

MEMBRANAS ZEOLÍTICAS APLICADAS A SEPARAÇÃO EMULSÃO ÓLEO/ÁGUA

Isabel Vidal Paulino ¹
Antonielly dos Santos Barbosa ²
Juliana Araújo Marques França ³
Meiry Glaucia Freire Rodrigues ⁴
Antusia dos Santos Barbosa ⁵

RESUMO

O óleo, como um poluente comum em águas residuais, causa muitos efeitos na biosfera. O óleo lubrificante automotivo nos efluentes líquidos também apresenta potencial para poluição. As emulsões tipo óleo em água (O/A) podem apresentar características potencialmente poluidoras semelhantes às dos óleos que as deram origem, porém com menores concentrações e devem ser tratadas para atender ao padrão de descarga em corpos receptores. Uma membrana, de maneira geral, é uma barreira que separa duas fases e que restringe total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases. As zeólitas são um grupo de silicatos e aluminossilicatos cristalinos hidratados de estrutura aberta tridimensional composta por um conjunto de cavidades, constituída por tetraedros de SiO_4 e AlO_4 ligados entre si por átomos de oxigênio. As membranas zeolíticas são completamente diferentes dos pós de zeólita cristalino simples. A síntese de membrana zeolítica requer novas estratégias, em oposição a métodos hidrotermais tradicionais. Existem várias técnicas de separação emulsão óleo/água, podendo destacar a separação por membranas zeolíticas. Dentro deste contexto, este trabalho teve como objetivo revisar diferentes fontes de pesquisa a evolução para o desenvolvimento e aplicação de membranas zeolíticas em efluentes contaminados com óleo, assim como investigar de forma sistemática as novas tecnologias utilizadas nesse campo de estudo. As membranas Zeolíticas produzidas demonstram serem promissoras como técnica de tratamento de efluentes oleosos.

Palavras-chave: Membranas zeolíticas, Efluentes oleosos, Sustentabilidade, Separação emulsão óleo/água.

¹ Graduando do Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, vidalisabel22@gmail.com;

² Doutora do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, antoniellybarbosa@yahoo.com.br;

³ Doutoranda do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina grande - UFCG, Julianamarquesquimica@gmail.com;

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

⁵ Pesquisadora do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, antusiasb@hotmail.commailto:coautor1@email.com;

Águas residuais oleosas a partir de processos industriais

A rápida industrialização e o crescimento econômico favoreceram consideravelmente para o bem-estar humano nas últimas décadas, contribuindo para a poluição industrial e a erradicação dos recursos naturais em todo o mundo. Em particular, a geração de grandes quantidades de efluentes industriais enfatizou substancialmente os recursos hídricos disponíveis, suscitando uma grande preocupação em todo o mundo (BHARATHIRAJA et al., 2019).

O petróleo é um dos principais contaminantes em efluentes industriais. Os efluentes industriais oleosos são extremamente heterogêneos, contendo vários tipos de hidrocarbonetos, surfactantes, metais, ácidos etc. Efluentes oleosos estáveis constituídos por óleos altamente emulsificados química e fisicamente são os mais desafiadores em termos de tratamento eficaz (KARHU et al., 2013).

O efluente oleoso é um termo gerado para descrever todos os resíduos industriais que apresentam quantidades variáveis de óleos, graxas e lubrificantes além de uma variedade de outros materiais como sais, metais, detergentes, e inúmeros contaminantes que podem afetar o ambiente aquático e a agricultura. Assim, é de fundamental importância a caracterização do efluente, para que o tratamento mais adequado seja aplicado. Óleos e graxas geralmente apresentam-se nos efluentes oleosos em duas categorias distintas (CHERYAN, 1998). Óleo livre em solução: apresenta uma fase visivelmente distinta da fase aquosa, isto é, não se mistura com a água, e pela sua densidade aparece flutuando na superfície da água como gotículas ou em suspensão. Óleo disperso sob a forma de gotas de grandes diâmetros, acima de 100 μm . É formado por hidrocarbonetos praticamente insolúveis, tais como aromáticos, polinucleares, policicloparafinas e parafinas pesadas. O óleo livre pode ser facilmente removido da água, através de separadores gravitacionais (MOTTA et al., 2013).

