 15,43 % (Figura 26). A curva de DTG mostra que a temperatura para a máxima perda de massa foi de 523 °C (temperatura de pico do DTG). A perda de massa nesta região representa a desidroxilação da caulinita para metacaulinita, esse processo ocorre na faixa de temperatura de 500-600 °C (Rashad, 2013; Khan, 2017). A magnitude da temperatura do pico DTG depende da taxa de aquecimento, tamanho da amostra, tamanho das partículas e do conteúdo mineral do caulim (Bulens; Delmon, 1977).

A perda de massa ocorrida durante a metacaulinização foi causada pela liberação de grupos hidroxila associados às camadas das folhas octaédricas levando à formação de estruturas desordenadas (Ptáček, 2010; Khan, 2017). O processo desta reação térmica é representado pela seguinte reação:



A Reação (1) fornece a reação fundamental que ocorre durante a formação do metacaulim. O processo de transformação térmica do caulinita em metacaulim é afetado pela taxa de aquecimento, quantidade de amostra, grau de desordem na amostra, pressão de vapor de vapor da água e tipo de fases (como impurezas) presentes no caulim inicial (Ptáček, 2010; Khan, 2017).

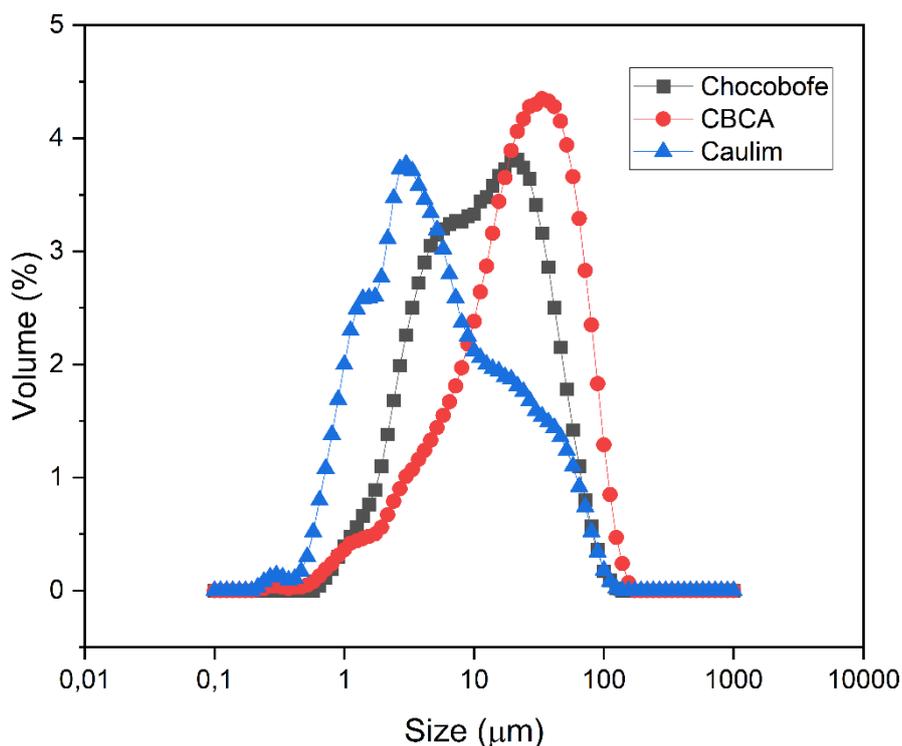
6.1.4. Análise do tamanho de partículas e distribuição de partículas

A distribuição de tamanho de partícula dos materiais in natura foi realizada para obter uma ideia do tamanho das partículas e sua uniformidade. O tamanho dos materiais brutos determina a porosidade e o tamanho do poro da membrana sinterizada. O crescimento do poro depende principalmente do tamanho inicial das partículas dos materiais brutos e da pressão de compactação (Tsuru, 2001).

Partículas mais finas (50 nm a 1 μm) requerem uma temperatura relativamente baixa para sinterização e, ao contrário, resultam em uma grande resistência ao transporte devido ao tamanho do poro efetivo muito pequeno. Por outro lado, partículas mais grossas (maiores que 10 μm) necessitam de uma temperatura de sinterização mais alta, resultando em membranas macroporosas com resistência mecânica reduzida (Wang *et al.*, 2007).

A distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas está mostrada na Figura 27, exibindo um modelo bimodal para a argila chocobofe e para a CBCA, e um modelo multimodal para o caulim.

Figura 27 – Distribuição do tamanho das partículas das matérias-primas.



Fonte: Própria (2024).

A Tabela 12 sumariza as distribuições de tamanho de partícula apresentadas na Figura 27.

Tabela 12 – Distribuição do tamanho das partículas das matérias-primas.

	Chocobofe	CBCA	Caulim
Diamêtro médio de partícula (μm)	18,59	32,17	12,35
Valor de dispersão	3,25	2,76	7,17
Faixa de tamanho de partícula (μm)	0,64-124,50	0,22-155,00	0,26-124,50
D₁₀ (μm)	2,91	4,14	1,19
D₅₀ (μm)	12,38	24,48	4,82
D₉₀ (μm)	43,14	71,76	35,79

Fonte: Própria (2024).

Com base na Tabela 12 e na Figura 27 pode-se observar que o tamanho das partículas está na faixa de 0,64-124,50 μm, 0,22-155,00 μm e 0,26-124,50 μm e o diâmetro médio das partículas, calculado usando a fórmula média ponderada por volume, é de 18,59 μm, 32,17 μm e 12,35 μm para a argila chocobofe, cinza do bagaço de cana-de-açúcar e caulim, respectivamente. Esses tamanhos de partículas são razoavelmente

úteis para a preparação de membranas porosas à base de argila com uma boa porosidade (Suresh; Pugazhenthii, 2016). Os valores encontrados estão de acordo com trabalhos existentes na literatura (Barros *et al.*, 2022; Andrade *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2023).

Além disso, os valores de D_{10} , D_{50} e D_{90} representam os tamanhos de partículas correspondentes a 10 %, 50 % e 90 % das amostras, respectivamente. O diâmetro mediano (D_{50}) foi determinado como 12,38 μm para a argila chocobofe, 24,48 μm para a cinza do bagaço de cana-de-açúcar e 4,82 μm para o caulim, indicando que 50 % das partículas em cada uma dessas matérias-primas possuem diâmetro igual ou menor do que esses valores.

Os valores de dispersão, ou a variabilidade dos tamanhos de partículas, obtidos na análise variaram entre 2,76 e 7,17 para todas as matérias-primas utilizadas neste estudo, indicando que as distribuições de tamanho possuem larguras semelhantes, o que favorece uma boa mistura e distribuição uniforme entre as partículas (Monash; Pugazhenthii, 2011).

6.2. CARACTERIZAÇÃO DAS MEMBRANAS

As membranas cerâmicas planas contendo diferentes concentrações de argila chocobofe e cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), foram preparadas conforme apresentado na Tabela 7. As imagens das membranas cerâmicas não sinterizadas e sinterizadas a 650 °C, são apresentados na Figura 28, respectivamente.

Figura 28 – Membranas cerâmicas não sinterizadas e sinterizadas.



Fonte: Própria (2024).

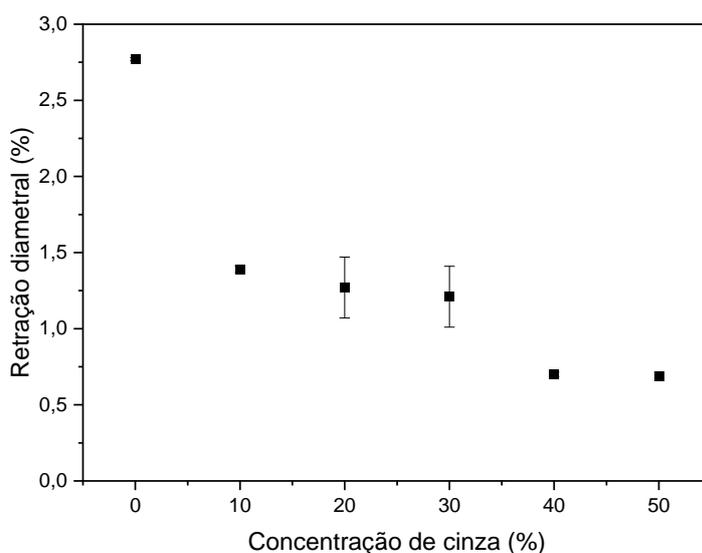
Observa-se que na Figura 28 a adição da CBCA resulta em uma alteração na coloração das membranas não sinterizadas, uma vez que o aumento da concentração do agente porogênico, a cor da CBCA vai ficando mais predominante.

Quando as membranas cerâmicas são sinterizadas, é possível observar a mudança de coloração, de maneira análoga ao descrito no estudo do autor (Pin, 2023). Estes resultados são devido à carbonização a temperaturas não muito altas (350 °C) e alteração para tons mais amarelados ou avermelhados devido à formação de óxidos de ferro a médias e altas temperaturas (500 °C e 650 °C), respectivamente (Ulery; Graham, 1993; Certini, 2005). Por fim, as membranas adquiriram uma coloração semelhante, isso se deve ao fato de que são sinterizadas a mesma temperatura (650 °C) mas com composições diferentes (Salomão; Oliveira, 2020).

As membranas formuladas também podem ser caracterizadas pela classe, obtendo uma classificação de resíduo Classe II-A, ou seja, um resíduo não perigoso e não inerte (ABNT, 2004), não apresentando características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade ou quaisquer outras propriedades que possam causar danos à saúde pública ou ao meio ambiente (Freitas *et al.*, 2024).

A Figura 29 apresenta a retração linear do diâmetro dos corpos de prova sinterizados em função do teor de cinza do bagaço de cana-de-açúcar incorporado em cada membrana.

Figura 29 – Retração linear do diâmetro das membranas cerâmicas.



Fonte Própria (2024).

É observado que os valores das retrações para as membranas cerâmicas foram baixos, apresentando pequenas alterações, com os valores variando entre 0,69 e 2,77 %. Baixos valores de retração nas dimensões indicam estabilidade dos materiais frente a altas temperaturas (650 °C) (Guimarães *et al.*, 2023).

Com o aumento da concentração de CBCA houve uma pequena diminuição na retração, de 2,77 % (membrana C0) para 0,69 % (membrana C50). Segundo os autores (Souza *et al.*, 2011), que utilizaram cinza de bagaço de cana-de-açúcar e material argiloso para produção de produtos cerâmicos, notou-se que na sinterização em temperaturas menores a 1000 °C, houve uma menor retração relacionada as amostras com maior quantidade de cinza na composição, por ser um material não plástico, confirmando o resultado apresentado nesta pesquisa.

Além disso, os autores (Souza *et al.*, 2011) encontraram um resultado para a retração linear do diâmetro de aproximadamente 11,5 % para sinterização em 1200 °C contendo 60 % de CBCA e 40 % de argila, do grupo caulinita, e uma retração de, aproximadamente, 0 % para uma temperatura de 800 °C.

Os resultados obtidos nas caracterizações físicas das membranas cerâmicas, encontram-se nas Tabela 13 e 14. Na Tabela 13, são apresentados os resultados obtidos das medidas de perda de massa média das amostras, antes e após a sinterização, e seus respectivos desvios padrões. Na etapa de sinterização, um fenômeno comum que pode ocasionar a redução da massa é a eliminação da água residual presente nos poros da membrana, que está fisicamente ligada à argila (Lima, 2021).

Tabela 13 – Perda de massa das membranas cerâmicas.

Análise	C0	C10	C20	C30	C40	C50
Perda de massa (%)	19,35±0,60	16,73±0,22	16,39±0,26	15,59±0,13	15,50±0,22	15,14±0,40

Fonte Própria (2024).

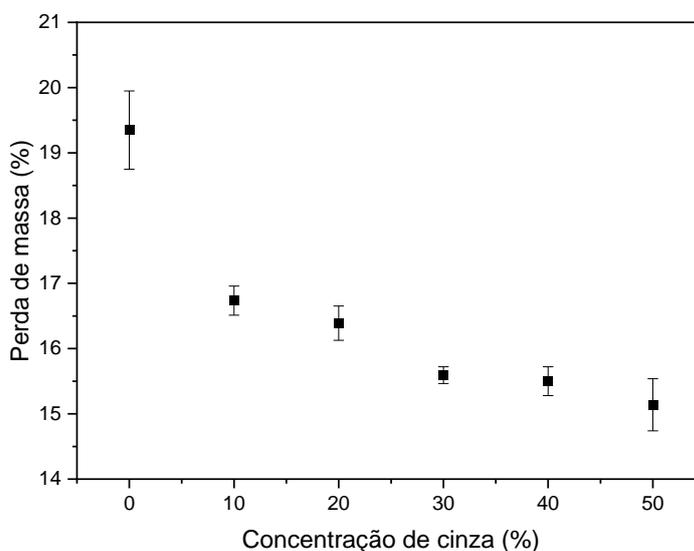
Durante todo o processo de sinterização, as membranas cerâmicas apresentaram pequena perda de massa, variando entre 15,14 % a 19,35 %. Analisando a Tabela 13 e a Figura 30, é possível observar que, a substituição parcial da argila pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar, ocorreu uma redução na perda de massa de 21,78 %. Nota-se que a maior perda (19,35 %) ocorre para a amostra sem CBCA (membrana C0), pois apresenta

maior concentração de partículas finas (argilominerais), matéria orgânica e hidróxidos (por exemplo, Fe e Al) (Souza, 2008).

O resultado da perda de massa, para membranas cerâmicas utilizando a CBCA, está de acordo com o encontrado na literatura (Souza, 2008). Para a temperatura de 800 ° C, membranas com 20, 40 e 60 % de cinzas tiveram uma perda de massa de 7,8 %, 6,4 % e 4,9 %, respectivamente. Por se tratar de um material calcinado, a cinza não apresenta (ou apresenta poucos) elementos que possam ser eliminados na temperatura de sinterização determinada neste trabalho.

Outro fator que pode justificar a redução da perda de massa com o aumento da concentração da CBCA, é a contaminação de areia na cinza. A areia faz com que a quantidade de quartzo aumente de forma significativa (como já analisado na Tabela 10 e na Figura 22) e sejam necessárias temperaturas mais elevadas para ser eliminado. Na Figura 30, é mostrada de forma gráfica a análise da perda de massa das membranas.

Figura 30 – Análise da perda de massa das membranas cerâmicas.



Fonte Própria (2024).

Os resultados do ensaio de absorção de água, porosidade aparente e densidade para cada amostra estão apresentados na Tabela 14.

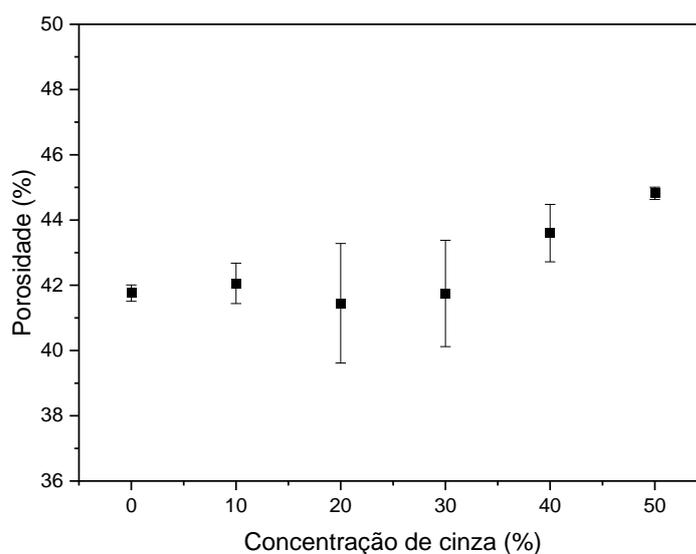
Tabela 14 – Caracterização física das membranas cerâmicas.

Análise	C0	C10	C20	C30	C40	C50
Densidade (g.cm ⁻³)	1,51±0,01	1,48±0,02	1,47±0,05	1,44±0,04	1,41±0,01	1,37±0,01
Porosidade aparente (%)	41,76±0,25	42,06±0,62	41,45±1,83	41,75±1,63	43,60±0,88	44,82±0,19
Absorção de água (%)	21,65±0,17	22,11 ±0,48	22,05±1,30	22,53±1,15	23,63±0,46	24,67±0,04

Fonte Própria (2024).

Observa-se que a membrana C50 apresentou densidade aparente de 1,37 g.cm⁻³, enquanto a membrana C0 de 1,51 g.cm⁻³, valores correspondentes a literatura (Pin, 2023). A menor densidade aparente foi observada para a maior quantidade de CBCA (membrana C50), o que pode estar relacionado aos valores de porosidade aparente obtidos, demonstrando que a adição de cinza proporcionou uma maior geração de poros, apresentando um maior volume de espaços vazios em sua estrutura (Pizzatto *et al.*, 2021). Os valores da porosidade estão apresentados na Tabela 14 e na Figura 31.

