

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

MODIFICAÇÃO DA PERMEABILIDADE DE MEMBRANAS CERÂMICAS PARA USO EM SISTEMAS DE RECUPERAÇÃO DE AROMÁTICOS E REATORES MEMBRANARES FOTOCATALÍTICOS

ARMOA, M. H.

*Fatec Nilo De Stéfani - Jaboticabal – Biocombustíveis/Gestão Ambiental
marcelo.armoa@fatec.sp.gov.br*

Title: Permeability modification of ceramic membranes for aromatics recovery system and photocatalytic reactor applications.

Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais.

Resumo

Membranas cerâmicas tem vasto campo de aplicação industrial e ambiental, superiores às poliméricas em inércia térmica, mecânica e química. O sistema membranar de recuperação de aromáticos (MARS) e o reator membranar fotocatalítico (PMR) são tecnologias que utilizam membranas para fins ambientais. MARS utilizam-se de membranas hidrofóbicas para retirar compostos orgânicos indesejáveis da água. PMR utilizam-se de fotocatalisadores suportados para prover atividade fotocatalítica à membrana. Para as duas tecnologias encontramos diversos trabalhos que utilizam membranas poliméricas como substrato e quase total ausência de trabalhos com membranas cerâmicas. Neste trabalho apresenta-se diferenças de permeabilidade de membranas de SiO₂ modificadas com polidimetilsiloxano (PDMS – 5000 cS) e com TiO₂. Membranas macroporosas de SiO₂ (SIL-HT) foram obtidas por tratamento hidrotérmico de vidros borossilicatos. Efetuou-se a modificação química da superfície da sílica com PDMS – 5000 cS, por catálise ácida, obtendo-se membranas inorgânicas hidrofóbicas (SIL-HT-HFB). Também foi depositado por capilaridade TiO₂ (anatase) na superfície longitudinal interna de membranas de SiO₂ (SIL-HT-Ti), a fim de prover atividade fotocatalítica. Além disto, submeteu-se as membranas recobertas por TiO₂ à ação de radiação UV durante os testes de permeação. Obteve-se para as variantes da membrana, a variação do fluxo transmembranar (J) em relação à pressão e o coeficiente de permeabilidade (Q_w), mostrando evidente diferença no comportamento físico-químico. Verifica-se para a membrana de SiO₂ não modificada Q_w=12038 L h⁻¹ m⁻², comparada à membrana hidrofobizada, com Q_w=3187 L h⁻¹ m⁻². Para a membrana de TiO₂ verificou-se o fenômeno da hidrofiliçidade fotoinduzida, quando atuada por fonte de radiação UV, com aumento reversível e expressivo da permeabilidade da membrana, atribuída à adsorção dissociativa das moléculas de água. As membranas de SiO₂ modificadas por PDMS mostram perspectivas de aplicação em sistemas membranares de recuperação de aromáticos (MARS). As membranas modificadas com TiO₂ mostram aplicação em reatores membranares fotocatalíticos (PMR) ou como válvulas químicas.

Palavras-chave: *Sílica, Polidimetilsiloxano, Anatase, Sistema membranar de recuperação de aromáticos (MARS), Reator membranar fotocatalítico (PMR).*

Abstract

Ceramic membranes have a vast field of industrial and environmental application, superior to polymeric membranes in terms of thermal, mechanical and chemical inertness. The membrane aromatics recovery system (MARS) and the photocatalytic membrane reactor (PMR) are technologies that use membranes for environmental purposes. MARS use hydrophobic membranes to remove undesirable organic compounds from water. PMR use supported photocatalysts to provide photocatalytic activity to the membrane. For both technologies we found several works that use polymeric membranes as substrate and an almost total absence of works with ceramic membranes. This work presents differences in the permeability of SiO₂ membranes modified with polydimethylsiloxane (PDMS – 5000 cS) and TiO₂. Macroporous SiO₂ membranes (SIL-HT) were obtained by hydrothermal treatment of borosilicate glasses. Chemical modification of the silica surface was carried out with PDMS – 5000 cS, by acid catalysis, obtaining hydrophobic inorganic membranes (SIL-HT-HFB). TiO₂ (anatase) was also deposited by capillary action on the internal longitudinal surface of SiO₂ membranes (SIL-HT-Ti), in order to provide photocatalytic activity. Furthermore, the membranes covered by TiO₂ were subjected to UV radiation during the permeation tests. For the membrane variants, the variation in transmembrane flux (J) in relation to pressure and the permeability coefficient (Q_w) was obtained, showing an evident difference in the physicochemical behavior. It is verified for the unmodified SiO₂ membrane Q_w=12038 L h⁻¹ m⁻², compared to the

