

doi 10.46943/VII.CONAPESC.2022.01.019

MEMBRANA CERÂMICA DE BAIXO-CUSTO APLICADA NO TRATAMENTO DE EFLUENTES OLEOSOS: UMA REVISÃO

JULIANA ARAÚJO MARQUES FRANÇA

Doutoranda do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina grande - UFCG, Julianamarquesquimica@gmail.com;

EDILÂNIA SILVA DO CARMO

Doutoranda do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina grande - UFCG, Edilania.carmo@eq.ufcg.edu.br;

ANTUSIA DOS SANTOS BARBOSA

Pesquisadora do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, antusiasb@hotmail.com;

MEIRY GLAUCIA FREIRE RODRIGUES

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

RESUMO

Um dos grandes desafios de indústrias geradoras de quantidades expressivas de água contaminada por óleo durante suas atividades de funcionamento é como remover o óleo disperso neste efluente industrial. Óleos e graxas podem estar contidos na água, formando uma mistura imiscível, de duas maneiras diferentes: livres ou emulsionados. Óleo livre é caracterizado por formar uma fase definida visivelmente separada da fase de água, estando o óleo acima da superfície da água devido a sua menor densidade. As membranas possuem um papel cada vez mais importante no enfrentamento desse desafio. Os principais motivos do avanço da tecnologia de separação por membranas estão no fato de que essas membranas trabalham com o uso relativamente baixo de energia. Os processos de separação que envolve membranas cerâmicas têm apresentado elevado potencial de aplicações em diversos setores

da indústria petrolífera. Esses materiais são utilizados em aplicações como: ultrafiltração, microfiltração, pervaporação e separação de gases. A necessidade da utilização de materiais de baixo custo com ótimos desempenhos fez com que fossem realizados cada vez mais estudos com o objetivo de selecionar matérias-primas de qualidade e adequadas para a utilização necessária. Dentro deste contexto, o seguinte estudo tem como objetivo apresentar as principais características das membranas cerâmicas de baixo-custo produzidas através de matéria prima menos onerosa, destacando as principais vantagens, os métodos de obtenção e aplicações na remoção de efluentes oleosos.

Palavras-chave: Membrana Cerâmica de Baixo-Custo, efluentes oleosos, Separação por membranas.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a rápida industrialização resultou na geração de uma enorme quantidade de efluentes. Indústrias petroquímicas, têxteis, curtumes e laticínios, geram efluentes com altas concentrações de óleos, gorduras, demanda química de oxigênio (DQO), demanda biológica de oxigênio (DBO) e sólidos totais em suspensão (TSS) (RANI E KUMAR, 2021). Com a busca por recursos mais eficientes, destinados ao tratamento de efluentes oleosos, destacam-se os processos de separação por membranas. Muitos estudos foram conduzidos selecionando matérias-primas baratas, em seguida, ajustando características e, portanto, permitindo que as membranas cerâmicas sejam adaptadas para gama de aplicações industriais.

As membranas atuam como uma barreira seletiva, que sob o efeito de uma força motriz permitirá ou impedirá total ou parcialmente o fluxo de certos elementos entre os dois meios que os separa. Uma força de transferência pode ser gerada por um gradiente de pressão, concentração ou potencial elétrico aplicado para induzir a permeação através da membrana (ISSAOIU e LIMOUSY, 2019; HABERT et al 2006).

Geralmente, uma membrana cerâmica tem uma assimetria estrutura composta por três camadas: camada externa que forma um suporte macroporoso e fornece uma alta resistência mecânica para a membrana fabricada; camada interna que garante a separação; camada intermediária que liga as camadas internas e externas (LI, 2007).

Durante as últimas décadas, as aplicações da membrana cerâmica aumentaram devido às suas excelentes propriedades químicas, térmicas e estabilidade mecânica e maior eficiência de separação (BENITO et al., 2005; VASANTH et al., 2013). No futuro próximo, a exploração de novos tipos de materiais cerâmicos e técnicas de fabricação simples poderia desempenhar um papel significativo para a preparação de membranas de baixo custo. A base de alumina membrana cerâmica para aplicação industrial é limitada devido à maior custo e temperatura de sinterização (YANG 1998). Portanto, as membranas cerâmicas de baixo custo à base de argila seriam ainda aplicáveis às indústrias. Muitos pesquisadores usaram argilas de baixo custo, como argila in natura, argila marroquina, argila tunisiana, argila sepiolita, argila argelina, dolomita e caulim (MESTRE et al., 2019).

As membranas cerâmicas estão sendo cada vez mais utilizadas em muitos setores econômicos devido às suas vantagens, tais como, melhor estabilidade

química e térmica, resistência mecânica, vida longa e pouco impacto da poluição no meio ambiente (SAMAEI et al., 2018).

Diante desse contexto, o principal objetivo deste trabalho é apresentar as características gerais das membranas cerâmicas de baixo custo para tratamento de efluentes oleosos, destacando suas vantagens, os seus métodos de obtenção.

