

MEMBRANAS CERÂMICAS DE BAIXO CUSTO APLICADAS A REMOÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS: UMA REVISÃO

Ana Beatriz de França Silva Araújo¹

Edilânia Silvia do Carmo²

Tatiane Maria do Nascimento³

Meiry Gláucia Freire Rodrigues⁴

RESUMO

A poluição dos corpos hídricos é um dos grandes desafios da sociedade e vem sendo objeto de estudo de muitas pesquisas. As industriais são as principais responsáveis pela geração de efluentes contaminados, sobretudo a indústria têxtil que é uma das maiores consumidoras de recursos hídricos e geradora de efluentes que em sua maioria são contaminados com corantes que se destacam pelos seus impactos causados ao meio ambiente, afetando, por exemplo, a manutenção da vida marinha e a produtividade de solos. Entre as técnicas de tratamento, o uso de membranas cerâmicas destaca-se pela alta eficiência no tratamento de efluentes com corantes industriais, além de apresentar alta estabilidade térmica e química, resistência mecânica e resistência a incrustação, fatores esses que oferecem maior durabilidade ao material. Todavia algumas matérias-primas demandam alto investimento e necessitam muitas vezes de condições específicas, por exemplo, altas temperaturas de sinterização, assim sendo, a elaboração de membranas cerâmicas porosas utilizando materiais de baixo custo tem atraído muitas pesquisas. A escolha de matérias-primas adequadas é crítica para o desempenho da membrana. No entanto, com a crescente necessidade de recursos mais eficientes, com bons resultados, muitos estudos foram conduzidos selecionando materiais economicamente mais viáveis. Desta maneira, este trabalho teve como objetivo analisar e revisar a partir de diferentes fontes de pesquisa os sinais atuais de progresso para o desenvolvimento e aplicação de membranas de baixo custo formadas a partir de materiais de pouco valor agregado e sua aplicação em efluentes contaminados com corantes, assim como investigar de forma sistemática as novas tecnologias utilizadas nesse campo de estudo. As membranas produzidas demonstram num geral, uma capacidade adsorptiva tal qual a literatura, desta forma pode-se concluir que as membranas em estudos têm um grande potencial relativas ao seu custo-benefício.

Palavras-chave: Membranas de Baixo Custo, Argila Bofe, Efluentes Têxteis, Sustentabilidade.

¹ Graduando do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, beatriz.franca@eq.ufcg.edu.br;

² Doutoranda pelo Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, edilania.carmo@eq.ufcg.edu.br;

³ Mestranda pelo Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, fjtatiane2012@gmail.com;

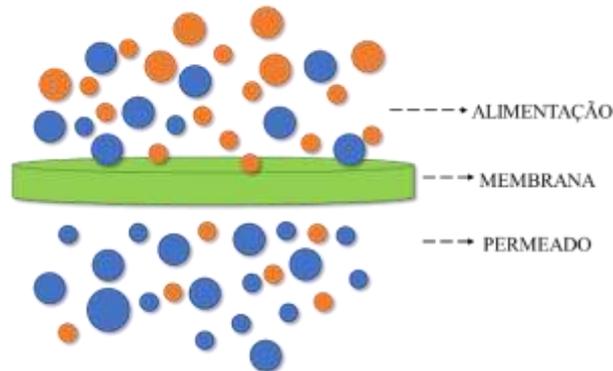
⁴ Professora orientadora: Doutora, Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, meiry.freire@eq.ufcg.edu.br;

INTRODUÇÃO

O rápido crescimento e desenvolvimento do setor industrial ocorrido nas últimas décadas, fez com que vários poluentes fossem despejados de forma inadequada no ambiente. Isso resultou em um drástico declínio da qualidade da água em todo o mundo. Portanto, o controle da água tem a maior prioridade hoje em dia para fornecer uma necessidade humana básica. Processos de tingimento na indústria têxtil, como tingimento, fixação e processo de lavagem usa grande volume de água. Portanto, existem vários componentes nos estágios de tingimento e outros tratamentos, como sólidos em suspensão, teor de sólidos altamente dissolvidos, corantes que não reagiram e outros estão contidos em águas residuais da indústria têxtil. Alguns corantes produzem produtos químicos tóxicos a partir de processo de decomposição e corantes complexos liberam metal pesado na água que são muito prejudiciais ao meio ambiente, como também aos seres humanos, animais e plantas (PRASETYO, et al. 2022).