Emulsões óleo/água: apresenta apenas uma fase a olho nu, sendo o óleo, intimamente misturado à água por meio de inúmeras micelas. Este grupo pode ser dividido em emulsões estáveis e instáveis. Óleo disperso presente sob a forma de gotas de pequenos diâmetros, variando entre 100 e 20 μm . É também formado por hidrocarbonetos praticamente insolúveis. Essa forma de óleo é mais difícil de ser separada da água. De fato, os diâmetros das gotas de emulsão podem atingir valores bem pequenos, na faixa de micrômetros ou submicrômetros (MOTTA et al., 2013).

Normalmente os tratamentos típicos que são utilizados nas águas residuais oleosas são a desmulsificação química, separação por gravidade ou centrífuga, precipitação eletrostática, ciclones, flutuação do ar dissolvido, ajuste de pH, desnatação, tratamento térmico, adsorção, entre outros. O principal inconveniente dessas técnicas de tratamento é que se trata de técnicas de alto custo, envolvem outros produtos químicos ou são ineficazes que precisam de operações unitárias adicionais para atender à qualidade dos efluentes (SHEIKHI et al. 2019; GAO e XU, 2019). Diante desta problemática os processos utilizando tecnologias de separação por membrana, em particular, vem se mostrando bastante eficiente e eficaz na remoção de gotículas de emulsões de água e óleo quando comparadas aos métodos convencionais de separação (TAWALBEH et al., 2018). Suas principais vantagens são: retenção de gotas de óleo com diâmetros abaixo de 10 μm , o fato de dispensar a utilização de produtos químicos na sua operação e a capacidade de gerar permeados com qualidade aceitável, ou seja, atendendo ao requisito da norma de descarga antes de ser liberado no ambiente (MOTTA et al., 2019).

O descarte dos efluentes oleosos só é permitido depois que o óleo e os sólidos em suspensão são removidos. A concentração máxima permitida de óleo e sólidos nos efluentes depende da legislação de cada país (VASANTH et al., 2013). No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente – SISNAMA, determina que efluentes de qualquer fonte poluidora só poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e adequação às condições, padrões e exigências definidas na Resolução n° 357 (CONAMA, 2005), que determina que o lançamento da água produzida nos corpos aquáticos deverá apresentar uma concentração de óleos e graxas de até 20 mg/L, com relação ao descarte em plataformas marítimas de petróleo, aplica-se a Resolução 393/2007 do CONAMA (2007), que estabelece a média aritmética simples mensal do teor de óleos e graxas de até 29 mg/L, com valor máximo diário de 42 mg/L (PAIXÃO e BALABAN, 2018).

Membranas e sua importância na separação óleo/água

Membranas e processos com membranas foram introduzidos pela primeira vez como uma ferramenta analítica em laboratórios químicos e biomédicos; eles se desenvolveram muito rapidamente em produtos e métodos industriais com significativo impacto técnico e comercial (BAKER, 2004).

Atualmente, as membranas são usadas em larga escala para produzir água potável do mar e da água salobra, limpar efluentes industriais e recuperar componentes valiosos, concentrar, purificar ou fracionar misturas macromoleculares nas indústrias de alimentos e medicamentos e separar gases e vapores em processos petroquímicos. Eles também são de grande interesse em sistemas de conversão e armazenamento de energia, em reatores químicos, em órgãos artificiais e em dispositivos de administração de medicamentos (NOBLE e STERN, 1995).

Membranas podem ser definidas como “uma barreira que separa duas fases e que restringe total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases” (HABERT et al., 2006). O fluido é transportado através da membrana pela ação de uma força motriz, que pode ser provocada por vários tipos de gradientes: de concentração, de potencial elétrico, de pressão de vapor e de pressão hidráulica. Esse último é o mais utilizado no tratamento de água (MOTTA et al., 2013).