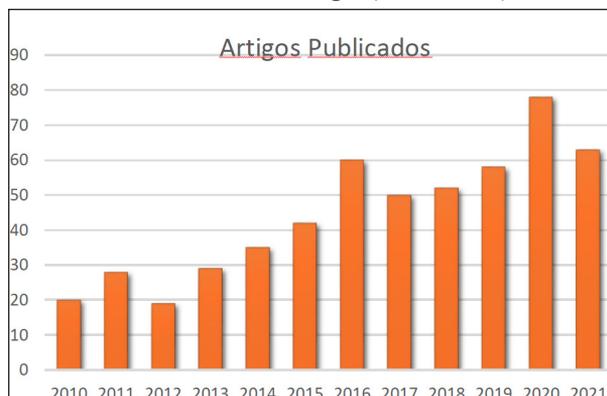
METODOLOGIA

Para o estudo, foi utilizado a metodologia de pesquisa bibliográfica, de natureza qualitativa (Pereira et al., 2018), realizando buscas no banco de dados do SCOPUS, utilizando os termos a seguir: Membrana Cerâmica de Baixo-Custo, efluentes oleosos, Separação por membranas. Foram utilizadas as bibliografias onde apresentaram maior interesse para o estudo, os trabalhos selecionados foram os publicados entre os anos de 2010 a 2021. A presente revisão aborda um tema geral, reunindo os vários trabalhos sobre a produção e aplicação de membranas de membranas cerâmicas de baixo custo aplicada na separação óleo/água. Este estudo se trata de uma revisão temática, centrada no conceito, histórico, métodos de obtenção, e aplicações das membranas cerâmicas de baixo custo, sendo um trabalho de nível informativo, apresentando os diversos tipos de materiais que podem ser empregados na produção de uma membrana cerâmica e suas principais características. Assim, a revisão apresentada é uma síntese das características, produção e aplicação de membranas cerâmicas de baixo custo aplicada no tratamento de efluentes oleosos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No gráfico 1, é mostrado o número de artigos publicados por ano, onde podemos perceber uma crescente no número de artigos publicados confirmando que cada vez mais vem sendo buscado alternativas para baratear a fabricação de membranas cerâmicas. Sendo o ano de 2020 o que houve mais publicações.

Gráfico 1 – Número de Artigos publicados por ano.



Fonte: Scopus (2021)

No gráfico 2, temos o número de artigos publicados por países, a China lidera com média de 120 artigos publicados, em seguida temos a Índia e os Estados Unidos, o Brasil encontra-se em 11^o posição com uma média de 30 artigos publicados, podemos perceber que ainda temos muito o que avançar em relação a essas pesquisas utilizando Membranas cerâmicas de baixo custo para tratamento de efluentes oleosos.

Gráfico 2 – Número de artigos publicados por países.

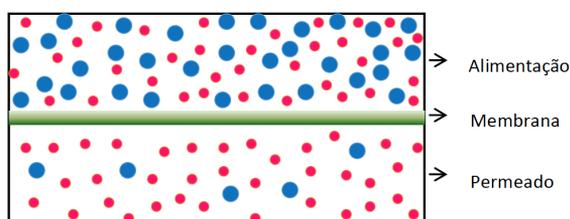


Fonte: Scopus (2021)

Aspectos Gerais

Por volta da década de 70, surgiu uma nova 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, como mostrado na Figura 1, onde a capacidade de separação das membranas irá depender da porosidade e da seletividade. (HABERT, BORGES E NÓBREGA, 2006; SILVA et al., 2003).

Figura 1- Representação gráfica de uma membrana cerâmica.



Fonte: Burggraaf (1996).

As membranas são de extrema importância para a tecnologia de separação, uma vez que são processos rentáveis quando otimizado, dispensam a utilização de produtos químicos, operam à temperatura ambiente, são relativamente simples, possuem fácil utilização e podem ser aplicados na separação de ambas as misturas de líquidos e gases (ZAWRAH et al., 2014). Com isso, estão sendo cada vez mais usadas em muitos setores econômicos, pois além dessas características, possuem estabilidade química e térmica, resistência mecânica, vida longa e pouco impacto da poluição no meio ambiente (COLLE et al., 1997; ELOMARI et al., 2015).

De acordo com Habert et al. (2006), as membranas podem ser naturais ou sintéticas, as membranas sintéticas são divididas em dois grupos como mostra a Tabela 1. Os materiais orgânicos, em sua grande maioria polímeros, e os inorgânicos, como metais e cerâmicos. Normalmente as membranas de natureza orgânica apresentam menor custo de produção do que as inorgânicas. No entanto, estas últimas apresentam uma maior vida útil e permitem limpezas mais eficientes.

Tabela 1 - Classificação das membranas sintéticas.

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

Fonte: Habert, Borges e Nóbrega (2006).

As membranas poliméricas são usadas em muitos processos industriais. Uma gama de polímeros pode ser usada, como derivados de celulose, polivinilideno difluoreto (PVDF), polissulfona (PS), poliéter sulfona (PES), poliácridonitrila (PAN), politetrafluoroetileno (PTFE) e policloreto de vinila (PVC).

Essas membranas podem ser adaptadas às especificidades do processo em que são utilizadas, tornando mais eficaz a separação seletiva. Selecionar uma membrana polimérica para uma determinada tarefa não é tão simples, pois o polímero deve ter afinidade e deve suportar as condições severas da separação. As membranas poliméricas podem ser produzidas apenas por polímeros ou compósitas (híbridas) a partir de misturas com outros compostos. Podem ser preparadas tanto com morfologia porosa quanto densa, dependendo do tipo de método de preparação e aplicação a que se destinam e podem ser submetidas à modificação superficial, para melhorar funcionalidades (DICKHOUT et al., 2017).