A água desempenha um papel crucial em todos os seres vivos, incluindo plantas, animais e seres humanos. Devido à industrialização contínua, o consumo de água doce e a geração de efluentes vem constantemente aumentando. Para reduzir as ameaças ambientais, se faz então necessário o tratamento de efluentes antes de serem lançados em corpos d'água. Nos estudos mais recentes percebe-se que a tecnologia de membranas tem sido amplamente empregada em diversos setores, como limentos, bebidas, farmacêutico, têxtil, petroquímico e tecnologias de tratamento de efluentes. Além da membrana tecnologia, as membranas poliméricas podem ser preparadas a baixo custo com distribuição mais estreita do tamanho dos poros. No entanto, não suportam altas temperaturas, ambientes ácidos e são propensos a incrustações frequentes. Neste aspecto, as membranas cerâmicas têm um bom desempenho sobre as poliméricas. membranas, proporcionando excelente estabilidade térmica e química, resistência à corrosão, facilidade de limpeza e maior vida útil (CARO, 1998). A respeito dessa classe de processos que utilizam membranas sintéticas com barreira seletiva, tais membranas são definidas como um tipo de filtro ou uma barreira cerâmica que separa duas fases delimitando, total ou parcialmente, o transporte de uma ou várias espécies químicas existentes na solução. (HABERT, BORGES E NÓBREGA, 2006; SILVA, BARBOSA, RODRIGUES, 2021). A Figura 1 representa estrutura de uma membrana cerâmica plana com a representação do processo de separação.

Figura 1 – Representação de uma membrana cerâmica disco plana.



Fonte: Adaptado de BURGGRAAF, 2015.

podem ser aplicados na microfiltração, o frontal e o tangencial. No método frontal, a corrente de alimentação flui em direção perpendicular à superfície da membrana, havendo alta concentração de partículas na superfície e/ou nos poros da membrana, o que se torna prejudicial ao processo com o tempo, pois haverá formação de uma camada sólida (camada de polarização) que irá diminuir significativamente o fluxo e conseqüentemente, a eficiência da filtração. Enquanto na filtração tangencial, a formação desta camada pode ser reduzida devido à passagem da corrente de alimentação ser paralela à superfície da membrana (DEL COLLE et al., 2009).

A exigência de matérias-primas caras e temperaturas de sinterização mais altas, acima de 1200 °C, são fatores limitantes para a industrialização de membranas cerâmicas. Como consequência dessas restrições econômicas, as membranas cerâmicas de baixo custo estão ganhando popularidade nos últimos tempos. Além disso, vale salientar que o preço médio das membranas cerâmicas à base de alumina e zircônia está em alta, em contrapartida, o custo de membranas poliméricas já é um pouco reduzido. No entanto, existe uma enorme escopo para preparar membranas cerâmicas com matérias-primas de baixo custo, mantendo suas vantagens. Além disso, a sinterização a temperaturas também podem ser reduzidas (SANDHYA RANI, KUMAR, 2021).

A tecnologia de membrana é uma técnica de separação avançada para o tratamento de muitos poluentes. A filtração por membrana tornou-se uma parte essencial de estações de tratamento avançado para tratamento de águas residuais de corante. Dentro o processo de tecnologia de membranas, as águas residuais passarão por uma barreira seletiva que é a membrana porosa. No caso da indústria têxtil esse efluente é contaminado essencialmente por

corantes, a partícula de corante será separada da água limpa devido à diferença de tamanho entre as partículas, onde as com tamanho menor que o poros da membrana atravessarão a membrana e as maiores ficarão retidas. Os materiais dissolvidos coletados na superfície da membrana podem ainda ser reativados e utilizados novamente em processos de tingimento. As vantagens do uso da tecnologia de membrana no tratamento de corantes são a reciclagem da água e do corante no processo anterior (GIWA, 2012). Comparando com as tecnologias convencionais, a separação por membrana configuram-se como operações economicamente rentáveis não só em termos de extração, mas também porque esses processos não exigirem o uso de outros agentes e compostos químicos destrutivos e com poder de contaminação (CASTRO-MUÑOZ, 2020; PRASETYO, et al. 2022).

