

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

BRENDA GOMES DA SILVA

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MEMBRANAS
CERÂMICAS DE BAIXO CUSTO APLICADAS AO TRATAMENTO
DE EFLUENTES TÊXTEIS

João Pessoa – PB 2026

BRENDA GOMES DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MEMBRANAS
CERÂMICAS DE BAIXO CUSTO APLICADAS AO TRATAMENTO
DE EFLUENTES TÊXTEIS**

Trabalho Final de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia
Química do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal da Paraíba em
cumprimento aos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Genaro Zenaide Clericuzi

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586d Silva, Brenda Gomes da.

Desenvolvimento e avaliação de membranas cerâmicas
de baixo custo aplicadas ao tratamento de efluentes
têxteis / Brenda Gomes da Silva. - João Pessoa, 2026.
80 f. : il.

Orientação: Genaro Zenaide Clericuzi.
TCC (Graduação) - UFPB/Centro de Tecno.

1. suportes cerâmicos; bagaço de cana-de-açúcar;
filt. I. Clericuzi, Genaro Zenaide. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 66.01(043.2)

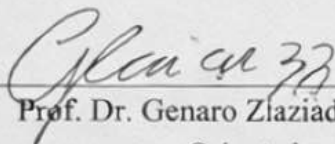
BRENDA GOMES DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MEMBRANAS
CERÂMICAS DE BAIXO CUSTO APLICADAS AO TRATAMENTO
DE EFLUENTES TÊXTEIS**

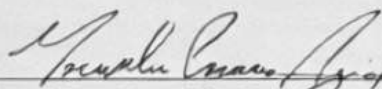
Trabalho Final de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia
Química do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal da Paraíba em
cumprimento aos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 31 de março de 2026.

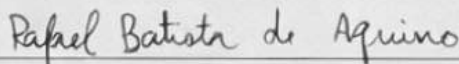
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Genaro Zlaziade Clericuzi
Orientador



Prof. Dr. Franklin Pessoa Aguiar
Examinador



Prof. Me. Rafael Batista de Aquino
Examinador

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser minha fonte de força e fortaleza em todos os momentos. Sua luz guiou meus passos, renovando minhas forças e me dando a sabedoria necessária para superar cada desafio desta jornada.

À minha família, por ser o meu porto seguro. O apoio incondicional e o amor que recebi foram fundamentais para que eu nunca desistisse dos meus sonhos. Tudo o que conquisto é também fruto do esforço e da dedicação de vocês.

Ao meu namorado, João Vitor, pelo companheirismo, pela paciência e por estar ao meu lado em cada noite de estudo e em cada pequena vitória. Seu apoio foi essencial para que eu mantivesse o equilíbrio e a motivação durante essa trajetória.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Genaro Zenaide Clericuzi, pela orientação dedicada, pela confiança depositada em meu trabalho e por compartilhar generosamente seu conhecimento, sendo peça fundamental na minha formação acadêmica.

Aos técnicos do laboratório, Franklin Pessoa Aguiar e Rafael Batista de Aquino, por todos os ensinamentos práticos, pelo apoio técnico e pela disposição em compartilhar suas experiências durante todos os meus anos de pesquisa.

Às minhas amigas Larissa, Clarice, Izabella, Debora e Thalita, por compartilharem comigo os desafios, as angústias e as alegrias da graduação. A presença de vocês transformou o ambiente acadêmico em um espaço de acolhimento, parceria e crescimento.

À minha amiga Erika Arruda, pela amizade verdadeira e pela irmandade construída ao longo de tantos anos. Sua presença tornou o caminho mais leve e cheio de significado.

Aos meus amigos Luize, Brenda Lays, Leticia, Hadassa, Gustavo e Helder, por tantos anos de amizade verdadeira, pelas risadas, pelo apoio constante e por estarem presentes em todos os momentos importantes da minha vida. Vocês fazem parte da minha história.

Por fim, expresso minha gratidão a todos que fizeram parte desta trajetória. Cada apoio, palavra de incentivo e contribuição foi importante para a conclusão desta etapa.

“Não fui eu que te ordenei? Sê forte e corajoso! Não tenhas medo, nem te espantes, porque o Senhor teu Deus estará contigo por onde quer que andares.”

(Josué 1:9)

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e a caracterização de membranas cerâmicas de baixo custo, utilizando bagaço de cana-de-açúcar como agente formador de poros, com vistas à aplicação no tratamento de efluentes têxteis. A proposta insere-se no contexto da busca por soluções sustentáveis e economicamente viáveis para o tratamento de águas residuárias industriais, especialmente diante da crescente escassez de recursos hídricos e da complexidade dos efluentes gerados pela indústria têxtil. As pastilhas cerâmicas foram obtidas por compactação uniaxial a seco, seguida de sinterização a 650 °C por 3 horas, utilizando uma composição baseada em bentonita, caulim, bagaço de cana-de-açúcar e amido. A caracterização dos materiais foi realizada por difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e determinação de propriedades físicas, como absorção de água e densidade aparente, permitindo avaliar as transformações estruturais e a adequação do material para aplicação como suporte filtrante. Os resultados evidenciaram a formação de uma estrutura porosa, com absorção de água aproximadamente 29%, indicando a presença de poros abertos e interconectados, essenciais para o escoamento do fluido. As análises de DRX revelaram a predominância de fases ricas em sílica, com destaque para o quartzo, enquanto o FTIR confirmou a presença de ligações características de materiais aluminossilicáticos, corroborando a formação de uma matriz cerâmica estável após a sinterização. Nos ensaios de filtração, os suportes apresentaram valores de fluxo permeado entre aproximadamente 68 e 84 L·m⁻²·h⁻¹, tanto para água quanto para efluente têxtil, evidenciando boa capacidade de permeação e eficiência no transporte de fluido através da estrutura porosa. Entretanto, a eficiência de remoção do corante foi limitada, variando entre 7% e 14%, indicando que o material atua predominantemente como suporte cerâmico. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que os suportes cerâmicos produzidos apresentam propriedades adequadas para aplicação em sistemas de filtração, especialmente como substratos para membranas cerâmicas, destacando-se o uso do bagaço de cana-de-açúcar como alternativa sustentável e de baixo custo para a produção de materiais porosos.

Palavras-chave: suportes cerâmicos; bagaço de cana-de-açúcar; filtração; efluentes têxteis; materiais porosos.

ABSTRACT

This study aimed to develop and characterize low-cost ceramic membranes using sugarcane bagasse as a pore-forming agent, targeting applications in textile wastewater treatment. The proposal is framed within the search for sustainable and economically viable solutions for industrial wastewater treatment, especially considering the increasing scarcity of water resources and the complexity of textile effluents. The ceramic samples were produced by dry uniaxial pressing followed by sintering at 650 °C for 3 hours, using a composition based on bentonite, kaolin, sugarcane bagasse, and starch. Material characterization was carried out by X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and determination of physical properties, such as water absorption and apparent density, allowing the evaluation of structural transformations and the suitability of the material as a filtration support. The results indicated the formation of a porous structure, with water absorption around 29%, suggesting the presence of open and interconnected pores, which are essential for fluid flow. XRD analysis revealed the predominance of silica-rich phases, especially quartz, while FTIR confirmed the presence of characteristic bonds of aluminosilicate materials, indicating the formation of a stable ceramic matrix after sintering. In filtration tests, the supports exhibited permeate flux values ranging from approximately 68 to 84 $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ for both water and textile effluent, demonstrating good permeability and fluid transport capacity. However, dye removal efficiency was limited, ranging from 7% to 14%, indicating that the material acts predominantly as a ceramic support. Therefore, the results demonstrate that the developed ceramic supports have potential for application in filtration systems, particularly as substrates for ceramic membranes. Additionally, the use of sugarcane bagasse stands out as a sustainable and low-cost alternative for the production of porous materials.

Keywords: ceramic supports; sugarcane bagasse; filtration; textile wastewater; porous materials.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	15
2.1. OBJETIVO GERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1. HISTÓRIA DA INDÚSTRIA CERÂMICA	16
3.1.1. História da Indústria Cerâmica no Brasil	17
3.2. ARGILOMINERAIS	19
3.2.1. Argila Bentonita	21
3.2.2. Argila Caulinita	22
3.3. AMIDO	23
3.4. BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	24
3.5. MEMBRANAS CERÂMICAS	26
3.5.1. História das Membranas	26
3.5.2. Tipos de Membranas	28
3.5.4. Membranas Cerâmicas de Baixo Custo	32
3.6. INDÚSTRIA TÊXTIL	34
3.7. TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS	36
4. METODOLOGIA	39
4.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	39
4.2. PRODUÇÃO E SINTERIZAÇÃO DO SUPORTE CERÂMICO	42
4.3. PARÂMETROS AVALIADOS	44
4.3.1. Difração de Raios-X (DRX)	44
4.3.2. Fluorescência de Raios-X (FRX)	45
4.3.3. Análise Termogravimétrica (TG)	45
4.3.4. Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	46
4.3.5. Desenvolvimento do Sistema de Filtração	46
4.3.6. Ensaio de Filtração e Determinação da Eficiência de Remoção	47
4.3.7. Determinação do Volume Aparente	49
4.3.8. Determinação da Absorção de Água	50
4.3.9. Determinação de fluxo	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)	52
5.2. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)	55

5.3. ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	57
5.4. ANÁLISE TERMOGRAVIMETRICA	59
5.5. PRODUÇÃO E SINTERIZAÇÃO DO SUPORTE CERÂMICO.....	62
5.6. ENSAIO DE FILTRAÇÃO E FLUXO PERMEADO	63
5.7. VOLUME APARENTE	69
5.8. ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	70
6. CONCLUSÕES	72
REFERÊNCIAS	74

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório “*Global Water Bankruptcy: Living Beyond Our Hydrological Means in the Post-Crisis Era*”, elaborado pelo *United Nations University Institute for Water, Environment and Health* e apresentado na sede da Organização das Nações Unidas (ONU), o mundo encontra-se em um estado estrutural de falência hídrica global, caracterizada pelo uso contínuo da água em níveis superiores à capacidade natural de reposição dos sistemas hídricos. Esse processo tem causado degradação irreversível de rios, lagos, aquíferos, zonas úmidas e geleiras. Dados do relatório indicam que mais da metade dos grandes lagos do planeta perdeu volume desde a década de 1990, cerca de 70% dos principais aquíferos apresentam tendência de declínio e aproximadamente 410 milhões de hectares de áreas úmidas desapareceram nos últimos 50 anos (INSTITUTO FUTURO DA ÁGUA, 2026).

A água é um recurso essencial para várias áreas da sociedade brasileira, sendo amplamente utilizada na irrigação agrícola, no abastecimento humano, nas atividades industriais, na geração de energia, na mineração, na aquicultura, na navegação e em atividades de turismo e lazer. No Brasil, a irrigação agrícola é responsável pela maior parcela do consumo de água, representando 52,9% do total. Em seguida aparecem o abastecimento humano urbano, com 9,4%, e a indústria de transformação, responsável por 8,2% do uso da água. As projeções indicam que a demanda por água pode crescer aproximadamente 30% até 2040, reforçando a necessidade de gestão eficiente dos recursos hídricos e da implementação de políticas públicas voltadas ao uso sustentável da água (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2022).

A industrialização desempenha um papel fundamental no crescimento econômico e na modernização das nações, destacando-se a indústria têxtil pelo seu potencial de geração de empregos e por sua interconexão com diversos setores econômicos, em âmbito global e local. Trata-se de um setor emergente e em expansão, que utiliza como principais matérias-primas algodão, lã, fibras sintéticas, corantes sintéticos, produtos químicos e água de processo, o que acentua sua relevância econômica. As indústrias têxteis se organizam em dois processos principais: processamento a seco, que gera resíduos sólidos, e processamento úmido, que resulta na produção de resíduos líquidos. Este último inclui etapas como engomagem,

desengomagem, purga, alvejamento, mercerização, tingimento, acabamento e estamparia. O uso intensivo de água e produtos químicos nessas etapas gera descargas de águas residuais contaminadas, evidenciando o significativo impacto ambiental do setor têxtil (ADANE; ADUGNA; ALEMAYEHU, 2021).

As indústrias têxteis enfrentam grandes desafios no tratamento eficiente de suas águas residuárias, especialmente na remoção de corantes, que, mesmo em pequenas concentrações, conferem coloração intensa a essas descargas líquidas. Esses resíduos apresentam, geralmente, elevadas demandas química e bioquímica de oxigênio, grande quantidade de sólidos suspensos e alta coloração, decorrente da presença de corantes não fixados nas fibras durante o processo de tingimento. Tais características tornam esses efluentes um dos tipos mais complexos e difíceis de tratar (AKSU, 2005 *apud* VASQUES *et al*, 2011).

Os corantes têxteis, responsáveis pela coloração das águas residuárias, são compostos de estrutura molecular complexa, o que os torna estáveis e de difícil biodegradação (ROSALEN *et al*, 2004 *apud* FORGIARINI, 2006). Esses corantes sintéticos são amplamente utilizados pela indústria têxtil, sendo estimado que entre 10 a 15% são descartados no efluente após o processo de coloração. A elevada diversidade e complexidade desses efluentes, associados às exigências legais por tratamentos eficientes, têm estimulado o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas à melhoria dos processos de tratamento (FORGIARINI, 2006).

O tratamento de efluentes com alta coloração apresenta desafios significativos, uma vez que as diversas técnicas disponíveis possuem limitações quanto à eficiência e aplicabilidade. Além disso, a elevada complexidade desses efluentes torna necessária a associação de diferentes métodos para que o tratamento seja efetivo, o que, muitas vezes, compromete sua viabilidade devido ao alto custo envolvido. Nesse contexto, diversos estudos têm se concentrado na otimização de tecnologias já consolidadas, visando torná-las mais eficientes e sustentáveis (BRILLAS e MARTÍNEZ-HUITTLE, 2015; MEHRJOUEI *et al.*, 2015 *apud* NUNES, 2019).

No tratamento de efluentes industriais, os processos físico-químicos tornam-se indispensáveis, uma vez que certos metais e microrganismos apresentam resistência aos tratamentos biológicos. Entre esses processos, destacam-se a coagulação e a floculação, amplamente utilizadas no tratamento de efluentes têxteis, devido à sua eficiência na remoção

de sólidos suspensos, fósforo, redução da demanda química de oxigênio (DQO) e da cor (SCHROEDER, 2016; KIM, 2016; ZHANG, 2018; NUNES, 2012 *apud* NUNES, 2019).

O tratamento de águas residuais industriais representa um desafio significativo, o que tem incentivado o investimento em pesquisas por novos métodos de tratamento de efluentes eficazes e sustentáveis, beneficiando tanto o meio acadêmico quanto o industrial. Nesse cenário, a filtração por membranas destaca-se como uma alternativa viável para o tratamento de efluentes industriais, proporcionando boa estabilidade e menor custo de produção (BATISTA, 2019).

As membranas podem ser fabricadas de materiais orgânicos, como polímeros ou inorgânicos, como cerâmicos, os metais, as zeólitas e o carbono. As membranas poliméricas são populares devido à fácil fabricação e baixo custo, porém possuem limitações quanto à resistência química, térmica e mecânica, além da curta vida útil. Por outro lado, as membranas cerâmicas são produzidas a partir de materiais como alumina, zircônia, titânia e sílica, apresentam maior durabilidade, embora possuam custo mais elevado. Técnicas de conformação, como prensagem e extrusão, são empregadas na estruturação do suporte dessas membranas (BENTO, 2022). Nesse contexto, torna-se relevante analisar matérias-primas alternativas provenientes de resíduos agroindustriais, como o bagaço da cana-de-açúcar, que apresentam potencial para aplicação na produção de membranas cerâmicas de baixo custo.

A safra brasileira de cana-de-açúcar 2025/26 está estimada em 663,4 milhões de toneladas, apresentando uma leve redução de 2% em relação à safra anterior, influenciada principalmente por condições climáticas desfavoráveis que impactaram a produtividade dos canaviais. Apesar disso, a área cultivada permanece praticamente estável, com pequeno aumento de 0,3%. Em contrapartida, a região Nordeste apresenta expectativa de crescimento, com aumento de 3,6% na produção, estimada em 56,3 milhões de toneladas, impulsionado pela expansão da área plantada e melhores condições de produtividade (CONAB, 2025).

Dentre os subprodutos da indústria sucroalcooleira, o bagaço de cana-de-açúcar destaca-se como uma biomassa de grande potencial. Para cada tonelada de cana processada, são gerados, em média, de 250 a 300 kg desse resíduo, que pode ser aproveitado na geração de energia elétrica, produção de vapor e aquecimento de caldeiras, apresentando elevado poder calorífico e boa eficiência energética (MATOS *et al*, 2021). Além disso, resíduos agroindustriais, como o bagaço de cana-de-açúcar, são gerados em grandes quantidades e

podem causar impactos ambientais quando não são devidamente aproveitados. No entanto, esse material apresenta elevado potencial de valorização, especialmente devido à presença de sílica em sua composição, um composto de grande interesse industrial. A sílica presente no bagaço é influenciada por fatores como solo, condições de cultivo e estágio da planta, sendo depositada principalmente na forma amorfa (NORSURAYA; FAZLENA; NORHASYIMI, 2016). Dessa forma, o reaproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar surge como uma alternativa promissora para a obtenção de materiais de alto valor agregado, como insumos para a produção de membranas cerâmicas.