Figura 31 – Porosidade aparente das membranas cerâmicas.



Fonte Própria (2024).

A porosidade aparente da amostra apresentou um leve aumento com o aumento da quantidade de CBCA na composição das membranas. Esse aumento pode estar associado à volatilização das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, que produzem uma fase líquida, ocorrendo o fenômeno de sobrequeima, o que resulta no surgimento de poros (Pin, 2023). Em temperaturas acima de 1000 °C, ocorre uma maior formação da fase líquida e preenche os poros abertos e diminuindo a porosidade (Souza *et al.*, 2011).

Quando comparado com trabalhos presentes na literatura, os autores (Souza *et al.*, 2011) obtiveram valores de porosidade de 41,73 %, 41,88 % e 41,26 % para 20 %, 40 % e 60 % de CBCA, respectivamente, em uma temperatura de sinterização de 800 °C. De maneira similar, o autor (Pin, 2023) encontrou porosidades de 38,63 % e 46,03 % para membranas com concentração de CBCA de 40 % e 60 %, respectivamente, a uma temperatura de sinterização de 1200 °C. Além disso, os autores (Andrade *et al.*, 2019) que utilizaram a cinza de bagaço de cana-de-açúcar como agente formador de poros para a produção de membranas cerâmicas, encontraram o valor de 37,40 % para porosidade aparente com a queima de 900 °C e 31,00 % para 1000 °C. Portanto, os valores encontrados no presente trabalho estão de acordo com a literatura.

Por sua vez, a absorção de água aparente expressa a massa de água absorvida pela membrana após a sinterização (Guimarães *et al.*, 2023), que foi de 21,65 % para CO, 22,11 % para C10, 22,05 % para C20, 22,53 % para C30, 23,63 % para C40 e 24,67% para C50, como pode-se observar na Tabela 14.

Como esperado, a substituição da argila pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar resultou em maior absorção de água, para uma temperatura de sinterização estabelecida neste trabalho (650 °C). Os resultados foram significativos e coerentes ao se observar os valores das porosidades, pois o comportamento das membranas em relação a absorção de água está diretamente relacionado com a quantidade de poros existentes (Pin, 2023).

As membranas por serem superfícies sólidas possuem uma energia livre interfacial. Logo, quando um líquido é colocado na superfície, ou ele vai se espalhar ou vai formar uma gota. O ângulo formado no contato do líquido com a superfície é denominado ângulo de contato (Lima, 2019). Com base na magnitude do ângulo de contato, os estados podem ser categorizados da seguinte forma: ângulos de contato inferiores a 90° caracterizam o estado como hidrofílico, enquanto ângulos de contato superiores a 90° denotam o estado como hidrofóbico (Wenzel, 1936; Cassie; Baxter, 1944).

Após a realização dos experimentos para a determinação do ângulo de contato, não foi possível observar a formação da gota na superfície das membranas, uma vez que são altamente hidrofílicas e possuem poros nas superfícies que ajudam na absorção da gota (Tonel *et al.*, 2019). Portanto, o ângulo de contato é igual a 0. Para cenários em que o ângulo de contato se restringe a menos de 5 graus, é categorizado como um estado super-hidrofílico (Drelich *et al.*, 2011)

Os poros atuam como concentradores de tensão e são a principal causa dos defeitos dos produtos cerâmicos, uma vez que facilitam o início das trincas e com isso, uma possível fratura (Fonseca *et al.*, 2016). A distribuição de tamanhos de poros e a porosidade total alteram as propriedades das cerâmicas. Os vazios atuam negativamente sobre a resistência à fratura (Kingery *et al.*, 1976).

Os poros podem ou não estar em contato com a superfície do material, ou seja, com o exterior. Tal fato é relevante, uma vez que se existir esse contato, o poro pode conduzir material entre o exterior e o interior, como é o caso da umidade, que se transferida do exterior para o interior pode dissolver a fase sólida. Estes poros conectados com a superfície são denominados poros abertos e são mais prejudiciais no que se refere à resistência mecânica do material, já que muitas fraturas têm origem em trincas superficiais, as quais podem ser poros. Por outro lado, os poros que não se conectam com a superfície são chamados poros fechados, mesmo que estejam conectados entre si e estes muitas vezes existem sem que sejam percebidos. Os poros fechados podem existir devido ao fechamento dos poros abertos, ou por gases da fase sólida que não conseguiram sair da estrutura (Fonseca *et al.*, 2016).

Segundo o autor (Henriques, 2017) um dos métodos mais eficientes utilizado para aumentar tamanho e a quantidade de poros em corpos cerâmicos é a utilização de agentes porogênicos. Na Tabela 15, estão apresentados o tamanho médio dos raios dos poros, de acordo com a Equação 7.

Tabela 15 – Raio médio dos poros das membranas cerâmicas.

Raio médio dos poros (µm)	C0	C10	C20	C30	C40	C50
	0,23	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27

Fonte Própria (2024).

Ao analisar os valores apresentados na Tabela 15, verifica-se que os resultados estão de acordo com as previsões teóricas. A adição da CBCA, conforme esperado, provocou

um aumento no tamanho do raio dos poros, o que é consistente com os efeitos descritos na literatura (Souza, 2011).

De acordo com os autores (Wang *et al.*, 2005) para membranas de microfiltração, o diâmetro médio dos poros deve estar compreendido entre 0,1–10 μm e apresentam porosidade variando entre 5 % e 70 % (Cot *et al.*, 1988), portanto todas as membranas produzidas neste trabalho são determinadas como membranas de microfiltração devido ao tamanho inferior a 10 μm (Mestre *et al.*, 2019).

Os autores (Rani e Kumar, 2022) fabricaram membranas planas cerâmicas a partir da argila da terra de Fuller, pelo método de prensagem uniaxial a seco (prensa hidráulica por 3 min e uma pressão de 50 bar), seguido por sinterização em diferentes temperaturas (650–950 °C). A membrana identificada como a mais adequada para a microfiltração, apresentou a porosidade média de 39 % e um tamanho de poro de 0,176 μm , sendo sinterizada a 850 °C.

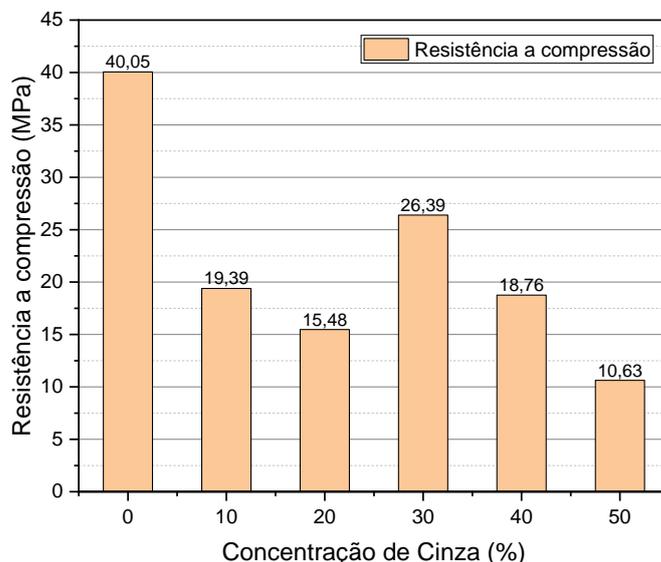
Ainda segundo a literatura, os autores (Andrade *et al.*, 2019), mencionados anteriormente, obtiveram valores de 2,5 a 6 μm para membranas com adição de CBCA, enquanto os autores (Silva e Lira, 2006) encontraram valores de 1 a 4 μm para membranas formadas por cordierita e os autores (Souza *et al.*, 2011) obtiveram tamanhos próximos a 10 μm utilizando diatomita. O tamanho dos poros pode variar de acordo com as propriedades dos materiais precursores e com a temperatura de sinterização (Saparuddin *et al.*, 2020).

Tendo em vista os testes realizados e discutidos, afirma-se que a absorção de água, a porosidade e o tamanho dos poros podem alterar a resistência mecânica das amostras (Ye *et al.*, 2017). Outro fator que também pode alterar a resistência mecânica é a temperatura de sinterização, uma vez que quanto maior a temperatura de sinterização, menor a porosidade e maior a resistência mecânica (Liang *et al.*, 2021). Como este trabalho busca a utilização de temperaturas de sinterização mais baixas, quando comparada com outros estudos, visando o baixo custo da produção das membranas, se faz necessário o estudo da resistência mecânica devido a essas observações.

As membranas cerâmicas foram preparadas contendo diferentes concentrações de argila e CBCA, conforme apresentado na Tabela 7. As membranas também foram preparadas em diferentes pressões de moldagem, de acordo com a Tabela 8. Ao utilizar as membranas prensadas a 0,666 tonelada, as mesmas racharam dentro do molde,

indicando uma baixa resistência mecânica, sendo descartadas para este trabalho. Portanto, na Figura 32, estão apresentados os dados das membranas cerâmicas prensadas a 1 tonelada por 60 segundos a 650 °C.

Figura 32 – Resultado da resistência a compressão (MPa).



Fonte Própria (2024).

Analisando os dados, pode-se verificar o comportamento atípico crescente e decrescente dos resultados, isso acontece, pois, algumas misturas não apresentam previsibilidade da formação de defeitos internos nas membranas durante o processo de fabricação. A resistência mecânica de um produto depende de sua microestrutura e, principalmente, da distribuição e tamanho dos defeitos presentes. Os materiais cerâmicos apresentam uma série de defeitos que podem atuar como concentradores de tensão, determinando os pontos onde mais facilmente se inicia a fratura da membrana (Lima, 2021).

Entretanto, quando comparado o valor da membrana C0, que não contém CBCA em sua composição, com as demais membranas, percebe-se que seu valor de resistência a compressão é significativamente maior, indicando que a adição do agente porogênico reduziu o valor dessa propriedade. Ainda observando a Figura 32, houve uma diminuição considerável na resistência mecânica, quando comparado C0 (40,05 MPa) e C50 (10,63 MPa), cerca de 73,47 %, o que pode ser explicado pela sinterização incompleta dessa membrana por necessitar de temperaturas mais elevadas (900–1000 °C).

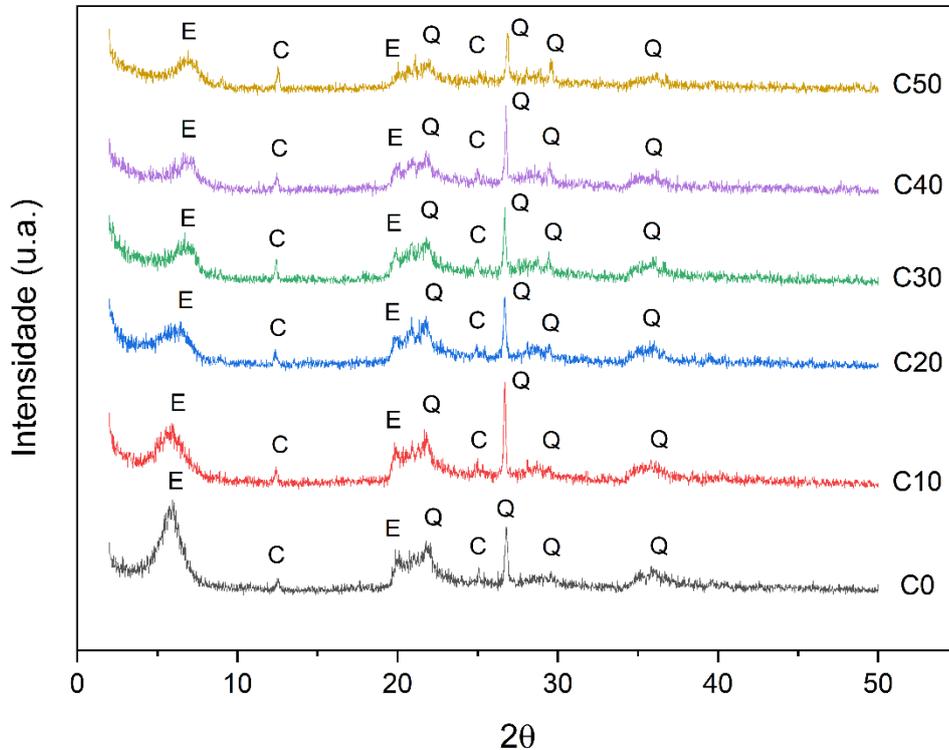
Deve-se ressaltar que de acordo com valores especificados na norma ABNT NBR 7171 (1992), todas as amostras cerâmicas têm de atender ao requisito mínimo de 1,0 MPa, independentemente da classificação. Apesar da redução progressiva da resistência, verifica-se que todos os corpos de prova apresentaram valores acima do recomendado pela norma.

Os autores (Elomari *et al.*, 2015) conduziram um estudo em que produziram membranas cerâmicas, em formato de disco, a base de argila, utilizando o método de prensagem uniaxial com pressão de moldagem 10 kg/m² por um tempo de 15 min, em uma temperatura de sinterização de 950 °C. O resultado desse processo foi uma membrana com o valor da resistência mecânica de 14,8 MPa.

Os valores de resistência mecânica encontrados neste trabalho estão em concordância quando comparados com a literatura, uma vez que a temperatura de sinterização influencia diretamente na resistência (Huang *et al.*, 2023) e a temperatura utilizada neste trabalho é mais baixa, buscando um menor custo na produção das membranas.

A fim de destacar o efeito do tratamento térmico na composição mineralógica das membranas cerâmicas foram realizadas análises de DRX nas amostras não sinterizadas e sinterizadas a 650 °C. Os difratogramas das membranas não sinterizadas estão apresentados na Figura 33.

Figura 33 – Difratomogramas de raios X das membranas cerâmicas não sinterizadas (E: Esmeclita, C: Caulinita e Q: Quartzo).



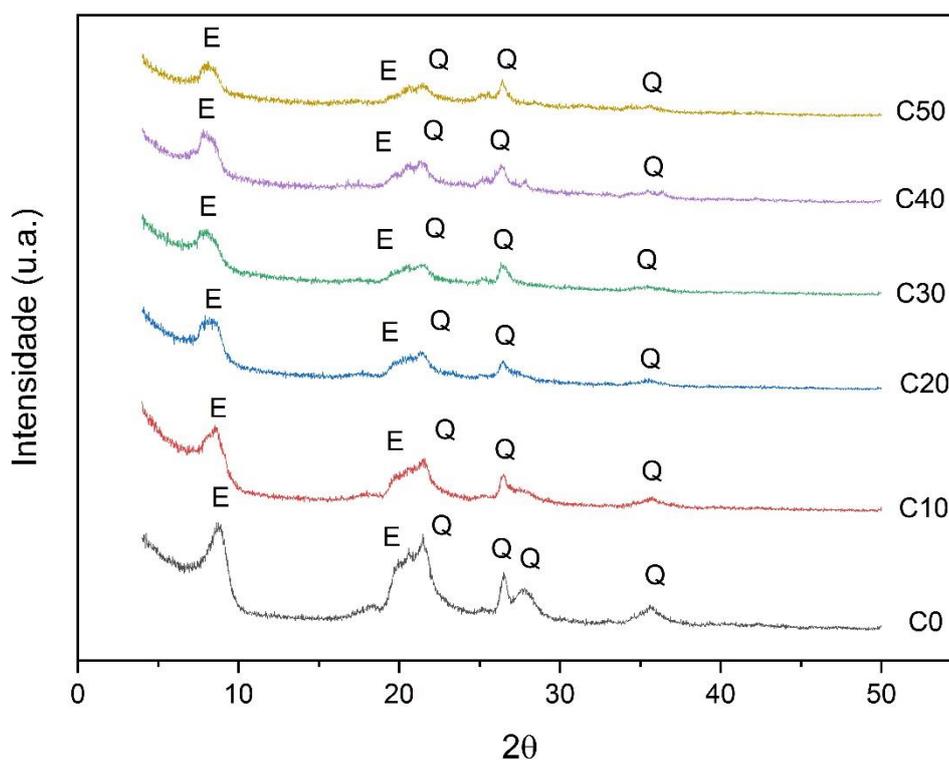
Fonte: Própria (2024).