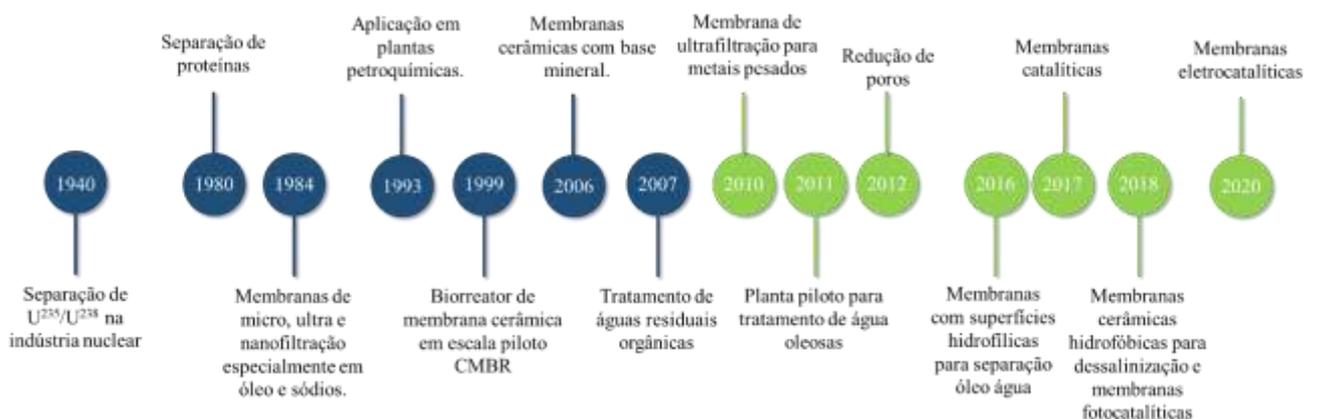
Nos últimos anos, a gestão de resíduos tem se tornado uma das prioridades da política ambiental. Para isso, as indústrias estão buscando soluções sustentáveis e viáveis para minimizar dos altos volumes de resíduos, adotando novas estratégias em cumprimento de objetivos de desenvolvimento sustentável (BAYOUSSEF, et al. 2021). Assim, os pesquisadores têm se interessado cada vez mais na gestão de resíduos que podem ser valorizados e utilizados para diversas aplicações por serem abundantes e renováveis. Conseqüentemente, os resíduos sólidos são valorizados para diferentes produtos de valor agregado, como materiais cerâmicos (TABIT et al., 2021; TABIT, et al. 2020), membranas cerâmicas (LI et al., 2020), adsorventes (CHIKRI et al., 2020), fertilizante de compostagem (CERDA et al., 2018), energia (FERREIRA et al., 2016), e assim por diante. A utilização de resíduos sólidos industriais como matéria-prima para a preparação das membranas cerâmicas tem um impacto positivo na redução de resíduos sólidos, fabricação de materiais de baixo custo com alto valor agregado e na proteção do meio ambiente. De fato, numerosos estudos mostraram a possibilidade de usar resíduos sólidos industriais como precursores para a produção de materiais de baixo custo (GE et al., 2019; ZOU et al., 2019). Nesse cenário as membranas cerâmicas porosas atraíram a atenção da comunidade científica e a indústria devido às suas vantagens significativas, incluindo sua área superficial, condutividade térmica e elétrica e resistência a ambientes químicos severos e altas temperaturas. Eles são usados em diferentes campos, como a remoção de poluentes de fases líquida e gasosa, usos médicos, catálise, filtração de fluido, dentre outros (EL MAGUANA et al., 2022).

As membranas cerâmicas são um tipo de membranas inorgânicas com uma camada estrutura, composta por uma camada de suporte macroporosa, um camada intermediária e uma camada superior microporosa seletiva (KIM, VAN DER BRUGGEN, 2010). Mais comumente,

materiais inorgânicos como Alumina (Al_2O_3), Zircônia (ZrO_2), Dióxido de titânio (TiO_2), Carbetto de Silício (SiC) são usados para a fabricação de membranas cerâmicas. Há também relatos de zeólita, cinzas volantes, caulinita, e mulita, entre outros (ARUMUGHAM et al., 2021). sendo investigados como alternativas para a preparação de membranas cerâmicas. Esses precursores cerâmicos possuem alta estabilidade térmica, excelente resistência mecânica e tolerância a amplas faixas de pH (DAS et al., 2016). Se as três camadas da membrana cerâmica são preparados a partir do mesmo material, a membrana é indicado como um tipo integral. Se os materiais usados para cada camada forem diferentes, eles são indicados como membranas cerâmicas compostas (ARUMUGHAM et al., 2021).