As crises ambientais decorrentes de derramamentos regulares de óleo e o vazamento de soluções orgânicas perigosas têm despertado considerável atenção no aprimoramento das técnicas de tratamento de misturas óleo-água (XU et al., 2018). Em comparação com os tratamentos tradicionais (como o método de skimming, absorção e floculação química), a separação por membranas é considerada uma estratégia válida com operação simples, baixo custo e alta eficiência (CHEN et al., 2019; GUAN et al., 2022).

É essencial desenvolver métodos de preparação de membranas de separação óleo/água de alto desempenho que melhorem o mecanismo de separação original com funcionalidades múltiplas ou duplas, visto que gotículas de óleo suspensas, dissolvidas na água podem escapar facilmente para o filtrado (LIU et al., 2019).

Membranas cerâmicas

As membranas inorgânicas (cerâmicas) oferecem melhor propriedades quando comparadas às membranas orgânicas (poliméricas) em termos de estabilidade térmica, química e mecânica, propriedade antiincrustante, maior vida útil, altos fluxos a baixas pressões, maior hidrofobicidade, distribuição de tamanho de poro estreita e bem definida, maior porosidade, bem como resistência à degradação microbiana (SAW et al., 2019; HAMID et al., 2020). As membranas cerâmicas geralmente apresentam melhor desempenho que as membranas poliméricas, em processos de separação emulsões

óleo/água (CHEN et al., 2020). Além disso, elas podem preservar suas propriedades de permeabilidade ao fluxo e à água ao longo do tempo (CHOUGUI et al., 2019).

As membranas cerâmicas podem ser categorizadas em dois grupos principais, membranas porosas e densas. Para membranas porosas, seus mecanismos de separação são fortemente dependentes do tamanho dos poros. Por outro lado, as membranas densas possuem mecanismos complexos de separação e são usadas apenas em aplicações gasosas (HUBADILLAH et al., 2019).

Os principais fatores para determinar a usabilidade de uma membrana são a alta porosidade da superfície que proporciona uma alta taxa de transferência, uma distribuição estreita do tamanho dos poros que fornece boa seletividade e boa resistência mecânica para manter a integridade estrutural (NG et al., 2020; TRAN et al., 2019).

E de grande interesse dos pesquisadores a obtenção de uma membrana cerâmica porosa que apresente separação eficaz e de boa porosidade. Os materiais mais utilizados para a produção de membranas cerâmicas estão a alumina (Al_2O_3), zircônia (ZrO_2), titânia (TiO_2), carboneto de silício (SiC), vidro (SiO_2) ou uma combinação desses óxidos metálicos e outros materiais adequados, incluindo não óxidos (carbonetos, nitretos, boretos e silicidas), bem como outros minerais argilosos (por exemplo, caulino, mulita, dolomita, etc.) (LEE et al., 2019).

A elaboração das membranas cerâmicas pode ser realizada em três etapas: a primeira etapa consiste na formação da suspensão de partículas, a segunda etapa consiste em moldar a suspensão de partículas em uma membrana precursora com geometria desejada e a etapa final consiste em sinterizar a membrana precursora. A membrana obtida pode ser modificada pelo método de deposição de camada adaptando a seletividade e outras propriedades da membrana (ISSAOUI E LIMOUSY, 2019).

As membranas cerâmicas podem ser fabricadas usando diferentes métodos, dependendo dos requisitos de aplicação, da estrutura da membrana desejada e dos materiais específicos. Os processos de fabricação mais comuns são fundição por deslizamento, fundição de fita, prensagem, extrusão e fundição por congelamento.

O método de prensagem é um método bem conhecido, usado principalmente para a fabricação de membranas cerâmicas. Este método é geralmente baseado na prensagem de um pó seco por meio de uma prensa. Após a mistura homogênea do pó (matéria-prima com proporções de agentes formadores de poros), o produto obtido é prensado uniaxialmente, ou seja, sofre estresse por uma punção em um molde com paredes imóveis

para obter a membrana desejada forma do suporte. Por fim, a membrana cerâmica plana obtida deve passar por tratamento térmico, geralmente a uma temperatura que atinge a sinterização dos materiais. Esse processo permite taxas de produção muito altas.