Através do difratograma de raios X da membrana cerâmica C0, é possível observar picos característicos da esmeclita (E) e do quartzo (Q), principais componentes do argilomineral esmeclítico, como também notado na Figura 21, difratograma da argila chocobofo. A presença da caulinita foi confirmada por reflexões características em $2\theta = 12,41^\circ$, $20,21^\circ$ (reflexões múltiplas) e $25,49^\circ$, o segundo sobreposto no pico de esmeclita e quartzo também são observados, mas com picos menos intensos quando comparados aos picos da caulinita, ficando o pico do quartzo sobreposto ao pico referente ao argilomineral esmeclítico. A pequena reflexão em $2\theta = 26,5^\circ$ mostrou a presença de traços de quartzo e $8,86^\circ$ da esmeclita (Carmo, 2022)

Não foram observadas diferenças significativas no padrão de DRX da membrana cerâmica (C0) com as outras formulações (C10, C20, C30, C40 e C50), seguindo assim, o mesmo comportamento, onde são observados picos característicos do argilomineral esmeclítico, caulim e da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, confirmando sua composição.

Na Figura 34, estão apresentados os difratogramas de raios X das membranas cerâmicas sinterizadas a 650 °C.

Figura 34 – Difratogramas de raios X das membranas cerâmicas sinterizadas a 650 °C (E: Esmectita e Q: Quartzo).



Fonte: Própria (2024).

O método mais comum para modificar fisicamente um material cerâmico é por meio de tratamento térmico. A estrutura e a composição de argilominerais pode ser modificada por aquecimento em alta temperatura (300 °C) (Haller-Kallai, 2006). No aquecimento, todos os argilominerais passam através de uma faixa de temperatura na qual eles são desidratados para vários graus. Na região superior deste intervalo de temperatura, desidratação e desidroxilação podem se sobrepor. A desidratação causa mudanças que podem ser controladas e utilizadas (Zou *et al.*, 2021).

Examinando os difratogramas das membranas cerâmicas sinterizadas na Figura 34, foram identificados apenas os picos característicos da esmectita (E) e do quartzo (Q), principais componentes do argilomineral esmectítico. Também é possível verificar que após o processo de sinterização ocorreram modificações estruturais. Os picos referentes às argilas esmectitas apresentaram redução da intensidade do pico característico da

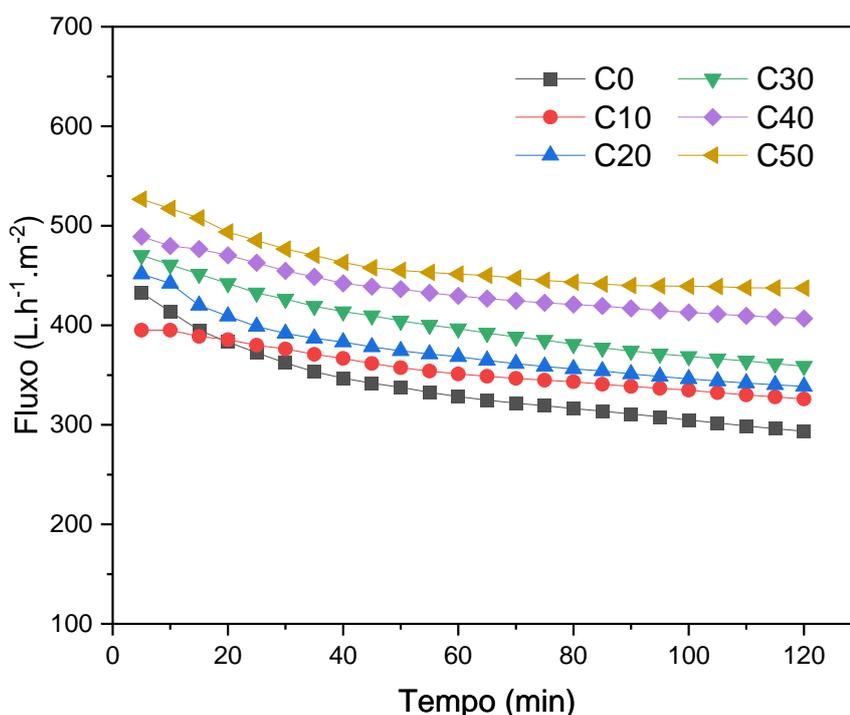
esmectita, confirmando a influência do processo de sinterização (nas condições em que foi realizado) sobre as propriedades estruturais da argila chocobofo (Bertagnolli *et al.*, 2011).

Os picos de caulinita uma vez observados na Figura 33 não estão mais presentes na Figura 34 após o tratamento térmico. A conversão da caulinita em metacaulim é confirmada pela ausência de picos de difração de caulinita, acompanhada pelo aparecimento do aluminossilicato amorfo (Khan *et al.*, 2017). O metacaulim é um material amorfo e os picos mais altos de difração correspondem à presença de quartzo (SiO_2), que é a fase cristalina, no metacaulim (Ayele *et al.*, 2015). Outros picos remanescentes após a calcinação ainda são observados, o que corresponde ao fato de quartzo, pois destruir a estrutura desses argilominerais exigiria temperaturas acima de 700°C (Maia *et al.*, 2007; Melo e Riella, 2010).

6.2.1. Fluxo de água pura

A Figura 35, apresenta os fluxos de água pura para as membranas prensadas a 1 tonelada por 60 s, propondo um comparativo.

Figura 35 – Fluxo de água pura em função do tempo para as membranas cerâmicas.



Fonte: Própria (2024).

Avaliando o comportamento das curvas mostradas na Figura 35, verifica-se que o fluxo das membranas apresenta comportamentos similares, decrescendo gradualmente ao longo dos 120 min do experimento. No início da análise, as membranas atingem o fluxo máximo, uma vez que ainda está ocorrendo a hidratação superficial da membrana (Carmo *et al.*, 2022), e vão diminuindo ao longo do tempo, tendendo a estabilidade. Também é possível visualizar que entre 0 e 15 min, nas membranas C0, C20, C40 e C50, ocorre o declínio do fluxo de maneira mais acentuada, devido à hidratação das membranas com as moléculas de água.

Os valores médios do fluxo de água pura, estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Fluxos médios das membranas cerâmicas.

Fluxo médio (L.h⁻¹.m⁻²)	C0	C10	C20	C30	C40	C50
	337,89	355,54	374,22	400,68	435,65	460,67

Fonte: Própria (2024).

Com base nos dados da Tabela 16, observa-se uma tendência clara de aumento no fluxo de água pura à medida que a quantidade de CBCA nas membranas aumenta. Isso confirma que a quantidade de CBCA utilizada como agente porogênico exerce uma influência direta no fluxo de água pura.

Conforme descrito anteriormente, os valores de porosidade (Figura 31) e raio médio de poros (Tabela 15) aumentaram conforme a adição de CBCA na produção das membranas. Segundo os autores (Silva *et al.*, 2013; Boutaleb *et al.*, 2024), as propriedades citadas (porosidade e raio médio dos poros) interferem diretamente no fluxo das membranas, uma vez que a membrana C0 possui menor porosidade (41,76 %) e menor raio de poro (0,23 µm), a mesma possui o menor fluxo (337,89 L.h⁻¹.m⁻²), por outro lado, a membrana C50, que possui a maior porosidade (44,82 %) e o maior raio (0,27 µm), então apresentando o maior fluxo (460,67 L.h⁻¹.m⁻²). O aumento do fluxo médio, entre as membranas C0 e C50, é de 36,33 %, indicando uma melhoria notável.

Comparando os fluxos de água pura encontrados neste estudo com trabalhos presentes na literatura os autores (Sarkar *et al.*, 2012) produziram a membrana D70, sinterizada a 1300 °C e encontrou uma porosidade de 37 %, raio médio dos poros 0,4 µm, resistência mecânica 51 MPa e fluxo de água pura de 760 L.h⁻¹.m⁻².

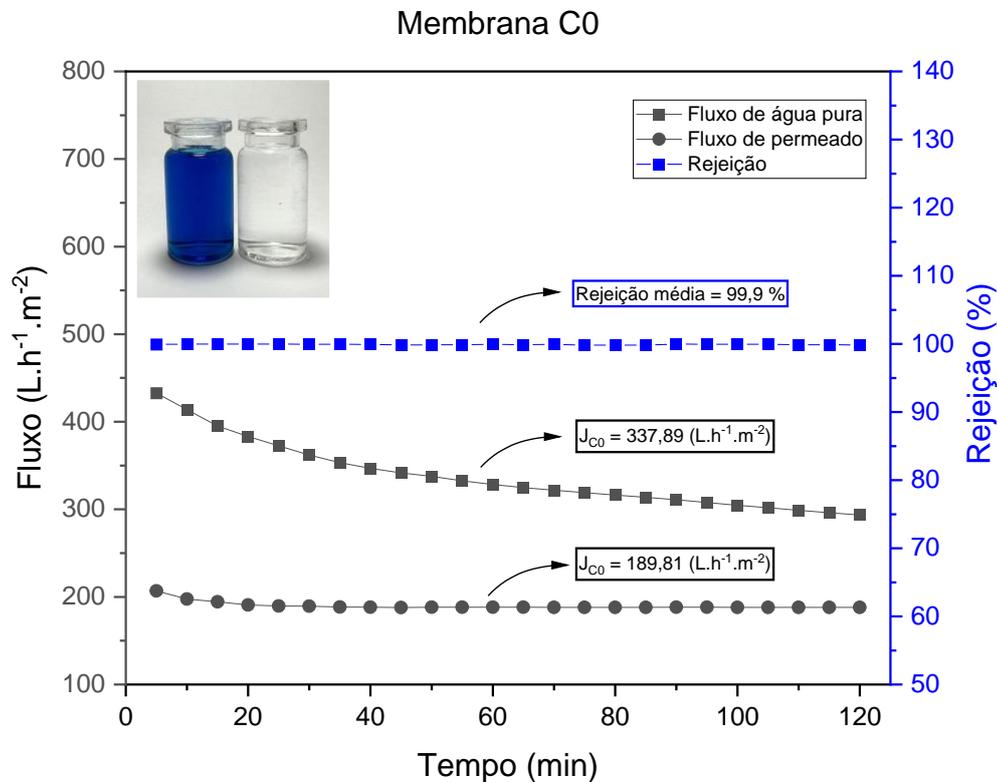
Os autores (Hubadillah *et al.*, 2018) fabricaram membranas com porosidade de 43,1 %, raio médio dos poros 0,55–2,3 μm , resistência mecânica de 71,21 MPa e fluxo de água pura de 303 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Além disso, os autores (Elomari *et al.*, 2015) produziram membranas cerâmica a uma temperatura de sinterização de 950 °C, detectando uma porosidade de 28,1 %, raio médio dos poros 0,9 μm , resistência mecânica 14,8 MPa e fluxo de água pura de 95 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

6.2.2. Tratamento do efluente têxtil

Após serem avaliadas quanto as suas propriedades e características, as membranas cerâmicas foram avaliadas no sistema de separação de (corante azul de metileno), para determinar o fluxo de permeado correspondente para cada uma das amostras. Os ensaios de microfiltração foram realizados nas seguintes condições experimentais: concentração de 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, para a solução do corante, temperatura ambiente (25 °C), pressão de 2 bar e tempo de 120 min.

Da Figura 36 a Figura 41, estão apresentadas as curvas correspondentes aos resultados das avaliações das membranas cerâmicas de baixo custo utilizando o corante azul de metileno.

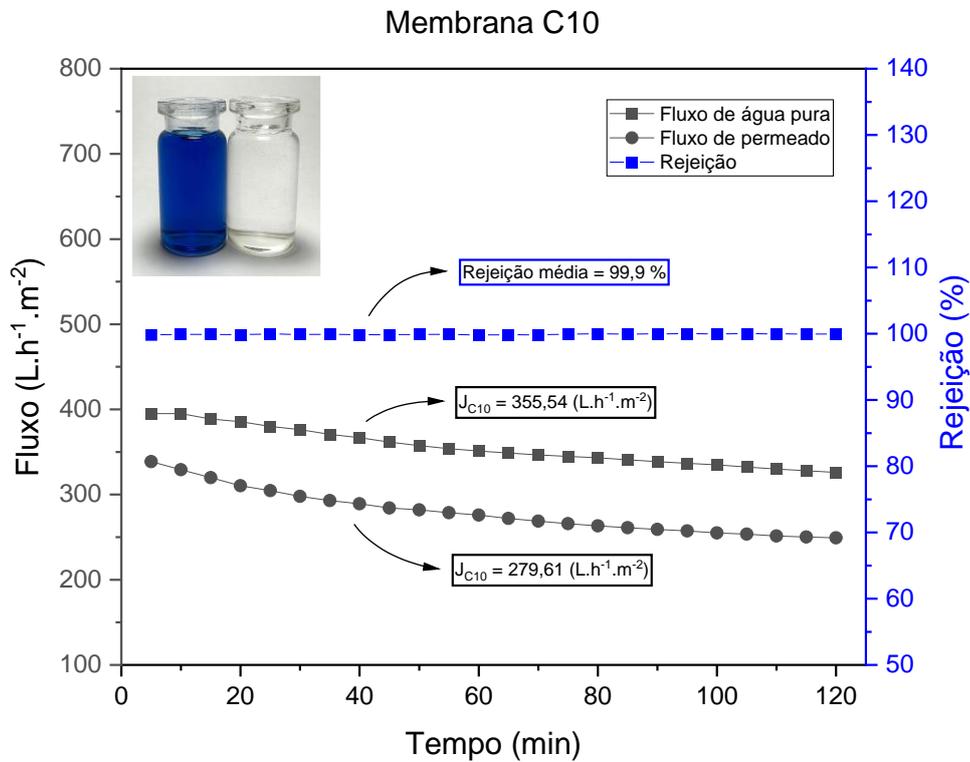
Figura 36 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica C0.



Fonte: Própria (2024).

Analisando a Figura 36, verifica-se que para o tratamento do efluente sintético, fazendo uso da membrana C0, o fluxo médio de água pura foi de $337,89 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ e o fluxo médio do permeado de $189,87 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, revelando uma redução de 43,80 %. A redução do fluxo foi significativa em virtude da formação de *fouling*, sendo confirmado após o fim do experimento quando a membrana apresentou um depósito das moléculas de corante azul de metileno. Esse depósito pode ser resultante do entupimento dos poros ou da adsorção do material (Batista, 2019). A rejeição média da membrana C0 foi de 99,90 %, apresentando um permeado transparente, sem indicação de traços visuais do corante azul de metileno na membrana cerâmica C0.

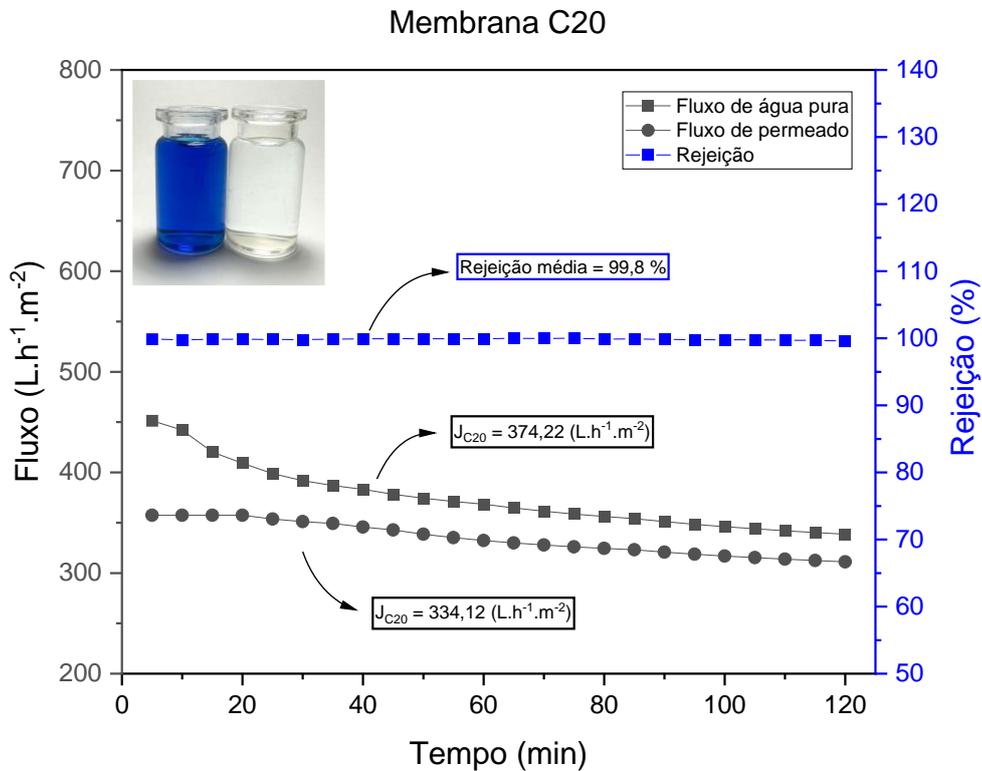
Figura 37 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica C10.



Fonte: Própria (2024).