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

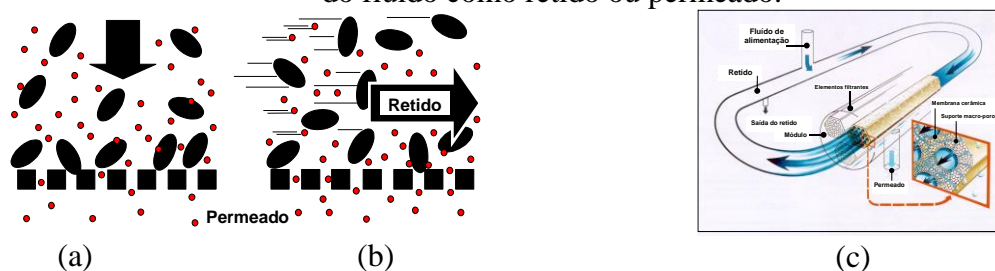
hydrophobized membrane, with $Q_w=3187 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$. For the TiO_2 membrane, the phenomenon of photoinduced hydrophilicity was observed, when acted upon by a UV radiation source, with a reversible and significant increase in membrane permeability, attributed to the dissociative adsorption of water molecules. SiO_2 membranes modified by PDMS show prospects for application in membrane aromatics recovery systems (MARS). TiO_2 -modified membranes show application in photocatalytic membrane reactors (PMR) or as chemical valves.

Key-words: *Silica, Polydimethylsiloxane, Anatase, Membrane aromatic Recovery System (MARS), Photocatalytic Membrane Reactor (PMR).*

1. Introdução

Processos membranares caracterizam-se pela passagem de uma dispersão por uma membrana, barreira semipermeável de separação entre duas fases, sob o efeito de uma força motriz [1]. Na filtração normal o fluido se movimenta perpendicular à superfície da membrana, ocorrendo rápido acúmulo de partículas e diminuição da eficiência. Em processos contínuos opta-se pela filtração tangencial, com movimento do fluido paralelo à superfície da membrana, minimizando o entupimento. Os dois processos são ilustrados respectivamente na Fig. 1a e 1b. A Fig. 1c representa o funcionamento de um sistema de filtração tangencial, destacando a camada filtrante suportada no elemento macroporoso, a permeação do fluido através da camada filtrante (permeado) e o fluxo tangencial do retido nos canais de cada elemento filtrante.

Fig. 1 - Representação esquemática dos modos de filtração: (a) filtração normal; (b) filtração tangencial. Representação esquemática de sistema de filtração tangencial, indicando o destino do fluido como retido ou permeado.



Fonte: [1].

MARS e PMR

O conceito de Sistemas Membranares de Recuperação de Compostos Aromáticos (MARS) se baseia no uso do caráter hidrofóbico de membranas poliméricas não porosas na retirada de substâncias apolares do meio aquoso [2-6]. Apesar das vantagens das membranas inorgânicas, como resistência mecânica e inércia química, e da proposta já consagrada de funcionalização, pouco se encontra acerca do conceito além de sua aplicação envolvendo materiais cerâmicos em suspensão [7-10]. A extração de substâncias apolares em meios aquosos tem sido realizada com a utilização de membranas poliméricas. Diversos trabalhos enfocam a extração de óleos essenciais de sucos de fruta com fluido supercrítico (CO_2), com o processo de separação como forma de amenização da perda de energia, por meio das propriedades de rejeição das membranas.

Outra vertente, a recuperação de compostos aromáticos halogenados, nitrogenados e não substituídos presentes na água, por vezes em traços, mas com elevada toxicidade utiliza-se da afinidade dos compostos pelas membranas. Têm se desenvolvido estudos complexos envolvendo constantes de transferência de massa, coeficientes de partição para a interface

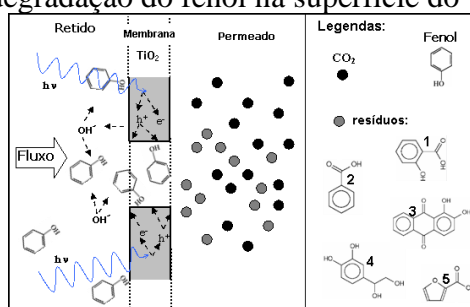
Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

polímero / solução, na utilização de membranas de borracha de silicone (PDMS) [7]. A diferença de pH entre os fluídos retido e permeado como força motriz para o processo membranar na extração de anilina ou fenol [3][4].