Geralmente, as membranas cerâmicas produzidas pelo método de prensagem têm características bem definidas, como porosidade uniforme e propriedades físicas homogêneas sobre a parte total da membrana.

Uma membrana cerâmica normalmente consiste em uma camada de substrato microporoso com poros grandes e alto nível de porosidade e uma camada ativa superior com a faixa de tamanho de poro projetada especificamente (dependendo do tipo de aplicação de filtração) e o melhor nível de porosidade responsável pela separação e desempenho da filtração (NG et al., 2020).

Membranas zeolíticas

As primeiras membranas zeolíticas foram preparadas em 1987, desde então avanços vem sendo realizado durante a preparação dessas membranas zeolíticas, com qualidades e utilidades mais aprimoradas (ASGHARI et al., 2019).

No entanto, a formação de defeitos durante a preparação das membranas zeolíticas (natureza da estrutura dos poros e a uniformidade do tamanho dos poros), são desafios críticos sendo investigados por muitos pesquisadores (ASGHARI et al., 2019).

As membranas zeolíticas possuem uma estrutura de poros uniformes, altamente estáveis e de tamanho molecular, elas são capazes de obter peneiras moleculares nítidas com altas taxas de transporte e, portanto, têm demonstrado excelente desempenho em muitos sistemas desafiadores de separação (LIU et al., 2017).

Em particular, as zeólitas têm atraído considerável atenção como materiais para obtenção das membranas zeolíticas por causa de suas propriedades exclusivas físico-químicas, efeito de peneiração molecular, hidrofiliicidade/hidrofobicidade ajustável e acidez no estado sólido devido à presença de poros uniformes de tamanho molecular e Al em sua estrutura (INOUE et al., 2019). Entre as diferentes técnicas sugeridas para obtenção das membranas zeolíticas (cristalização in situ (hidrotérmica), método de gel seco ou úmido, método de síntese embebida, crescimento secundário (semeado) e síntese por microondas), a primeira e a segunda vem despertando grande interesse devido a

facilidade de obtenção em condições estruturais favoráveis e controláveis (ASGHARI et al., 2019).

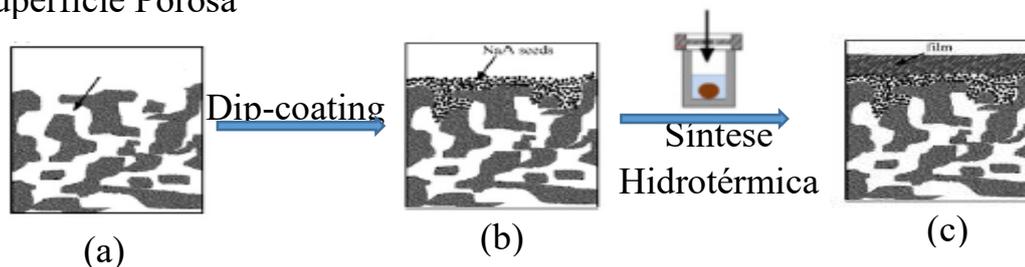
Preparação de Membranas Zeolíticas

As membranas zeolíticas vêm sendo obtidas por vários métodos, entre eles, os mais comumente usados são: Método “In situ”, com uma ou várias camadas zeolíticas; Crescimento Secundário, com a cobertura do suporte com semente seguido da síntese hidrotérmica; Método de Transporte a Vapor (CARO et al., 2008; CARO e NOACK, 2000). Na técnica do método “in situ”, a superfície do suporte é colocada em contato direto com a solução contendo os precursores da zeólita, e em seguida, são submetidos a condições hidrotérmicas e pressão autógena. Sob as condições adequadas, a nucleação dos cristais de zeólita ocorre sobre o suporte, seguido de seu crescimento, para formar a camada zeolítica. Ao mesmo tempo que ocorrem reações em solução, também ocorre a deposição dos núcleos e cristais na superfície, seguido de sua incorporação na membrana (AUERBACH et al., 2003). O método de transporte a vapor, é um procedimento em que se deposita uma camada da mistura reacional de síntese sobre o suporte e, em seguida esta mistura é transformado em zeólita, na presença de vapores. Trata-se de uma alternativa, para evitar o crescimento de cristais que podem prejudicar a qualidade final da membrana zeolítica (NUNES, 2008).