Na Figura 37, observa-se que a membrana cerâmica C10 apresentou um fluxo médio de água pura de $355,54 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ e o fluxo médio do permeado de $279,61 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, revelando uma redução de 21,36 %. A estabilização do fluxo da membrana para água pura e para o permeado ocorreu no mesmo período de tempo, próximo aos 80 minutos. A rejeição média da membrana cerâmica C10 foi de 99,9 %, o mesmo valor apresentado pela membrana C0, indicando que com a adição de 10 % de CBCA, o fluxo médio aumentou, e a rejeição ao corante azul de metileno foi a mesma.

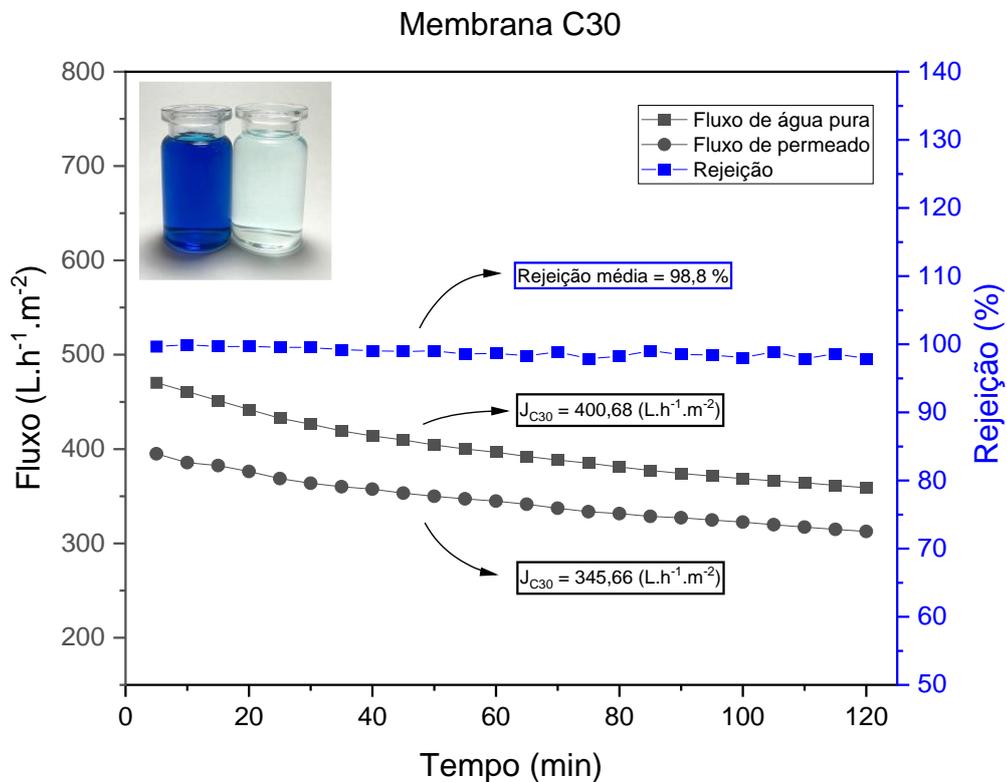
Figura 38 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica C20.



Fonte: Própria (2024).

Na Figura 38, as curvas de fluxo de água pura e de fluxo de permeado estão próximas e, por volta dos 40 minutos, exibem comportamentos paralelos. O valor do fluxo médio de água pura de $374,22 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ e o fluxo médio do permeado foi de $334,12 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, revelando uma redução de 10,72 %. A rejeição média da membrana cerâmica C20 foi de 99,8 %. A amostra coletada do permeado, apresentou uma leve coloração azul clara, indicando traços leves de corante azul de metileno.

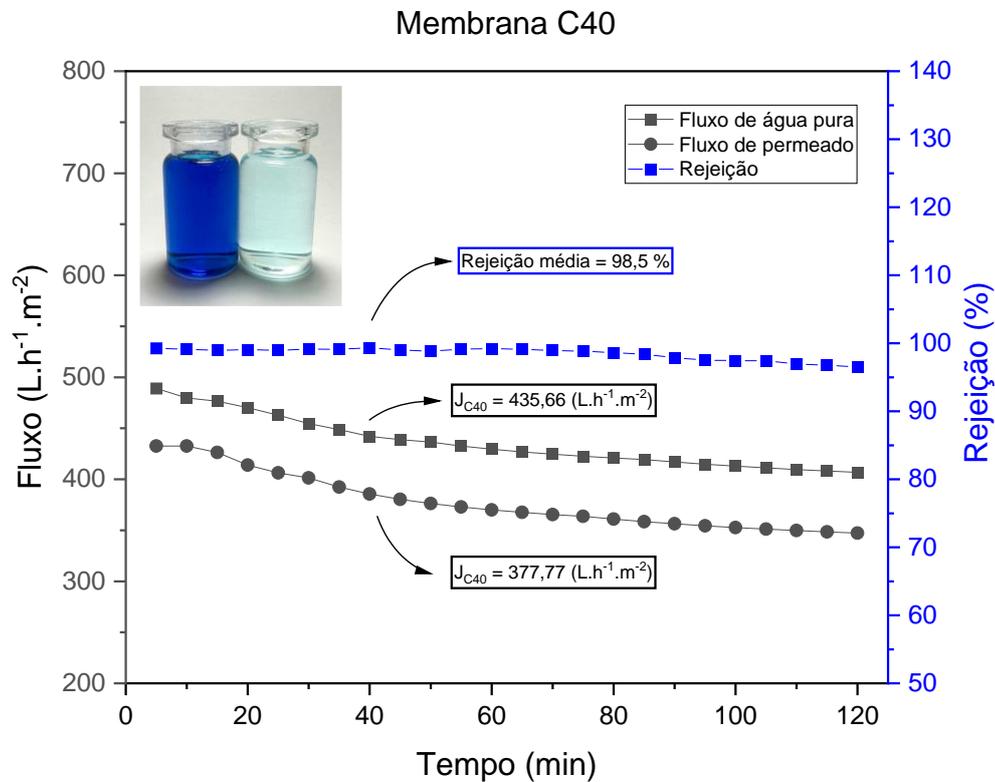
Figura 39 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica C30.



Fonte: Própria (2024).

Considerando as curvas apresentadas na Figura 39, observa-se que elas exibem comportamentos semelhantes desde o início até o final da análise. O valor do fluxo médio de água pura de $400,88 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ e o fluxo médio do permeado foi de $345,66 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, indicando uma diminuição de $13,77 \%$. O comportamento da curva de rejeição apresenta pontos alternados a partir de 65 minutos. A rejeição média é de $98,8 \%$, e a coloração da amostra torna-se mais azulada em comparação com a membrana cerâmica C20.

Figura 40 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica C40.

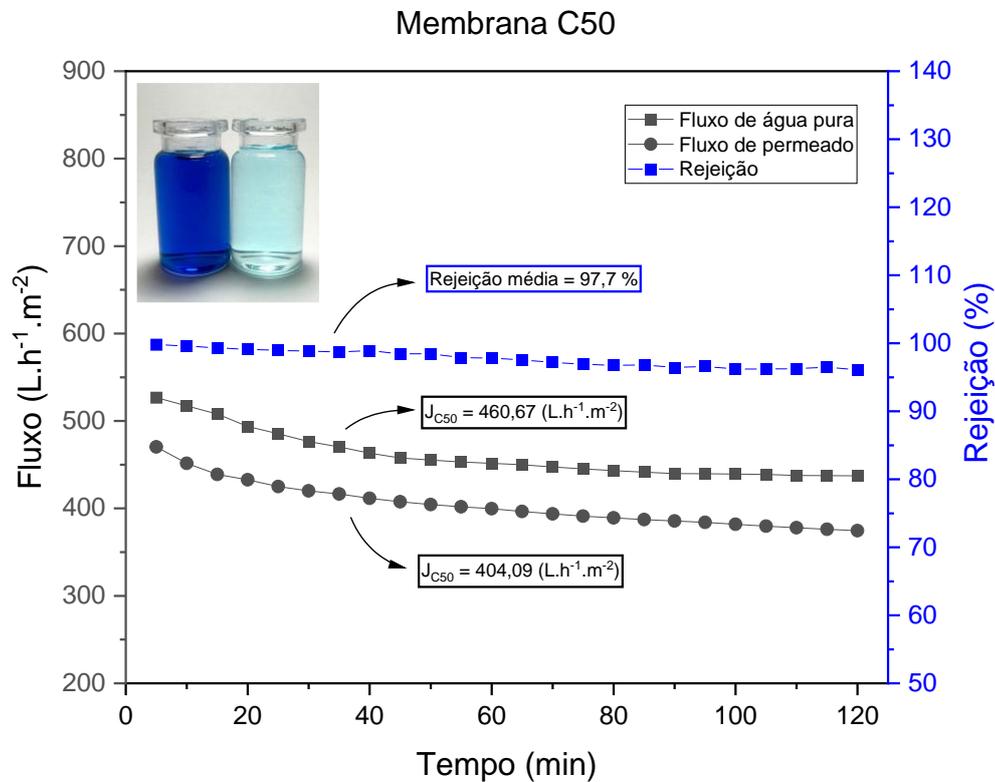


Fonte: Própria (2024).

O fluxo médio de água pura para a membrana cerâmica C40, apresentado na Figura 40, é de $435,66 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ e o fluxo médio do permeado de $377,77 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, demonstrando uma redução de 13,28 %, quando comparado os fluxos. A curva de rejeição apresenta um comportamento levemente decrescente, chegando a um valor de rejeição média de 98,5 % sendo possível perceber que moléculas do corante azul de metileno passaram pela membrana cerâmica.

Na Figura 41, pode-se analisar que o fluxo médio de água pura é de $460,67 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ e o fluxo médio do permeado de $404,09 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, expressando uma redução de 12,29 %.

Figura 41 – Fluxo de água pura, fluxo do permeado e rejeição em função do tempo para a membrana cerâmica C50.



Fonte: Própria (2024).

Analisando a imagem comparativa da coloração da alimentação com o permeado, observa-se que a coloração do permeado é mais clara em comparação com a solução inicial, porém apresenta uma tonalidade azul mais acentuada. Essa variação de cor não indica necessariamente um desvio dos padrões estabelecidos. Portanto, com a análise quantitativa, observa-se que a rejeição média da membrana cerâmica C50 é de 97,7 %, o que ainda reflete um excelente nível de rejeição.

De maneira mais sucinta, na Tabela 17 estão compiladas as informações, proporcionando uma visão consolidada de todos os dados discutidos anteriormente.

Tabela 17 – Caracterização dos parâmetros das membranas cerâmicas produzidas.

Parâmetros	C0	C10	C20	C30	C40	C50
Porosidade aparente (%)	41,76±0,25	42,06±0,62	41,45±1,83	41,75±1,63	43,60±0,88	44,82±0,19

Raio médio dos poros (μm)	0,23	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27
Resistencia mecânica (MPa)	40,05	19,39	15,48	26,39	18,76	10,63
Fluxo médio de água pura ($\text{L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$)	337,89	355,54	374,22	400,68	435,65	460,67
Fluxo médio de permeado ($\text{L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$)	189,81	279,61	334,12	345,66	377,77	404,09
Rejeição (%)	99,9	99,9	99,8	98,8	98,5	97,7

Fonte: Própria (2024).

Diante dos dados apresentados na Tabela 17, constata-se que a adição de CBCA, na produção de membranas cerâmicas, resulta num aumento gradual da porosidade. Isso ocorre devido a perda do agente porogênico durante o processo de sinterização, deixando espaços vazios dentro da membrana, o que forma poros maiores e aumenta a porosidade (Obada *et al.*, 2017).

O aumento da porosidade e do tamanho dos poros torna as membranas mais frágeis (Huang *et al.*, 2023). Esse efeito pode ser observado quantitativamente pela diminuição da resistência mecânica, mesmo com a adição de pequenas quantidades de cinza. A baixa resistência mecânica pode comprometer a integridade estrutural das membranas, tornando-as mais suscetíveis a fraturas e danos sob condições de operação.

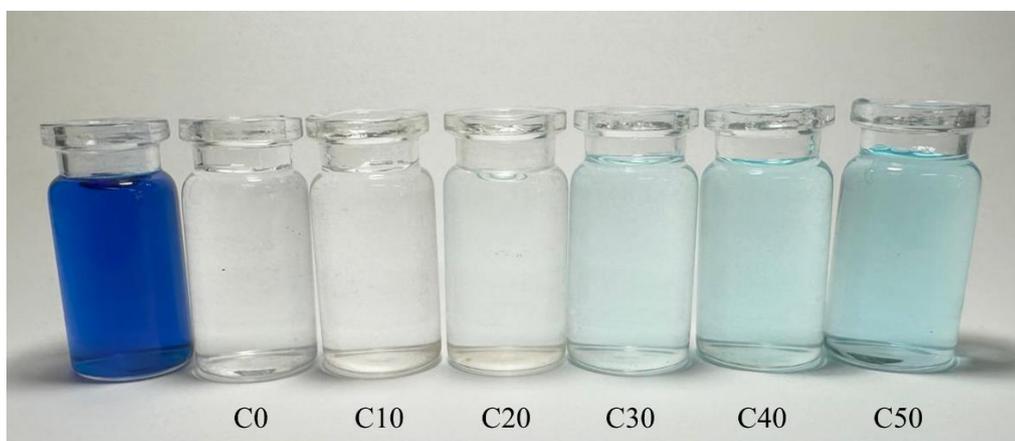
Apesar da redução da resistência, estudos demonstram que a presença de poros maiores facilita a passagem de fluidos, reduzindo a resistência do fluido ao passar pela membrana e, conseqüentemente, aumentando o fluxo (Song *et al.*, 2022). Essa característica é especialmente vantajosa em aplicações onde a alta permeabilidade é essencial, como na filtração de águas residuais ou na purificação de produtos químicos.

Na utilização das membranas cerâmicas no tratamento de efluentes, é possível observar diminuição do fluxo de permeado em relação ao fluxo de água pura devido ao fenômeno de *fouling*, que é resultado entupimento dos poros ou da adsorção de material na membrana (Li *et al.*, 2020). Com o aumento do teor de CBCA nas membranas, há uma menor redução do fluxo, quando comparado o fluxo de água pura e o fluxo de permeado,

pois os poros maiores permitem que as moléculas de corante passem mais livremente, reduzindo o *fouling*.

Essa dinâmica também se reflete na redução da rejeição das membranas com o aumento da quantidade de CBCA adicionado. A Figura 42 ilustra todos os permeados das membranas cerâmicas quando comparados, evidenciando o impacto das variações na composição sobre o desempenho de microfiltração. Além disso, a porosidade das membranas pode ser crucial para equilibrar a permeabilidade e a resistência ao *fouling*, assegurando a eficiência e a durabilidade das membranas no tratamento de efluentes industriais complexos.

Figura 42 – Permeados coletados após a avaliação da rejeição do corante azul de metileno para as membranas cerâmicas produzidas.



Fonte: Própria (2024).

De maneira mais evidente, observa-se que o aumento da quantidade de CBCA adicionado em cada membrana cerâmica, resulta na diminuição da rejeição e influencia diretamente na coloração do permeado.

Os resultados do desempenho das membranas cerâmicas preparadas neste trabalho e de outras membranas cerâmicas usadas para a separação de corantes, presentes na literatura, são mostradas na Tabela 18.

Tabela 18 – Comparação das propriedades das membranas cerâmicas.

Composição	Design da membrana	Temperatura de sinterização (°C)	Porosidade (%)	Raio médio dos poros (µm)	Tipo de corante	Rejeição (%)		Ref.
Caulim	Disco	850	34,50	1,14	Azul de metileno	10 mg.L ⁻¹	99,07	Agarwalla <i>et al.</i> , 2022
						100 mg.L ⁻¹	93,45	
Argila magnesita natural	Disco	1100	48,15	0,56	Efluente têxtil real	99,90		Manni <i>et al.</i> , 2020
Cinzas volantes de carvão mineral	Tubular	800	51,00	0,13	Efluente têxtil real	98,72		Jedidi <i>et al.</i> , 2011
Argila fenítica marroquina	Disco	1050	34,50	1,95	Efluente real	100,00		Lagdali <i>et al.</i> , 2023
Argila e 30 % CBCA	Disco	1000	25,76	-	Efluente têxtil real	82,00-96,00		Batista, 2019
Argila chocobofo, cauli, concentrado de magnesita e amido	Disco	650	53,00	0,24	Azul de metileno	50 mg.L ⁻¹	100,00	Carmo, 2022
					Azul reativo	50 mg.L ⁻¹	88,00	
Caulim e cinza da casca do arroz	Disco	1200	34,59	0,86	Efluente bruto	83,00		Guimarães <i>et al.</i> , 2023
Argila chocobofo, CBCA e caulim	Disco	650	41,45-44,82	0,23-0,27	Azul de metileno	97,70-99,90		Este trabalho

Fonte: Própria (2024).