De acordo com os autores (Gupta, 2016 e Habert et al., 2006), os métodos utilizados para preparação de membranas poliméricas porosas isotrópicas, geralmente são, sinterização, estiramento, gravação e inversão de fases.

Geralmente as membranas poliméricas são aplicadas em processos com baixa temperatura e para a separação de misturas quimicamente inertes.

Membranas Inorgânicas

As membranas inorgânicas são constituídas em sua maioria por óxidos tais como sílica, titânia, zircônia e alumina, entre outros, que podem ser utilizados isoladamente ou combinados, como é o caso das membranas compósitas (ARMOA e JAFELICCI, 2011).

Características gerais das membranas

De acordo com os autores (Manni et al., 2020 e Richard, 2012), nas últimas décadas, os processos com membrana têm sido amplamente utilizados em muitas aplicações industriais, como tratamento de água (água potável, águas residuais e dessalinização da água do mar), separação de gás (produção de bi hidrogênio e recuperação de oxigênio), indústria petroquímica (petróleo bruto, gás natural e reações de desidrogenação), indústria alimentícia (laticínios, sucos e vinho) e indústria farmacêutica. Sendo classificadas em microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose inversa, eletrodialise, pervaporação e permeação de gases.

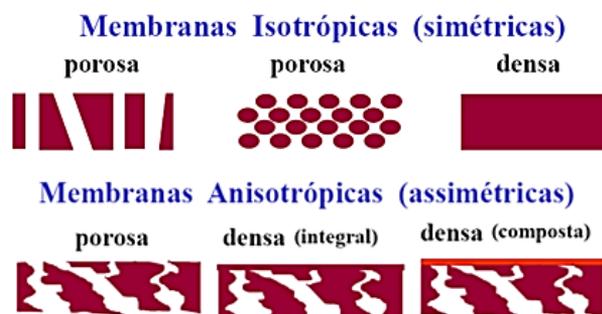
Classificação quanto a morfologia

Em função das aplicações a que se destinam, as membranas apresentam diferentes morfologias. De um modo geral, as membranas podem ser classificadas em duas grandes categorias: densas e porosas. 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).

As membranas são consideradas densas quando o transporte dos componentes envolve uma etapa de dissolução e difusão através do material que constitui a membrana. A membrana é denominada porosa quando o transporte dos permeantes ocorre preferencialmente em uma fase fluida contínua, que preenche os poros da membrana (HABERT, BORGES E NÓBREGA, 2006).

Tanto as membranas densas quanto as porosas (mostrada na Figura 2), podem ser classificadas como isotrópicas ou anisotrópicas, as anisotrópicas se caracterizam por uma região superior muito fina, mais fechadas sendo com ou sem poros, quando as duas regiões são constituídas por um único material a membrana será do tipo anisotrópica integral, se os materiais forem diferentes a membrana será do tipo anisotrópica composta (HABERT, BORGES E NÓBREGA, 2006).

Figura 2 - Representação das membranas isotrópicas e anisotrópicas.



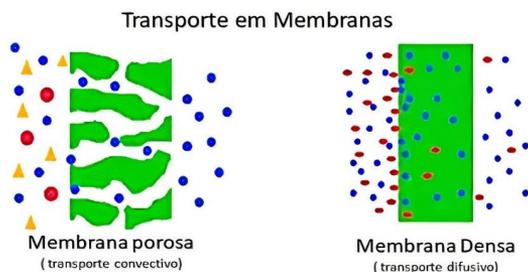
Fonte: Habert, Borges e Nóbrega, 2006.

Geralmente, uma membrana cerâmica tem uma assimetria estrutural composta por três camadas: a camada externa forma um suporte macroporoso e fornece uma alta resistência mecânica para a membrana fabricada. A segunda é a camada interna garantindo a separação. A camada intermediária liga as camadas internas e externas (LI, 2007).

Transporte em membranas

De acordo com Del Colle et al., (2009), nos processos com membranas é necessária a existência de uma força motriz para que ocorra o transporte da espécie (de interesse) através da membrana. A grande maioria dos processos com membranas não utilizam energia térmica para mudanças de fase e o gradiente de potencial químico pode ser expresso em termos do gradiente de pressão ou de concentração. O transporte das diferentes espécies (representado na Figura 3), pela 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.

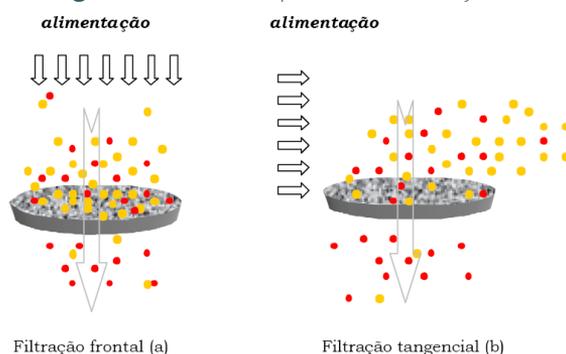
Figura 3 - Transporte em membranas porosas e densas.