Diante da elevada complexidade dos efluentes industriais e das limitações dos métodos convencionais de tratamento, torna-se necessário o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis. De forma análoga aos processos de destilação fracionada na separação de misturas líquidas, os processos de separação por membranas operam mediante barreiras seletivas, distinguindo-se por dispensar mudança de fase e por apresentar menor consumo energético, o que os torna especialmente adequados ao tratamento contínuo de efluentes industriais. Além disso, a utilização de materiais alternativos e de baixo custo na produção de membranas cerâmicas tem se mostrado uma estratégia relevante para reduzir custos operacionais e ampliar a aplicação dessas tecnologias, especialmente em países em desenvolvimento. Assim, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar membranas cerâmicas de baixo custo aplicadas ao tratamento de efluentes, buscando contribuir para o avanço de soluções tecnológicas mais eficientes, acessíveis e ambientalmente sustentáveis.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo consistiu em avaliar a aplicação de membranas cerâmicas fabricadas a partir de argilas naturais, amido e bagaço da cana-de-açúcar no tratamento de efluentes industriais têxteis. Dessa forma, a pesquisa teve como objetivo examinar a viabilidade técnica da utilização de matérias-primas não convencionais na retenção de contaminantes, visando desenvolver sistemas que combinem alta eficiência e de baixo custo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar misturas cerâmicas à base de bentonita, caulim, bagaço de cana-de-açúcar e amido, visando a obtenção de suportes cerâmicos porosos;
- Produzir suportes cerâmicos por meio de compactação uniaxial a seco, seguida de sinterização em temperatura controlada;
- Caracterizar os materiais obtidos por meio de técnicas de difração de raios X (DRX) e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR);
- Determinar propriedades físicas dos suportes cerâmicos, como absorção de água e volume aparente;
- Avaliar o desempenho dos suportes cerâmicos em ensaios de filtração, por meio da determinação do fluxo permeado;
- Analisar a eficiência de remoção do corante em soluções sintéticas de efluente têxtil, utilizando espectrofotometria UV-Vis;

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. HISTÓRIA DA INDÚSTRIA CERÂMICA

A cerâmica é um dos materiais mais antigos produzidos pelo ser humano, com origem estimada entre 10 e 15 mil anos. O nome vem do grego “kéramos”, que significa “terra queimada”. Historicamente, a demanda por utensílios que fossem resistentes, impermeáveis e de fácil fabricação levou à manipulação da argila. Valorizada por sua alta plasticidade quando úmida, a matéria-prima permite modelagem complexa. Submetida a tratamento térmico em fornos, a peça adquire elevada resistência mecânica, processo que também viabiliza a aplicação de esmaltes para acabamento da superfície. A cerâmica apresenta uma grande versatilidade, abrangendo desde aplicações tradicionais na construção civil até tecnologia de ponta, como a fabricação de componentes para foguetes espaciais, devido à sua resistência (BRITO, 2011).

A origem da cerâmica está documentada em sítios arqueológicos. As peças mais antigas encontradas no Japão têm cerca de 8 mil anos. A técnica cerâmica se espalhou da Ásia para a Europa antes do final do período Neolítico. Há mais de 5 mil anos, países como China e Egito já produziam cerâmica, com exemplos como os vasos encontrados nas tumbas dos faraós. Com o passar do tempo, diferentes culturas desenvolveram seus próprios estilos, refletindo tendências artísticas variadas. Assim, a cerâmica evoluiu de um produto simples para uma indústria fundamental, substituindo materiais como pedra e madeira. Ela ganhou ainda mais destaque após a Revolução Industrial, impulsionando sua expansão e inovação (BRITO, 2011).

A partir do século XV, na Europa, o desenvolvimento dos primeiros altos-fornos e, depois, de refratários mais resistentes no século XVI impulsionou uma transformação industrial ligada às cerâmicas, explorando propriedades como alto ponto de fusão, resistência química elevada e baixa condutividade térmica e elétrica. Até cerca de 80 anos atrás, predominavam as cerâmicas tradicionais, feitas principalmente em argila, presentes em produtos como louças, porcelanas, tijolos, telhas, além de vidros e cerâmicas de alta temperatura. Com os avanços das últimas décadas na compreensão de sua estrutura e dos

fenômenos internos, o termo “cerâmica” passou a incluir uma variedade muito maior de materiais (MISRA; MISRA, 2022).

Depois da Segunda Guerra, tanto as cerâmicas quanto os vidros passaram a desempenhar papel fundamental em áreas tecnológicas como eletrônica, energia, medicina e aeroespacial. Nesse período também surgiram as cerâmicas de engenharia, formadas por compostos puros ou quase puros como alumina, carbetos e nitretos. Diferentemente das cerâmicas tradicionais como, por exemplo, argila, sílica e feldspato, as propriedades destes materiais decorrem de ligações iônicas e covalentes fortes, garantindo alta estabilidade química e altas temperaturas de fusão, porém resultando em fragilidade e baixa tenacidade quando comparada a metais e polímeros. Ainda assim, melhorias na resistência à fratura e na tenacidade, junto com novas técnicas de processamento (sol-gel, liofilização, colagem de barbotina, moldagem por injeção, prensagem a quente e sinterização), viabilizaram produção em escala e aplicações estruturais, especialmente em altas temperaturas (MISRA; MISRA, 2022).

A indústria cerâmica é muito diversificada, originada de antigas fábricas de tijolos, louças de barro e porcelanas branca, que compartilham processos e matérias-primas semelhantes. O setor se desenvolveu com a integração das tecnologias trazidas pela imigração europeia, possui vários segmentos no Brasil, abundância em recursos naturais e forte presença nas exportações. Embora a cerâmica seja um material antigo e amplamente reconhecido, os avanços significativos do setor no país ocorreram a partir da combinação do conhecimento técnico dos imigrantes e das inovações da Revolução Industrial (KILLER; ROTTA, 2019).

3.1.1. História da Indústria Cerâmica no Brasil

A história da cerâmica brasileira tem início na Ilha de Marajó, no estado do Pará, com a cultura indígena que desenvolveu grande sofisticação nos seus artefatos. O material produzido era elaborado e especializado, utilizando técnicas como raspagem, incisão e pintura. Mesmo com ferramentas simples e sem recursos como o torno, o povo marajoara dominou o trabalho do barro e alcançou um nível técnico e estético relevante, superando as fases mais primárias associadas à origem do uso de materiais. Assim, a cerâmica não foi

introduzida no país pelos portugueses em 1500 nem pelos escravizados, ela já era parte da cultura indígena. Com a chegada dos colonizadores, o que ocorreu foi a organização e a concentração da mão de obra, com a instalação das primeiras olarias em território brasileiro (ANICER, 2015).

Em 1549, com a chegada de Tomé de Sousa, começou a produção de materiais de construção para o desenvolvimento de cidades planejadas, incluindo o uso de telhas em São Paulo desde 1575. Esse estímulo deu início ao desenvolvimento intensivo da atividade cerâmica, com as olarias marcando o começo da indústria em São Paulo, principalmente com processos manuais e produção de tijolos, telhas, tubos, vasos e outros itens vendidos localmente. A primeira fábrica brasileira de produtos cerâmicos foi fundada em São Paulo no ano de 1893, a “Cerâmica Sacoman S.A.” pelos irmãos franceses Sacoman, que encerrou suas atividades em 1956. No final do século XIX e início do XX, houve uma separação entre olarias, que produziam tijolos e telhas, e cerâmicas, que fabricavam itens mais sofisticados como azulejos, louças e potes, marcando a especialização do setor (BRITO, 2011).

Com o avanço da industrialização ao longo do século XX, a indústria cerâmica brasileira passou por um processo de consolidação e organização produtiva. O setor estruturou-se em diferentes segmentos, definidos pelos produtos e mercados atendidos, assumindo papel estratégico na economia nacional, especialmente como base da construção civil. A indústria cerâmica responde por cerca de 1% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, apresenta ampla distribuição territorial e caracteriza-se pela diversidade de ramos produtivos, evidenciando a transição de uma atividade predominantemente artesanal para um parque industrial tecnicamente estruturado e economicamente relevante no país (BUSTAMANTE; BRESSIANI, 2000).

A indústria cerâmica brasileira caracteriza-se por sua ampla diversidade de ramos produtivos, os quais se diferenciam tanto pelos produtos fabricados quanto pelos mercados atendidos. Entre os principais segmentos destacam-se a cerâmica estrutural (ou vermelha), voltada à produção de tijolos, blocos e telhas; a cerâmica de revestimento, responsável por pisos, azulejos e porcelanatos; os materiais refratários, empregados em indústrias de base como siderurgia e cimento; a louça sanitária; a louça de mesa; as fritas, vidrados e corantes; além de setores como vidros, cimento Portland e cerâmicas técnicas e especiais. Grande parte desses ramos apresenta forte vínculo com a construção civil, o que historicamente tem

influenciado seu crescimento e sua distribuição geográfica no território nacional, consolidando a indústria cerâmica como um setor essencial para a economia brasileira (PRADO; BRESSIANI, 2013).

Nesse contexto, a compreensão das matérias-primas utilizadas na indústria cerâmica torna-se essencial, destacando-se os argilominerais como principais responsáveis pelas propriedades físicas, químicas e estruturais dos materiais cerâmicos.

3.2. ARGILOMINERAIS

O termo “material argiloso” refere-se a materiais naturais de granulometria fina e textura terrosa, compostos principalmente por argilominerais, incluindo solos com elevado teor da fração argila. Existem diferentes tipos específicos de argilas, como caulins, bentonitas, *ball-clays* (argila bola ou argila plástica), argilas refratárias e *flint-clays* (argila sílex), cuja classificação varia conforme a origem geológica, composição mineralógica e aplicação tecnológica. Conceitualmente, mineral é um corpo inorgânico natural com composição química definida e estrutura cristalina característica, enquanto rocha é um agregado natural formado por um ou mais minerais. A argila é definida como uma rocha finamente dividida, constituída principalmente por argilominerais, podendo conter impurezas como quartzo, calcita, dolomita e matéria orgânica. Quimicamente, é composta majoritariamente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, apresentando plasticidade quando umedecida, característica fundamental para sua aplicação industrial (SOUZA SANTOS, 1989).

Os argilominerais constituem a fração mineralógica dominante das argilas e são classificados como filossilicatos estruturados em camadas formadas por folhas tetraédricas e octaédricas. A organização dessas camadas e as substituições isomórficas na estrutura cristalina influenciam propriedades como capacidade de troca catiônica, expansibilidade, estabilidade estrutural e comportamento físico-químico. A classificação dos argilominerais baseia-se principalmente no tipo de arranjo estrutural das lamelas, sendo as principais categorias: esmectitas, ilitas, caulinita, cloritas, vermiculitas e argilas fibrosas (BELGHAZIS; HACHEM, 2022).

De acordo com BELGHAZIS e HACHEM (2022), as categorias podem ser descritas da

seguinte forma:

- **Esmectitas:** argilominerais do tipo 2:1, constituídos por duas folhas tetraédricas envolvendo uma folha octaédrica. Apresentam cátions intercambiáveis no espaço interlamelar, que podem ser hidratados, favorecendo a expansão da estrutura na presença de água e conferindo elevada capacidade de troca catiônica.
- **Montmorilonita:** principal representante das esmectitas, com estrutura 2:1 e substituições isomórficas que geram carga negativa compensada por cátions intercambiáveis. Destaca-se por sua elevada expansibilidade e propriedades de adsorção.
- **Bentonita:** argila predominantemente composta por montmorilonita, caracterizada por elevada capacidade de inchamento e propriedades coloidais.
- **Ilita:** argilomineral do tipo 2:1 com baixa expansibilidade devido à presença de íons potássio (K^+) fortemente ligados no espaço interlamelar, o que reduz a hidratação entre as camadas.
- **Caulinita:** apresenta estrutura 1:1, formada por uma folha tetraédrica e uma folha octaédrica. Não é expansiva e possui baixa capacidade de troca catiônica devido à ausência de cátions intercambiáveis no espaço interlamelar.
- **Clorita:** possui estrutura 2:1 associada a uma camada adicional semelhante à brucita, conferindo maior estabilidade estrutural e baixa capacidade de expansão.
- **Vermiculita:** filossilicato do tipo 2:1 com maior carga estrutural que as esmectitas, apresentando capacidade de expansão intermediária.
- **Argilas fibrosas:** incluem minerais como sepiolita e paligorsquita, caracterizados por estrutura fibrosa e elevada área superficial.

Os minerais argilosos, apesar de pouco visíveis e esteticamente discretos, possuem grande importância econômica, tanto pelo volume quanto pelo valor da produção. Cerca de 90% das argilas destinam-se à fabricação de agregados e materiais de construção, sendo denominadas argilas comuns, cerâmicas ou vermelhas, enquanto os 10% restantes correspondem às argilas especiais, que, embora representem menor volume, concentram maior valor agregado devido às diversas aplicações industriais. Produtos cerâmicos são materiais inorgânicos e não metálicos submetidos a tratamento térmico em altas

temperaturas, tendo como principais matérias-primas as argilas, o quartzo e o feldspato. As argilas comuns, compostas principalmente por esmectita e illita, são utilizadas há milênios na produção de tijolos, telhas e outros artefatos, além de servirem como fonte de alumina e na fabricação de cimento. Já as argilas especiais apresentam aplicações variadas, como o caulim na porcelana, papel e produtos químicos; a bentonita em fundição, purificação e impermeabilização; e a palygorskita e a sepiolita em pigmentos, fertilizantes, filtração e outras aplicações industriais. O Brasil também possui importantes reservas de argila, como a descoberta em 2009 no oeste paulista, considerada a quarta maior do país, com potencial para abastecer a indústria regional por décadas e impulsionar o desenvolvimento econômico local (BRANCO, 2014).

3.2.1. Argila Bentonita

O termo "bentonita" refere-se originalmente a um tipo de argila plástica e coloidal encontrada em Fort Benton, Wyoming, EUA, mas atualmente designa argilas ricas em montmorillonita, um argilomineral da família esmectita. A bentonita é classificada em cálcica e sódica, com a propriedade física única de expandir significativamente seu volume ao entrar em contato com água, formando géis tixotrópicos; sendo que a bentonita sódica apresenta maior capacidade de expansão em relação à cálcica. No Brasil, as principais jazidas estão em Boa Vista, Paraíba, com outros depósitos em Vitória da Conquista, Bahia, onde também foi inaugurado em 2007 um empreendimento mineral pela Companhia Brasileira de Bentonita-CBB, ligada à Geosol, que atua em sondagens e perfurações de poços artesianos (LUZ; OLIVEIRA, 2008).

A bentonita apresenta uma grande variabilidade em sua aparência e propriedades físicas. Comumente, é encontrada nas cores cinza-creme, cinza opaca e verde azulada, mas também pode ser rosa, verde-oliva profundo, vermelho ou amarelo. Algumas amostras podem ser quase brancas quando secas. Sua textura varia entre compacta e porosa, podendo apresentar fratura conchoidal (fratura com superfície lisas e curvas). Após sua formação, a textura da bentonita pode ser alterada pela deposição de materiais que se transportam em solução, como pequenos grãos de carbonato de cálcio ou ferro. Em certos depósitos, a ação carbonatada preenche poros, resultando numa rocha dura e densa, enquanto manchas pretas

de óxido de manganês e cristais de gipsita e barita são encontrados em outros. A presença de álcalis e sais alcalinos ocorre em quantidades variáveis (ROSS; SHANNON, 1926).

A bentonita sódica destaca-se por sua elevada capacidade de expansão quando em contato com água, formando uma barreira impermeável, além de apresentar plasticidade e comportamento tixotrópico. Essas propriedades fundamentam suas principais aplicações industriais. Na indústria de perfuração, é utilizada em fluidos de perfuração para resfriar e lubrificar a broca, remover detritos do poço e formar uma camada de vedação nas paredes do furo. Na engenharia ambiental, é empregada como material de revestimento em aterros e sistemas de contenção de resíduos, atuando como barreira contra a migração de contaminantes. Na construção civil, é utilizada para vedação e impermeabilização, como em lagoas, sistemas de irrigação e impermeabilização de porões. Já na fundição, atua como agente ligante na preparação de areias de moldagem para produção de peças metálicas (ILHAN, 2023).

3.2.2. Argila Caulinita

A caulinita é um mineral argiloso resultante do intemperismo de feldspatos, caracterizado por sua aparência branca e pulverulenta. Recebeu o nome da localidade chinesa de Kaolin, famosa por ter inventado a porcelana, também conhecida como "china", utilizando esse mineral. A caulinita é amplamente utilizada na indústria cerâmica, mas possui uma capacidade de adsorção de íons menor em comparação a outros minerais argilosos, devido ao seu equilíbrio elétrico. Este grupo de minerais inclui, além da caulinita, a nacrita, dickita e halloysita, sendo os minerais argilosos mais comuns na natureza. Todos possuem uma estrutura em camadas 1:1, consistindo em uma folha de silicato tetraédrico e uma folha octaédrica, com dois terços dos sítios octaédricos ocupados por alumínio (BERGAYA; LEGALY, 2013).

O caulim é constituído principalmente de caulinita, um silicato de alumínio hidratado ($\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$). O termo "caulim" se refere tanto à rocha que contém caulinita como seu componente principal, quanto ao produto obtido após seu beneficiamento. É uma rocha de granulação fina, composta por material argiloso, geralmente com baixo teor de ferro, de cor branca ou quase branca. Devido às suas propriedades físicas e químicas, o caulim tem

diversas aplicações, sendo amplamente utilizado na produção de papéis, cerâmicas e materiais refratários (LUZ *et al.*, 2005).

Murray (1986 *apud* LUZ *et al.*, 2005) destaca que o amplo uso industrial do caulim decorre de suas propriedades tecnológicas, como inércia química em ampla faixa de pH, cor branca, capacidade de cobertura, fácil dispersão, baixa condutividade térmica e elétrica, maciez, baixa abrasividade e competitividade de custo. Por essas características, o caulim é amplamente empregado nas indústrias de papel, cerâmica branca, fibra de vidro, plástico, tintas, borracha, catalisadores para craqueamento de petróleo, concreto de alto desempenho e refratários, além de aplicações em cimento branco, pesticidas, vidros, adesivos e cosméticos.