A Tabela 18, ilustra várias propriedades de algumas membranas cerâmicas desenvolvidas com base em diferentes matérias-primas. Os resultados de rejeição das membranas cerâmicas produzidas neste estudo foram satisfatórios e estão de acordo os apresentados na literatura.

Além disso, as membranas cerâmicas produzida neste estudo foram sinterizadas a uma temperatura de 650 °C, o que evidencia um menor custo energético em relação às outras membranas apresentadas na literatura que foram sinterizadas a temperaturas superiores a 650 °C. Por exemplo, trabalhos dos autores (Manni *et al.*, 2020 e Guimarães *et al.*, 2019) relatam temperaturas de sinterização significativamente mais altas para a produção das membranas cerâmicas. A utilização de uma temperatura mais baixa no presente estudo não apenas reduz o consumo de energia, mas também demonstra a eficiência do processo de fabricação desenvolvido, contribuindo para a competitividade econômica da membrana produzida.

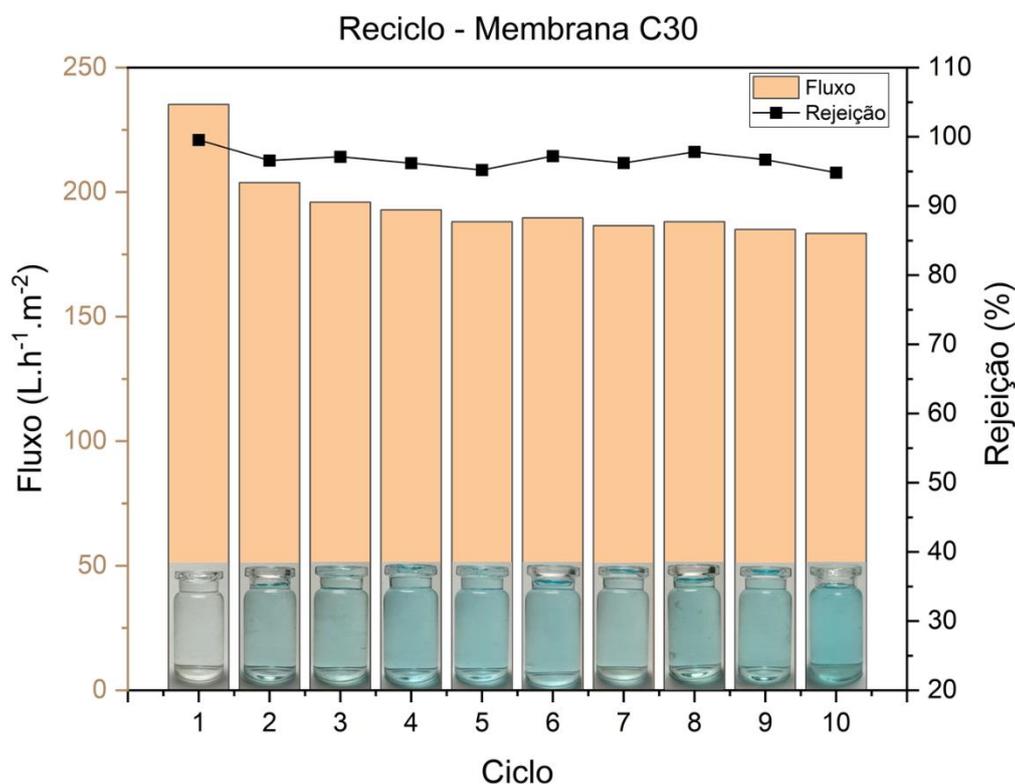
6.2.3. Reciclabilidade

Após serem estudados os comportamentos de cada uma das membranas produzidas para o tratamento do efluente têxtil, observa-se que em todas as composições as membranas apresentam alto índice de rejeição (Tabela 17) para o tempo de 120 min. No entanto, para que sejam aplicadas de forma viável, as membranas precisam ter uma boa vida útil. Portanto, nesta seção, será avaliado como as membranas cerâmicas C30 e C50 se comportam no processo de reciclabilidade.

Para avaliar a reciclabilidade das membranas cerâmicas, o processo apresentado na Figura 20 é repetido durante um tempo de 60 min, indicando 1 ciclo. Após cada ciclo, o volume do permeado é registrado para o cálculo do fluxo, e uma amostra do volume é coletada e analisada no UV-Vis, para leitura da concentração.

A Figura 43, apresenta o fluxo e a rejeição da membrana C30 ao longo de 10 (dez) ciclos do processo, assim como, a característica visual de cada ciclo.

Figura 43 – Fluxo e rejeição do corante azul de metileno utilizando a membrana cerâmica C30.



Fonte: Própria (2024).

Observa-se que o fluxo médio, no ciclo 1, é de 235,19 L.h⁻¹.m⁻², com uma diminuição notável para o ciclo 2, que apresenta um fluxo de 203,78 L.h⁻¹.m⁻². A redução se torna mais gradual ao longo dos ciclos subsequentes, estabilizando em torno de 185 L.h⁻¹.m⁻². A diminuição do fluxo pode ser atribuída ao acúmulo de impurezas na superfície ou nos poros da membrana, o efeito *fouling*, que reduz sua permeabilidade com o passar do tempo.

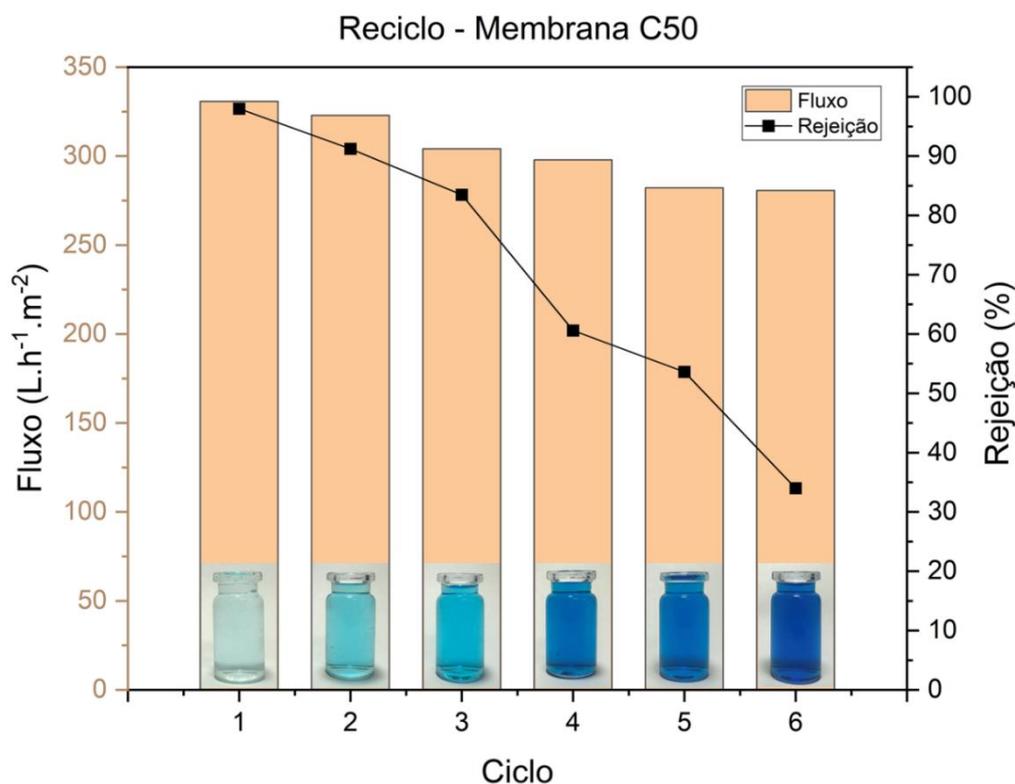
Por outro lado, a rejeição da membrana C30, representada pela linha preta no gráfico, mantém-se relativamente constante durante todos os ciclos, situando-se na faixa de 95% a 99%. Essa alta taxa de rejeição indica que a membrana cerâmica C30 é eficaz na separação das partículas do corante azul de metileno, mantendo seu desempenho de purificação mesmo após múltiplos ciclos.

As imagens dos frascos na parte inferior da Figura 43 corroboram com os dados apresentados, mostrando uma pequena diferença entre a amostra inicial e as demais amostras, mas uma coloração semelhante a partir do ciclo 2, confirmando a eficácia da

membrana cerâmica na remoção de contaminantes ao longo dos ciclos. Essa análise sugere que a membrana cerâmica C30 possui boa durabilidade e eficiência, conseguindo manter uma alta taxa de rejeição com uma leve redução no fluxo ao longo do tempo.

A reciclabilidade da membrana cerâmica C50 é mostrada na Figura 44, para 6 (seis) ciclos. Para este estudo, é importante ressaltar que a membrana cerâmica estudada possui o maior raio médio de poro ($0,27 \mu\text{m}$), entre as membranas produzidas, o maior fluxo de permeado ($404,09 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$) e que durante a análise prévia foi determinado que o efeito *fouling* não era tão intenso, uma vez que a redução do fluxo de água pura para o fluxo de permeado não era tão grande.

Figura 44 – Fluxo e rejeição do corante azul de metileno utilizando a membrana cerâmica C50.



Fonte: Própria (2024).

Inicialmente, o fluxo médio da membrana cerâmica C50, para o ciclo 1, é alto, em torno de $330,75 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, mas uma redução progressiva é notada ao longo dos ciclos 2, 3 e 4, enquanto nos ciclos 5 e 6, o fluxo apresenta uma constância. A redução do fluxo do ciclo 1 para o ciclo 6, é de 15,16 %, confirmando a que o efeito *fouling* não é tão intenso.

Porém, a rejeição apresenta uma diminuição acentuada ao longo dos ciclos. No primeiro ciclo, a taxa de rejeição é de 97,98 %, mas reduz até atingir cerca de 34,00 % no sexto ciclo. Esse comportamento sugere uma degradação na capacidade da membrana de separar as partículas do corante, possivelmente devido à saturação.

As imagens contendo amostras do permeado reforçam a análise realizada. Nos dois primeiros ciclos, o permeado apresenta uma coloração mais clara, sugerindo uma maior eficiência no processo. Contudo, com o avanço dos ciclos, a coloração azul do permeado se torna mais intensa, evidenciando a diminuição da rejeição da membrana cerâmica C50 em reter as partículas ao longo do tempo.

O teste apresentado na Figura 44 sugere que, embora a membrana cerâmica C50 apresente um bom desempenho inicial em termos de fluxo e rejeição, sua eficácia diminui significativamente ao longo dos ciclos de operação, o que pode limitar sua aplicabilidade no processo de tratamento de efluentes têxteis.

A autora (Carmo, 2022) também estudou a reciclabilidade da membrana cerâmica ótima em seu trabalho. A membrana produzida a partir de argila chocobofe, caulim, concentrado de magnesita e amido, em uma temperatura de sinterização de 650 °C, possui porosidade de 53 %, raio médio dos poros de 0,24 μm e fluxo de água pura de 520 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. A autora avaliou a membrana para 15 ciclos e obteve uma rejeição média de 99,86 %, porém o fluxo médio do permeado foi de apenas 73,60 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

7. ESTIMATIVA PRELIMINAR DE CUSTOS

Dois aspectos são necessários para que qualquer tecnologia seja adequada para uso industrial: viabilidade técnica e viabilidade econômica. A produção de membranas cerâmicas de baixo custo tem se mostrado tecnicamente viável quando utilizada no tratamento de efluentes têxteis, conforme apresentado na literatura (Chikri *et al.*, 2024; Saja *et al.*, 2020).

No entanto, a literatura ainda é limitada no que diz respeito à viabilidade econômica da produção dessas membranas cerâmicas de baixo custo. De acordo com os autores (Suresh *et al.*, 2016) um dos fatores primordiais no processo de preparação das membranas cerâmicas é o custo de fabricação. Deve-se considerar, principalmente, o custo de matérias primas, mão de obra, consumo energético e equipamento.

Os valores em quilogramas para as matérias-primas da argila e do caulim foram obtidos através de cotações na internet. O valor da cinza do bagaço de cana-de-açúcar não foi apresentado, pois o resíduo não apresenta valor agregado.

Todas as matérias-primas foram doadas ao LABNOV para este estudo, o que resultou na ausência de custos para a produção neste trabalho. No entanto, para realizar a análise preliminar de custo mais realista e aplicável a outras situações, utilizou-se os valores obtidos nas cotações mencionadas.

Na Tabela 19, são apresentados os valores por quilograma para cada uma das matérias-primas utilizadas no estudo.

Tabela 19 – Preço por quilograma para as matérias-primas.

Matéria-prima	Valor da matéria-prima (kg)
Argila Chocobofo	26,00
Cinza do bagaço de cana-de-açúcar	-
Caulim	92,00
Custo total das matérias-primas (R\$)	118,00

Fonte: Própria (2024).

Conforme descrito no tópico 5.2, as matérias-primas são conduzidas ao moinho de bolas, configurando uma batelada. Cada batelada contém um peso de 100 g de massa. É importante destacar que cada uma das membranas cerâmicas apresentadas neste estudo possui composições diferentes, como mostrado na Tabela 7. Portanto, é necessário realizar o cálculo proporcional para cada composição específica sendo apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – Preço por batelada e preço unitário das membranas cerâmicas.

Membranas	Valor por batelada (100 g)	Valor por unidade (3,5 g)
C0	2,93	0,1026
C10	2,67	0,0935
C20	2,41	0,0844
C30	2,15	0,0753

C40	1,89	0,0662
C50	1,63	0,0571

Fonte: Própria (2024).

O custo das matérias-primas para a produção das membranas cerâmicas variou entre R\$ 1,63 e R\$ 2,93 para uma batelada que produz 28 membranas e variou entre R\$ 0,06 e R\$ 0,11 por unidade. Analisando a Tabela 20, observa-se que com o aumento da composição de CBCA as membranas se tornaram menos custosas, já que a cinza foi doada.

Na Tabela 21, está apresentada a estimativa de custo energético para a produção da membrana cerâmica. O custo de energia foi estimado com base no preço para moer, secar e sinterizar. Para o cálculo do consumo de energia elétrica foi utilizada a Equação 9.

$$C = T \cdot P \cdot t \quad (9)$$

Onde: C: custo da energia elétrica consumida (R\$); T: tarifa de consumo sem ICMS (R\$/kwh); P: potência do aparelho utilizado (kw); t: tempo de utilização do equipamento (horas).

Tabela 21 – Estimativa de custo energético para a preparação da membrana cerâmica de baixo custo.

Equipamento	Potência (Kw/h)	Tempo de uso (h)	Tarifa de consumo sem ICMS (R\$/kwh)	Custo energético por equipamento (R\$)
Moinho de bolas	0,15	2		0,15
Estufa	0,82	48	0,48605	19,13
Mufla	6,00	6		17,50
Custo energético total (R\$)	-	-	-	36,78

Fonte: Própria (2024).

O custo energético para preparação de 28 membranas é de R\$ 36,78, portanto o custo energético de preparação de cada membrana é de R\$ 1,32.

O custo total para uma batelada da produção das membranas variou de R\$ 38,41 a R\$ 39,71, e por sua vez, o custo para produção de uma membrana variou de R\$ 1,38 a

R\$ 1,43. O custo foi estimado com base no preço das matérias-primas (Tabela 20) juntamente com o custo energético para os processos de moagem, secagem e sinterização (Tabela 21).

Com os valores obtidos para a produção das membranas neste estudo, pode-se agora realizar uma comparação com outras membranas disponíveis no mercado para determinar se as membranas, produzidas neste trabalho, são de baixo custo. Essa análise comparativa considerará tanto os custos das matérias-primas quanto os custos totais de preparação, levando em conta dados de referências comerciais e acadêmicas.

De acordo com os autores (Vasanth *et al.*, 2012), as membranas produzidas de α -alumina custam cerca de \$500/m², enquanto as membranas de aço inoxidável custam aproximadamente \$3000/m². Em contraste, os custos das membranas poliméricas variam de \$50/m² a \$200/m² (Nandi *et al.*, 2009). No entanto, o baixo custo das membranas poliméricas não necessariamente indica que sejam as mais adequadas para o tratamento de águas residuais, dado que as condições nesse contexto são desafiadoras.

A utilização de membranas cerâmicas é mais adequada para o tratamento de águas residuais, pois elas apresentam propriedades mecânicas, químicas, biológicas e térmicas superiores. Essas características resultam em custos operacionais mais baixos e uma vida útil mais longa em comparação com as membranas poliméricas (Lagdali *et al.*, 2023).