Fonte: Habert, Borges e Nóbrega, 2006.

Dois métodos mostrados na Figura 4, 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).

Figura 4 - Métodos aplicados na filtração.



Fonte: Habert, Borges e Nóbrega, 2006.

Membranas cerâmicas de baixo custo

A membrana cerâmica de baixo custo consiste de suportes simétricos que servem como substratos nos quais uma ou mais camadas são aplicadas, cuja

composição pode ser também com base em matérias-primas de baixo custo (argilas, feldspatos, etc., ou até mesmo resíduos) ou em matérias-primas normalmente usadas para obter camadas seletivas (alumina, titânia, zircônia, etc).

Na literatura, é possível encontrar uma grande variedade de matérias-primas de baixo custo que podem ser aplicadas na obtenção de membranas cerâmicas, dentre elas estão as argilas, a magnesita e o caulim (ALFTESSI et al., 2021; KAMOUN et al., 2020; MANNI et al., 2020; BELIBI et al., 2015., ELOMARI et al., 2015; WANG et al., 2015). Algumas membranas preparadas com argila apresentam desvantagens, como baixa porosidade, tamanho de poros pequenos ou alta retração de sinterização, como resultado da alta taxa de argilas devido à existência de impurezas em sua composição (MESTRE et al., 2019).

Muito interesse tem sido demonstrado na produção de membranas cerâmicas porosas utilizando materiais de baixo custo. Com efeito, a escolha de matérias-primas adequadas (incluindo aditivos ou ligantes) é crucial para a preparação da membrana em termos econômicos.

Muitos estudos tem sido realizados na tentativa de produzir membranas com matérias-primas de baixo custo com recursos mais eficientes e desempenho eficiente, ajustando suas características. E dessa forma, portanto, permitindo que as membranas cerâmicas sejam adaptadas para uma gama de aplicações industriais (alimentícias, farmacêuticas, tratamento de águas residuárias têxteis, tratamento de água produzida de petróleo, etc). Muitas tentativas foram realizadas por pesquisadores para produzir membranas cerâmicas porosas a partir de materiais específicos, mas as aplicações industriais permanecem muito limitadas devido ao alto custo das matérias-primas utilizadas, tais como alumina, titânia e zircônia.

A tecnologia de separação por membranas tem as vantagens da separação verde e de alta pureza e é a tecnologia mais promissora para purificar águas residuais (WANG et al., 2021).

Materiais para preparação das membranas

Argila Chocobofe

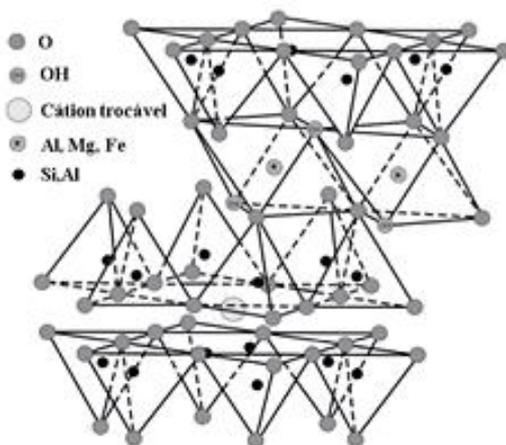
De acordo com os autores Souza Santos, (1992) e Buriti et al., (2017), as argilas são materiais terrosos, de granulação fina, formadas quimicamente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio que geralmente adquire, quando umedecida com água, certa plasticidade. São compostos por partículas

crystalinas extremamente pequenas, com um número restrito de argilominerais, podendo conter matéria orgânica, sais solúveis, partículas de quartzo, pirita, calcita, outros minerais residuais assim como também minerais amorfos.

A argila esmectita também conhecida como montmorilonitas e Bentonitas, caracterizam-se por possuírem uma alta capacidade de troca catiônica, é uma das matérias-primas mais baratas da membrana disponível no Brasil, pois são abundantes na natureza e possuem um baixo custo. (SOUZA SANTOS, 1992).

As esmectitas se caracterizam por serem filossilicatos ou silicatos em camadas constituídas por duas folhas de tetraedros “ensanduichando” uma folha central de octaedros, unidas entre si por oxigênios comuns às mesmas (Figura 5), apresentando deste modo uma estrutura cristalina classificada como do tipo 2:1. É um dos mais importantes grupos de argilas encontrados em solos e sedimentos (SOUZA SANTOS, 1992).

Figura 5 - Representação esquemática da estrutura da esmectita.



Fonte: Fonseca et al 2016

Segundo o autor (Souza Santos, 1992), os argilominerais podem ser classificados de acordo a proporção existente entre as camadas tetraédricas de óxido de silício e octaédricas de alumínio (podendo ser na forma de óxido ou hidróxido):

- i. Duas camadas (1:1): caulinita (equidimensional) e haloisita (alongada);
- ii. Três camadas (2:1): com reticulado cristalino expansivo como a montmorilonita e vermiculita (equidimensional) e a saponita e nontronita (alongada); com reticulado cristalino não-expansivo como a illita;

- iii. De camadas mistas regulares: clorita;
- iv. De estruturas em cadeias: paligorsquita e sepiolita.