A Figura 2 apresenta uma breve visão geral dos principais marcos de desenvolvimento de membranas cerâmicas com uma ênfase particular em novas cerâmicas membranas e importantes aplicações de membranas. Destacando ainda a ênfase na cor verde de quando começaram a ser estudadas as membranas cerâmicas de baixo custo. A Figura 2 contém uma linha do tempo dos principais marcos das pesquisas relacionadas a membranas ao longo dos anos

Figura 2 – Linha do tempo das pesquisas e desenvolvimento de membranas cerâmicas.



Fonte: Adaptado de DONG et al., 2022.

As membranas em geral podem ser classificadas de acordo com seu tipo de filtração como membranas de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose inversa, eletrodialise, evaporação e permeação de gases. E se baseando também em outras variáveis como sua morfologia podendo ser densas ou porosas. As características da superfície da membrana que

estão em contato com a solução a ser separada é que vão definir a utilização de uma membrana densa ou porosa (HABERT, BORGES E NÓBREGA, 2006).

Subdivididas ainda em isotrópicas ou anisotrópicas, as anisotrópicas se caracterizam por uma região superior muito fina e poros irregulares, quando as duas regiões são constituídas por um único material a membrana será do tipo anisotrópica integral, se os materiais forem diferentes a membrana será do tipo anisotrópica composta (HABERT, BORGES E NÓBREGA, 2006).

De acordo com o tipo de transporte, sendo assim, O transporte das diferentes espécies através da membrana pode ocorrer por mecanismos diferentes: convectivo ou difusivo. O uso de um dos mecanismos ou ambos dependem da força motriz empregada e da morfologia da membrana. Do tipo de filtração, frontal ou tangencial. No método frontal, a corrente de alimentação flui em direção perpendicular à superfície da membrana, que favorece a diminuição do fluxo e formação de incrustações. Enquanto na filtração tangencial, esse fator é menos evidente devido à passagem da corrente de alimentação ser paralela à superfície da membrana (DEL COLLE et al.,2009).

METODOLOGIA

A fabricação de membranas cerâmicas envolve quatro etapas significativas, partindo da seleção de matérias-primas adequadas para o processamento das matérias-primas materiais por meios mecânicos, como trituração, peneiramento, mistura, entre outros, para obter mistura homogênea em seguida o material é moldado com a geometria desejada e a essa etapa da-se o nome de membrana verde. O material é submetido então a um tratamento térmico para obter uma membrana cerâmica estável. A geometria do suporte/membrana cerâmica final depende o tipo de método de fabricação. Assim, a microestrutura e propriedades morfológicas da membrana variam de um método para outro. Geralmente, as membranas cerâmicas são preparadas em duas diferentes configurações, planas e tubulares. Existem ainda outros arranjos complexos que são modificações de membranas tubulares, incluindo membranas de fibra oca, monólitos multicanal. As membranas planas são geralmente preparadas por métodos de prensagem, fundição em pasta e fundição em fita, enquanto os métodos tubulares membranas são muitas vezes fabricadas usando a técnica de extrusão. Algumas pesquisas relatam a fabricação de membranas cerâmicas usando técnicas de fundição por deslizamento, fundição por congelamento e inversão de fase (SANDHYA, KUMAR, 2021).