Na (Fig. 1a) está ilustrado o processo de formação da camada zeolítica sobre uma superfície porosa usando o método de semeadura de revestimento por imersão. Utilizando o método revestimento por imersão (dip-coating), resulta na deposição de uma espessa camada de sementes sobre a superfície porosa (Fig. 1b). A camada da zeólita crescida sobre a superfície porosa semeada pelo método de revestimento por imersão (dip-coating), tendem a revestir completamente os grãos que compunham o suporte poroso, como representado na (Fig. 1c).

Figura 1. Mecanismo proposto para a montagem e crescimento de filmes de zeólita em superfícies porosas semeados pelo método de revestimento por imersão.

Superfície Porosa



Fonte: (YANG et al., 2007).

Nosso grupo de pesquisa publicou alguns artigos sobre a produção de membranas zeólitas e aplicações no processo de separação emulsão óleo-água.

A.P. Araújo, V.J. Silva, A.C. Crispim, R.R. Menezes, M.G.F. Rodrigues, Mater. Sci. Forum 660-661 (2010) 1058.

A.P. Araújo, M.G.F. Rodrigues, Av. Cien. Ing. 3 (2012) 51.

A.S. Barbosa, A.S. Barbosa, M.G.F. Rodrigues, 11th Int. Conf. Catal. Membr. React., Porto (2013).

J.R. Scheibler, E.R.F. Santos, A.S. Barbosa, M.G.F. Rodrigues, Desalin. Water Treat. 26 (2015) 3561.

A.S. Barbosa, A.S. Barbosa, M.G.F. Rodrigues, Mater. Sci. Forum 805 (2014) 272.

A.S. Barbosa, A.S. Barbosa, M.G.F. Rodrigues, Desalin. Water Treat. 56 (2015) 3665.

F.M.N. Silva, T.L.A. Barbosa, M.G.F. Rodrigues, 12th Int. Conf. Catal. Membr. React., Szczecin (2015).

F.M.N. Silva, E. G. Lima, T.L.A. Barbosa, M.G.F. Rodrigues, 13th Int. Conf. Catal. Membr. React., Houston (2017).

A.S. Barbosa, A.S. Barbosa, T.L.A. Barbosa, M.G.F. Rodrigues, 13th Int. Conf. Catal. Membr. React., Houston (2017).

A.S. Barbosa, A.S. Barbosa, M.G.F. Rodrigues, Mater. Sci. Forum 912 (2018) 12.

A.S. Barbosa, A.S. Barbosa, T.L.A. Barbosa, M.G.F. Rodrigues, Sep. Purif. Technol. 200 (2018) 141.

A.S. Barbosa, A.S. Barbosa, M.G.F. Rodrigues, Mater. Sci. Forum 958 (2019) 23.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As membranas zeolíticas podem ser utilizadas em várias aplicações em diferentes áreas, como no tratamento de águas, despejos industriais, entre outros. Elas tem se destacado como excelentes alternativas no tratamento de efluentes oleosos. Vários tipos de zeólitas e materiais cerâmicos podem ser utilizados para a fabricação de membranas zeolíticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem todo o apoio do Laboratório de Desenvolvimento de Novos Materiais, fundamental para a elaboração deste trabalho, FAPESQ/ PIBIC (Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba) e a CAPES (Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ASGHARI, M.; MOUSAVI, S. R.; MOHAMMADI, T. A comprehensive comparative study on morphology and pervaporative performance of porous-supported mesoporous zeolitic membranes. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 280, p. 174–186, 2019.
- BAKER, R. W. **Membrane Technology and applications**, 2ª Ed. John Wiley & Sons, Ltd. v. 90-96, p.4-7, 2004.
- CARO, J.; NOACK, M.; KOLSCH, P.; SCHAFER, R. Zeolite membranes – state of their development and perspective. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 38, p. 3-24, 2000.
- CHEN, M.; ZHU, L.; CHEN, J.; YANG, F.; TANG, C. Y.; GUIVER, M. D.; DONG, Y. Spinel-based ceramic membranes coupling solid sludge recycling with oily wastewater treatment. **Water Research**, v. 169, Article 115180, 2020.
- CHEN, P.; YIN, D.; SONG, P.; LIU, Y.; ZHANG, L. Demulsification and oil recovery from oil-in-water cutting fluid wastewater using electrochemical micromembrane technology. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118698, 2019.
- CHERYAN, M. **Ultrafiltration and Microfiltration Handbook**. Technomic Publishing Co., Lancaster, PA. 1998.
- CHOUGUI, A.; BELOUATEK, A.; RABILLER-BAUDRY, M. Synthesis and characterization of new ultrafiltration ceramic membranes for water treatment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 30, p. 100620, 2019.