Para este estudo, as membranas foram desenvolvidas utilizando argila chocobofofe, uma alternativa mais econômica, que foi submetida à sinterização em temperatura mais baixa (650 °C) em comparação com membranas comerciais de alumina (acima de 1200 °C). A Tabela 22 apresenta os diferentes custos associados à produção de membranas.

Tabela 22 – Análise comparativa do custo das membranas preparados com outras membranas relatadas na literatura.

Matéria-prima	Design da membrana	Custo da matéria prima (\$/m²)	Custo total da produção da membrana (\$/m²)	Ref.
Caulim, quartzo, feldspato, carbonato de sódio, ácido bórico e metassilicato de sódio	Disco	220,00	-	Nandi <i>et al.</i> , 2009

Caulim, quartzo, feldspato, carbonato de sódio, ácido bórico e metassilicato de sódio	Disco	67,00	-	Vasanth <i>et al.</i> , 2011
Caulim, quartzo, carbonato de cálcio, carbonato de sódio, ácido bórico, metassilicato de sódio e álcool polivinílico	Disco	78,00	-	Emani <i>et al.</i> , 2013
Argila fengita bruta	Disco	0,32	3,50	Lagdali <i>et al.</i> , 2023
Argila chocobofo, caulim, magnesita concentrada e amido	Disco	16,14	265,24	Carmo, 2022
Argila chocobofo, cinza do bagaço de cana-de-açúcar e caulim (C10)	Disco	10,78	163,76	Este trabalho
Argila chocobofo, cinza do bagaço de cana-de-açúcar e caulim (C50)	Disco	6,59	158,82	Este trabalho

Fonte: Própria (2024).

Ao comparar as membranas produzidas neste estudo com as de outros trabalhos presentes na literatura, observa-se valores distintos. A análise comparativa é, devido ao fato de que os autores geralmente fazem a estimativa de custo na moeda de seu país e depois convertem para dólar. Algumas moedas são desvalorizadas em relação ao dólar, o que pode resultar em valores significativamente diferentes. Além disso, o preço das matérias-primas disponíveis em cada país, assim como o custo da energia, pode variar consideravelmente.

Os trabalhos mencionados na Tabela 22, apresentam as membranas cerâmicas como opções de baixo custo. Isso se deve ao fato de utilizarem algum tipo de argila em sua composição, um material barato, abundante e que pode ser sinterizado a temperaturas mais baixas, quando comparado com a alumina comercial (Lagdali *et al.*, 2023). A utilização da argila contribui para a redução dos custos de produção, permitindo afirmar que essas membranas podem ser classificadas como de baixo custo.

8. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi estudada a possibilidade de incorporar a cinza do bagaço de cana-de-açúcar na formulação de membranas cerâmicas, com a argila chocobofo, motivado pela necessidade de reduzir os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado da CBCA. Estudos presentes na literatura demonstraram a viabilidade de utilizar resíduos em materiais argilosos, gerando produtos de qualidade. A partir dos testes e ensaios realizados, é possível destacar algumas conclusões específicas.

Com a produção de membranas cerâmicas com diferentes concentrações de CBCA e produzidas nas mesmas condições, foi possível avaliar a influência do agente porogênico. As membranas foram sinterizadas a 650 °C e apresentaram porosidade variando entre 41,45 % e 44,82 %. A porosidade não teve grandes alterações pois a temperatura de sinterização não era a temperatura para a degradação máxima da cinza.

O raio médio dos poros variou de 0,23 μm , para a membrana cerâmicas que não apresentou cinzas em sua composição (membrana C0), para 0,27 μm , para a membrana com maior quantidade de cinzas (membrana C50). O aumento do raio do poro resultou em um aumento da absorção de água, um aumento no fluxo de água pura e no fluxo do permeado.

A resistência mecânica das membranas não apresentou constância com o aumento da concentração de cinzas, mas foi possível observar que, a partir da adição das cinzas, ocorreu uma diminuição significativa neste parâmetro. Variando entre 10,36 MPa e 26,39 MPa, a resistência das membranas com adição de cinzas foi satisfatória e está de acordo com os valores encontrados na literatura.

O fluxo de água pura aumentou nas membranas cerâmicas com maior concentração de CBCA, o que pode ser atribuído ao maior raio dos poros nessas membranas. O fluxo do permeado também aumentou com a maior concentração de cinzas.

Na rejeição do corante azul de metileno, todas as membranas cerâmicas demonstraram alta eficiência, com índices de rejeição variando entre 99,90 % e 97,70 %. A membrana com a maior concentração de cinza, identificada como C50, apresentou o menor índice de rejeição.

A membrana C30 apresentou uma acentuada redução no fluxo entre o primeiro e os demais ciclos, seguida de estabilidade e uma alta taxa de rejeição, o que indica sua viabilidade para uso prolongado. Por outro lado, a membrana C50 manteve o fluxo estável

durante os ciclos, mas a taxa de rejeição diminuiu rapidamente, o que limita sua aplicabilidade em operações contínuas.

A viabilidade econômica das membranas cerâmicas também foi avaliada, e os resultados indicaram que o custo das matérias-primas é relativamente baixo. O custo das matérias-primas variou entre R\$ 37,40 e R\$ 61,17 por metro quadrado (equivalente a aproximadamente 6,59 e 10,78 USD/m²). Quando incluídos os custos de produção, como os custos energéticos, o custo total variou entre R\$ 901,24 e R\$ 929,27 por metro quadrado (aproximadamente 158,82 e 163,76 USD/m²). Com base nesses resultados, as membranas cerâmicas foram classificadas como de baixo custo, tornando-as uma opção econômica e viável para aplicações industriais.

Por fim, as membranas cerâmicas à base de argila representam uma solução promissora e economicamente viável para o tratamento de efluentes têxteis. A abundância e o baixo custo das argilas, juntamente com resíduos agroindustriais que seriam descartados, combinam-se para formar propriedades estruturais favoráveis nas membranas. Os avanços recentes presentes na literatura, junto com este trabalho desenvolvido, demonstram que, apesar dos desafios ainda existentes, há um grande potencial na aplicação industrial neste campo.

9. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Durante a realização deste trabalho, constatou-se que, alguns aspectos importantes para o processo não foram abordados nesta pesquisa. Essas lacunas se devem tanto às limitações do estudo, quanto ao surgimento de novas questões durante o decorrer do trabalho. A seguir, são sugeridos alguns desses aspectos que podem ser explorados em futuras pesquisas:

- Produzir membranas cerâmicas sob diferentes pressões de moldagem (2, 4 e 6 bar).
- Sinterizar as membranas cerâmicas em outras temperaturas (maiores que 650 °C).
- Elaborar membranas cerâmicas com agentes porogênicos diferentes (materiais orgânicos que a temperatura de queima esteja na faixa dos 300-400 °C).
- Estudar o fenômeno da modificação do pH do efluente para garantir a eficiência da membrana em situações extremas.

- Comparar a eficiência das membranas em diferentes configurações, utilizando o fluxo direto e o fluxo cruzado.
- Utilizar corantes de diferentes características (aniônicos e catiônicos), assim como efluente têxtil real.
- Testar o método de regeneração por tratamento térmico nas membranas cerâmicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abit - Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. Disponível em: <<https://www.abit.org.br/cont/quemsomos>>. Acesso em: 4 fev. 2024.

Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: Safra 2020/21 N.3 - Terceiro levantamento - DEZEMBRO 2020. **CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento**, Brasília, v.7, 2020.

AGARWALLA, A.; MOHANTY, K. **Comprehensive characterization, development, and application of natural/Assam Kaolin-based ceramic microfiltration membrane.** *Materials Today Chemistry*, v. 23, p. 100649, 2022.

AHMED, N.; MIR, F. **A comprehensive study on the development of ceramic membranes from natural Kashmir clay and its application in pH-mediated removal of Indigo carmine dye.** *Emergent Materials*, p. 1-12, 2024.

AHMED, S. F.; MOFIJUR, M.; NUZHAT, S.; CHOWDHURY, A. T.; RAFA, N.; UDDIN, M. A.; INAYAT, A.; MAHLIA, T.; ONG, H.; CHIA, W.; SHOW, P. L. **Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater.** *Journal of Hazardous Materials*, v. 416, p. 125912, 2021.

ALIQUE, D.; MARTINEZ-DIAZ, D.; SANZ, R.; CALLES, J. A. **Review of Supported Pd-Based Membranes Preparation by Electroless Plating for Ultra-Pure Hydrogen Production.** *Membranes*, v. 8, n. 1, p. 5, 2018.

ALMEIDA, E.; ALMEIDA, E. J. R.; DILARRI, G.; CORSO, C. R. **A indústria têxtil no Brasil: Uma revisão dos seus impactos ambientais e possíveis tratamentos para os seus efluentes. Projeto Qualidade da Água, Boletim das Águas - Ministério Público Federal, Brasília/DF**, p. 1-18, 2016.

ALVARENGA, K.; CORDEIRO, G. **Evaluating sugarcane bagasse fly ash as a sustainable cement replacement for enhanced performance.** *Cleaner Engineering and Technology*, v. 20, p. 100751, 2024.

AMBIKA, S.; SRILEKNHA, V. **Eco-safe chemico thermal conversion of industrial graphite waste to exfoliated graphene and evaluation as engineered adsorbent to remove toxic textile dyes.** *Environmental Advances*, v. 4, p. 100072, 2021.

AMIN, S. K.; ROUSHDY, M. H.; EL-SHERBINY, C. A. **An overview of production and development of ceramic membranes.** v. 11, p. 7708-77721, 2016.

ANA – Agência Nacional de Águas. (2024). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023: informe anual*. Brasília.

ANDRADE NETO, J. S.; DE FRANÇA, M. J. S.; DE AMORIM JÚNIOR, N. S.; RIBEIRO, D. V. **Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete,** *Construction and Building Materials*, v. 266, p. 120959, 2021.

ANDRADE, R. M.; JAQUES, N. G.; SOUSA, J.; DUTRA, R. P. S.; MACEDO, D. A.; CAMPOS, L. F. A. **Preparation of low-cost ceramic membranes for microfiltration using sugarcane bagasse ash as a pore-forming agent.** *Cerâmica*, v. 10, n. 65, p. 620-625, 2019.

ARIF, E.; CLARK, M. W.; LAKE, N. **Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production.** *Construction and Building Materials*, v. 128, p. 287-297, 2016.

ARTAXO, P. **Mudanças climáticas: caminhos para o Brasil: a construção de uma sociedade minimamente sustentável requer esforços da sociedade com colaboração entre a ciência e os formuladores de políticas públicas.** *Ciência e Cultura*, v. 74, n. 4, p. 01-14, 2022.

ASIF, M.; ZHANG, Z. **Ceramic membrane technology for water and wastewater treatment: A critical review of performance, full-scale applications, membrane fouling and prospects.** *Chemical Engineering Journal*, v. 418, p. 129481, 2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT); NB-10006: Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos; ABNT: Rio de Janeiro, 2004.

AYALEW, A. **Physiochemical Characterization of Ethiopian Mined Kaolin Clay through Beneficiation Process.** *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2023, n. 1, p. 9104807, 2023.

AYELE, L.; PÉREZ-PARIENTE, J.; CHEBUDE, Y.; DÍAZ, I. **Synthesis of zeolite A from Ethiopian kaolin.** *Microporous and Mesoporous Materials*, v. 215, p. 29-36, 2015.

BAHURUDEEN, A.; MARCKSON, A. V.; KISHORE, A.; SANTHANAM, M. **Development of sugarcane bagasse ash based Portland pozzolana cement and evaluation of compatibility with superplasticizers.** *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 465-475, 2014.

BAKER, R.; RICHARD W. **Membrane technology and applications.** John Wiley & Sons, 2012.

BANAT, I. M.; NIGAM, P.; SINGH, D.; MARCHANT, R. **Microbial Decolorization of Textile Dye-Containing Effluents: A Review.** *Bioresource Technology*, v. 58, p. 217, 1996.

BARBOSA, A. S.; RODRIGUES, M. G. F. **Síntese e caracterização de alumina para aplicação como suporte de membrana zeolítica.** 56º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2012.

BARBOSA, A.; RODRIGUES, M. **Synthesis of NaA Zeolite: Conventional Route and Green Route.** *Catalysis Research*, v. 4, n. 1, p. 1-16, 2024.

BARBOSA, A. S.; BARBOSA, A. S.; RODRIGUES, M. **Low cost membrane used in oil/water removal.** *Desalination and Water Treatment*, v. 317, p. 100029, 2024.

BARBOSA, J. “Prospecção tecnológica aplicada à avaliação de tecnologias para recuperação avançada de petróleo”. Tese de Doutorado, Programa de Doutorado em Propriedade Intelectual e Inovação, Instituto Nacional de Propriedade Industrial – INPI, 2020.

BARROS, J.; BANDEIRA, D.; SOUSA, E.; DE ALMEIDA ROCHA, L.; DA SILVA FILHO, J.; LEITE, P. G.; ...; ARAGÃO, K. P. **Estudo reológico comparativo entre duas variedades de argilas esmectitas do município de Boa Vista no estado da**

Paraíba. Research, Society and Development, v. 11, n. 1, p. e5211124516-e5211124516, 2022.

BASSO, L. De lateral a transversal: a trajetória das questões ambientais no âmbito da OCDE. Boletim de Economia e Política Internacional, n. 34, 2022.

BATISTA, F. Aplicação de membranas cerâmicas no tratamento de efluentes têxteis. Dissertação de mestrado Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal da Paraíba, 2019.

BELGHAZDIS, M.; HACHEM, E. Clay and clay minerals: A detailed review. International Journal of Recent Technology and Applied Science (IJORTAS), v. 4, n. 2, p. 54-75, 2022.

BENKHAYA, S.; M'RABET, S.; EL HARFI, A. A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. Inorganic Chemistry Communications, v. 115, p. 107891, 2020.

BEQQOUR, D.; ACHIOU, B.; BOUAZIZI, A.; OUADDARI, H.; ELOMARI, H.; OUAMMOU, M.; ... YOUNSSI, S. A. Enhancement of microfiltration performances of pozzolan membrane by incorporation of micronized phosphate and its application for industrial wastewater treatment. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 7, n. 2, p. 102981, 2019.

BERTAGNOLLI, C.; KLEINUBING, J.; SILVA, C. Preparation and characterization of a Brazilian bentonite clay for removal of copper in porous beds. Applied Clay Science, v. 53, p.73-79, 2011.

BIRON, D. S.; DOS SANTOS, V.; ZENI, M. Ceramic membranes applied in separation processes. Springer, 2017.

BORLINI, M.; MENDONÇA, J.; VIEIRA, C.; MONTEIRO, S. Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana de açúcar. Matéria, v. 11, p. 433-441, 2006.

BOUTALEB, M.; TABIT, K.; MANSORI, M.; SAÂDI, L.; WAQIF, M. Development of low-cost clayey ceramic filtering membrane with controllable porosity and high mechanical strength. Ceramics International, v. 50, p. 32771-32782, 2024.

BRAILE, P.; CAVALCANTI, J. Manual de tratamento de águas residuárias. São Paulo: CETESB, 1993.

BRASIL Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 1981.

BULENS, M.; DELMON, B. The exothermic reaction of metakaolinite in the presence of mineralizers. Influence of crystallinity. Clays and Clay Minerals, v. 25, p. 271-277, 1977.

BURGGRAAF, A. J.; COT, L. Fundamentals of Inorganic Membranes Science and Technology. Elsevier, Amsterdam, 1996.

- 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.; ARAÚJO, A.; RODRIGUES, M. **Preparação de membrana cerâmica a base de argila chocobofo e resíduos industriais.** Conjecturas. v. 22, p. 765-779, 2022.
- CARMO, E. S. **Produção de membranas cerâmicas de baixo custo para remoção de corantes.** Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2022.
- CASAS, J.; MENDEZ, A.; VALDÉS, J.; DE LA PARRA, S.; ZALDIVAR-CADENA, A.; PÉREZ, D. & VÁZQUEZ, A. **Sugarcane Bagasse Ash as an Alternative Source of Silicon Dioxide in Sodium Silicate Synthesis.** Materials, v. 16, p. 6327, 2023.
- CASSIE, A.; BAXTER, S. **Wettability of porous surfaces.** Transactions of the Faraday Society, v. 40, p. 546-551, 1944.
- CERTINI, G. **Effects of fire on properties of forest soils: a review.** Oecologia, v. 143, p. 1-10, 2005.
- CHERYAN, M. **The Microfiltration and Ultrafiltration Handbook - Second Edition.** Technomic Publishing, Pennsylvania, USA, p. 537, 1998.
- CHIKRI, R.; ELATAOUI, K.; SAID, H. A.; BENCHANAA, M.; ELHADIRI, N. **Highly efficient ceramic membrane synthesized from sugar scum and fly ash as sustainable precursors for dyes removal.** Heliyon, v. 10, n. 6, 2024.
- CHRISTOFOLETTI, S.; MORENO, M. **Granulometria por difração a laser e sua relação com a faciologia das rochas argilosas da Formação Corumbataí-SP.** Cerâmica, v. 63, p. 303-310, 2017.
- CHUAH, C.; LEE, J.; SONG, J.; BAE, T.H. **CO₂/N₂ separation properties of polyimide-based mixed-matrix membranes comprising UiO-66 with various functionalities.** Membranes, v. 10, n. 7, p. 1-18, 2020.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 393, de 8 de agosto de 2007. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011.
- CORDEIRO, G.; TOLEDO FILHO, R.; FAIRBAIRN, E. **Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash.** Construction and building materials, v. 23, n. 10, p. 3301-3303, 2009.
- CORNELL UNIVERSITY; INSEAD; WIPO – WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION. The Global Innovation Index 2020: Who Will Finance Innovation?, 2020.
- COT, L.; GUIZARD, C.; JULBLE, A.; LARBOT, A. **Inorganic membranes: Preparation, Characterization, Specific Applications.** Industrial Ceramics, v. 8, n. 1, 1988.
- CRESPO, J.; BÖDDEKER, K. **Membrane processes in separation and purification.** Springer Science & Business Media, 2013.