Os argilominerais do grupo da montmorilonita são constituídos por duas folhas de silicato tetraédricas, com uma folha central octaédrica, unidas entre si por oxigênios comuns às folhas. Argilas constituídas por esses argilominerais geralmente possuem, em elevado grau, propriedades plásticas e coloidais e apresentam grandes variações em suas propriedades físicas. Essas variações podem frequentemente, ser atribuídas a variações na natureza dos cátions trocáveis que neutralizam a estrutura cristalina e a fatores estruturais e composicionais como variações na população das posições octaédricas (SOUZA SANTOS, 1992).

Vários pesquisadores relataram o uso de argila como material de partida com outros aditivos para produção de membranas (NANDI et al., 2011; VANSANT et al., 2011; MONASH et al., 2011; KAUR et al., 2015; KAUR et al., 2016).

Tratamento de Efluentes Oleosos

Atualmente, as águas residuais oleosas são produzidas por diversos setores da indústria como farmacêutica, petroquímica e metalúrgica, resultando em problemas de poluição ambiental e exploração de recursos. (ALOULOU et al., 2020). Como consequência, há uma necessidade crucial de tratamento de águas residuais oleosas antes de seu descarte seguro (HUA et al 2007 e CHAKRABARTY et al 2008). Para resolver este problema, uma grande variedade de técnicas, como processo de oxidação avançada (POA), filtração por membrana, separação ultrassônica, coagulação, flotação por ar, desmulsificação química e sedimentação por gravidade para tratamento de efluentes oleosos têm sido empregadas nos últimos anos (GOLSHENAS et al., 2020).

Normalmente, as técnicas de tratamento de efluentes oleosos, como flotação por ar, separação por gravidade e skimming, coagulação e floculação, são atormentadas com alto custo de operação, corrosão, baixa eficiência e problemas de recontaminação (ONE et al 2014). Além disso, a maioria desses métodos não pode eliminar gotículas de óleo de tamanho micron ou submicron (HURUM et al., 2003). Entre as técnicas mais promissoras estão a tecnologia de separação por membranas como o tratamento de emulsão de óleo microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF), osmose reversa (RO) e destilação por membrana (MD) (ALOULOU et al., 2021). Especialmente, as membranas cerâmicas

oferecem inúmeras vantagens únicas na separação óleo/água devido às suas excelentes propriedades mecânicas, químicas e térmicas. O mais interessante, o óleo colado na membrana cerâmica pode ser eliminado por tratamento térmico para recuperar o desempenho da membrana (ALOULOU et al., 2021).

A utilização de membranas para tratamento de efluentes oleosos, além do seu baixo consumo de energia, fácil operação e alta eficiência para separação de misturas óleo/água, em especial emulsões óleo/água, pode ser destacada. Dessa forma, os estudos nesse tema estão voltados para o desenvolvimento de materiais inovadores que apresentem resistência ao fouling e estabilidade química e física, sendo seguros, eficazes e de baixo custo (ALZAHIRANI e MOHAMMAD, 2014; PADAKI et al., 2015).

ESTADO DA ARTE

Mittal et al. (2011), produziram membranas compósitas (cerâmica-poli-mérica hidrofílica) de baixo custo para tratamento de águas residuais oleosas utilizando argila, caulim e uma pequena quantidade de materiais de ligação. O suporte foi preparado por moldagem, enquanto a membrana compósita foi preparada por imersão em solução de acetato de celulose (CA) a 10% em acetona (p/v). A membrana obtida foi sinterizada a 1000 °C obteve resistência mecânica de 6,1 MPa, tamanho médio dos poros de 28 nm e porosidade igual a 0,56 % obtendo rejeição de 93,00 %.

Boudaira et al. (2016), elaboraram membranas cerâmicas de baixo custo a partir de caulim e calcita usando o método de extrusão. Esses suportes foram sinterizados a 1150 °C obtendo tamanho médio de poro de cerca de 4 µm, porosidade em torno de 50,50 % e um valor de resistência de 28 Mpa.

Shweta et al. (2017), produziram suportes cerâmicos de baixo custo preparado a base de argila, caulim e uma pequena quantidade de materiais de ligação. O suporte foi preparado através do método de compactação a seco, obtendo assim membranas em forma de disco com dimensões de 45 mm × 3 mm. A membrana obtida foi sinterizada entre 900-1000°C, obtendo tamanho médio dos poros de 4µm e porosidade igual a 35 % obtendo remoção de 97-100 %.

Lorente- Ayza et al. (2017), desenvolveram membranas cerâmicas de baixo custo para tratamento de efluentes em biorreatores de membrana (MBRs) e/ou tratamentos terciários. As membranas foram preparadas por quatro procedimentos diferentes, prensagem uniaxial e extrusão, com e sem adição de amido

para geração de poros. A temperatura de sinterização das membranas variou de 1060 a 1160 °C e tempo de sinterização de 6 a 120 min.

Riduan et al. (2019), produziram membranas cerâmicas a base de bagaço de cana de açúcar, para remoção de 3 tipos de mistura real de óleo de fábrica de óleo de palma (POME) obtendo percentual de remoção de até 99 % e 134 L/m².h.