Na indústria de papel, principal setor consumidor, o caulim é utilizado como carga e como pigmento de revestimento, melhorando propriedades como alvura, opacidade, brilho e qualidade de impressão. Na cerâmica branca, atua como fonte de alumina, contribuindo para resistência mecânica, refratariedade, controle de retração e formação de mulita durante a queima, sendo aplicado em porcelanas, revestimentos, sanitários e grês porcelanato. Na fibra de vidro, fornece sílica e alumina, participando da formação de materiais resistentes ao fogo. No setor de plásticos, funciona como carga funcional, melhorando propriedades mecânicas, térmicas e elétricas. Em tintas, contribui para estabilidade, opacidade, resistência e acabamento. Na borracha, atua como carga de reforço, aumentando resistência mecânica e à abrasão. O caulim também é empregado como suporte de catalisadores no craqueamento de petróleo, na forma de metacaulinita em concreto de alto desempenho, melhorando a reação pozzolânica e a durabilidade, e na fabricação de refratários sílico-aluminosos, utilizados em fornos e equipamentos sujeitos a altas temperaturas (LUZ *et al.*, 2005).

Além das matérias-primas inorgânicas, a incorporação de aditivos orgânicos tem sido amplamente utilizada com o objetivo de modificar a microestrutura dos materiais cerâmicos, sendo o amido um dos principais agentes formadores de poros.

3.3. AMIDO

O amido é um dos principais componentes produzidos pelas células vegetais, sendo superado apenas pela celulose em abundância. Trata-se de um polissacarídeo de reserva

constituído por dois tipos de polímeros de glicose: a amilose, de estrutura essencialmente linear, e a amilopectina, altamente ramificada. A estrutura do amido varia entre as espécies vegetais, podendo ser utilizada para identificação botânica e comparação com materiais arqueológicos. Esse composto é formado em organelas chamadas leucoplastos, onde se precipita e se dispersa no citoplasma celular. Os grãos de amido apresentam diferentes formas, tamanhos e estruturas, podendo ser simples ou compostos, com camadas bem definidas (UDA *et al.*, 2008).

O amido possui capacidade de formar gel em suspensões aquosas devido à presença de grupos hidroxila em sua estrutura, o que confere caráter hidrofílico aos grânulos. Em temperaturas abaixo de aproximadamente 50 °C, os grânulos permanecem insolúveis em água, permitindo seu processamento sem alteração estrutural. Entretanto, quando aquecidos entre 55 °C e 80 °C, ocorre enfraquecimento das ligações intermoleculares e os grânulos absorvem água, inchando rapidamente (LYCKFELDT; FERREIRA, 1998).

O amido é amplamente utilizado como agente formador de poros em materiais cerâmicos, pois sua composição orgânica permite que ele seja removido facilmente por queima durante a sinterização, sem deixar resíduos no material final. No processo denominado *starch consolidation casting* (SCC), o amido também pode atuar na formação do corpo cerâmico, aproveitando a capacidade de seus grânulos de inchar em meio aquoso quando aquecidos, o que promove a consolidação da suspensão cerâmica em moldes não porosos (GREGOROVÁ; PABST; BOHAČENKO, 2006).

De forma complementar, resíduos agroindustriais vêm sendo estudados como alternativas sustentáveis para substituição parcial de matérias-primas convencionais, destacando-se o bagaço de cana-de-açúcar devido à sua disponibilidade e potencial de aplicação

3.4. BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar, provavelmente originária da Índia, foi difundida pelos árabes e chineses para regiões do Mar Mediterrâneo e do Oceano Índico. Durante as Cruzadas, cavaleiros europeus passaram a consumir açúcar no Oriente e, ao retornarem à Europa, impulsionaram o comércio do açúcar produzido no Mediterrâneo, atividade que se manteve

até o início do século XVI. Com a conquista de Constantinopla pelos turcos em 1453, a produção açucareira na região entrou em declínio, permitindo que os portugueses assumissem o monopólio da produção após iniciarem o cultivo da cana em ilhas do Atlântico. No século XVI, a cultura foi introduzida no Brasil, marcando o início de uma trajetória que transformaria a produção açucareira em uma importante atividade econômica colonial (RODRIGUES; ROSS, 2020).

No território brasileiro, condições naturais favoráveis, como solos férteis, abundância de água, clima quente e relevo adequado, contribuíram para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. Inicialmente cultivada nas áreas litorâneas e posteriormente no interior, a produção dependia do trabalho escravo indígena e africano, sendo processada nos engenhos para a fabricação de açúcar destinado à exportação. Com o passar do tempo, esses engenhos foram substituídos pelas usinas sucroalcooleiras no século XX e, posteriormente, pelas atuais usinas sucroenergéticas, que processam a cana para produzir não apenas açúcar, mas também etanol, bioplásticos e energia a partir do bagaço (RODRIGUES; ROSS, 2020).

A expansão da produção de açúcar no Brasil colonial marcou o início da relevância do setor sucroalcooleiro na economia nacional, impulsionada pela demanda internacional e pelo desenvolvimento dos engenhos. Ao longo do tempo, o setor se modernizou e diversificou, incorporando a produção de álcool e ampliando sua importância econômica. Atualmente, além de seu papel histórico, destaca-se no contexto energético, especialmente pela produção de etanol como fonte renovável. O setor também contribui significativamente para a geração de empregos e o desenvolvimento regional, reforçando sua importância econômica e social no país (D'ALESSANDRO; CAVICHIOLI, 2024).

O reaproveitamento de resíduos na agroindústria da cana-de-açúcar é fundamental para a sustentabilidade do setor, permitindo o aproveitamento integral da matéria-prima e reduzindo impactos ambientais. Entre os principais subprodutos destacam-se o bagaço, a torta de filtro, o melaço e a vinhaça, cujas quantidades variam conforme o tipo de processo industrial adotado. O bagaço, rico em celulose, hemicelulose e lignina, é amplamente utilizado na geração de energia, enquanto a torta de filtro e a vinhaça apresentam elevado potencial como fertilizantes, embora esta última, quando descartada inadequadamente, possa causar sérios impactos ambientais, como contaminação do solo e de corpos hídricos (GURGEL *et al.*, 2024).

O bagaço da cana-de-açúcar é o principal resíduo gerado pela agroindústria brasileira. As usinas utilizam de 60% a 90% desse bagaço como fonte de energia para aquecer caldeiras e gerar eletricidade, substituindo a lenha usada anteriormente. Além do uso energético, o bagaço também é empregado na fabricação de papel, papelão, aglomerados, produtos químicos, construção civil, ração animal e biomassa. No entanto, ainda há um excedente significativo, que causa problemas de armazenamento e poluição. O bagaço é composto por cerca de 40% de celulose, 35% de hemicelulose e 15% de lignina, sendo que a celulose e a hemicelulose, que representam 70% do peso seco dos resíduos agrícolas, têm grande potencial comercial (FAPESP, 1998).

De modo geral, a maioria das pesquisas relacionadas ao uso de resíduos da cana-de-açúcar na produção de materiais cerâmicos concentra-se na utilização das cinzas do bagaço, obtidas após processos de combustão. No entanto, estudos recentes demonstram que o uso do bagaço de cana-de-açúcar *in natura* apresenta grande potencial como agente formador de poros na produção de suportes cerâmicos. A incorporação desse material contribui para o aumento da porosidade e para a obtenção de propriedades adequadas para aplicação em membranas de filtração, além de representar uma alternativa sustentável e de baixo custo para a valorização de resíduos agroindustriais (MACIEL *et al.*, 2025).

Dessa forma, o aproveitamento de resíduos agroindustriais, associado a materiais cerâmicos tradicionais, possibilita o desenvolvimento de estruturas porosas com propriedades adequadas para aplicações tecnológicas avançadas. Nesse contexto, destaca-se a produção de membranas cerâmicas de baixo custo, que têm sido amplamente investigadas para processos de separação e tratamento de efluentes.

3.5. MEMBRANAS CERÂMICAS

3.5.1. História das Membranas

O estudo sistemático dos fenômenos relacionados às membranas remonta ao século XVIII, quando o cientista Abbé Nollet apresentou o conceito osmose para descrever a passagem de água através de um diafragma. Durante os séculos XIX e início do XX, as membranas foram utilizadas principalmente como ferramentas laboratoriais para o

desenvolvimento de teorias físico-químicas, como os estudos de pressão osmótica que contribuíram para a formulação da equação de Van't Hoff. Inicialmente, materiais naturais como bexigas animais eram utilizados como membranas, sendo posteriormente substituídos por membranas de colódio (nitrocelulose), que ofereciam maior reprodutibilidade e controle do tamanho de poros (BAKER, 2004).

A partir da década de 1930, membranas microporosas começaram a ser fabricadas comercialmente e aplicadas principalmente em análises microbiológicas da água. Entretanto, até a década de 1960, a tecnologia de membranas ainda apresentava limitações relacionadas à baixa seletividade, fluxo reduzido, custo elevado e baixa confiabilidade. Um avanço fundamental ocorreu no início dos anos 1960 com o desenvolvimento do processo Loeb–Sourirajan, que permitiu a produção de membranas anisotrópicas de osmose reversa com alto fluxo e maior eficiência, possibilitando sua aplicação industrial, especialmente na dessalinização da água (BAKER, 2004).

A partir desse período, houve um grande crescimento na tecnologia de membranas, com o desenvolvimento de novos processos como microfiltração, ultrafiltração, eletrodialise e separação de gases. Além das aplicações industriais, as membranas também passaram a desempenhar papel essencial na área médica, destacando-se na hemodiálise (rim artificial), oxigenadores sanguíneos e sistemas de liberação controlada de fármacos. Assim, entre as décadas de 1960 e 1980, a tecnologia de membranas evoluiu de aplicações laboratoriais para processos amplamente utilizados na indústria e na medicina (BAKER, 2004).

A indústria química é essencialmente uma indústria de transformação que precisa separar, concentrar e purificar substâncias químicas para obter produtos finais com especificações desejadas. Esse processo tem sido um grande desafio desde o início da indústria. A partir da década de 1970, novos processos de separação emergiram, incluindo o uso de membranas sintéticas como barreira seletiva, além dos métodos clássicos como destilação, filtração, absorção, troca iônica, centrifugação, extração por solvente e cristalização. As membranas sintéticas foram desenvolvidas com o objetivo de reproduzir o desempenho membranas naturais, destacando-se por sua elevada seletividade e capacidade de permeabilidade, características que as tornam eficientes em processos de separação (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

3.5.2. Tipos de Membranas

A tecnologia de membranas representa um avanço significativo em comparação aos métodos tradicionais de separação, purificação e concentração em diversas indústrias, escolhida por sua relação custo-benefício, facilidade de operação, baixo uso de produtos químicos e características ambientais favoráveis. Este método usa membranas semipermeáveis para separar componentes de uma mistura com base em tamanho, carga ou afinidade, atuando como barreiras seletivas. As membranas são classificadas em simétricas e assimétricas e os processos de separação incluem microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa, dependendo do tamanho dos poros. Classificações geométricas incluem membranas planas, tubulares, capilares e de fibra oca, enquanto os materiais abrangem membranas orgânicas (poliméricas) e inorgânicas (cerâmicas). Pesquisas recentes têm favorecido as membranas cerâmicas devido à sua estabilidade superior, resistência a altas temperaturas, e maior durabilidade, sendo aplicáveis em setores como tratamento de água, biotecnologia, farmacêutico, alimentos e bebidas, eletrônica, energia e medicina, conforme apresentado na Tabela 1 (KANTH, 2025).

Tabela 1: Exemplos de aplicações de Processos de Separação por Membranas

Setor	Aplicações
Indústria Química	Separação de misturas gasosas (CO_2/CH_4), recuperação de H_2 , fracionamento de ar, quebra de azeótropos.
Biotecnologia	Purificação de enzimas, fracionamento de proteínas, esterilização de meios de fermentação, biorreatores a membranas.
Alimentícia	Concentração de leite, soro e sucos; clarificação e desalcoholização de bebidas.
Tratamento de Água	Dessalinização, desmineralização, produção de água ultrapura, remoção de contaminantes orgânicos.
Efluentes Industriais	Separação óleo/água, recuperação de metais, remoção de sólidos dissolvidos.
Medicina	Hemodiálise, oxigenadores, liberação controlada de fármacos.

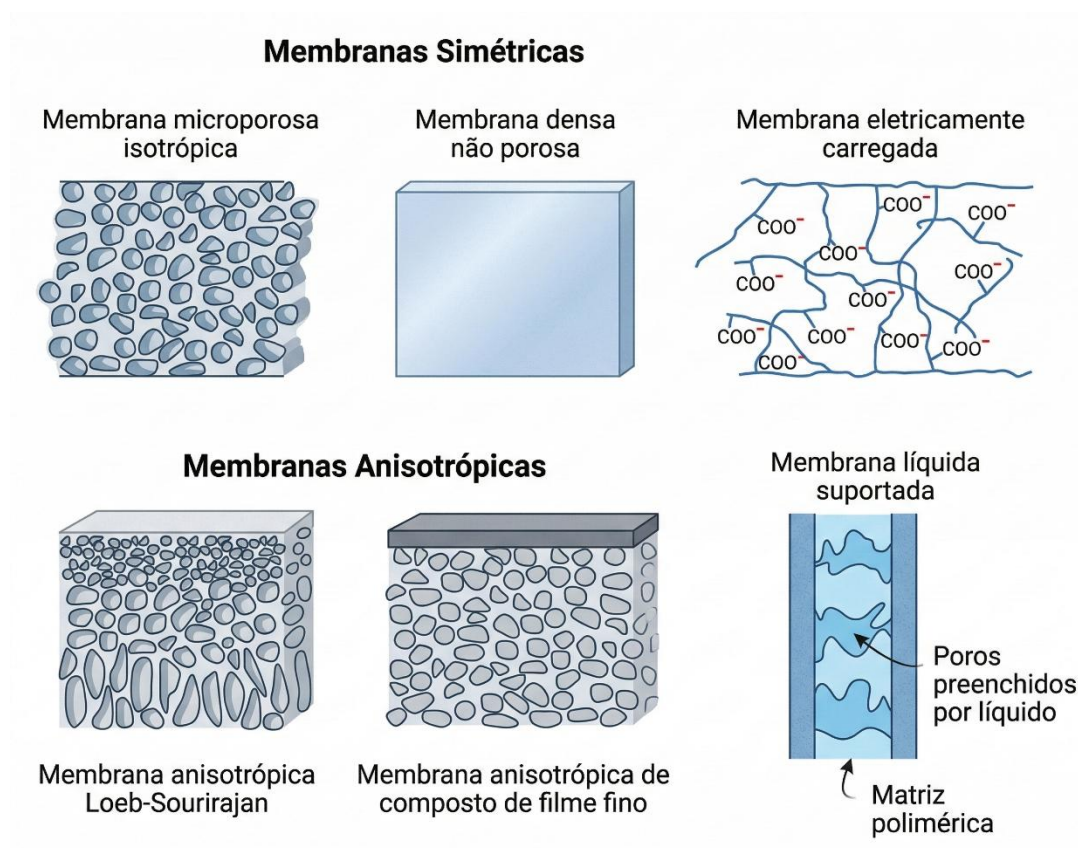
Fonte: Adaptado de HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006.

As membranas microporosas possuem estrutura semelhante à de filtros convencionais, apresentando poros interconectados distribuídos aleatoriamente, com diâmetros geralmente entre 0,01 e 10 μm . Nesse tipo de membrana, a separação ocorre principalmente por exclusão de tamanho, sendo amplamente utilizadas em processos como microfiltração e ultrafiltração. Já as membranas densas não porosas são constituídas por filmes compactos nos quais o transporte das espécies ocorre por difusão através do material da membrana, impulsionado por gradientes de pressão, concentração ou potencial elétrico (BAKER, 2004).

Outro tipo importante são as membranas carregadas eletricamente, que apresentam grupos com cargas fixas positivas ou negativas em sua estrutura. A separação nessas membranas ocorre principalmente pela exclusão eletrostática de íons com a mesma carga presente na membrana, sendo amplamente empregadas em processos de eletrodialise. Além disso, destacam-se as membranas anisotrópicas, que possuem uma camada seletiva extremamente fina suportada por uma estrutura porosa mais espessa, responsável por fornecer resistência mecânica e permitir maiores taxas de fluxo (BAKER, 2004).

Além das membranas poliméricas, que representam a maioria das aplicações industriais, também existem membranas produzidas a partir de materiais inorgânicos, como cerâmicas e metais. As membranas cerâmicas destacam-se por sua elevada estabilidade térmica, resistência química e durabilidade, sendo amplamente utilizadas em processos de microfiltração e ultrafiltração, especialmente em aplicações relacionadas ao tratamento de água e efluentes (BAKER, 2004). A classificação estrutural dos diferentes tipos de membranas é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Classificação estrutural dos diferentes tipos de membranas.



Fonte: Adaptado de Baker (2004), com ilustração gerada e aprimorada por inteligência artificial.