CRIADO, J. M.; MORALES, J.; RIVES, V. **Computer kinetic analysis of simultaneously obtained TG and DTG curves.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 14, n. 3, p. 221-228, 1978.

DA SILVA, R. **A Difração de Raios X: uma técnica de investigação da estrutura cristalina de materiais.** Revista Processos Químicos, v. 14, n. 27, p. 73-82, 2020.

DE ALMEIDA, K.; VIDAL, F.; CASTRO, N. **Melhoria do beneficiamento de caulim do seridó com uso do classificador hidrociclone.** OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, v. 21, n. 12, p. 23810-23825, 2023.

DE MATOS RODA, N.; PONTIN, J. C.; BRANCHI, B. A.; LONGO, R. M. **Uso de caulim processado como técnica sustentável de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas na produção agrícola.** REUNIR Revista de Administração Contabilidade e Sustentabilidade, v. 13, n. 1, p. 171-183, 2023.

de MORAES, M.; de MELO, M.; CADENA, P. **Monitoramento tecnológico de produtos à base de nanoemulsão com aplicação na saúde animal.** Revista Eletrônica Acervo Saúde, v. 24, n. 3, p. e14668-e14668, 2024.

DE OLIVEIRA, A.; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos.** Ed. da UFSC, 2011.

DELE-AFOLABI, T.; JUNG, D.; ILYAS, R.; CALIN, R.; IZZAH, A. **Rice Husk as a Pore-Forming Agent: Impact of Particle Size on the Porosity and Diametral Tensile Strength of Porous Alumina Ceramics.** Coatings, p. 1259, 2022.

DICKHOUT, J. M.; MORENO, J.; BIESHEUVEL, P. M.; BOELS, L.; LAMMERTINK, R.; VOS, W. M. **Produced water treatment by membranes: A review from a colloidal perspective.** Journal of Colloid and Interface Science, v.487, p. 523-534, 2017.

DO CARMO, E.; ARAÚJO, A.; RODRIGUES, M. **Preparação de membrana cerâmica a base de argila chocobofo e resíduos industriais.** Conjecturas, v. 22, n. 13, p. 765-779, 2022.

DRELICH, J.; CHIBOWSKI, E.; MENG, D. D.; TERPILOWSKI, K. **Hydrophilic and superhydrophilic surfaces and materials.** Soft Matter, v. 7, p. 9804-9828, 2011.

ELOMARI, H.; ACHIOU, B.; OUAMMOU, M.; ALBIZANE, A.; BENNAZHA, J.; ALAMI YOUNSSI, S.; ELAMRANI, I. **Elaboration and characterization of flat membrane supports from Moroccan clays. Application for the treatment of wastewater.** Desalination and Water Treatment, v. 57, n. 43, p. 20298-20306, 2016.

ELOUSSAIEF, M.; KALLEL, N.; YAACOUBI, A.; BENZINA, M. **Mineralogical identification, spectroscopic characterization, and potential environmental use of natural clay materials on chromate removal from aqueous solutions.** Chemical Engineering Journal, v. 168, n. 3, p. 1024-1031, 2011.

EMANI, S.; UPPALURI, R.; PURKAIT, M. K. **Preparation and characterization of low cost ceramic membranes for mosambi juice clarification.** Desalination, v. 317, p. 32-40, 2013.

- ESPOSITO, L.; PIANCASTELLI, A. **Role of powder properties and shaping techniques on the formation of pore-free YAG materials.** Journal of the European Ceramic Society, v. 29, p. 317-322, 2009.
- FERNANDES, M.; MORELLI, M. **Desenvolvimento de arcabouços de óxido de titânio e Biosilicato® para regeneração óssea.** Cerâmica, v. 63(366), p. 263-270, 2017.
- FREITAS, A.; NEVES, M. A.; GUIMARÃES, D.; TAGUCHI, S. P. **Influência do procedimento de ajuste granulométrico de amostras de cerâmica vermelha agregada com resíduos de rochas ornamentais para classificação conforme critérios da ABNT.** Química Nova, v. 47, n. 8, p. e-20240036, 2024.
- GARCIA-VALLES, M.; ALFONSO, P.; MARTÍNEZ, S.; ROCA, N. **Mineralogical and thermal characterization of kaolinitic clays from Terra Alta (Catalonia, Spain).** Minerals, v. 10, n. 2, p. 142, 2020.
- GITIS, V.; ROTHENBERG, G. **Ceramic Membranes: New Opportunities and Practical Applications.** Weinheim, Germany: John Wiley & Sons, 2016.
- GUARATINI, C.; ZANONI, M. **Corantes têxteis.** Química nova, v. 23, p. 71-78, 2000.
- GUIMARÃES, E.; LEVANDOSKI, W.; VARGAS, G.; KORF, E.; DERVANOSKI, A. **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, p. e20220242, 2023.
- HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de separação por membranas.** E-papers Serviços Editoriais Ltda., 2006.
- HAJJAJI, M.; KACIM, S.; ALAMI, A.; EL BOUADILI, A.; EL MOUNTASSIR, M. **Chemical and mineralogical characterization of a clay taken from the Moroccan Meseta and a study of the interaction between its fine fraction and methylene blue.** Applied clay science, v. 20, n. 1-2, p. 1-12, 2001.
- HARSANTO, B.; PRIMIANA, I.; SARASI, V.; SATYAKTI, Y. **Sustainability innovation in the textile industry: a systematic review.** Sustainability, v. 15, n. 2, p. 1549, 2023.
- HELLER, L. **Os direitos humanos à água e ao saneamento.** Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 2022.
- HELLER-KALLAI, L. **Thermally modified clay minerals.** Developments in clay science, v. 1, p. 289-308, 2006.
- HENRIQUES, J. D. O. **Avaliação da separação de microalgas *Acutodesmus obliquus* a partir de membranas cerâmicas incorporadas com agentes porogênicos.** Dissertação de mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal do Paraná, 2017.
- HILACHUK, D.; de PAULA, D. **Monitoramento tecnológico de probióticos para alimentação humana.** Cadernos de Prospecção, v. 15, n. 2, p. 362-378, 2022.
- HSIEH, H. **Inorganic Membranes for Separation and Reaction.** Elsevier, 1996.

HUANG, J.; CHEN, H.; YANG, J.; ZHOU, T.; ZHANG, H. **Effects of particle size on microstructure and mechanical strength of a fly ash based ceramic membrane.** *Ceramics International*, v. 49, n. 10, p. 15655-15664, 2023.

HUBADILLAH, S.; OTHMAN, M. H. D.; ISMAIL, A. F.; RAHMAN, M. A.; JAAFAR, J.; IWAMOTO, Y.; ...; YUSOP, M. Z. M. **Fabrication of low cost, green silica based ceramic hollow fibre membrane prepared from waste rice husk for water filtration application.** *Ceramics International*, v. 44, n. 9, p. 10498-10509, 2018.

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

HURLE, K.; LUBAUER, J.; BELLI, R.; LOHBAUER, U. **On the assignment of quartz-like $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6\text{-SiO}_2$ solid solutions in dental lithium silicate glass-ceramics: Virgilite, high quartz, low quartz or stuffed quartz derivatives?.** *Dental Materials*, v. 38, n. 9, p. 1558-1563, 2022.

JARVIS, P.; CARRA, I.; JAFARI, M.; JUDD, S. J. **Ceramic vs polymeric membrane implementation for potable water treatment.** *Water Research*, v. 215, p. 118269, 2022.

JEDIDI, I.; KHEMAKHEM, S.; SAÏDI, S.; LARBOT, A.; ELLOUMI-AMMAR, N.; FOURATI, A.; ...; AMAR, R. B. **Preparation of a new ceramic microfiltration membrane from mineral coal fly ash: Application to the treatment of the textile dyeing effluents.** *Powder Technology*, v. 208, n. 2, p. 427-432, 2011.

JUNIOR, B.O.M. *Caderno setorial ETENE*. Ano 8, n° 304, 2023.

KATARE, V.; MADUWAR, M. **Experimental characterization of sugarcane biomass ash: A review.** *Construction and Building Materials*, v. 152, p. 1-15, 2017.

KAYVANI FARD, A.; MCKAY, G.; BUEKENHOUDT, A.; AL SULAITI, H.; MOTMANS, F.; KHRAISHEH, M.; ATIEH, M. **Inorganic membranes: Preparation and application for water treatment and desalination.** *Materials*, v. 11, n. 1, p. 74, 2018.

KETOV, A.; KOROTAEV, V.; RUDAKOVA, L.; VAISMAN, I.; BARBIERI, L.; LANCELLOTTI, I. **Amorphous silica wastes for reusing in highly porous ceramics.** *International Journal of Applied Ceramic Technology*, v. 18, p. 394-404, 2021.

KHALIL, A. K. A.; ELGAMOUZ, A.; NAZIR, S.; ATIEH, M. A.; ALAWADHI, H.; LAOUI, T. **Preparation and characterization of clay based ceramic porous membranes and their use for the removal of lead ions from synthetic wastewater with an insight into the removal mechanism.** *Heliyon*, v. 10, 2024.

KHAN, M. I.; KHAN, H. U.; AZIZLI, K.; SUFIAN, S.; MAN, Z.; SIYAL, A. A.; MUHAMMAD, N.; FURM, R. **The pyrolysis kinetics of the conversion of Malaysian kaolin to metakaolin.** *Applied Clay Science*, v. 146, p. 152-161, 2017.

KHEDIDJA, M.; BECHIR, M.; FEYDA, S.; ALI, T. M. **Development of ceramic filtering membranes based on Tunisian clay and phosphate sludge in wastewater treatment.** *Solid State Sciences*, v. 148, p. 107430, 2024.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to ceramics.** John Wiley & sons, 1976.

- KINSER, K. **Membrane Filtration: Past, Present and Future.** Journal-American Water Works Association, v. 113, n. 8, p. 72-75, 2021.
- KOZAK, C.; FERNANDES, C. V. S. **A influência dos eventos de precipitação e poluição difusa em rios: implicações para os instrumentos de gestão dos recursos hídricos.** Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 19, n. 2022, 2022.
- KUMAR, A.; SINGH, R.; UPADHYAY, S. K.; KUMAR, S.; CHARAYA, M. U. **Biosorption: The removal of toxic dyes from industrial effluent using phyto biomass-A review.** Plant Arch, v. 21, p. 1320-1325, 2021.
- LAGDALI, S.; MIYAH, Y.; EL-HABACHA, M.; MAHMOUDY, G.; BENJELLOUN, M.; IAICH, S.; ...; SINAN, F. **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, p. 100388, 2023.
- LI, C.; SUN, W.; LU, Z.; AO, X.; LI, S. **Ceramic nanocomposite membranes and membrane fouling: A review.** Water Research, v. 175, p. 115674, 2020.
- LIANG, D.; HUANG, J.; ZHANG, H.; FU, H.; ZHANG, Y.; CHEN, H. **Influencing factors on the performance of tubular ceramic membrane supports prepared by extrusion.** Ceramics International, v. 47, n. 8, p. 10464-10477, 2021.
- LIANG, D.; HUANG, J.; ZHANG, Y.; ZHANG, Z.; CHEN, H.; ZHANG, H. **Influence of dextrin content and sintering temperature on the properties of coal fly ash-based tubular ceramic membrane for flue gas moisture recovery.** Journal of the European Ceramic Society, v. 41, n. 11, p. 5696-5710, 2021.
- LIMA, J.; FERREIRA, R.; CHRISTOFIDIS, D. **O uso da irrigação no Brasil. O estado das águas no Brasil.** Agência Nacional de Energia Elétrica. CD-ROM, 1999.
- LIMA, L.; SANTANA, L.; LIRA, H. **Preparação de membranas cerâmicas utilizando caulim e alumina como principais matérias-primas.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 13, n. 3, 2018.
- LORENTE-AYZA, M. M.; MESTRE, S.; MENÉNDEZ, M.; SÁNCHEZ, E. **Comparison of extruded and pressed low cost ceramic supports for microfiltration membranes.** Journal of the European Ceramic Society, v. 35, n. 13, p. 3681-3691, 2015.
- LOT, A. V.; DOS SANTOS, L. R.; NASTRI, S.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. **AVALIÇÃO Comparativa de Massas Industriais Utilizadas na Fabricação de Revestimentos Cerâmicos por Via Seca.** Cerâmica Industrial, v. 22, n. 4, p. 7-14, 2018.
- MAGALHÃES, R. S.; DOS SANTOS, R. M.; DA SILVA, A. A. M.; MARQUES, F. P.; GOMES, E. R. **Propriedades e aplicações industriais de argilas do estado do Maranhão / Properties and industrial applications of clays from Maranhão/Brazil.** Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 8, p. 82090-82108, 2021.
- MAIA, A.; SALDANHA, E.; ANGÉLICA, R.; SOUZA, C.; NEVES, R. **Utilização de rejeito de caulim da Amazônia na síntese da zeólita A.** Cerâmica, v. 53, p. 319-324, 2007.

- MANNI, A.; ACHIOU, B.; KARIM, A.; HARRATI, A.; SADIK, C.; OUAMMOU, M.; ...; EL BOUARI, A. **New low-cost ceramic microfiltration membrane made from natural magnesite for industrial wastewater treatment.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 8, n. 4, p. 103906, 2020.
- MARGUÍ, E.; ZAWISZA, B.; SITKO, R. **Trace and ultratrace analysis of liquid samples by X-ray fluorescence spectrometry.** TrAC Trends in Analytical Chemistry, v. 53, p. 73-83, 2014.
- MELO, C.; RIELLA, H. **Síntese de zeólita tipo NaA a partir de caulim para obtenção de zeólita 5A através de troca iônica.** Cerâmica, v. 56, p. 340-346, 2010.
- MENDONÇA, A.; DE SOUZA, L.; LIRA, Y.; DE SOUSA NETO, V.; DE NEGREIROS DUARTE, E.; NUNES, C.; ...; DINIZ, M. **Resíduo de caulim como material alternativo para produção de blocos de tijolos solo-cimento.** Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 5, p. 44168-44178, 2021.
- MENG, L.; WANG, Y. **Advances in the development of ceramic membranes for water treatment.** Chemical Engineering Journal, v. 391, p. 393, 2020.
- MESTRE, S.; GOZALBO, A.; LORENTE-AYZA, M. M.; SÁNCHEZ, E. **Low-cost ceramic membranes: a research opportunity for industrial application.** Journal Of The European Ceramic Society, Castellón, v. 39, n. 12, p. 3392-3407, 2019.
- MONARCH INNOVATION. Mechanical testing. Disponível em: <https://www.monarch-innovation.com/mechanical-testing>. Acesso em: Julho de 2024.
- MONASH, P.; PUGAZHENTHI, G. **Development of ceramic supports derived from low-cost raw materials for membrane applications and its optimization based on sintering temperature.** International Journal of Applied Ceramic Technology, v. 8, n. 1, p. 227-238, 2011.
- MONASH, P.; PUGAZHENTHI, G.; SARAVANAN, P. **Various fabrication methods of porous ceramic supports for membrane applications.** Reviews in Chemical Engineering, v. 29, n. 5, p. 357-383, 2013.
- MOORE, D.; REYNOLDS, R. **X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals.** 1989.
- MOURA, E.; SALES, J.; NASCIMENTO, N.; SOUSA, V.; SILVA, D. & LIBERA JUNIOR, V. **Characterization and use of sugarcane bagasse ash in soil-cement bricks.** Ambiente Construído, v. 21, p. 69-80, 2021.
- MULDER, M. **Basic principles of membrane technology.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- MULDER, M.; NUNES, S.P. **Comprehensive Membrane Science and Engineering,** 2nd ed., 2019.
- MURRAY, H. **Applied clay mineralogy: occurrences, processing and applications of kaolins, bentonites, palygorskitesepiolite, and common clays.** Elsevier, 2006.