Malik et al. (2020), prepararam membranas cerâmicas de baixo custo a base de dolomita como formador de poros, o caulim e cinzas volantes em diferentes composições. A membrana foi sinterizada entre 800 e 1000 °C. A membrana obteve tamanho médio dos poros de 0,62 µm e porosidade igual a 46,3 % obtendo rejeição de 97,4 – 98,8%.

Belgada et al. (2021), fabricaram membranas cerâmicas de baixo custo utilizando fosfato natural marroquino via prensagem a seco. As membranas foram sinterizadas entre 900 e 1100 °C, obtendo tamanho médio de poro de 0,26 µm, porosidade de 25,6 %. O desempenho da membrana otimizada foi avaliado para pré-tratamento de água do mar bruta para dessalinização medindo a melhoria da qualidade da água do mar em termos de carbono orgânico total (TOC), turbidez, obtendo redução de carbono orgânico total e turbidez de 73 e 98 % respectivamente.

Tabela 1 - Membranes of microfiltration inorganic used for the oil-water emulsion separation results.

Membranas cerâmicas	Método de preparação	Parâmetros	Fluxo (L.m ⁻² .h)	Coefficiente de Rejeição (%)	Referência
Compósita de baixo custo	Compactação a seco uniaxial	Óleo sintético	----	93,00	Mittal et al. 2011
Baixo custo	Compactação a seco	Água residual	-----	97-100	Shweta et al. 2017
Baixo custo	Compactação a seco	Óleo POME	134,00	99,00	Riduan et al. 2019
Baixo custo	Prensagem a seco	Água do mar	---	98,00	Belgada et al. 2021
NaA/ α -Al ₂ O ₃	Hidrotérmica 100 °C 4 h	Óleo sintético			
		C _{alimentação} (mg/L): 30	55,26	98,00	Silva et al., 2021
		C _{alimentação} (mg/L): 100	50,00	97,00	
Pressão: 2.0 bar					
NaA/gamma-alumina	Hidrotérmica 100 °C 4 h	Óleo sintético			Barbosa et al., 2020
		C _{alimentação} (mg/L): 100	150,00	97,80	
		Pressão: 2.0 bar			
ZSM- 5/ gamma-alumina	Pressão atmosférica, 25 °C	Óleo sintético Cf (mg/L): 600 Pressão atmosférica	264,00	91,30	Scheibler et al., 2014

Membranas cerâmicas	Método de preparação	Parâmetros	Fluxo (L.m ⁻² ..h)	Coefficiente de Rejeição (%)	Referência
Zeolite (MCM-22/ α - alumina) ZMDC	Dip coating: 150 °C, 10 days	Synthetic oil, Cf=100 mg/L, Cp =3.21 mg/L, pressure=2.0 bar, temp.=25 °C, 1st cycle	696,00	96,80	Barbosa et al.,
Zeolite (MCM-22/ α - alumina) ZMVPT	Vapor phase transport: 150 °C, 10 days	Synthetic oil, Cf=100 mg/L, Cp =3.98 mg/L, pressure=2.0 bar, temp.=25 °C, 1st cycle	721,00	96,40	Barbosa et al.,
Zeolite (Y/ γ - alumina)	Dip coating: 90 °C, 7 h	Synthetic oily wastewater, Cf=500 mg/L, Cp=50 mg/L, pressure=1.0 bar, temp.=25 °C	565,00	90,00	Barbosa et al., 2018
Zeolite (Y/ α - alumina)	Dip coating: 90 °C, 7 h	Synthetic oily wastewater, Cf=500 mg/L, Cp=33 mg/L, pressure=1.0 bar, temp.=25 °C	875,00	53,40	Barbosa et al., 2018
Zeolite (NaY/ γ - alumina)	Rubbing: 90 °C, 7 h	Synthetic oily wastewater, Cf=100 mg/L, Cp=4.7 mg/L, pressure=2.0 bar, temp.=25 °C	746,00	95,20	Barbosa et al., 2018
Zeolite (NaY/ α - alumina)	Rubbing: 90 °C, 7 h	Synthetic oily wastewater, Cf=100 mg/L, Cp=1.3 mg/L, pressure=2.0 bar, temp.=25 °C	1036,00	98,70	Barbosa et al., 2018.
Baixo custo	Compactação a seco uniaxial 25 °C	Óleo sintético Cf (mg/L): 235 Pressão: 2 bar	16,53	100,00	Silva et al., 2021

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As membranas cerâmicas apresentam uma grande versatilidade de aplicações em diferentes áreas, como no tratamento de águas, tratamento de despejos industriais e biotecnologia. Sendo uma ótima alternativa para o tratamento de efluentes oleosos. Vários tipos de argilas e resíduos podem ser utilizados para a fabricação de membranas cerâmicas de baixo custo via compactação uniaxial a seco.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ/Pb), e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (Capes), pelas bolsas concedidas.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, A. S.; BARBOSA, A. S.; RODRIGUES, M. G. F, **Materials Science Forum Fórum**, 912 -12, 2018.

A.S. Barbosa, A.S. Barbosa, T.L.A. Barbosa, M.G.F. Rodrigues, **Separation and Purification Technology** **200** 141, 2018.