FU, M.; LIU, J.; DONG, X.; ZHU, L.; DONG, Y. Stuart Hampshire Waste recycling of coal fly ash for design of highly porous whisker-structured mullite ceramic membranes.

Journal of the European Ceramic Society, v. 39, p. 5320–5331, 2019.

GAO, N.; XU, Z-K. Ceramic membranes with mussel-inspired and nanostructured coatings for water-in-oil emulsions separation. **Separation and Purification Technology**, v. 212, p. 737–746, 2019.

GUAN, C.; YANG, L.; ZHU, L.; XIA, D. One-step removal of all pollutants to produce clean water: Construct a novel dual-functional aramid nanofibre membrane for simultaneous oil-in-water separation and single-ring aromatic compound removal. **Journal of Cleaner Production**, v. 361, p. 132259, 2022.

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

HAMID, K. I. A.; SCALES, P. J.; ALLARD, S.; CROUE, J-P.; MUTHUKUMARAN, S.; DUKE, M. Ozone combined with ceramic membranes for water treatment: Impact on HO radical formation and mitigation of bromate. **Journal of Environmental Management**, v. 253, p. 109655, 2020.

HE, Z.; LYU, Z.; GU, Q. ZHANG, L.; WANG, J. Ceramic-based membranes for water and wastewater treatment. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 578, p. 123513, 2019.

HUBADILLAH, S. K.; TAI, Z. S.; OTHMAN, M. H. D.; HARUN, Z.; JAMALLUDIN, M. R.; RAHMAN, M. A.; JAAFAR, J.; ISMAIL, A. F. Hydrophobic ceramic membrane for membrane distillation: A mini review on preparation, characterization, and applications. **Separation and Purification Technology**, v. 217, p. 71–84, 2019.

INOUE, R.; UENO, K.; YAMADA, S.; NEGISHI, H.; MIYAMOTO, M.; UEMIYA, S.; OUMI, Y. Preparation of novel hydrophilic microporous material PML-1 membrane by topotactic transformation of layered silicate SSA-1 and applicability to the dehydration of aqueous acetic acid. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 285, p. 241–246, 2019.

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

JAFARI, B.; ABBASI, M.; HASHEMIFARD, S. A. Development of new tubular ceramic microfiltration membranes by employing activated carbon in the structure of membranes

for treatment of oily wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118720, 2020.

JAMALY, S.; GIWA, A.; HASAN, S. W. Recent improvements in oily wastewater treatment: Progress, challenges, and future opportunities. **Journal of environmental sciences**, v. 37, p. 15– 30, 2015.

KHAN, M. I.; KHAN, H. U.; AZIZLI, K.; SUFIAN, S.; MAN, Z.; SIYAL, A. A.; MUHAMMAD, N.; FURM, R. The pyrolysis kinetics of the conversion of Malaysian kaolin to metakaolin. **Applied Clay Science**, v. 46, p. 152-161, 2017.

LEE, H. J.; PARK, Y. G.; KIM, M. K.; LEE, S. H.; PARK, J. H. Study on CO₂ absorption performance of lab-scale ceramic hollow fiber membrane contactor by gas/liquid flow direction and module design. **Separation and Purification Technology**, v. 220, p. 189– 196, 2019.