3.5.3. Mecanismos de Transporte através de Membrana

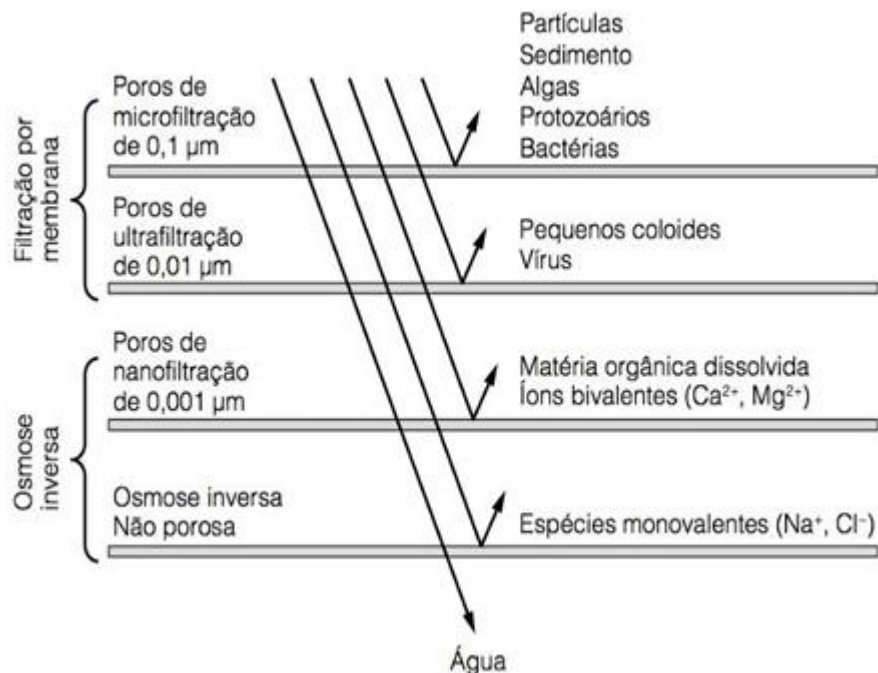
Os parâmetros para caracterização de membranas incluem a morfologia, como a distribuição do tamanho dos poros e a porosidade superficial para membranas porosas, e propriedades físico-químicas, como a espessura do filme para membranas densas. Para membranas compostas, também são consideradas as características do suporte poroso. Propriedades de transporte, como permeabilidade e capacidade seletiva, são parâmetros críticos em todos os tipos de membranas (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

Para a separação de componentes através de membranas, é necessário um transporte que ocorre de três maneiras principais. O "transporte passivo" é a forma mais simples, podendo ser convectivo ou difusivo, onde a membrana atua como barreira física, com o transporte impulsionado por um gradiente de potencial químico, que pode ser gerado por

diferenças de pressão, concentração ou temperatura entre as fases separadas. Além disso, um gradiente de potencial elétrico também pode provocar a separação. A segunda forma é o "transporte facilitado", que também usa o gradiente de potencial químico como força motriz, mas envolve um transportador específico que interage com os componentes na fase membrana. Essa forma é uma variação do transporte passivo e é característica das membranas líquidas. Por último, o "transporte ativo" ocorre quando os componentes são movidos contra o gradiente de potencial químico, sendo a força motriz fornecida por reações químicas que ocorrem na fase membrana. Esse tipo de transporte é encontrado em biomembranas, como a membrana plasmática das células (DIEL, 2010).

Os processos de separação por membranas têm evoluído bastante devido a demandas tecnológicas e ambientais, oferecendo vantagens como operação em fluxo contínuo e trabalho à temperatura ambiente. Esses processos, como nanofiltração, ultrafiltração e microfiltração, são aplicáveis em purificação na indústria farmacêutica e alimentícia, tratamento de água e efluentes. A microfiltração é utilizada, por exemplo, na clarificação de sucos e no pré-tratamento de água. Os processos de osmose reversa e nanofiltração necessitam de pré-tratamento para evitar entupimentos das membranas, que também são usadas em separações microscópicas e na extração de lignina como biocombustível. Além disso, membranas inorgânicas e catalíticas estão surgindo como alternativas promissoras, especialmente na produção de combustíveis renováveis, como o etanol, a partir da fixação do carbono atmosférico. Elas também desempenham um papel importante na produção de gás de síntese, reforçando sua relevância em diversas tecnologias voltadas para a sustentabilidade. (ARMOA; JAFELICCI, 2011). A Figura 2 ilustra de maneira clara a classificação dos processos de filtração por membranas.

Figura 2 - Classificação dos processos de filtração por membranas.



Fonte: Howe *et al.*, 2016.

3.5.4. Membranas Cerâmicas de Baixo Custo

Os requisitos essenciais para membranas incluem alta permeabilidade, seletividade, resistência mecânica, estabilidade química e térmica, baixa obstrução, longa vida útil e custo de produção competitivo. Membranas poliméricas atendem a maioria dessas exigências, dominando o comércio mundial. Contudo, o desenvolvimento de membranas inorgânicas tem avançado para resolver problemas específicos enfrentados por membranas poliméricas em condições exigentes, como altas temperaturas e ambientes agressivos. Embora as membranas inorgânicas, como as cerâmicas, sejam promissoras, apresentam limitações como fragilidade e elevados custos de produção. Apesar disso, sua aplicabilidade em ambientes hostis torna sua fabricação viável devido à maior durabilidade (BENITO; CONESA; RODRÍGUEZ, 2004).

Membranas cerâmicas possuem propriedades importantes, como elevada resistência mecânica, estabilidade térmica e resistência a ambientes químicos agressivos. Apesar dessas

vantagens, seu alto custo tradicionalmente limita sua aplicação. Por isso, pesquisas recentes têm buscado desenvolver membranas de menor custo, utilizando matérias-primas abundantes e economicamente acessíveis, como argila, caulim, zeólita e bauxita. Diferentemente da alumina sintética, cujo processamento envolve etapas de purificação e síntese de elevado custo energético, os minerais naturais como caulim e bentonita requerem apenas beneficiamento físico, o que reduz substancialmente o custo da matéria-prima sem comprometer as propriedades estruturais essenciais ao suporte cerâmico. Além disso, esses materiais possibilitam a utilização de menores temperaturas de sinterização, tornando a fabricação dessas membranas mais viável economicamente (LORENTE-AYZA *et al.*, 2015). Os materiais alternativos empregados na fabricação de membranas de baixo custo podem ser observados na Figura 3.

Figura 3 - Materiais alternativos para fabricação de membranas de baixo custo



Fonte: Adaptado de Kanth, 2025.

Além disso, estudos têm explorado diferentes composições e métodos de fabricação para melhorar o desempenho das membranas cerâmicas. Materiais como mulita, obtidos a partir de argilas e caulim, apresentam boas propriedades térmicas, químicas e mecânicas, sendo utilizados em diversas aplicações de separação. Para aumentar a porosidade e controlar o tamanho dos poros, podem ser adicionados formadores de poros orgânicos ou inorgânicos,

como amido e carbonato de cálcio. As membranas podem ser produzidas em diferentes configurações, como planas ou tubulares, sendo a extrusão e a prensagem métodos comuns de fabricação. O método de conformação influencia diretamente a microestrutura e as propriedades finais do material, o que torna importante o estudo desses processos na produção de suportes cerâmicos para membranas (LORENTE-AYZA *et al.*, 2015).

A produção de membranas cerâmicas porosas a partir de materiais de baixo custo tem despertado crescente interesse, especialmente devido à importância da escolha adequada das matérias-primas e aditivos para o desempenho final. Apesar dos avanços, o uso industrial dessas membranas ainda é limitado pelo alto custo de materiais convencionais, o que tem impulsionado pesquisas voltadas à utilização de matérias-primas mais acessíveis. O desempenho das membranas, principalmente em termos de permeabilidade e rejeição, possibilita sua aplicação em diversos setores, como alimentos, farmacêutico, biotecnológico, petroquímico e no tratamento de água, destacando seu potencial em soluções ambientais (CARMO *et al.*, 2020).

3.6. INDÚSTRIA TÊXTIL

A evolução da humanidade é marcada por transformações significativas nos modos de produção, destacando-se, no contexto industrial, quatro grandes revoluções industriais. A Primeira Revolução Industrial, iniciada no século XVIII na Inglaterra, promoveu a substituição do trabalho artesanal pela produção mecanizada, impulsionada pelo uso da máquina a vapor, especialmente no setor têxtil, resultando em intensa urbanização e mudanças nas condições de trabalho. Posteriormente, a Segunda Revolução Industrial, a partir de meados do século XIX, introduziu novas fontes de energia, como a eletricidade, além do motor a combustão, avanços na metalurgia e nos meios de comunicação, ampliando a produção e a eficiência industrial. Já a Terceira Revolução Industrial, iniciada no século XX, caracterizou-se pelo avanço da informática, da automação, da robótica e de tecnologias como a biotecnologia e a indústria espacial, consolidando a globalização e promovendo maior integração entre os mercados e sistemas produtivos (FRAGA; SANTOS, 2020).

Nesse contexto de transformações tecnológicas e produtivas, destaca-se o papel da indústria têxtil, que acompanhou e foi diretamente impactada por essas mudanças ao longo da história. A indústria têxtil no Brasil tem origem ainda no período pré-colonial, com a

produção de tecidos pelos povos indígenas. Durante o período colonial, houve desenvolvimento inicial da produção têxtil, especialmente com o algodão no Norte e Nordeste, porém esse avanço foi interrompido em 1785 pelo alvará de D. Maria I, que proibiu as manufaturas para preservar os interesses agroexportadores da colônia. Com a chegada da corte portuguesa em 1808, a atividade foi retomada, mas enfrentou dificuldades devido à concorrência de produtos ingleses favorecidos por acordos comerciais. Apenas a partir de 1844, com a Tarifa Alves Branco, houve estímulo indireto à indústria nacional. Ao longo do século XIX, a indústria têxtil se expandiu, inicialmente no Nordeste e depois concentrando-se no Centro-Sul, impulsionada por fatores como infraestrutura e disponibilidade de mão de obra. No final do século, o setor já apresentava crescimento significativo, com diversas fábricas em operação. No início do século XX, o Brasil passou a exportar algodão e consolidou polos industriais, especialmente em São Paulo, mantendo o algodão como principal base produtiva do setor (FUJITA; JORENTE, 2015).

Atualmente, como resultado desse processo histórico de consolidação e expansão, a indústria têxtil e de confecção brasileira apresenta grande relevância no cenário produtivo nacional. Caracteriza-se por possuir uma cadeia produtiva completa, que abrange desde a produção de fibras até a confecção de produtos finais. O setor é composto por mais de 32 mil empresas distribuídas em todo o território nacional, sendo majoritariamente formado por pequenas e médias confecções, e emprega cerca de 1,7 milhão de pessoas diretamente. Além disso, a produção nacional é fortemente voltada ao mercado interno, responsável por aproximadamente 97,5% do consumo, com destaque para a produção anual de bilhões de peças e significativa participação do algodão como matéria-prima. Apesar de sua importância econômica, representando cerca de 6% do valor da produção da indústria de transformação, o setor enfrenta desafios relacionados à perda de competitividade, redução da produção e aumento da presença de produtos importados no mercado interno (ABIT, 2013).

Nesse cenário, além de sua relevância econômica, a indústria têxtil também se destaca pelos impactos ambientais associados às suas atividades produtivas, especialmente pela geração de efluentes. Esses efluentes apresentam elevado potencial poluidor, principalmente devido à presença de corantes que não se fixam completamente às fibras durante o processo de tingimento, resultando em águas residuárias altamente coloridas. Os corantes sintéticos são amplamente utilizados em diversos setores industriais, com destaque para o setor têxtil.

Esses compostos são produzidos em grande escala mundial. Estruturalmente, os corantes são compostos por um grupo cromóforo, responsável pela cor, e uma estrutura responsável pela fixação à fibra. Entre os principais grupos, destacam-se os azocorantes, que representam cerca de 60% dos corantes utilizados, além dos corantes reativos, que se ligam quimicamente às fibras. A presença desses compostos nos corpos hídricos pode causar impactos ambientais significativos, como a interferência na fotossíntese e potenciais efeitos tóxicos, incluindo caráter carcinogênico e mutagênico. Diante desses impactos, torna-se essencial o desenvolvimento de tecnologias eficientes para o tratamento de efluentes têxteis (KUNZ *et al.*, 2002).

3.7. TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS

Despejos industriais, também conhecidos como águas residuais ou efluentes industriais, referem-se a correntes líquidas ou suspensões originadas de diversos processos industriais e operações, que podem incluir águas pluviais contaminadas e esgotos sanitários. Esses efluentes apresentam características que dificultam seu reaproveitamento técnico e econômico na fonte geradora, levando à sua destinação direta ou indireta a corpos receptores. A composição e a quantidade dos despejos variam amplamente, influenciadas pela diversidade dos produtos fabricados, natureza da indústria, grau de modernidade dos processos produtivos, tipos de matérias-primas utilizadas e práticas de reciclagem e reuso. Até indústrias do mesmo setor podem gerar efluentes distintos devido a variáveis nos processos produtivos e nas práticas de produção sustentável. Antes de serem lançados em corpos receptores, esses despejos requerem tratamento para atender a padrões sanitários, ambientais e legais, visando a preservação do meio ambiente e a integridade das águas que serão utilizadas para diferentes propósitos, incluindo abastecimento de água. Os despejos industriais podem conter uma ampla gama de características físico-químicas e bioquímicas, além de componentes biológicos como bactérias. As classes de compostos que podem estar presentes nos efluentes incluem sólidos totais dissolvidos (SDT), gases dissolvidos ionizáveis (GDI), compostos orgânicos dissolvidos (COD), sólidos em suspensão (SS) e microrganismos como bactérias e vírus (CAVALCANTI, 2016).

Diante da necessidade de controle e tratamento desses efluentes, a Resolução do

CONAMA nº 357/2005, o tratamento de efluentes é fundamental para garantir que os lançamentos em corpos hídricos atendam às condições e padrões de qualidade estabelecidos, de forma a não comprometer a saúde humana, o equilíbrio ecológico e os usos preponderantes da água. A resolução define limites para diversos parâmetros físico-químicos e biológicos, além de estabelecer critérios para o controle da poluição e a classificação dos corpos d'água, visando assegurar a manutenção da qualidade ambiental. Nesse contexto, o tratamento de efluentes deve ser capaz de reduzir a carga poluidora a níveis que não causem efeitos tóxicos aos organismos aquáticos nem alterem as características naturais da água, sendo essencial para o atendimento às exigências legais e para a preservação dos recursos hídricos (CONAMA, 2005).

Para atender a esses padrões estabelecidos, o tratamento de efluentes industriais utiliza processos e operações unitárias que envolvem métodos físicos, químicos e biológicos, utilizados de forma isolada ou combinada, com o objetivo de remover contaminantes e entrar em conformidade com os padrões ambientais. As operações unitárias referem-se a processos físicos, como gradeamento, sedimentação, flotação e filtração, que promovem a separação de fases, enquanto os processos unitários envolvem reações químicas ou biológicas responsáveis pela transformação dos poluentes. Os tratamentos químicos incluem coagulação, floculação, precipitação, oxidação-redução e processos oxidativos avançados, sendo eficazes na remoção de sólidos, metais e compostos orgânicos recalcitrantes. Já os processos biológicos utilizam a ação de microrganismos para degradar matéria orgânica biodegradável, destacando-se sistemas aeróbios e anaeróbios. Além disso, tecnologias avançadas, como processos por membranas (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa), vêm ganhando destaque por sua elevada eficiência na remoção de contaminantes, permitindo inclusive a separação de espécies dissolvidas. Dessa forma, a escolha do tratamento adequado depende da natureza dos poluentes e dos requisitos de lançamento ou reuso, sendo comum a integração de diferentes processos para maior eficiência (CAVALCANTI, 2016).

O crescimento populacional e a industrialização intensiva, combinados com a má gestão dos recursos naturais e altos níveis de poluição, têm gerado preocupações globais significativas. O desenvolvimento industrial é um dos principais fatores que exacerbam esses problemas, resultando na produção de grandes quantidades de resíduos sólidos e efluentes

líquidos e gasosos, frequentemente descartados inadequadamente. Em resposta, as indústrias estão se adaptando para cumprir a legislação ambiental e promover crescimento sustentável, integrando fatores econômicos, sociais e ambientais. O setor têxtil é especialmente poluente, consumindo grandes volumes de água em relação ao material processado e gerando efluentes altamente coloridos devido ao uso de corantes, que não se fixam nas fibras durante o tingimento. Esses efluentes possuem carga orgânica elevada e substâncias tóxicas que requerem tratamento adequado antes do descarte em sistemas de esgoto ou corpos d'água (CRUZ, 2015).

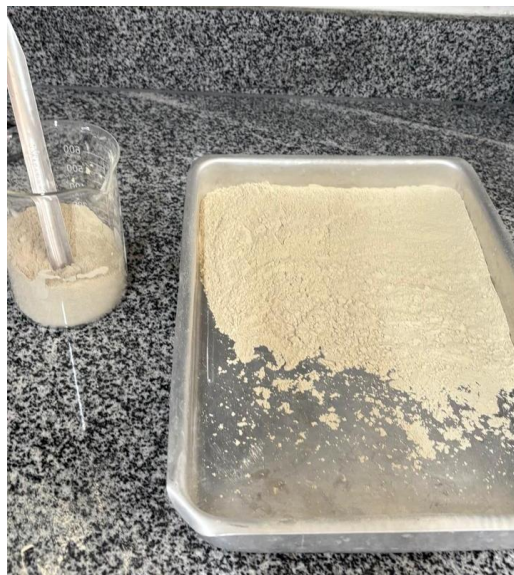
4. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido em parceria com o Laboratório de Fenômenos de Transporte (LFT), Laboratório de Bioengenharia (LABIO) e Laboratório de Operações Unitárias (LOU), pertencentes ao Departamento de Engenharia Química; Laboratório de Ensaaios Mecânicos, pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica; Laboratório de Materiais e Química Ambiental (LABMAQ), pertencente ao Centro de Energias Alternativas e Renováveis; Laboratório de Materiais Cerâmicos e Laboratório de Purificação e Aspersão de Minerais Argilosos, pertencentes ao Departamento de Engenharia de Materiais, todos vinculados ao Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. Destaca-se também a contribuição do Núcleo de Pesquisa e Extensão – Laboratório de Combustíveis e Materiais (NPE-LACOM/UFPB), pela realização de análises e suporte técnico fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Ademais, contou-se com a colaboração do Laboratório de Desenvolvimento de Novos Materiais (LABNOV), pertencente ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O apoio das empresas PEGMATECH – Especialidades Tecnológicas LTDA, METALTEC – Serviços de Usinagem e do Laboratório de Controle de Qualidade da Elizabeth Cimentos foi igualmente fundamental para o sucesso desta pesquisa.