BARBOSA, A. S.; BARBOSA, A. S.; RODRIGUES, M. G. F. Contaminants removal in wastewater using membrane adsorbents zeolite Y/Alpha-Alumina. **Materials Science Forum**, *MSF*, 12–15, 2018. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.912.12>

BARBOSA, A. S.; BARBOSA, A. S.; RODRIGUES, M. G. F. Influence of the methodology on the formation of zeolite membranes MCM-22 for the oil/water emulsion separation. **Ceramica**, *65*(376), 531–540, 2019. <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653762676>

BARBOSA, A. S.; BARBOSA, A. S.; RODRIGUES, M. G. F. Synthesis of MCM-22 zeolite membrane on a porous alumina support. **Materials Science Forum**, *805*, 272–278, 2015. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.805.272>

BARBOSA, A. S.; BARBOSA, A. DOS S.; BARBOSA, T. L. A.; RODRIGUES, M. G. F. Synthesis of zeolite membrane (NaY/alumina): Effect of precursor of ceramic support and its application in the process of oil–water separation. **Separation and Purification Technology**, *200*, 141–154, 2018.

BELIBI BELIBI, P.; NGUEMTCHOUIN, M.M.G.; RIVALLIN, M.; NDINSAMI, J.; SIELIECHI, J.; CERNEAUX, S.; NGASSOUM, M.B.; CRETIN, M.; Microfiltration ceramic membranes from local Cameroonian clay applicable to water treatment. **Ceramics International**, v. 41, p. 2752–2759, 2015.

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.

BOUDAIRA, B.; HARABI, A.; BOUZERARA, F.; ZENIKHERI, F.; FOUGHALI, L.; GUECHI, A. Preparation and characterization of membrane supports for microfiltration and ultrafiltration using kaolin (dd2) and CaCo₃. **Desalination and water Treatment**. 2016.

BURGGRAAF, A.J.; COT, L. Fundamentals of Inorganic Membranes Science and Technology, series 4, 1st Ed., Elsevier Science B. V, Amsterdam, 1996. ceramic membranes from local Cameroonian clay applicable to water treatment. **Ceramics International**, v. 41, p. 2752–2759, 2015.

BURITI, B.M.A.B.; BURITI, J.S.; CARTAXO, J.M.; NEVES, G.A. Estudo das propriedades estruturais, térmicas, químicas e granulométricas de argilas com perspectivas em tratamentos medicinais, terapêuticos e estéticos. **14º Congresso da Sociedade Latino Americana de Biomateriais**, Órgãos Artificiais e Engenharia de Tecidos - SLABO 5ª Edição do Workshop de Biomateriais, Engenharia de Tecidos e Órgãos Artificiais - OBI 20 a 24 de agosto de 2017 - Maresias - SP – Brasil.

COT, L.; GUIZARD, C.; JULBLE, A.; LARBOT, A. Inorganic Membranes: Preparation Characterization, Specific Applications. **Industrial Ceramics**, v. 8, n. 1, p. 53-57, 1988.

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.

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

ELOMARI, H., ACHIOU, B., OUAMMOU, M., ALBIZANE, A., BENNAZHA, J., ALAMIYOUNSSI, S., ELAMRANI, I. Elaboration and characterization of flat membrane supports from Moroccan clays. Application for the treatment of wastewater. **Desalination Water Treatment**, p. 1-9, 2015.

FANE, A. G.; WANG, R.; JIA, Y.; **Membrane Technology: Past, Present and Future.** In: Wang, L. K.; Chen, J. P.; Shaman, N. k. membrane and desalination Technologies. **Springer Science + Business Media**, LLC, p. 1 – 38, 2011.

GAVIRIA-ARROYAVE, M. I.; OSORIO-ECHAVARRÍA, J.; GÓMEZ-VANEGAS, N.A. Evaluación del escalamiento de un reactor para el tratamiento de efluentes textiles usando Bjerkandera sp. **Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia**, v.88, p. 80-90, 2018.

GUPTA, H.V.; KLING, H.; On typical range, sensitivity, and normalization of Mean Squared Error and Nash-Sutcliffe Efficiency type metrics. **Water Resources Research**, v. 47, n. 10 (W10601), 2011.

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

HUBADILLAH, S.K.; OTHMAN, M.H.D.; RAHMAN, M.A.; ISMAIL, A.F.; JAAFAR, J. 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 Chemistry**, v. 13, p. 2349–2367, 2020.

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

KAMOUN, N.; HAJJEJI, W.; ABID, R.; RODRIGUEZ, M. A.; JAMOUSI, F. Elaboration and properties of low-cost ceramic microfiltration membrane from local Tunisian clay for wastewater treatment. **Cerâmica**, v. 66, p. 386-393, 2020.

KAUR, H.; KUMAR, V.; RAJ, B.; GUPTA, R.K. Effect of carbonates composition on the permeation characteristics of low-cost ceramic membrane supports. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 44, p.185-194, 2016.

KUMBHAJ, S.; KULKARNI, S.K.; PATWARDHAN, V.A. Synthesis and characterization of low-cost flat membrane support. **International journal of Engineering technology science and Research**, v. 4, 2017.

LI, C.; SUN, W.; LU, Z.; AO, X.; LI, S. Ceramic Nanocomposite Membranes and Membrane Inlay: A review, **Water Research**, 2020.