A metodologia do processo de obtenção de membranas cerâmicas num geral pode ser de dois tipos, por extrusão ou por compactação a seco uniaxial. A composição da membrana cerâmica é o principal fator condicionante do ciclo de sinterização, assim como sua microestrutura e valor agregado. No entanto, o método de fabricação determina a geometria final do produto, tendo também um grande impacto na microestrutura e, conseqüentemente, nas propriedades e desempenho dos o produto final (KRAKOWIAK, LOURENCO, ULM, 2011; HU et al., 2018). As membranas cerâmicas geralmente apresentam configurações diferentes, estabelecendo dois grupos principais: discos planos e membranas tubulares (CHIHU et al., 2019). Existem outras configurações mais complexas, como multicanal monólitos (favos de mel) e módulos de fibra oca, que podem ser consideradas variações de formas tubulares. Prensagem e extrusão de pó (para geometrias tubulares) representam os métodos de conformação comuns relatados, com uma minoria de estudos usando fundição por deslizamento, e muito raramente a técnica de inversão de fase (USMAN et al., 2021; DAS, CHAKRABARTY, BARKAKATI, 2017).

A prensagem a seco ou úmido uniaxial é usada para obter geometrias simples como planas membranas e suportes circulares. É uma técnica barata e adequado para grandes volumes de produção (VASANTH, PUGAZHENTHI, UPPALURI, 2013). Depois de misturar a matéria prima escolhida, a composição deve ser condicionada para posterior conformação. Isso inclui a possível adição de água e/ou aglutinantes orgânicos (álcool polivinílico, ácido poliacrílico, polietilenoglicol ou metilcelulose) em proporções adequadas (BESSA et al., 2013) que aumentam a resistência mecânica do suporte/membrana. O material é então compactado por pressão uniaxial aplicada por um êmbolo ou pistão, a pressão utilizada depende da composição, da compactação e as características finais do material. Com o aumento da pressão dende-se a acontecer um aumento na resistência mecânica, bem como redução do tamanho dos poros; no entanto, um existe pressão máxima além da qual um aumento na pressão aplicada a pressão não produz mais mudanças microestruturais. (SANDHYA, KUMAR, 2021).

Diferentes aditivos são geralmente adicionados nas composições para o processo de extrusão, como aglutinantes, plastificantes e lubrificantes que conferem as pastas o comportamento maleável adequado para extrusão, minimizando o aparecimento de defeitos e rachaduras. Normalmente, derivados de celulose como aglutinantes (metilcelulose, carboximetilcelulose, dentre outros.) e polímeros orgânicos como plastificantes ou lubrificantes (álcool polivinílico, polietileno glicol, entre outros.) vem sendo ao longo dos anos empregados (MAJOULI et al., 2012). Depois de misturar a composição com aditivos apropriados e água, é

amassado até obter uma pasta altamente viscosa. Após amassar, um homogeneização ou estágio de envelhecimento deve ser realizado (BURGGRAAF, 1996). Finalmente, a moldagem do suporte ocorre, normalmente, em uma extrusora, geralmente sob condições de vácuo para reduzir a quantidade de ar contidos na pasta. Na extrusão, a pasta cerâmica é forçada a passar através de uma matriz aplicando uma força com a ajuda de um embolo. A geometria da matriz determina a configuração final do o suporte (plano, tubular multicanal, estrutura em favo de mel) (MESTRE et al., 2019).

Portanto, é altamente necessário desenvolver novas membranas cerâmicas de baixo custo com aceitável ou mesmo excelente desempenho adequado para aplicações mais amplas. Na última década existe grande interesse em diminuir os custos de materiais de membrana, conformação e sinterização, para conseqüentemente diminuir o custo das membranas cerâmicas (MESTRE et al., 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sobre alguns resultados atuais a respeito das membranas cerâmicas para aplicações de tratamento de água é possível citar as análises laboratoriais, estudos de caso e aplicações de tecnologia de membrana cerâmica para tratamento de diversos efluentes como mineração, alimentos, papel e celulose, têxtil, etroquímica cal e farmacêuticos (SAMAEI, GATO-TRINIDAD, ALTAEE, 2018). Para o tratamento de água recuperada. concentrou-se ainda pesquisas nos novos avanços e tecnologias de membrana cerâmica para alcançar mitigação de incrustações e otimização de desempenho, como fluxo de permeado especialmente para sistemas de água oleosa (ZOUBEIK et al., 2017). Recentemente, vários artigos de revisão com tópicos relacionados a membranas cerâmicas de baixo custo foram publicados devido ao aumento das preocupações de pesquisas. Alguns autores introduzem ainda uma revisão abrangente focada em membranas cerâmicas de baixo custo discutindo suas características minerais, técnicas de fabricação e aplicações como águas residuais oleosas e suportes de membrana (HUBADILLAH et al., 2020). Além disso tem-se o foco na classificação de materiais para vários processos de fabricação, características de propriedade e potenciais aplicações industriais de membranas cerâmicas de baixo custo (MESTRE et al., 2019).