4.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O processo de preparação das amostras envolveu a separação das argilas, incluindo argila bentonita sódica *in natura* fornecida pela empresa PEGMATECH e a argila caulinita fornecida pelo Laboratório de Purificação e Aspersão de Minerais Argilosos, bem como o bagaço da cana-de-açúcar proveniente do Laboratório de Bioengenharia e o amido de milho comercial foi adquirido em comércio local. Inicialmente, as argilas foram peneiradas individualmente utilizando uma malha granulométrica de 200 *mesh* por meio de agitação manual e auxílio de um pincel, visando obter um material uniforme, como pode ser visto nas Figuras 4, 5 e 6. Posteriormente, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 100°C por 24 horas e armazenadas em recipientes adequados no dessecador.

Figura 4 - Bentonita sódica peneirada utilizada na confecção de membranas cerâmicas



Fonte: Autoral, 2026.

Figura 5 - Peneiramento da caulinita utilizado na preparação das pastilhas cerâmicas.



Fonte: Autoral, 2026.

Figura 6 - Amido de milho peneirado utilizado na produção da membrana cerâmica.



Fonte: Autoral, 2026.

O bagaço de cana-de-açúcar foi submetido à moagem em moinho de facas do tipo Willey SL-31, da marca Solab, utilizando peneira com abertura de 30 *mesh*. Após a etapa de moagem, o material foi seco em estufa a 100 °C por 24 horas e, posteriormente, peneirado em malha de 200 *mesh*, seguindo procedimento semelhante ao aplicado às demais amostras. O amido de milho também foi submetido à secagem em estufa a 100 °C durante 24 horas. As etapas do processamento do bagaço de cana-de-açúcar estão presentes da Figura 7.

Figura 7 – Etapas do processamento do bagaço de cana-de-açúcar: (a) bagaço *in natura*; (b) moagem em moinho de facas; (c) material moído; (d) bagaço peneirado para uso na preparação das amostras.



Fonte: Autoral, 2026.

4.2. PRODUÇÃO E SINTERIZAÇÃO DO SUPORTE CERÂMICO

A membrana cerâmica foi preparada utilizando 70% em massa da argila bentonita sódica *in natura*, 20% em massa do caulim, 5% do bagaço da cana-de-açúcar e 5% amido de milho.

A mistura foi conduzida ao moinho de bolas da marca Servitech Moinho CT – 241 como apresentado na Figura 8, por um período de 2 horas. Em seguida, os materiais foram submetidos a secagem à 100 °C por um período de 24 horas. Os suportes cerâmicos foram preparados pelo método de compactação uniaxial a seco (ARAÚJO, 2021; CARMO *et al.*, 2020). Em seguida, foram pesados 3 gramas desta mistura em uma balança analítica e colocada em um molde de 27 mm de diâmetro confeccionado pelo patrocinador METALTEC como apresentado na Figura 9, onde foi prensada em uma prensa hidráulica da marca Prensa Hidráulica 30 Toneladas - MARCON-MPH-30 como mostrado na Figura 10, por 2 minutos e com uma pressão de 3 toneladas, originando a membrana cerâmica plana em forma de disco.

Figura 8 - Moinho de bolas Servitech CT-241 utilizado na homogeneização da mistura das matérias-primas para a preparação das membranas cerâmicas.



Fonte: Autoral, 2026.

Figura 9 - Conjunto de molde metálico de 27 mm utilizado na prensagem das pastilhas cerâmicas.



Fonte: Autoral, 2026.

Figura 10 - Prensa hidráulica MARCON-MPH-30 utilizada na compactação das amostras para obtenção das pastilhas cerâmicas.

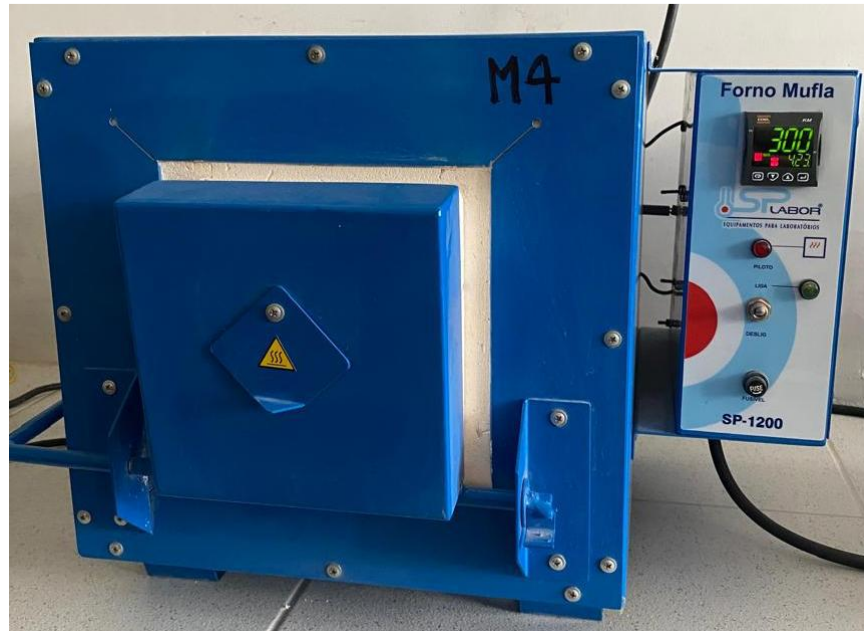


Fonte: Autoral, 2026.

Essas membranas foram levadas a estufa para uma pré-secagem a 100 °C por 24 horas para retirar a umidade nelas presente. Por fim, as membranas foram sinterizadas à 650 °C

durante 3 horas em um forno mufla, da marca SP Labor modelo SP-1200 como apresentado na Figura 11, com rampa de aquecimento de 5 °C/min.

Figura 11: Forno mufla SP Labor modelo SP-1200 utilizado no processo de sinterização das membranas cerâmicas.



Fonte: Autoral, 2026.

4.3. PARÂMETROS AVALIADOS

4.3.1. Difração de Raios-X (DRX)

A difração de raios X (DRX) é uma técnica não destrutiva utilizada para a caracterização de materiais cristalinos, permitindo a identificação de fases, estruturas e organização atômica. O princípio da técnica baseia-se na interação de um feixe monocromático de raios X com os planos cristalinos da amostra, gerando padrões de difração em ângulos específicos devido à interferência construtiva das ondas. O difratograma obtido funciona como uma “impressão digital” do material, possibilitando a identificação das fases presentes por comparação com padrões de referência (SILVA, 2020).

A Difração de Raios-X foi realizada utilizando um difratômetro da marca Shimadzu

XRD-6000 com radiação $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40 KV, corrente de 30mA, tamanho do passo de 0,02 θ e tempo por passo de 1,0s, com velocidade de varredura de 2 $^{\circ}(2\theta)$ /min, com ângulo 2θ percorrido de 2 $^{\circ}$ a 50 $^{\circ}$.

4.3.2. Fluorescência de Raios-X (FRX)

A fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF) é uma técnica analítica não destrutiva utilizada para determinar a composição química elementar de diferentes materiais. O princípio da técnica baseia-se na incidência de raios X sobre a amostra, promovendo a excitação dos átomos presentes. Como resultado, esses átomos emitem radiação característica, cuja energia é específica para cada elemento químico. Essa radiação é detectada e analisada, permitindo identificar e quantificar os elementos presentes na amostra de forma rápida e eficiente (XAVIER, 2024).

Fluorescência de Raio X empregando a Norma ABNT NBR 14656 – Cimento Portland e Matérias Primas – Análises Químicas por Espectrometria de Raios X. O equipamento utilizado para análise foi o Axios – Cement – Panalytical, com pastilhas fundidas provenientes da máquina de fusão elétrica Panalytical THEOX ADVANCED foi realizada para as amostras de argila bentonita sódica *in natura* e a caulinita.

4.3.3. Análise Termogravimétrica (TG)

A Análise Termogravimétrica (TGA) é uma técnica termoanalítica que permite acompanhar a variação da massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo, sob condições controladas de aquecimento ou resfriamento. Dessa forma, torna-se possível avaliar fenômenos como perda de umidade, decomposição térmica e transformações estruturais dos materiais (DENARI; CAVALHEIRO, 2012).

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada sob aquecimento controlado, com taxa de aquecimento de 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, desde a temperatura ambiente até aproximadamente 810 $^{\circ}\text{C}$. Durante o ensaio, foi monitorada a variação da massa da amostra em função da temperatura, permitindo a avaliação dos eventos de perda de massa associados à decomposição térmica dos constituintes orgânicos e transformações estruturais do material.

4.3.4. Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica não destrutiva baseada na absorção de radiação eletromagnética, que promove vibrações moleculares características das ligações químicas presentes na amostra. A partir do espectro obtido, é possível identificar grupos funcionais e obter informações sobre a composição química, estrutura molecular e propriedades do material (XAVIER, 2024).

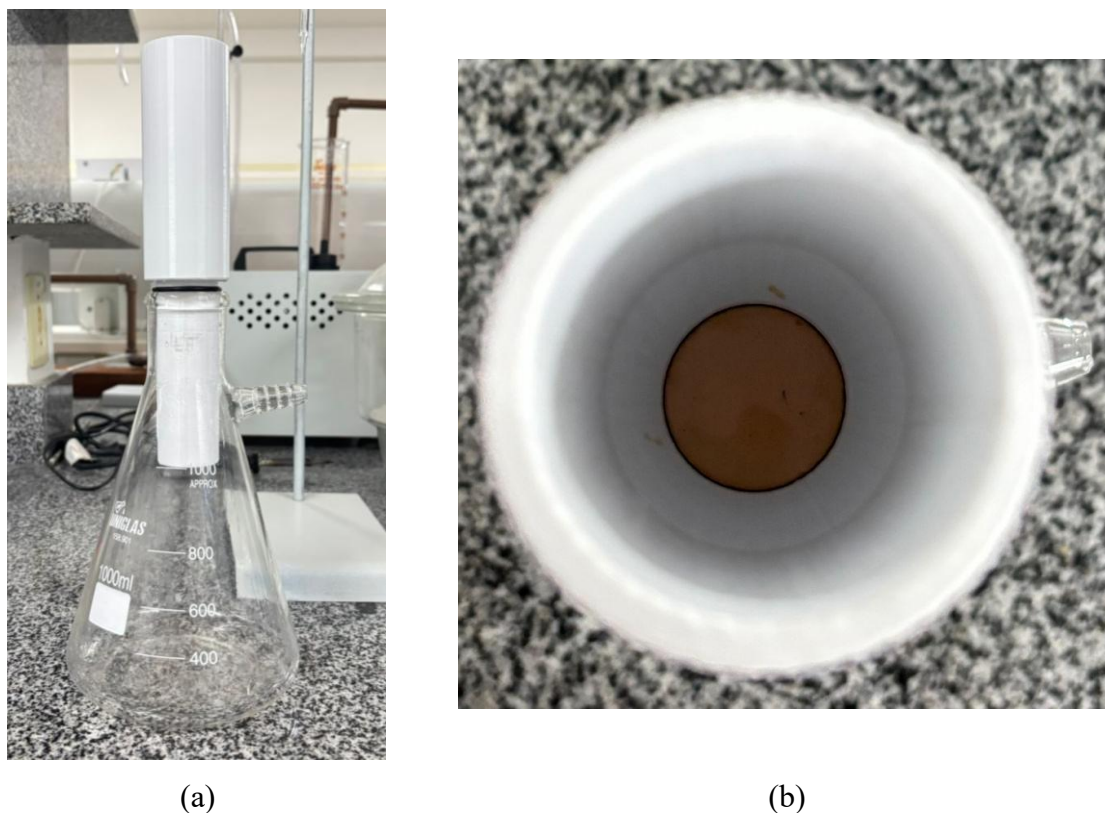
A análise por espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi realizada utilizando um espectrômetro de infravermelho Shimadzu, modelo IRPrestige-21. Os espectros foram obtidos na faixa de 4000 a 400 cm^{-1} , com o objetivo de identificar os grupos funcionais presentes nas amostras e avaliar possíveis modificações estruturais após o tratamento térmico.

4.3.5. Desenvolvimento do Sistema de Filtração

Para a realização dos ensaios de filtração, foi desenvolvido um protótipo de funil de Büchner por meio de impressão 3D de autoria própria através do software *SolidWorks*, visando adaptar o sistema às dimensões e características das membranas cerâmicas produzidas neste estudo. O uso da manufatura aditiva permitiu a obtenção de um dispositivo personalizado, com geometria adequada para acomodação das pastilhas cerâmicas e vedação eficiente durante o processo de filtração.

O protótipo foi projetado de forma a permitir sua integração a um sistema de filtração a pressão atmosférica e promovendo o escoamento do fluido através da membrana. Essa abordagem possibilitou maior controle experimental, reprodutibilidade dos ensaios e redução de custos em comparação com equipamentos comerciais. O protótipo desenvolvido para o sistema de filtração é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Dispositivo de filtração desenvolvido por impressão 3D, baseado no princípio do funil de Büchner, para filtração das pastilhas cerâmicas.



Fonte: Autoral, 2026.

4.3.6. Ensaio de Filtração e Determinação da Eficiência de Remoção

Para avaliação do desempenho das membranas cerâmicas no tratamento de efluentes, foram realizados ensaios de filtração utilizando soluções sintéticas de corante. O efluente foi preparado a partir de uma solução mãe de 200 ppm do corante Vermelho Quimiflux BF 3 RS, a qual foi devidamente diluída para obtenção das concentrações de 20, 15, 10 e 5 ppm em balões volumétricos de 250 mL.

O sistema de filtração foi montado utilizando um conjunto adaptado de filtração, no qual a membrana cerâmica foi posicionada como meio filtrante. Durante os ensaios, volumes conhecidos da solução foram submetidos à filtração, sendo coletado o permeado para posterior análise. A montagem do sistema de filtração utilizado nos ensaios é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Sistema de filtração utilizado na avaliação do desempenho das membranas cerâmicas.



Fonte: Autoral, 2026.

A eficiência de remoção do corante foi avaliada por meio de análises espectrofotométricas, com base nos valores de absorbância obtidos antes e após a filtração. A partir desses dados, foi possível verificar a capacidade de retenção da membrana em função da concentração inicial do efluente. As análises de absorbância foram realizadas utilizando um espectrofotômetro modelo U2M (Quimis), operando no comprimento de onda de 540 nm, adequado para a detecção do corante utilizado nas soluções estudadas. O equipamento utilizado nas análises é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Espectrofotômetro modelo U2M (Quimis) utilizado nas análises.



Fonte: Autoral, 2026.

A eficiência de remoção do corante foi calculada a partir da relação entre a absorbância inicial da solução e a absorbância final média do permeado, conforme apresentado na Equação (1).

$$R(\%) = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

Sabendo que:

- A_0 : absorbância inicial da solução;
- A_f : absorbância final média após a filtração.

4.3.7. Determinação do Volume Aparente

O volume aparente das membranas cerâmicas foi determinado com base no princípio de Arquimedes, utilizando as massas seca e imersa das amostras. Esse método considera o empuxo exercido pelo fluido durante a imersão, permitindo calcular o volume total da amostra, incluindo os poros abertos. O volume aparente foi obtido pela diferença entre a massa saturada ao ar e a massa imersa em água, considerando a densidade da água na

temperatura do ensaio. Esse parâmetro é fundamental para a determinação de propriedades como porosidade e densidade aparente, conforme estabelecido na norma ABNT NBR ISO 10545-3 (ABNT, 2020). A Equação (2) apresenta a relação utilizada para o cálculo do volume aparente.

$$V_{aparente} = \frac{m_{sat} - m_i}{\rho_{\text{água}}} \quad (2)$$

Sabendo que:

- m_{sat} : massa saturada ao ar (g);
- m_i : massa aparente imersa em água (g);
- $\rho_{\text{água}}$: densidade da água (g/cm^3) na temperatura do ensaio;
- $V_{aparente}$: volume aparente da amostra (cm^3).

4.3.8. Determinação da Absorção de Água

A absorção de água foi determinada a partir da diferença entre a massa saturada ao ar e a massa seca das membranas cerâmicas. Inicialmente, as amostras foram secas em estufa até massa constante e, em seguida, submetidas ao processo de saturação em água, garantindo o preenchimento dos poros abertos. Após a saturação, as amostras foram pesadas e a absorção de água foi calculada como a razão entre a massa de água absorvida e a massa seca da amostra, expressa em porcentagem. Esse parâmetro está diretamente relacionado à quantidade de poros abertos presentes no material, conforme descrito na norma ABNT NBR ISO 10545-3 (ABNT, 2020). A Equação (3) apresenta a relação utilizada para o cálculo da absorção de água.

$$AA(\%) = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100 \quad (3)$$

Sabendo que:

- m_s : massa seca da amostra (g);

4.3.9. Determinação de fluxo

Inicialmente, as membranas cerâmicas obtidas foram avaliadas quanto à sua permeabilidade, por meio da determinação do fluxo de permeado em sistema de filtração em escala laboratorial. Em seguida, foi realizada a avaliação do desempenho das membranas na remoção de corante, utilizando soluções sintéticas em diferentes concentrações, por meio de ensaios de filtração em sistema experimental, conforme metodologia semelhante à descrita por Carmo (2022).