LI, K. Ceramic Membranes for Separation and Reaction, **John Wiley & Sons**, Inc, Chichester, 2007.

LORENTE-AYZA, M.; PEREZ-FERNANDEZ, O.; ALCALA, R.; SANCHEZ, E.; MESTRE, S.; CORONAS, J.; MEDENDEZ. Comparison of porosity assessment techniques for low-cost ceramic membranes. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**. V. 56, p 29-38, 2017.

MALIK, A.; GROHMANN, E. **Environmental protection strategies for sustainable development**. Springer, Dordrecht, 2012.

MANNI, A.; ACHIOU, B.; KARIM, A.; HARRATI, A.; SADIK, C.; OUAMMOU, M.; ALAMI, S.; YOUNSSI.; EL BOUARI, A. New low-cost ceramic microfiltration membrane made from natural magnesite for industrial wastewater treatment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. v. 8, p. 103906, 2020.

MESTRE, S.; GOZALBO, A.; LORENTE-AYZA, M. M.; SÁNCHEZ, E. Low-cost ceramic membranes: A research opportunity for industrial application. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 22, p. 175-187, 2019.

MITTAL, P.; JANA, S.; MOHANTY, K. Synthesis of low-cost hydrophilic ceramic-polymeric composite membrane for treatment of oily wastewater. **Desalination** v. 282, p. 54-62, 2011.

MONASH, P; PUGAZHENTHI, G. Development of Ceramic Supports Derived from Low-Cost Raw Materials Membrane Applications and its Optimization Based on Sintering Temperature. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 8, p. 227-238, 2011.

NANDI, B. K.; UPPALURI, R.; PURKAIT, M. K. Identification of optimal membrane morphological parameters during microfiltration of mosambi juice using low cost ceramic membranes. **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, p. 214-223, 2011.

PADAKI, M.; MURALI, R, S.; ABDULLAH, MS.; MISDAN, N.; OSLEHYANI, A.; KASSIM, M.; HILAL, N.; ISMAIL, AF. Membrane technology enhancement in oil–water separation. A review. **Desalination**. v, 357, p.197–207, 2015.

PARMA, S.; CHOWDHURY, P. Preparation and characterization of microfiltration ceramic membrane for oily waste water treatment. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 3, p. 725-730, 2014.

PEREIRA, L.; ALVES, M.; **Capítulo 4: corantes - impacto ambiental e remediação** A. Malik, E. Grohmann (Eds.) , Environmental Protection Strategies for Sustainable Development, Strategies for Sustainability , Springer Science + Business Media BV., p. 111 - 154 , 2012.

RICHARD, W. BAKER.; **Membrane Technology and applications: Overview of Membrane**. Science and Technology. In: Richard W. baker.; Ed. Jonh Wiley & Sons – USA-2012.

RIDUAN, M.J.; KHADIJAH, S.H.; ZAWATI, H.; DZARFA, H.M.O.; ZAINI, M.Y. Novel superhydrophobic and superoleophilic sugarcane green ceramic hollow fibre membrane hybrid oil sorbent-separator of real oil and water mixture. **Materials Letters** v. 240, p. 136-139, 2019.

RIPPERGER, S.; ALTMANN, J. Crossflow microfiltration: state of art. **Separation and purification technology**. v. 26, p. 19-31, 2002.

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.

SCHEIBLER, J. R.; SANTOS, E. R. F.; BARBOSA, A. S.; RODRIGUES, M. G. F. Performance of zeolite membrane (ZSM-5/ γ -Alumina) in the oil/water separation process. *Desalination and Water Treatment*, 56(13), 3561–3567, 2015.

SOUZA SANTOS, P. *Ciência e Tecnologia de Argilas*, v. 1, 2ª Ed., Ed. **Edgard Blucher**. v. 2, 3, 1992.

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.

VASANTH, D.; PUGAZHENTHI, G.; UPPALURI, R. Fabrication and properties of low cost ceramic microfiltration membranes for separation of oil and bacteria from its solution. **Journal of Membrane Science**. v. 379 p.154-163, 2011.

WANG, C.; JIANG, X.; ZHOU, L.; GUANGQIANG X.; CHEN ZHENG, J.; MING D.; X, I. A. J. The preparation of organo-bentonite by a new gemini and its monomer surfactants and the application in MO removal: A comparative study. **Chemical Engineering Journal**, v.219, p.469-477, 2013.

YEOM, H.J., KIM, S.C., KIM, Y.W., SONG, I.H., Processing of alumina-coated clay diatomite composite membranes for oily wastewater treatment. **Ceramics International**, v. 42, p. 5024– 5035, 2016.

ZAWRAH, M. F.; KHATTAB, R. M.; GIRGIS, L.G.; SHEREEFY, E. E. E.; SAWAN, S. E. Effect of CTAB as a foaming agent on the properties of alumina ceramic membranes. **Ceramics International**, v. 40, n. 4, p. 5299-5305, 2014.

ZHANG, Z.H.; ZHU, H.J.; ZHOU, C.H.; WANG, H. Geopolymer from kaolin in China: An overview. **Applied clay Science**, v. 119, p.31-41, 2016.