Existem também variadas discussões a respeito das principais técnicas de preparação e aplicações industriais e ambientais críticas de membranas cerâmicas de baixo custo do ponto de vista econômico e ambiental (ISSAOUI, LIMOUSY, 2019). Apesar dessas revisões existentes principalmente trabalhos discutindo classificações de baixo custo membranas e

aplicações relacionadas a estes novos materiais com análise de aplicabilidade e custo (DONG et al., 2022).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se então concluir com essa revisão bibliográfica que as membranas cerâmicas possuem grande potencial para serem aplicadas no controle da poluição ambiental especialmente de efluentes contaminados da indústria têxtil e embora esses materiais sejam cada vez mais usadas em várias aplicações de tratamento de água, diminuir o custo de capital e melhorar a eficiência ainda são duas questões-chave desafiadoras, as recentes pesquisas vêm obtendo resultados positivos quando se trata de inovação quanto a utilização de materiais de baixo custo para o desenvolvimento e fabricação das membranas especialmente os estudos que abordam a aplicação de argilas e resíduos agroindustriais.

REFERÊNCIAS

- A. BURGGRAAF, L. Fundamentals of Inorganic Membranes, Science and ceramic membranes from local Cameroonian clay applicable to water treatment. **Ceramics International**, v. 41, p. 2752–2759, 2015.
- ARUMUGHAM, T. et al. Recent developments in porous ceramic membranes for wastewater treatment and desalination: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 293, p. 112925, 2021.
- BAYOUSSEF, A. et al. Use of clays by-products from phosphate mines for the manufacture of sustainable lightweight aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124361, 2021.
- BESSA, L. P. et al. Macro-porous dolomite hollow fibers sintered at different temperatures toward widened applications. **Ceramics International**, v. 43, p. 16283–16291, 2017.
- BURGGRAAF, A.J.; COT, L. Fundamentals of Inorganic Membranes Science and Technology, series 4, 1st Ed., Elsevier Science B. V, Amsterdam, 1996.
- CARO, J. Basic Principles of Membrane Technology. **Zeitschrift für Physikalische Chemie**, v. 203, p. 263, 1998.
- CASTRO-MUÑOZ, R. et al. Membrane technologies assisting plant-based and agro-food by-products processing: A comprehensive review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 95, p. 219–232, 2020.
- CERDA, A. et al. Composting of food wastes: Status and challenges. **Bioresource Technology**, v. 248, p. 57–67, 2018.
- CHIH, R. et al. Elaboration and characterization of a low-cost porous ceramic support from natural Tunisian bentonite clay. **Comptes Rendus Chimie**, v. 22, n. 2, p. 188–197, 2019.
- CHIKRI, R. et al. Efficiency of Sawdust as Low-Cost Adsorbent for Dyes Removal. **Journal of Chemistry**, v. 2020, p. 1–17, 2020.

DAS, B.; CHAKRABARTY, B.; BARKAKATI, P. Separation of oil from oily wastewater using low cost ceramic membrane. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 34, p. 2559–2569, 2017.

DAS, D. et al. Recycling of coal fly ash for fabrication of elongated mullite rod bonded porous SiC ceramic membrane and its application in filtration. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 40, n. 5, p. 2163–2172, 2020.

DEL COLLE, R.; FORTULAN, C. A.; FONTES, S. R. Manufacture and characterization of ultra and microfiltration ceramic membranes by isostatic pressing. **Ceramics International**, v. 37, p. 1161–1168, 2011.

DEL COLLE, R.; HANEDA, R. N.; LONGO, E.; GODINHO, M. J. & FONTES, S. R. Método de impregnação química aplicado em tubos microporosos e membranas tubulares para a microfiltração de emulsões e suspensões de bactérias. **Cerâmica**, v. 54, p. 21-28, 2009.

DONG, Y. et al. Cost and efficiency perspectives of ceramic membranes for water treatment. **Water Research**, v. 220, p. 118629, 2022.

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**, v. 53, p. 310-317, 2022.