O fluxo de permeado de cada membrana foi calculado a partir do volume coletado, do tempo de filtração e da área útil da membrana cerâmica, conforme apresentado na Equação 4.

$$J = \frac{V}{A * \Delta t} \quad (4)$$

Sabendo que:

- J : fluxo de permeado ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)
- V : volume de permeado coletado (L);
- A : área útil da membrana (m^2);
- t : tempo de filtração (h).

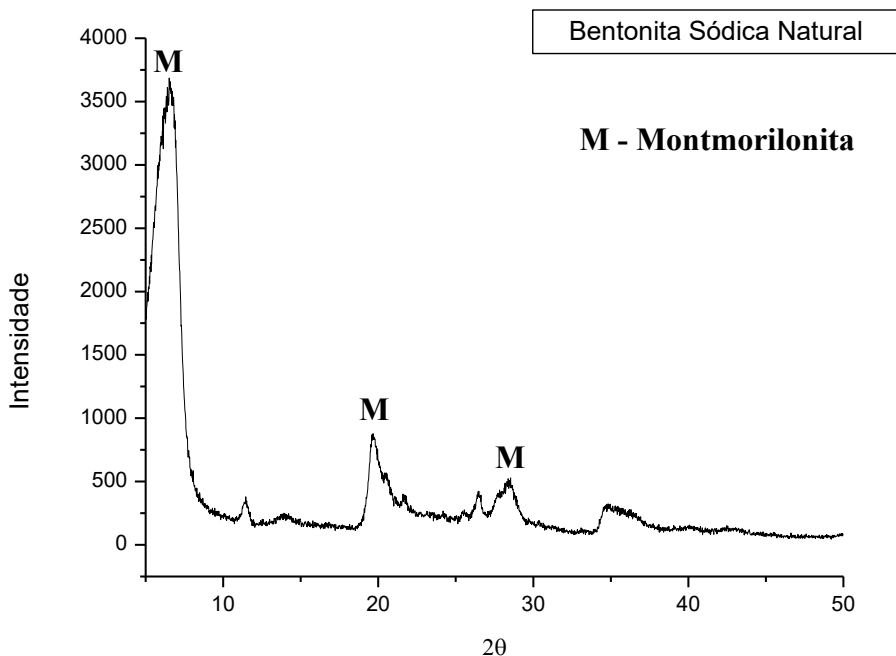
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresenta-se os resultados experimentais obtidos na caracterização dos suportes cerâmicos desenvolvidos, organizados de forma sequencial para correlacionar as análises estruturais (DRX, FRX, FTIR e TGA) com as propriedades físicas (volume aparente, absorção de água, densidade aparente) e o desempenho funcional (ensaios de filtração e fluxo permeado). Essa progressão lógica permite avaliar as transformações induzidas pelo processo de sinterização e relacionar as propriedades microestruturais com a viabilidade técnica do material como suporte para tratamento de efluentes têxteis, conforme delineado nos objetivos específicos do trabalho.

5.1. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Os resultados obtidos por difração de raios X (DRX) indicam a presença predominante da fase montmorilonita, característica principal das bentonitas, além de possíveis impurezas como quartzo. Esse comportamento está em concordância com o estudo de Braga (2008), no qual os difratogramas das bentonitas cálcica e sódica também evidenciaram picos característicos da montmorilonita, confirmando a natureza esmectítica desses materiais. A presença da montmorilonita é fundamental, pois está diretamente associada à estrutura lamelar do tipo 2:1, responsável pelas propriedades de troca iônica, capacidade de adsorção e expansão da bentonita. Assim, os resultados obtidos neste trabalho reforçam a adequação desse material para aplicações em processos de adsorção e filtração. O difratograma obtido para a bentonita é apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Difratoograma de raios X (DRX) da bentonita



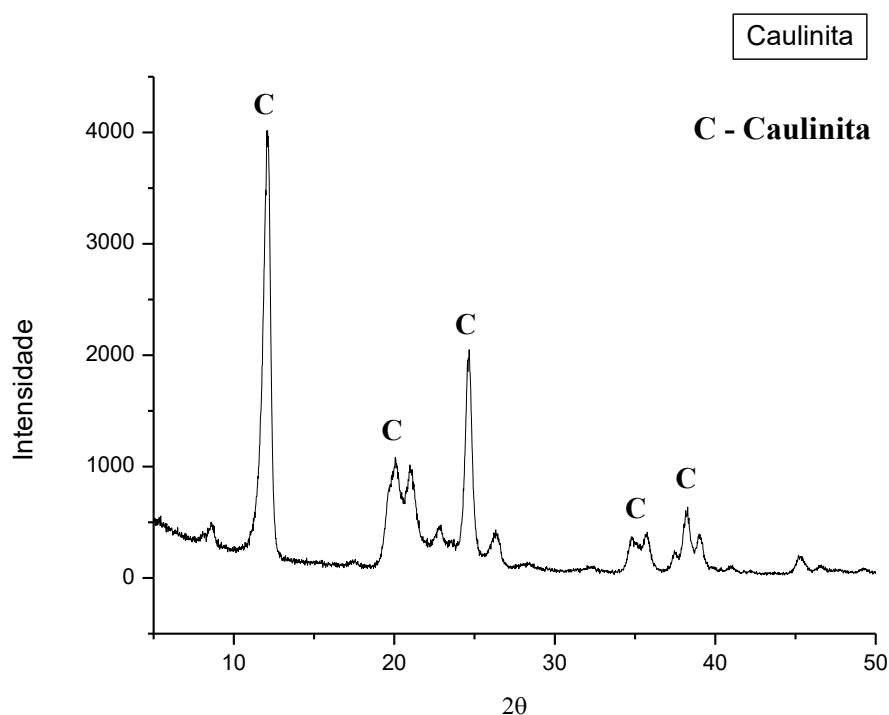
Fonte: Autoral, 2026.

Os resultados de difração de raios X (DRX) indicaram a presença predominante da fase caulinita, evidenciada pelos picos característicos desse argilomineral. Esse comportamento está em concordância com o estudo de Barata e Angélica (2012), no qual os difratogramas dos resíduos cauliniticos apresentaram elevada concentração de caulinita, superior a 90%, com presença apenas de pequenas quantidades de minerais acessórios. A identificação desses picos confirma a estrutura cristalina típica da caulinita, caracterizada por reflexões bem definidas nos ângulos 2θ associados aos planos cristalinos do mineral. No trabalho citado, a presença de picos intensos e bem definidos foi associada a materiais com alto grau de cristalinidade, enquanto alterações na forma dos picos (como alargamento ou redução de intensidade) foram relacionadas à presença de defeitos estruturais na rede cristalina.

Além disso, a predominância da caulinita observada nos resultados deste estudo reforça a pureza mineralógica do material analisado, uma vez que, conforme relatado por

Barata e Angélica (2012), materiais com elevado teor de caulinita apresentam baixo conteúdo de impurezas, o que favorece sua aplicação em processos cerâmicos e na obtenção de materiais com alto desempenho. Dessa forma, os resultados obtidos corroboram diretamente com a literatura, indicando que o material analisado apresenta características mineralógicas típicas de caulins de alta pureza, com predominância de caulinita e baixa presença de fases secundárias. Essa característica é fundamental para aplicações tecnológicas, especialmente na produção de materiais cerâmicos e sistemas de separação. O difratograma de raios X (DRX) da caulinita é apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Difratograma de raios X (DRX) da caulinita

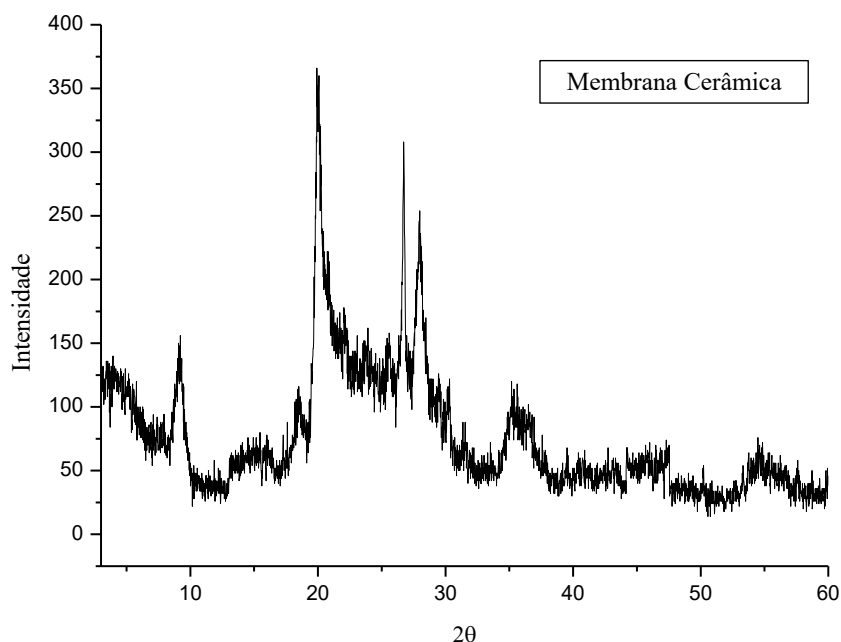


Fonte: Autoral, 2026.

O difratograma de raios X da membrana cerâmica apresentou picos característicos associados principalmente ao quartzo (SiO_2), com destaque para o pico intenso em aproximadamente $26,6^\circ$, indicando a predominância dessa fase cristalina no material. Adicionalmente, observa-se uma região de baixa definição entre 20° e 30° , sugerindo a presença de fase amorfa, possivelmente relacionada à sílica proveniente do bagaço de cana-de-açúcar e às transformações térmicas durante o processo de sinterização. A ausência de

picos bem definidos de caulinita, especialmente na região 12° , indica a sua decomposição térmica, com possível formação de metacaulinita. Esses resultados evidenciam as transformações estruturais do material e corroboram a formação de uma matriz cerâmica com contribuição significativa de sílica. Os resultados de DRX obtidos corroboram com El Maguana *et al.* (2022), evidenciando a predominância de fases ricas em sílica e a presença de material amorfo decorrente da sinterização de resíduos da agroindústria. O difratograma da membrana cerâmica sinterizada é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Difratograma de raios X (DRX) da membrana cerâmica após sinterização.



Fonte: Autoral, 2026.

5.2. FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)

Pela Fluorescência de Raios-X foram obtidas as composições químicas das amostras de argila bentonita sódica *in natura* e a caulinita como mostrado abaixo na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química da caulinita e da bentonita sódica natural.

Amostra	Perda ao Fogo (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	Total
Caulinita	13,89	47,144	39,289		0,003	0,218	0,023		0,345	0,047	100,96
Bentonita	17,47	54,165	16,684	4,296	0,91	2,607	0,819	2,495	0,259	0,293	100

Fonte: Autoral, 2026

A análise de fluorescência de raios X (FRX) permitiu determinar a composição química das matérias-primas utilizadas, evidenciando diferenças importantes entre a caulinita e a bentonita sódica natural. A caulinita apresentou elevados teores de SiO₂ (47,14%) e Al₂O₃ (39,29%), caracterizando-a como um material típico do grupo dos aluminossilicatos. Esse comportamento é consistente com o observado por Kumar e Lingfa (2019), que reportaram teores de aproximadamente 45,22% de SiO₂ e 38,43% de Al₂O₃ para caulim, confirmando sua natureza predominantemente aluminossilicática. A baixa presença de óxidos fundentes, como CaO, MgO e K₂O, indica um comportamento mais refratário, com menor tendência à fusão durante a sinterização, contribuindo para a estabilidade estrutural do material.

Por outro lado, a bentonita apresentou maior teor de SiO₂ (54,16%) e menor conteúdo de Al₂O₃ (16,68%), além de quantidades mais elevadas de óxidos como Fe₂O₃, MgO e Na₂O. Esse comportamento também está de acordo com Kumar e Lingfa (2019), que observaram para a bentonita teores elevados de SiO₂ (52,55%) e presença significativa de Fe₂O₃ (11,92%) e Na₂O (3,22%), indicando maior conteúdo de impurezas e cátions trocáveis. A presença desses óxidos fundentes está associada à maior reatividade durante o aquecimento, favorecendo a sinterização e a formação de fase líquida, o que contribui para a densificação do material.

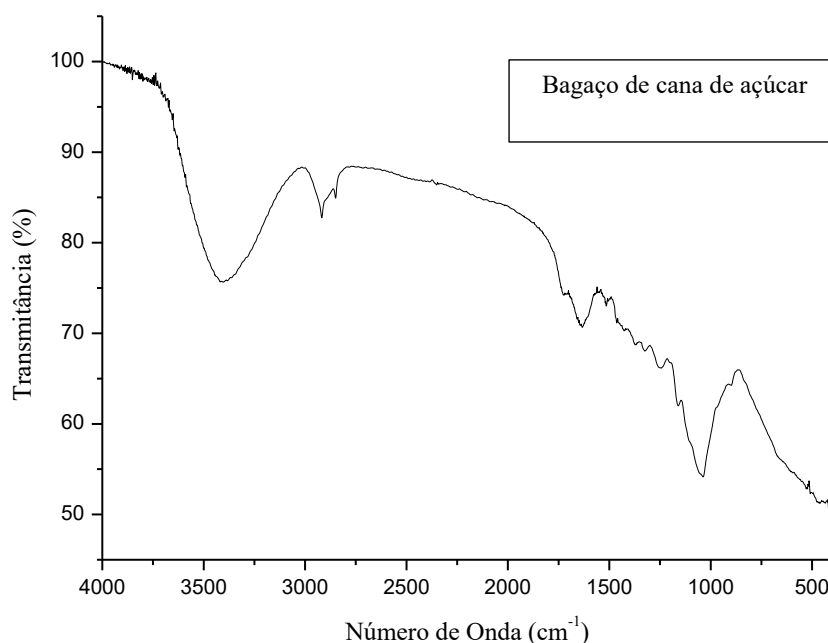
Além disso, a perda ao fogo observada nas amostras está relacionada à eliminação de água estrutural e matéria orgânica, comportamento também descrito por Kumar e Lingfa (2019) para argilas naturais, sendo um indicativo da formação de poros durante o tratamento térmico.

Dessa forma, os resultados obtidos corroboram com a literatura, indicando que a combinação entre caulinita e bentonita é adequada para a produção de suportes cerâmicos, uma vez que a caulinita confere estabilidade estrutural, enquanto a bentonita contribui para a sinterização e desenvolvimento de propriedades favoráveis à aplicação em processos de filtração.

5.3. ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

No espectro de FTIR do bagaço de cana-de-açúcar, observa-se uma banda larga em torno de 3400 cm^{-1} , atribuída às vibrações de estiramento dos grupos hidroxila (O–H), associadas à presença de água adsorvida e celulose. Na região de $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, são observadas bandas relacionadas às vibrações de C–H, características de cadeias orgânicas. Já na faixa de $1600\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$, destacam-se bandas associadas à estrutura aromática da lignina. Por fim, a região entre $1000\text{ e }1200\text{ cm}^{-1}$ apresenta bandas intensas atribuídas às ligações C–O–C, típicas de celulose e hemicelulose. Esses resultados corroboram o estudo de Maciel *et al.* (2025), que destaca a composição lignocelulósica do bagaço e sua aplicação como agente formador de poros na produção de materiais cerâmicos. A presença desses grupos funcionais indica que o material possui natureza orgânica e potencial para decomposição térmica durante a sinterização, favorecendo a formação de estruturas porosas. O espectro de FTIR do bagaço de cana-de-açúcar é apresentado na Figura 18.

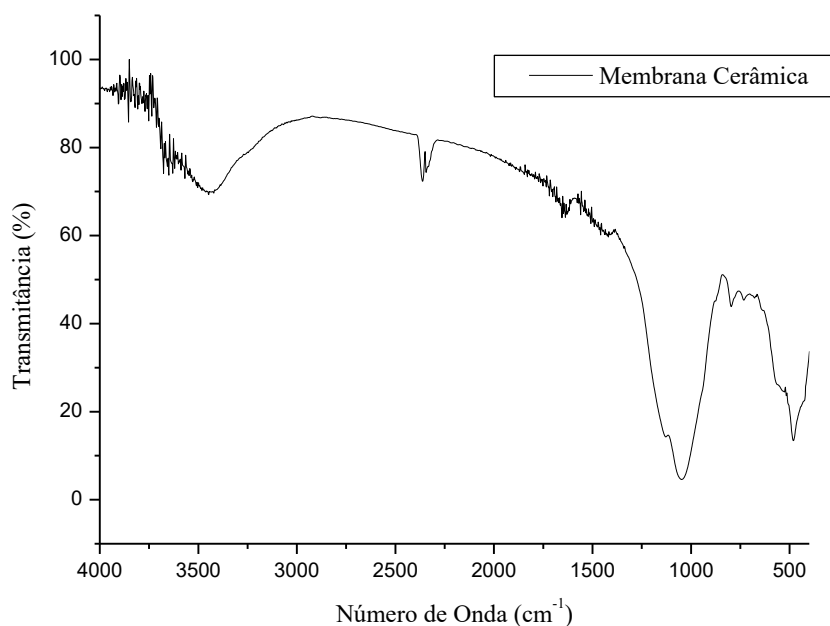
Figura 18 – Espectro de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: Autoral, 2026.