LIU, J.; HE, K.; ZHANG, J.; LI, C.; ZHANG, Z. Coupling ferrate pretreatment and in-situ ozonation/ceramic membrane filtration for wastewater reclamation: Water quality and membrane fouling. **Journal of Membrane Science**, v. 590, p. 117310, 2019.

LIU, Y.; ZHANG, B.; LIU, D.; SHENG, P.; LAI, Z. Fabrication and molecular transport studies of highly c-Oriented AFI Membranes. **Journal of Membrane Science**, v. 528, p. 46–54, 2017.

MOTTA, A. R. P. DA.; BORGES, C. P.; KIPERSTOK, A.; ESQUERRE, K. P.; ARAUJO, P. M.; BRANCO, L. DA. P. N. Produced water treatment for oil removal by membrane separation process: review. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.18, n.1, p. 15-26, 2013.

MOTTA, A. R. P.; BORGES, C. P.; KIPERSTOK, A.; ESQUERRE, K.; SILVA, P. M. R. T. DE S. DA. Avaliação de parâmetros operacionais de um sistema de membranas para tratamento de efluentes oleosos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 4, p. 719– 725, 2019.

NG, T. C. A.; LYU, Z.; GU, Q.; ZHANG, L.; POH, W. J.; ZHANG, Z.; WANG, J.; NG, H. Y. Effect of gradient profile in ceramic membranes on filtration characteristics: Implications for membrane development. **Journal of Membrane Science**, v. 595, p. 117576, 2020.

NOBLE, R. D.; STERN, S. A. Membrane Separations Technology: Principles and Applications. Elsevier, v. 2, 1st Edition, p. 738, 1995.

- PAIXÃO, M. V. G.; BALABAN, R. DE C. Application of guar gum in brine clarification and oily water treatment. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 108, p. 119–126, 2018.
- SAW, E. T.; ANG, K. L.; HE, W.; DONG, X.; RAMAKRISHNA, S. Molecular sieve ceramic pervaporation membranes in solvent recovery: A comprehensive review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, p. 103367, 2019.
- SHE, F. H.; TUNG, K. L.; KONG, L. X. Calculation of effective pore diameters in porous filtration membranes with image analysis Robotics and Computer-Integrated. **Manufacturing**, v. 24, p. 427–434, 2008.
- SHEIKHI, M.; ARZANI, M.; MAHDAVI, H. R.; MOHAMMADI, T. Kaolinitic clay-based ceramic microfiltration membrane for oily wastewater treatment: Assessment of coagulant addition. **Ceramics International**, v. 45, p. 17826–17836, 2019.
- TAWALBEH, M.; MOJJLY, A. AL.; AL-OTHMAN, A.; HILAL, N. Membrane separation as a pre-treatment process for oily saline water. **Desalination**, v. 447, p. 182–202, 2018.
- TRAN, N. T.; KIM, J.; OTHMAN, M. R. Microporous ZIF-8 membrane prepared from secondary growth for improved propylene permeance and selectivity. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 285, p. 178–184, 2019.
- VASANTH, D.; PUGAZHENTHI, G.; UPPALURI, R. Cross-flow microfiltration of oil-in-water emulsions using low cost ceramic membranes. **Desalination**, v. 320, p.86–95, 2013.
- WEI, X-L.; PAN, W-Y.; PAN, M.; PENG, L-L.; NIU, C-Q.; CHAO, Z-S. Effects of bubbles on the structure and performance of zeolite membranes. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 40, p. 1709–1716, 2020.
- XU, M.; WANG, S. L.; SHEN, F.; JI, J. Y.; & DAI, W. B. Study on the influential factors for preparing transition alumina Whiskers. **Journal of Alloys and Compounds**, p. 1–5, 2017.
- XU, W.; GLEN, D.; DUU-JONG, L.; LIU, J.; REN, N.Q.; QU, J.; GANG, L.; DAVID, B. Evolving wastewater infrastructure paradigm to enhance harmony with nature. **Science advances**, v. 4, (8), 2018.
- YANG, G.; ZHANG, X.; LIU, S.; YEUNG, K. L.; WANG, J. A novel method for the assembly of nano-zeolite crystals on porous stainless steel microchannel and then zeolite film growth. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 68, p. 26–31, 2007.