FERREIRA, C. I. A. et al. Comparative valorisation of agricultural and industrial biowastes by combustion and pyrolysis. **Bioresource Technology**, v. 218, p. 918–925, 2016.

GE, J. C. et al. Fabrication of low-cost and high-performance coal fly ash nanofibrous membranes via electrospinning for the control of harmful substances. **Fuel**, v. 237, p. 236–244, 2019.

GIWA, A. The Applications of Membrane Operations in the Textile Industry: A Review. **British Journal of Applied Science & Technology**, v. 2, p. 296–310, 2012.

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

HU, Z. et al. Preparation of a High-Performance Porous Ceramic Membrane by a Two-Step Coating Method and One-Step Sintering. **Applied Sciences**, v. 9, p. 52, 2018.

HUBADILLAH, S. K. et al. Preparation and characterization of inexpensive kaolin hollow fibre membrane (KHFM) prepared using phase inversion/sintering technique for the efficient separation of real oily wastewater. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 13, n. 1, p. 2349–2367, 2020.

ISSAOUI, M.; LIMOUSY, L. Low-cost ceramic membranes: Synthesis, classifications, and applications. **Comptes Rendus Chimie**, v. 22, n. 2, p. 175–187, 2019.

KHANMOHAMMADI, S.; TAHERI-NASSAJ, E. Micro-porous silica–yttria membrane by sol–gel method: Preparation and characterization. **Ceramics International**, v. 40, n. 7, Part A, p. 9403–9411, 2014.

KIM, J.; VAN DER BRUGGEN, B. The use of nanoparticles in polymeric and ceramic membrane structures: Review of manufacturing procedures and performance improvement for water treatment. **Environmental Pollution**, v. 158, n. 7, p. 2335–2349, 2010.

KRAKOWIAK, K.; LOURENCO, P.; ULM, F. Multitechnique Investigation of Extruded Clay Brick Microstructure. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 94, p. 3012–3022, 2011.

LI, L. et al. Recycling of construction and demolition waste to fabricate cost-effective anorthite ceramic membranes for enhanced separation of an oil-in-water emulsion. **Construction and Building Materials**, v. 265, p. 120512, 2020.

MAJOULI, A. et al. Elaboration of new tubular ceramic membrane from local Moroccan Perlite for microfiltration process. Application to treatment of industrial wastewaters. **Ceramics International**, v. 38, n. 5, p. 4295–4303, 2012.

MESTRE, S. et al. Low-cost ceramic membranes: A research opportunity for industrial application. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 39, n. 12, p. 3392–3407, 2019.

PRASETYO, H. et al. Technologies for treating wastewater from textile industry: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 3066–3072, 2022.

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

SANDHYA RANI, S. L.; KUMAR, R. V. Insights on applications of low-cost ceramic membranes in wastewater treatment: A mini-review. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 4, p. 100149, 2021.

SILVA, L. R. B.; BARBOSA, T. L. A.; RODRIGUES, M. G. F. Membrana zeolítica NaA : Preparação e aplicação para tratamento de emulsão óleo/água. In *Anais do IV CONEPETRO E VI WEPETRO*, 2021.

TABIT, K. et al. Cordierite-Based Ceramics from Coal Fly Ash for Thermal and Electrical Insulations. **Silicon**, v. 13, p.1-2, 2021.

TABIT, K. et al. Effect of CaO/SiO₂ ratio on phase transformation and properties of anorthite-based ceramics from coal fly ash and steel slag. **Ceramics International**, v. 46, n. 6, p. 7550–7558, 2020.

Technology, 1996.

USMAN, J. et al. An overview of superhydrophobic ceramic membrane surface modification for oil-water separation. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 643–667, 2021.

VASANTH, D.; PUGAZHENTHI, G.; UPPALURI, R. Performance of Low Cost Ceramic Microfiltration Membranes for the Treatment of Oil-in-water Emulsions. **Separation Science and Technology**, v. 48, p. 849-858, 2013

ZOU, D. et al. One step co-sintering process for low-cost fly ash based ceramic microfiltration membrane in oil-in-water emulsion treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 210, p. 511–520, 2019.

ZOUBEIK, M. et al. New Developments in Membrane Technologies Used in the Treatment of Produced Water: A Review. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 43, p. 2093–2118, 2017.