Os resultados de FTIR obtidos neste trabalho estão em concordância com o estudo de El Maguana et al. (2022), no qual membranas cerâmicas produzidas a partir de resíduos da agroindústria apresentaram bandas características de materiais aluminossilicáticos. De forma semelhante, o espectro obtido evidenciou uma banda larga em aproximadamente 3400 cm^{-1} , associada às vibrações de estiramento dos grupos hidroxila (O–H), bem como uma banda em torno de 1600 cm^{-1} , atribuída à deformação da água adsorvida. As bandas mais intensas na região de $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ foram atribuídas às ligações Si–O–Si e Si–O–Al, confirmando a formação da estrutura cerâmica. Além disso, bandas próximas de 800 cm^{-1} e entre 460 e 500 cm^{-1} indicam a presença de sílica e vibrações da rede silicática. Esses resultados corroboram diretamente com a literatura, evidenciando a formação de uma matriz cerâmica rica em aluminossilicatos após o processo de sinterização (EL MAGUANA et al., 2022). O espectro de FTIR da membrana cerâmica fabricada é apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Espectro de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) da membrana cerâmica sinterizada.



Fonte: Autoral, 2026.

5.4. ANÁLISE TERMOGRAVIMETRICA

A análise termogravimétrica (TGA) do caulim evidenciou diferentes etapas de perda de massa associadas a transformações físicas e estruturais características desse argilomineral. Inicialmente, observa-se uma pequena perda de massa em temperaturas inferiores a aproximadamente 200 °C, atribuída à eliminação de água adsorvida na superfície do material. Esse comportamento está em concordância com o estudo de Fischer et al. (2024), no qual foi observada uma perda inicial de massa relacionada à liberação de umidade adsorvida, com pico em baixas temperaturas.

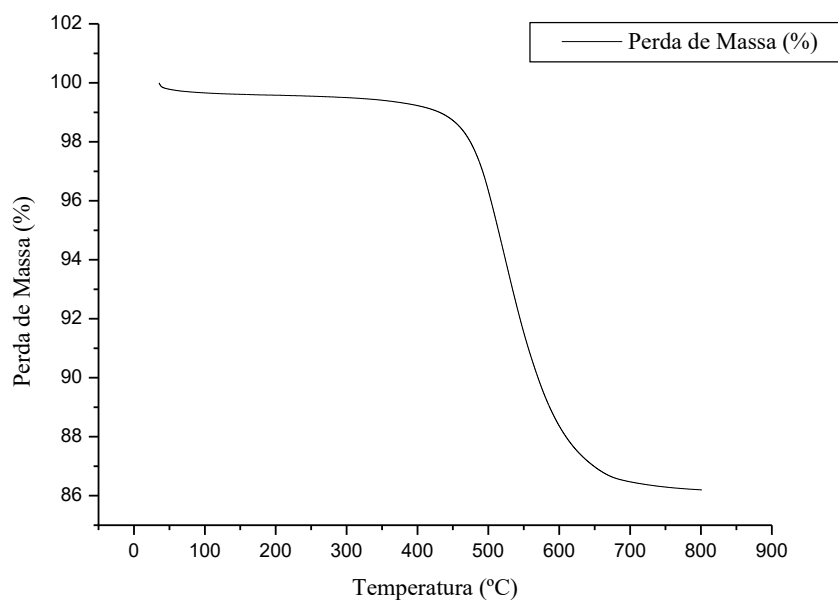
Em faixas intermediárias de temperatura (aproximadamente entre 200 °C e 300 °C), ocorre uma leve perda de massa associada à remoção de água de hidratação ou água de cristalização presente na estrutura do material. Esse fenômeno está relacionado à

reorganização parcial da estrutura cristalina do caulim. Na faixa de temperatura mais elevada, geralmente próxima de 500–600 °C, observa-se a principal perda de massa, correspondente ao processo de desidroxilação do caulim. Esse processo envolve a remoção de grupos hidroxila (–OH) da estrutura da caulinita, resultando na formação de metacaulim, uma fase amorfa de grande importância em aplicações cerâmicas e industriais.

De acordo com Fischer et al. (2024), essa etapa é caracterizada por uma perda de massa significativa (aproximadamente 13%) e por um pico pronunciado na curva DTG, evidenciando a transformação estrutural do material. Em temperaturas ainda mais elevadas, podem ocorrer transformações estruturais adicionais, como a formação de fases cristalinas mais estáveis, sem variação significativa de massa. Esse comportamento indica a reorganização da estrutura do material após a desidroxilação.

Dessa forma, os resultados obtidos neste trabalho estão em concordância com a literatura, evidenciando que o caulim apresenta comportamento térmico típico, com etapas bem definidas de desidratação e desidroxilação, fundamentais para sua aplicação em processos cerâmicos e na obtenção de materiais com propriedades específicas. A curva termogravimétrica (TG) da caulinita é apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Curva termogravimétrica (TG) da caulinita.

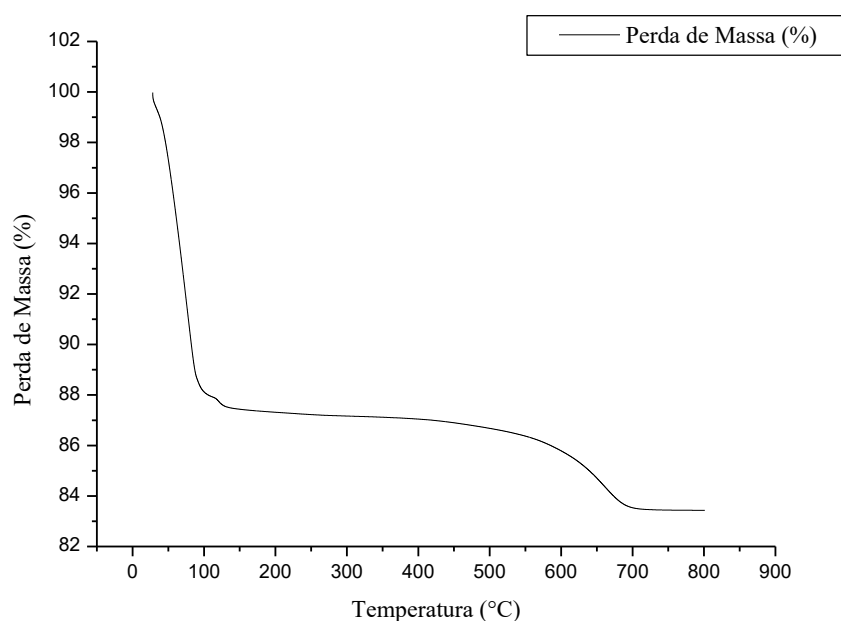


Fonte: Autoral, 2026.

Em relação à análise termogravimétrica (TGA), observou-se comportamento típico de argilominerais, com perdas de massa em diferentes faixas de temperatura. Inicialmente, ocorre uma perda associada à remoção de água adsorvida (umidade superficial), seguida pela perda de água interlamelar. Em temperaturas mais elevadas, observa-se a desidroxilação da estrutura cristalina, relacionada à decomposição das hidroxilas estruturais da montmorilonita. Esse comportamento também foi relatado por Braga (2008), que descreve curvas TG das bentonitas apresentando estágios distintos de perda de massa associados à remoção de água e à desidroxilação estrutural. Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo corroboram diretamente com a literatura, evidenciando a estabilidade térmica característica das bentonitas e confirmando sua estrutura mineralógica.

Além disso, a presença dessas etapas térmicas reforça a natureza hidratada da bentonita e sua estrutura lamelar, aspectos essenciais para sua aplicação como material adsorvente e como suporte em processos de separação. A curva termogravimétrica (TG) da bentonita é apresentada na Figura 21.

Figura 21 - Curva termogravimétrica (TG) da bentonita.



Fonte: Autoral, 2026.

5.5. PRODUÇÃO E SINTERIZAÇÃO DO SUPORTE CERÂMICO

A produção dos suportes cerâmicos ocorreu por meio da homogeneização das matérias-primas, seguida da compactação por prensagem uniaxial, resultando na obtenção de corpos com geometria uniforme e adequada integridade estrutural. Esse comportamento está de acordo com a literatura, que aponta a prensagem uniaxial como uma técnica amplamente utilizada na obtenção de suportes cerâmicos, promovendo maior empacotamento das partículas e aumento da resistência mecânica do corpo cerâmico (MESTRE et al., 2019). As pastilhas cerâmicas recém-prensadas são apresentadas na Figura 22.

Figura 22 – Pastilhas cerâmicas após prensagem uniaxial.



Fonte: Autoral, 2026.

A incorporação do bagaço de cana-de-açúcar e do amido atuou como agente formador de poros. Durante o processo de sinterização, esses materiais orgânicos são removidos da matriz cerâmica, contribuindo para a formação de uma estrutura porosa. Esse comportamento é amplamente descrito na literatura para materiais cerâmicos contendo aditivos orgânicos, sendo também observado em estudos com membranas produzidas a partir de resíduos

industriais, nos quais a estrutura final é diretamente influenciada pelo processo térmico (EL MAGUANA et al., 2022). As pastilhas cerâmicas recém-prensadas são apresentadas na Figura 23.

Figura 23 - Pastilhas cerâmicas após sinterização.



Fonte: Autoral, 2026.

5.6. ENSAIO DE FILTRAÇÃO E FLUXO PERMEADO

Após a caracterização física e estrutural das membranas cerâmicas, foi realizado o ensaio de filtração com o objetivo de avaliar o desempenho do suporte obtido na passagem do efluente sintético. A partir do volume de permeado coletado em função do tempo, foi possível determinar o fluxo permeado da membrana, parâmetro importante para verificar sua aplicabilidade em processos de separação. De modo geral, o ensaio permitiu observar a

capacidade da membrana em conduzir o fluido através de sua estrutura porosa, relacionando esse comportamento com as propriedades previamente determinadas, como absorção de água, porosidade e densidade aparente.

As dimensões das pastilhas cerâmicas utilizadas nos ensaios foram determinadas conforme apresentado na Figura 24, na qual são mostradas a espessura (a) e o diâmetro (b) das amostras. Essas medidas são essenciais para o cálculo da área útil da membrana, parâmetro diretamente empregado na determinação do fluxo permeado. Considerando o diâmetro médio obtido de aproximadamente 27 mm, foi possível calcular a área da membrana, permitindo a correta determinação do fluxo durante os ensaios de filtração.

Figura 24 – Dimensões da pastilha cerâmica (a) a espessura e (b) o diâmetro.



(a)



(b)

Fonte: Autoral, 2026.

A área da pastilha cerâmica foi calculada considerando sua geometria circular, conforme a Equação (6).

$$A = \pi * r^2 \quad (6)$$

Considerando o raio da pastilha de 13,5 mm (0,0135 m), obteve-se:

$$A = 3,1416 * 0,0135^2$$

$$A = 5,73 \times 10^{-4} m^2$$

Os tempos de filtração obtidos para as diferentes concentrações da solução estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Tempo de filtração das soluções em diferentes concentrações.

Concentração (PPM)	Tempo 1 (min)	Tempo 2 (min)	Tempo médio (min)	Tempo médio (h)
20	31	30	30,5	0,508
15	26	25	25,5	0,425
10	26	27	26,5	0,442
5	24	26	25	0,417
0	15	15	15	0,167

Fonte: Autoral, 2026.

O fluxo permeado da membrana cerâmica foi determinado a partir do volume coletado, da área útil da membrana e do tempo de filtração. Para a água, considerando um volume de 10 mL permeado em 15 minutos, obteve-se um fluxo de aproximadamente $69,8 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Para o efluente têxtil, os ensaios foram realizados com volume de 20 mL, sendo observados tempos médios distintos para cada concentração. Os fluxos obtidos foram de aproximadamente 68,8; 81,9; 78,9 e $83,7 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ para as concentrações de 20, 15, 10 e 5 ppm, respectivamente.

De modo geral, observa-se que os valores de fluxo para o efluente foram próximos ou ligeiramente superiores ao fluxo obtido com água, indicando que a membrana apresenta boa capacidade de permeação. Além disso, a variação do fluxo em função da concentração pode estar associada à interação entre o corante e a superfície da membrana, bem como à possível obstrução parcial dos poros. Esses resultados estão diretamente relacionados à estrutura porosa do material, previamente evidenciada pelas análises de absorção de água e porosidade aparente, indicando que a membrana possui poros abertos e interconectados, favorecendo o escoamento do fluido. Os valores de fluxo permeado em função da concentração do efluente estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Fluxo permeado da membrana cerâmica em função da concentração do efluente têxtil.

Concentração (PPM)	Fluxo ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)
20	68,8
15	81,9
10	78,9
5	83,7
0	68,9

Fonte: Autoral, 2026.

Os resultados de absorvância mostraram redução após a filtração em todas as concentrações avaliadas, indicando retenção parcial do corante pela membrana cerâmica. As eficiências de remoção calculadas foram de 9,09%, 7,29%, 9,04% e 14,16% para as concentrações de 20, 15, 10 e 5 ppm, respectivamente. De modo geral, a maior remoção foi observada para a solução de 5 ppm, sugerindo melhor desempenho da membrana em menores concentrações do corante. Os valores de absorvância inicial, absorvância média final e eficiência de remoção estão apresentados na Tabela 5.

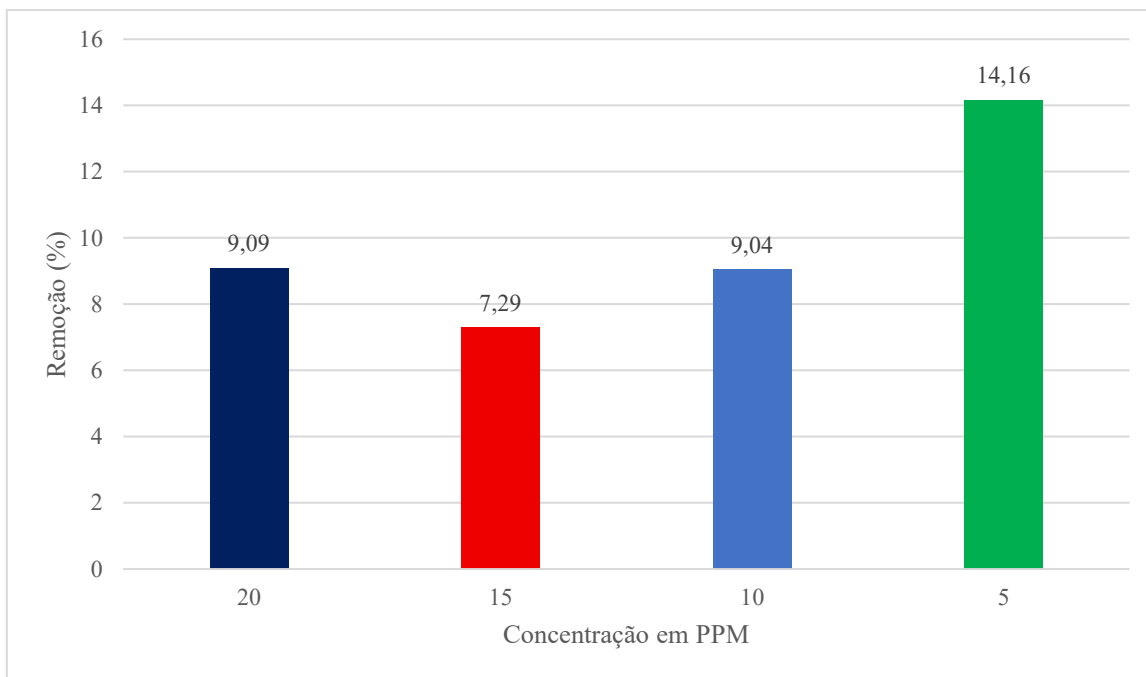
Tabela 5 – Valores de absorvância inicial, absorvância média final e remoção do corante após a filtração.

Concentração (PPM)	ABS apenas o corante	ABS 1^a	ABS 2^a	Média ABS
20	0,385	0,360	0,339	0,350
15	0,288	0,269	0,265	0,267
10	0,188	0,166	0,175	0,171
5	0,113	0,094	0,099	0,097
0	0	0,001	0,001	0,001

Fonte: Autoral, 2026.

Além disso, conforme apresentado no Gráfico 1, observa-se que a eficiência de remoção tende a aumentar com a diminuição da concentração inicial do corante, evidenciando maior desempenho do sistema em soluções mais diluídas.

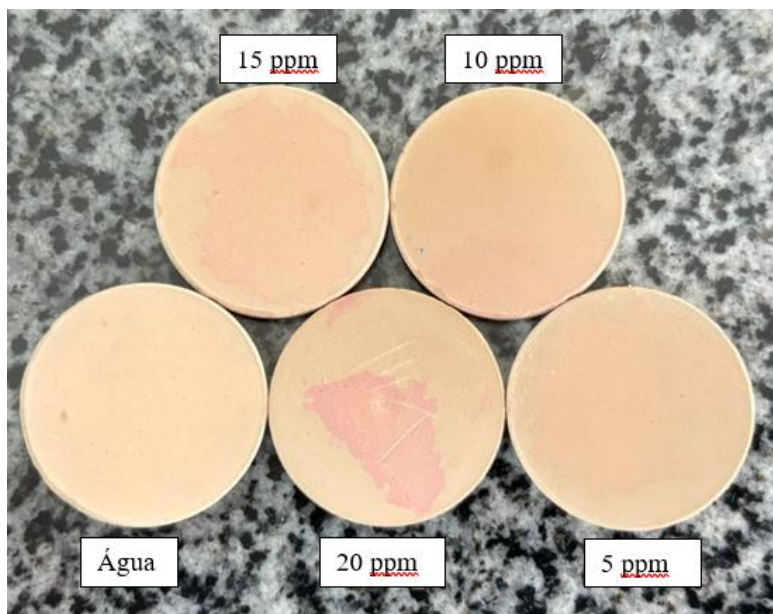
Gráfico 1 - Remoção de Corante em Função da Concentração Inicial



Fonte: Autoral, 2026.

O aspecto superficial das pastilhas cerâmicas após os ensaios de filtração, em diferentes concentrações de corante, é apresentado na Figura 25, evidenciando a deposição do corante na superfície da membrana e corroborando os resultados de retenção obtidos por meio das análises de absorvância.

Figura 25 – Aspecto das pastilhas cerâmicas após a filtração das soluções de corante em diferentes concentrações.