NANDI, B. K.; DAS, B.; UPPALURI, R.; PURKAIT, M. K. **Microfiltration of mosambi juice using low cost ceramic membrane.** Journal of Food Engineering, v. 95, n. 4, p. 597-605, 2009.

NOVO, B. L.; BRASILEIRO, F. A. G.; BARBATO, C. N.; BERTOLINO, L. C.; YOKOYAMA, L. **Technological Evaluation of Cubati/Brazil Montmorillonite / Avaliação Tecnológica Da Montmorillonita de Cubati/Brasil.** Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 1, p. 5203–5222, 2021.

NTRALLOU, K.; GIKA, H.; TSOCHATZIS, E. **Analytical and sample preparation techniques for the determination of food colorants in food matrices.** Foods, v. 9, n. 1, p. 58, 2020.

NURAZZI, N.; Asyraf, M. R. M.; Rayung, M.; Norrrahim, M. N. F.; Shazleen, S. S.; Rani, M. S. A.; ...; Abdan, K. **Thermogravimetric analysis properties of cellulosic natural fiber polymer composites: A review on influence of chemical treatments.** Polymers, v. 13, n. 16, p. 2710, 2021.

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.

OLIVEIRA, M. Bentonita. In: Sumário Mineral. Brasília, DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral: 2. 2018.

PANHWAR, A., JATOI, A. S., MAZARI, S. A., KANDHRO, A., RASHID, U., QAISAR, S. **Water resources contamination and health hazards by textile industry effluent and glance at treatment techniques: A review.** Waste Management Bulletin, v. 1, p. 158-163, 2024.

PASABEYOGLU, P.; MOUMIN, G.; DE OLIVEIRA, L.; ROEB, M.; AKATA, B. **Solarization of the zeolite production: Calcination of kaolin as proof-of-concept.** Journal of Cleaner Production, v. 414, p. 137611, 2023.

PATIL, P.; KATARE, V. **Development of sustainable alkali-activated binder for building products using sugarcane bagasse ash: A review.** Materials Today: Proceedings, 2023.

PÉREZ-CASAS, J.; ZALDÍVAR-CADENA, A.; ÁLVAREZ-MENDEZ, A.; RUIZ-VALDÉS, J.; PARRA-ARCINIEGA, S. & SÁNCHEZ-VÁZQUEZ, A. **Synthesis of silica particles from sugarcane bagasse ash for its application in hydrophobic coatings.** Materials Proceedings, v. 2, n. 1, p. 4, 2020.

PIASKOWSKI, K., ŚWIDERSKA-DĄBROWSKA, R., ZARZYCK, P. **Dye Removal from Water and Wastewater Using Various Physical, Chemical, and Biological Processes.** Journal of AOAC International, Special Guest Editor Section, v. 101, ed. 5, p. 1371-1384, 2018.

PIN, C. F. **Membranas cerâmicas sintetizadas a partir de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar para aplicação em tratamento de efluentes.** Dissertação de mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental. Universidade Federal da Fronteira Sul, 2023.

PINTO, C. Curso básico de Mecânica dos Solos. São Paulo: Oficina de Textos, v. 3, 2006.

PTÁČEK, P.; KUBÁTOVÁ, D.; HAVLICA, J.; BRANDŠTETR, J.; ŠOUKAL, F. & OPRAVIL, T. **Isothermal kinetic analysis of the thermal decomposition of kaolinite: the thermogravimetric study.** *Thermochimica Acta*, v. 501, n. 1-2, p. 24-29, 2010.

RAHAMAN, N. M. **Ceramic fabrication processes an introductory overview.** CRC Press, 2003.

RAKCHO, Y.; MOUIYA, M.; BOUAZIZI, A.; ABOULIATIM, Y.; SEHAQUI, H.; MANSOURI, S.; ...; ABOURRICHE, A. **Treatment of seawater and wastewater using a novel low-cost ceramic membrane fabricated with red clay and tea waste.** *Arabian Journal of Chemistry*, v. 16, n. 11, p. 105277, 2023.

RAMOS, M. D. N.; SANTANA, C. S.; VELLOSO, C. C. V.; DA SILVA, A. H. M.; MAGALHÃES, F.; AGUIAR, A. **A review on the treatment of textile industry effluents through Fenton processes.** *Process safety and environmental protection*, v. 155, p. 366-386, 2021.

RANI, S.; KUMAR, R. **Fabrication and characterization of ceramic membranes derived from inexpensive raw material fuller's earth clay.** *Materials Science and Engineering: B*, v. 284, p. 115877, 2022.

RASHAD, A. **Alkali-activated metakaolin: A short guide for civil Engineer—An overview.** *Construction and Building Materials*, v. 41, p. 751-765, 2013.

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

ROCHA, M.; VIRGINIE, M.; KHODAKOV, A.; POLLO, L. D.; MARCÍLIO, N. R.; TESSARO, I. C. **Preparation of alumina based tubular asymmetric membranes incorporated with coal fly ash by centrifugal casting.** *Ceramics International*, v. 47, n. 3, p. 4187-4196, 2021.

RODRIGUES, M. **Physical and catalytic characterization of smectites from Boa-Vista, Paraíba, Brazil.** *Cerâmica*, v. 49, p. 146-150, 2003.

ROY, M.; SEN, P.; PAL, P. **An integrated green management model to improve environmental performance of textile industry towards sustainability.** *Journal of Cleaner Production*, v. 271, p. 122656, 2020.

SAADATKHAH, N.; CARILLO GARCIA, A.; ACKERMANN, S.; LECLERC, P.; LATIFI, M.; SAMIH, S.; ...; CHAOUKI, J. **Experimental methods in chemical engineering: Thermogravimetric analysis – TGA.** *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 98, n. 1, p. 34-43, 2020.

SAHINKAYA, E., SAHIN, A., YURTSEVER, A., KITIS, M. **Concentrate minimization and water recovery enhancement using pellet precipitator in a reverse osmosis process treating textile wastewater.** *Journal of Environmental Management*, v. 222, p. 420-427, 2018.

SAJA, S.; BOUAZIZI, A.; ACHIOU, B.; OUADDARI, H.; KARIM, A.; OUAMMOU, M.; ...; YOUNSSI, S. A. **Fabrication of low-cost ceramic ultrafiltration membrane made from bentonite clay and its application for soluble dyes removal.** *Journal of the European Ceramic Society*, v. 40, n. 6, p. 2453-2462, 2020.

SALOMÃO, P.; OLIVEIRA, S. **Estudo da resistência a compressão de cerâmicas sinterizadas por aquecimento convencional e microondas na presença de grafite.** Research, Society and Development, v. 9, n. 2, p. e26921943-e26921943, 2020.

SAMAEI, S. M.; GATO-TRINIDAD, S.; ALTAEE, A. **The application of pressure-driven ceramic membrane technology for the treatment of industrial wastewaters—A review.** Separation and Purification Technology, v. 200, p. 198-220, 2018.

SANTOS, A. B.; CERVANTES, F. J.; VAN LIER, J. B. **Impacto dos Mediadores Redox na Remoção de Cor de Corantes Azo e Antraquinonico por Lodo Granular Anaeróbico sob Condições Mesofílicas e Termofílicas.** Revista Sanitaria e Ambiental – ABES, v. 12, 2007.

SAPARUDDIN, D. I.; HISHAM, N. A. N.; AB AZIZ, S.; MATORI, K. A.; HONDA, S.; IWAMOTO, Y.; ZAID, M. H. M. **Effect of sintering temperature on the crystal growth, microstructure and mechanical strength of foam glass-ceramic from waste materials.** Journal of Materials Research and Technology, v. 9, n. 3, p. 5640-5647, 2020.

SARKAR, S.; BANDYOPADHYAY, S.; LARBOT, A.; CERNEAUX, S. **New clay–alumina porous capillary supports for filtration application.** Journal of membrane science, v. 392, p. 130-136, 2012.

SAUFI, H.; ALOUANI, M. E.; ARIDE, J.; TAIBI, M. H. **Biossorção de rodamina B a partir de solução aquosa usando pós de Eichhornia crassipes: estudos isotérmicos, cinéticos e termodinâmicos.** Chemical Data Collection, v. 25, 2020.

SILVA, F. A.; Lira, H. L.; Chaves, A. C.; Neves, G. A.; França, K. B. **Preparação e caracterização de membranas cerâmicas tubulares de mulita.** Cerâmica, v. 59, p. 481-486, 2013.

SILVA, F. A. **Desenvolvimento de membranas cerâmicas tubulares a partir de matérias-primas regionais para processo de microfiltração,** Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. p. 146, 2009.

SILVA, F. A.; LIRA, H. L. **Preparação e caracterização de membranas cerâmicas de cordierita.** Cerâmica, v. 52, p. 276-282, 2006.

SILVA, G.; ALCOVER NETO, A. **Caracterização química de amostras geológicas por fluorescência de raios-X.** XII Jornada do Programa de Capacitação Institucional, 2023.

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

SOARES, R. A. L.; Castro, R. J. S.; do Nascimento, R. M.; Martinelli, A. E. **Influência do Teor de Calcário no Comportamento Físico, Mecânico e Microestrutural de Cerâmicas Estruturais.** Cerâmica Industrial, v. 15, n. 2, 2010.

SONG, S.; RONG, L.; DONG, K.; LIU, X.; LE-CLECH, P.; SHEN, Y. **Pore-scale numerical study of intrinsic permeability for fluid flow through asymmetric ceramic microfiltration membranes.** Journal of Membrane Science, v. 642, p. 119920, 2022.

SORIA, R. **Overview on Industrial membrane.** Catalysis Today, v. 25, p. 285-290, 1995.

- SOUZA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de Argilas**, v. 1, 2ª Ed., Edgard Blucher, 1992.
- SOUZA, A.; TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; COSTA, F. B.; LONGO, E. **Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials**. *Journal of Environmental Management*, v. 92, n. 10, p. 2774-2780, 2011.
- SOUZA, A. E. **Argilominerais: influência dos aditivos (cinza de bagaço de cana-de-açúcar e rocha sedimentar) no processo de sinterização**. Dissertação de mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2008.
- STRATHMANN, H. **Membrane separation processes**. *Journal of Membrane Science*, v. 9, n. 1–2, p. 121–189, 1981.
- SUBEDI, S.; ARCE, G.; HASSAN, M.; KUMAR, N.; BARBATO, M.; GUTIERREZ-WING, M. T. **Influence of production methodology on the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash**. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, p. 07003, 2019.
- SURESH, K.; PUGAZHENTHI, G. **Development of ceramic membranes from low-cost clays for the separation of oil–water emulsion**. *Desalination and Water Treatment*, v. 57, n. 5, p. 1927-1939, 2016.
- SURESH, K.; PUGAZHENTHI, G.; UPPALURI, R. **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.
- TEIXEIRA, J.; PONZILACQUA, M. **Acesso a água: o caso das Vipuxovoku Arara Azul e esperança localizadas em AQUIDAUANA/MS**. *Revista Direitos Fundamentais & Democracia*, v. 29, n. 1, 2024.
- TSURU, T. **Inorganic porous membranes for liquid phase separation**. *Separation and purification methods*, v. 30, n. 2, p. 191-220, 2001.
- UHLHORN, R. J. R.; KEIZER, K.; BURGGRAAF, A. J. **Gas transport and separation with ceramic membranes, Part II. Syntesis and separation properties of microporous membranes**. *Journal of Membrane Science*, v.66, p. 271-287, 1992.
- ULERY, A.; GRAHAM, R. **Forest fire effects on soil color and texture**. *Soil Science Society of America Journal*, v. 57, n. 1, p. 135-140, 1993.
- UNITED NATIONS CHILDREN’S FUND/WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2022: special focus on gender**. Nova York: United Nations Children’s Fund (UNICEF) and World Health Organization (WHO), 2023.
- UNITED NATIONS. Report A/RES/64/292 – The human right to water and sanitation. Geneva: United Nations, 2010.
- UYGUN, M.; DE LA ASUNCION-NADAL, V.; EVLI, S.; UYGUN, D. A.; JURADO-SANCHEZ, B.; ESCARPA, A. **Dye removal by laccase-functionalized micromotors**. *Applied Materials Today*, v. 23, p. 101045, 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.

VASANTH, D.; UPPALURI, R.; PUGAZHENTHI, G. **Influence of sintering temperature on the properties of porous ceramic support prepared by uniaxial dry compaction method using low-cost raw materials for membrane applications.** *Separation Science and Technology*, v. 46, n. 8, p. 1241-1249, 2011.

VYAZOVKIN, S.; ACHILIAS, D.; FERNANDEZ-FRANCOS, X.; GALUKHIN, A. & SBIRRAZZUOLI, N. **ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of thermal polymerization kinetics.** *Thermochimica acta*, v. 714, p. 179243, 2022.

WANG, C. C.; JUANG, L. C.; LEE, C. K.; HSU, T. C.; LEE, J. F.; CHAO, H. P. **Effects of exchanged surfactant cations on the pore structure and adsorption characteristics of montmorillonite.** *Journal of colloid and interface science*, v. 280, n. 1, p. 27-35, 2004.

WANG, Y.; ZHANG, Y.; LIU, X. Q.; MENG, G. Y. **Sol-coated preparation and characterization of macroporous α -Al₂O₃ membrane support.** *Journal of sol-gel science and technology*, v. 41, p. 267-275, 2007.

WARNER, E. **Patenting and Innovation in China: incentives, policy, and outcomes.** The Pardee RAND Graduate School, 2014.

WEN-QIONG, W.; YUN-CHAO, W.; XIAO-FENG, Z.; RUI-XIA, G.; MAO-LIN, L. **Whey protein membrane processing methods and membrane fouling mechanism analysis.** *Food Chemistry*: v. 289, p. 468-481, 2019.

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

WHELAN, M. J.; LINSTED, C.; WORRALL, F.; ORMEROD, S. J.; DURANCE, I.; JOHNSON, A. C.; ...; TICKNER, D. **Is water quality in British rivers “better than at any time since the end of the Industrial Revolution”?** *Science of the Total Environment*, v. 843, p. 157014, 2022.

XI, Y.; MALLAVARAPU, M.; NAIDU, R. **Preparation, characterization of surfactants modified clay minerals and nitrate adsorption.** *Applied Clay Science*, v. 48, n. 1-2, p. 92-96, 2010.

XU, Q.; JI, T.; GAO, S. J.; YANG, Z.; WU, N. **Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials.** *Materials*, v. 12, p. 39, 2019.

YADAV, A.; SAIRAM, V.; SRINIVASAN, K. & MURUGANANDAM, L. **Synthesis and characterization of geopolymer from metakaolin and sugarcane bagasse ash.** *Construction and Building Materials*, v. 258, p. 119231, 2020.

YANG, T.; WANG, N.; GU, H. **The adsorption behavior of niobium (V) on kaolin clay and kaolinite.** *Applied Clay Science*, v. 235, p. 106866, 2023.

YE, H.; JIN, N. & JIN, X. **An experimental study on relationship among water sorptivity, pore characteristics, and salt concentration in concrete.** *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, v. 61, n. 3, p. 530-540, 2017.

ZHANG, Y.; TAN, Y.; SUN, R. & ZHANG, W. **Preparation of ceramic membranes and their application in wastewater and water treatment.** *Water*, v. 15, n. 19, p. 3344, 2023.

ZHAO, J.; WANG, Q.; YANG, J.; LI, Y.; LIU, Z.; ZHANG, L.; ZHAO, Y.; ZHANG, S.; CHEN, L. **Comb-shaped amphiphilic triblock copolymers blend PVDF membranes overcome the permeability-selectivity trade-off for protein separation.** *Separation And Purification Technology*: v. 239, p. 116596-116607, 2020.

ZHU, L.; DONG, Y.; HAMPSHIRE, S.; CERNEAUX, S.; WINNUBST, L. **Waste-to-resource preparation of a porous ceramic membrane support featuring elongated mullite whiskers with enhanced porosity and permeance.** *Journal of European Ceramic Society*, v. 35, p. 711-721, 2015.

ZOU, D.; CHEN, X.; DRIOLI, E.; KE X.; QIU, M.; FAN, Y. **Facile co-sintering process to fabricate sustainable antifouling silver nanoparticles (AgNPs)-enhanced tight ceramic ultrafiltration membranes for protein separation.** *Journal of Membrane Science*: v. 593, p. 117402-117413, 2020.

ZOU, D.; FAN, Y. **State-of-the-art developments in fabricating ceramic membranes with low energy consumption.** *Ceramics International*, v. 47, p. 14966-14987, 2021.