Fonte: Autoral, 2026.

5.7. VOLUME APARENTE

Para a determinação do volume aparente e absorção de água das amostras cerâmicas, foram realizadas medições de massa seca, massa imersa e massa saturada, utilizando a água como fluido de referência. Esses parâmetros são fundamentais para o cálculo do volume ocupado pelo material, incluindo os poros abertos presentes em sua estrutura.

Os valores obtidos para cada uma das massas utilizadas no cálculo estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores das massas utilizadas para o cálculo do volume aparente e absorção de água da amostra cerâmica.

Massas	Peso (g)
Seca	2,5249
Imersa	2,9128
Saturada	3,2555

Fonte: Autoral, 2026

O volume aparente das amostras foi determinado com base na diferença entre a massa saturada e a massa imersa, considerando a densidade da água como unidade de referência. Esse parâmetro permite avaliar o volume ocupado pelo corpo cerâmico, incluindo os poros abertos.

O cálculo foi realizado conforme a Equação 2:

$$V_{aparente} = \frac{m_{sat} - m_i}{\rho_{água}}$$

$$V_{aparente} = \frac{(3,2555 - 2,9128) \text{ g}}{1 \text{ g/cm}^3} = 0,3427 \text{ cm}^3$$

$$V_{aparente} \cong 0,34 \text{ cm}^3$$

A partir dos valores obtidos, o volume aparente da amostra foi de aproximadamente 0,34 cm³, indicando o volume total ocupado pelo material, incluindo sua estrutura porosa.

5.8. ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água foi determinada com o objetivo de avaliar a quantidade de água absorvida pela amostra, sendo um parâmetro diretamente relacionado à porosidade aberta do material.

O cálculo foi realizado conforme a Equação 3:

$$AA(\%) = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100$$

$$AA(\%) = \frac{(3,2555 - 2,5249)g}{2,5249 g} * 100 = 28,94\%$$

$$AA(\%) \cong 29 \%$$

O valor de absorção de água obtido, aproximadamente 29%, indica que a amostra apresenta uma quantidade significativa de poros abertos e interconectados, característica essencial para materiais destinados a processos de filtração. Esse comportamento está diretamente relacionado à porosidade do material, uma vez que a absorção ocorre pela penetração de água nos poros acessíveis.

Resultados semelhantes foram observados no trabalho de Pin (2023), no qual membranas cerâmicas produzidas a partir de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e caulim apresentaram valores de absorção de água na faixa de aproximadamente 15% a 19%, associados a estruturas porosas adequadas para microfiltração. Apesar de os valores obtidos no presente estudo serem superiores, essa diferença pode ser atribuída à maior quantidade de agentes formadores de poros e às condições de processamento, como temperatura de sinterização e composição da massa cerâmica.

De acordo com a literatura, a absorção de água está diretamente relacionada à porosidade aberta do material, sendo um parâmetro amplamente utilizado para avaliar a estrutura porosa de materiais cerâmicos. Assim, valores mais elevados de absorção indicam maior volume de poros interconectados, favorecendo o escoamento do fluido através da matriz cerâmica.

Dessa forma, o resultado obtido neste trabalho corrobora com o comportamento observado por Pin (2023), indicando que o material desenvolvido apresenta uma estrutura porosa adequada para aplicações em processos de filtração, especialmente como suporte cerâmico, no qual a presença de poros abertos e interligados é fundamental para o desempenho hidráulico do sistema.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e a caracterização de suportes cerâmicos de baixo custo, utilizando bagaço de cana-de-açúcar como agente formador de poros, visando sua aplicação no tratamento de efluentes têxteis. Os resultados experimentais demonstraram que o processo de produção por compactação uniaxial, seguido de sinterização a 650 °C, foi eficaz na obtenção de suportes cerâmicos com boa integridade estrutural e características adequadas para aplicação em filtração. O valor obtido de absorção de água de aproximadamente 29% indica a formação de uma estrutura porosa com presença de poros abertos e interconectados, condição essencial para o escoamento do fluido através do material.

As análises de caracterização corroboraram esses resultados. O difratograma de raios X evidenciou a predominância de fases ricas em sílica, com destaque para o quartzo, enquanto a análise de FTIR confirmou a presença de ligações características de materiais aluminossilicáticos, como Si–O–Si e Si–O–Al, indicando a formação de uma matriz cerâmica compatível com aplicações em filtração.

Nos ensaios de filtração, os suportes apresentaram valores de fluxo permeado entre aproximadamente 68 e 84 L·m⁻²·h⁻¹, tanto para água quanto para efluente têxtil, evidenciando boa capacidade de permeação. Esse comportamento está diretamente relacionado à estrutura porosa desenvolvida durante a sinterização. Por outro lado, os resultados de remoção do corante indicaram eficiências relativamente baixas (entre aproximadamente 7% e 14%), demonstrando que o material apresenta limitada capacidade de retenção, atuando predominantemente como suporte cerâmico e não como membrana seletiva.

Dessa forma, os resultados obtidos confirmam que os suportes cerâmicos produzidos possuem propriedades adequadas para aplicação como substrato em sistemas de filtração, destacando-se o potencial do uso do bagaço de cana-de-açúcar como material formador de poros. De modo semelhante à configuração das membranas compostas assimétricas, nas quais uma camada densa e seletiva é depositada sobre um suporte poroso de elevada permeabilidade, a aplicação de um revestimento funcional sobre os suportes desenvolvidos

neste trabalho poderia viabilizar a separação seletiva de contaminantes dissolvidos, ampliando significativamente a eficiência de remoção.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a otimização da composição da mistura cerâmica e das condições de sinterização, bem como a aplicação de técnicas de revestimento superficial, visando aumentar a eficiência de remoção de contaminantes e ampliar o desempenho do sistema desenvolvido.

REFERÊNCIAS

ADANE, Teshale; ADUGNA, Amare Tiruneh; ALEMAYEHU, Esayas. *Textile industry effluent treatment techniques*. Journal of Chemistry, v. 2021, Article ID 5314404, p. 1–14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/5314404>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Usos da água no Brasil – 2022*. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ana>. Acesso em: 15 mar. 2026.

ANICER – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. *Cerâmica: a mais antiga das indústrias*. Revista da Anicer, ed. 96, out. 2015. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/revista-anicer/revista-96/historia/>. Acesso em: 3 fev. 2026.

ARAÚJO, A. B. F. S. et al. Produção de membrana de baixo custo e sua utilização no processo de separação emulsão óleo/água. In: **CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS**, 4., 2021, Campina Grande. *Anais [...]*. Campina Grande: [s.n.], 2021.

ARMOA, Marcelo Henrique; JAFELICCI JUNIOR, Miguel. Princípios e aplicações de processos de separação por membranas inorgânicas. *Ciência & Tecnologia: FATEC-JB*, Jaboticabal, v. 2, n. 1, p. 80–97, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO (ABIT). **Indústria têxtil e de confecção brasileira: cenários, desafios, perspectivas e demandas**. Brasília, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 10545-3: Placas cerâmicas — Parte 3: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente. Rio de Janeiro, 2020.

BAKER, Richard W. *Membrane technology and applications*. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S. **Caracterização dos resíduos caulíníticos das indústrias de mineração de caulim da Amazônia como matéria-prima para produção de pozolanas de alta reatividade**. *Cerâmica*, v. 58, n. 345, p. 36–42, 2012.

BATISTA, Felipe Peixoto Manguiera. *Aplicação de membranas cerâmicas no tratamento de efluentes têxteis*. 2019. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de

Materiais) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

BELGHAZIS, Mohammed; HACHEM, El-Kaber. *Clay and clay minerals: a detailed review*. International Journal of Recent Technology and Applied Science, v. 4, n. 2, p. 54–75, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36079/lamintang.ijortas-0402.367>.

BENITO, J. M.; CONESA, A.; RODRÍGUEZ, M. A. Membranas cerâmicas: tipos, métodos de obtención y caracterización. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, v. 43, n. 5, p. 829–842, 2004.

BENTO, Amerícia Florinda Machado Leitão. *Preparação de membranas cerâmicas a partir da alumina e da cinza da casca de arroz e aplicação como suporte para síntese de membranas de zeólita ZSM-5*. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

BERGAYA, Faïza; LAGALY, Gerhard. Clay and clay mineralogy. In: BERGAYA, Faïza; LAGALY, Gerhard (ed.). *Handbook of Clay Science*. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. p. 1–19.

BRAGA, Renata Martins. Uso de argilominerais e diatomita como adsorvente de fenóis em águas produzidas na indústria de petróleo. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

BRANCO, Pércio de Moraes. *Minerais argilosos*. Serviço Geológico do Brasil, 2014. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/minerais-argilosos>. Acesso em: 2 mar. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRILLAS, Enric; MARTÍNEZ-HUITLE, Carlos A. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: an update review. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 166–167, p. 603–643, 2015.

BRITO, Antônio Williams de Lima. *Apostila de introdução geral à tecnologia cerâmica*. Fortaleza: SEDUC/EEEP, 2011.

BUSTAMANTE, Gladstone Motta; BRESSIANI, José Carlos. A indústria cerâmica brasileira. *Cerâmica Industrial*, v. 5, n. 3, p. 31–36, 2000.

CARMO, E. S. et al. Produção de membranas cerâmicas de baixo custo: influência da temperatura de sinterização. In: *Tecnologia, investigação, sustentabilidade e os desafios do século XXI*. Campina Grande: Realize Editora, 2020. p. 812–826.

CARMO, Edilânia Silva do. **Produção de membranas cerâmicas de baixo custo para remoção de corantes**. 2022. 132 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2022.

CAVALCANTI, José Eduardo W. de A. *Manual de tratamento de efluentes industriais*. 3. ed. ampliada. São Paulo: Engenho Editora Técnica Ltda., 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Cana-de-açúcar tem produção estimada em 663,4 milhões de toneladas na safra 2025/26. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/cana-de-acucar-tem-producao-estimada-em-663-4-milhoes-de-toneladas-na-safra-2025-26>. Acesso em: 22 mar. 2026.

CRUZ, Joziel Aparecido. *Tratamento e reutilização do efluente têxtil gerado pelos laboratórios de lavanderia e estamparia da UTFPR, em processo de tingimento têxtil*. 2015. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Têxtil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2015.

D’ALESSANDRO, Victor Rodrigues; CAVICHIOLI, Fábio Alexandre. A importância do setor sucroalcooleiro na economia brasileira. *Interface Tecnológica*, v. 21, n. 1, p. 665–680, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31510/infa.v21i1.1922>

DENARI, Gabriela Bueno; CAVALHEIRO, Éder Tadeu Gomes. **Princípios e aplicações de análise térmica**. São Carlos: Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo (IQSC/USP), 2012.

DIEL, Jefferson Luís. *Caracterização funcional de membranas cerâmicas de micro e ultrafiltração*. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

EL MAGUANA, Y. et al. Low-cost and high-performance ceramic membrane from sugar industry waste: characterization and optimization using experimental design. *Materials Today: Proceedings*, 2022.

FAPESP. *Propriedades do bagaço da cana-de-açúcar*. Revista Pesquisa FAPESP, 1998. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/propriedades-do-bagaco-da-cana-de-acucar/>. Acesso em: 13 mar. 2026.

FISCHER, Carolin; SCHMÖLZER, Stefan; RÖDEL, Jonas. **Thermal analysis of kaolin**. NETZSCH-Gerätebau GmbH, Application Note 310, 2024.

FORGIARINI, E. *Degradação de corantes e efluentes têxteis pela enzima horseradish peroxidase (HRP)*. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

FRAGA, Josicleide de Jesus; SANTOS, Marília Gabriela Cruz dos. **A quarta revolução industrial e os impactos no ramo da moda**. In: *Anais do Fórum Regional de Administração*, 2020.

FUJITA, Renata Mayumi Lopes; JORENTE, Maria José Vicentini. **A indústria têxtil no Brasil: uma perspectiva histórica e cultural**. *Revista ModaPalavra e-Periódico*, v. 8, n. 15, p. 153-174, jan./jul. 2015.

GREGOROVÁ, Eva; PABST, Willi; BOHAČENKO, Ivan. Characterization of different starch types for their application in ceramic processing. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 26, n. 7, p. 1301–1309, 2006.

GURGEL, M. N. do A. *et al.* Gerenciamento, tratamento e disposição de resíduos na cana-de-açúcar. In: SILVA, F. C. da; FREIRE, F. J. (ed.). *Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar: manejo, nutrição, bioinsumos, recomendação de corretivos e fertilizantes*. Brasília, DF: Embrapa; Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2024. cap. 10, p. 339-385.

HABERT, Alberto Cláudio; BORGES, Cristiano Piacsek; NÓBREGA, Ronaldo. *Processos de separação por membranas*. Rio de Janeiro: E-papers, 2006.

HOWE, Kerry J. et al. *Princípios de tratamento de água*. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

ILHAN, Vahit. Calcium bentonite vs sodium bentonite. Petronaft, 2023. Disponível em: <https://www.petronaftco.com/calcium-bentonite-vs-sodium-bentonite/>. Acesso em: 2 mar. 2026.

INSTITUTO FUTURO DA ÁGUA (IFZ). *ONU reconhece falência hídrica global e alerta para falta de água no mundo*. 2026. Disponível em: <https://ifz.org.br/onu-reconhece-falencia-hidrica-global-e-alerta-para-falta-de-agua-no-mundo/>. Acesso em: 13 mar. 2026.

KANTH, Maddala Sree et al. Advancing ceramic membrane technology in chemical industries applications. *Results in Engineering*, v. 25, 2025. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103802>.

KILLER, Rafael Antonio; ROTTA, Ivana Salvagni. A evolução e as estratégias do setor cerâmico no contexto brasileiro. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 9., 2019. *Anais [...]*. Ponta Grossa: [s.n.], 2019.

KIM, S. C. Application of response surface method to optimize coagulation–flocculation. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 38, p. 93–102, 2016.

KUMAR, Awinash; LINGFA, Pradip. Sodium bentonite and kaolin clays: Comparative study on their FT-IR, XRF, and XRD. *Materials Today: Proceedings*, 2019.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; MORAES, S. G.; DURÁN, N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. *Química Nova*, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 78–82, 2002.

LORENTE-AYZA, M. M. et al. Comparison of extruded and pressed low-cost ceramic supports. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 35, p. 3681–3691, 2015.

LUZ, Adão Benvindo da; CAMPOS, Antonio Rodrigues de; CARVALHO, Eduardo Augusto de; BERTOLINO, Luis Carlos. Caulim. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (org.). *Rochas e minerais industriais*. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. p. 231–256.

LUZ, Adão Benvindo da; OLIVEIRA, Cristiano Honório de. Argila – Bentonita. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; LINS, F. F. (ed.). *Rochas e minerais industriais*. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 239–253.

LYCKFELDT, O.; FERREIRA, J. M. F. Processing of porous ceramics by starch consolidation. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 18, n. 2, p. 131–140, 1998.

MACIEL, F. et al. Applicability of sugarcane bagasse waste in the manufacturing of porous ceramic support for filtration membrane. *Materials Research*, [s.l.], 2025.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/393510484_Applicability_of_Sugarcane_Bagasse_Waste_in_the_Manufacturing_of_Porous_Ceramic_Support_for_Filtration_Membrane.

Acesso em: 25 mar. 2026.

MISRA, R. D. K.; MISRA, Kamakhya Prakash. Fundamentals of ceramics: introduction, classification and applications. In: *Ceramic Science and Engineering*. Amsterdam: Elsevier, 2022. p. 5–20. DOI: 10.1016/B978-0-323-89956-7.00020-6.

NORSURAYA, S.; FAZLENA, H.; NORHASYIMI, R. *Sugarcane bagasse as a renewable source of silica to synthesize Santa Barbara Amorphous-15 (SBA-15)*. **Procedia Engineering**, v. 148, p. 839–846, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.627>

NUNES, G. R. *Geração e tratamento de efluentes da indústria têxtil*. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

PRADO, Ulisses Soares do; BRESSIANI, José Carlos. Panorama da indústria cerâmica brasileira. *Cerâmica Industrial*, v. 18, n. 1, p. 7–11, 2013.

RODRIGUES, Gelze Serrat de Souza Campos; ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. *A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil*. Uberlândia: EDUFU, 2020.

ROSS, Clarence S.; SHANNON, Earl V. The minerals of bentonite and related clays. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 9, n. 2, p. 77–96, 1926.

SCHROEDER, L. H. *Tratamento físico-químico por coagulação-floculação sedimentação*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SILVA, Renato F. da. **A difração de raios X: uma técnica de investigação da estrutura cristalina de materiais**. *Revista Processos Químicos*, [s.l.], v. 14, n. 28, p. 73–82, jan./jun. 2020.

SOUZA SANTOS, P. *Ciência e tecnologia de argilas*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

UDA, Carla Fernanda et al. *Extração e caracterização do grão de amido*. Maringá: UNINGÁ, 2008.

VASQUES, A. R. et al. Adsorção de corantes utilizando lodo residual. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 16, n. 3, p. 245–252, 2011.

XAVIER, Chubraider. **Espectroscopia de absorção na região do infravermelho médio (FTIR)**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2024. Disponível em: <https://www.iq.unesp.br/#!/lacaque/ft-raman---ftir/apresentacao/>. Acesso em: 26 mar. 2026.

XAVIER, Chubraider. **Fluorescência de raios X (EDXRF)**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2024. Disponível em: <https://www.iq.unesp.br/#!/lacaque/espectrometro-de-fluorescencia-de-raios-x/apresentacao/>. Acesso em: 26 mar. 2026.

ZHANG, M. L. Z. et al. Roles of magnetic particles in coagulation-flocculation. *Chemical Engineering Journal*, v. 212, p. 337–343, 2018.