O conceito de Reatores Membranares Fotocatalíticos (PMR) surge com estudos propostos sobre estabilidade de membranas poliméricas como suporte para fotocatalisadores [11] e outros envolvendo compósitos polidimetilsiloxano (PDMS) / titânia a fim de potencializar a captação de poluentes para posterior fotodegradação [12]. Aliar separação e degradação catalítica em um processo viabilizaria o uso de fotocatalise heterogênea em larga escala.

De maneira geral, existem duas classes quanto à configuração de trabalho dos reatores encontrados [13][14]: a) com a fonte de radiação não integrada à membrana; b) com a fonte de radiação integrada à membrana. Dentre as formas experimentais encontradas em relação aos Reatores Membranares Fotocatalíticos Integrados, verifica-se que as diferenças estão relacionadas com o tipo e formato das membranas e com o posicionamento da fonte de radiação. De maneira geral são comuns as membranas poliméricas, planas e discóides, sendo escassos os estudos com membranas inorgânicas, tubulares, e ainda, com o fotocatalisador no interior das membranas e a fonte de radiação integrada. A Fig. 2 ilustra o a degradação oxidativa do fenol em um reator membranar fotocatalítico integrado. Ilustra-se a irradiação de uma membrana de dióxido de titânio com ultravioleta, a geração de pares e^-/h^+ , ocasionando a degradação do substrato a CO_2 e H_2O ou a resíduos com baixa toxicidade ou maior biodegradabilidade [15].

Fig. 2 - Representação da degradação do fenol na superfície do TiO_2 em um PMR integrado.



Fonte: [15].

Os processos membranares são competitivos a outros processos separativos quanto a custos energéticos e impacto ambiental. Dentre as vantagens dos processos em reatores membranares fotocatalíticos temos: a) combinação dos processos para atingir a purificação almejada; b) alia características de um processo contínuo às vantagens da catálise heterogênea; c) separação imediata dos produtos de reação (in situ), deslocando o equilíbrio em direção aos produtos, para as reações estabelecidas durante a ocorrência do processo; c) a eliminação da etapa de separação do fotocatalisador; d) possibilidade de ampliação para escalas maiores de aplicação.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Modificação de membranas por hidrofobização da sílica.

- fluído de silicone polidimetilsiloxano (PDMS 5000 cs) Dow Corning.

Dióxido de titânio suportado em membranas de sílica macroporosa (SIL-HT-P25).

Anais da VII Mostra de Docentes em RJJ

- dióxido de titânio comercial P-25 DEGUSSA (70% anatase / 30% rutilo).

Testes de permeação e ensaios fotocatalíticos:

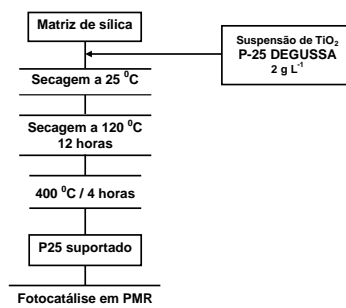
- água deionizada purificada por osmose reversa para os testes de permeação;
- membranas macroporosas de sílica obtidas hidrotermicamente (denominada por SIL-HT);
- membranas macroporosas de sílica obtidas hidrotermicamente hidrofobizadas com PDMS-5000 cs (denominada por SIL-HT-HFB)
- membrana de TiO₂ suportada em matriz de sílica macroporosa (denominadas por SIL-HT-P25).

2.2. Metodologia

Dióxido de titânio suportado em membranas de sílica macroporosa (SIL-HT-P25).

A membrana de TiO₂ suportada em SiO₂ foi preparada por capilaridade, a partir de uma suspensão do material P25 comercial em água, em uma proporção de 2 g L⁻¹. Após secagem a temperatura ambiente promoveu-se a secagem do material a temperatura de 120 °C por um período de 12 horas e posteriormente a 400 °C por um período de quatro horas, conforme fluxograma apresentado na Fig. 3.

Fig. 3 - Fluxograma de preparação de membrana de dióxido de titânio P-25 DEGUSSA.



Fonte: Autoria própria

Obtenção de membranas de sílica hidrofóbicas (SIL-HT-HFB).

A membrana de sílica foi hidrofobizada com fluído de silicone PDMS-5000 seguindo-se os passos: a) imersão do cilindro de sílica porosa em uma solução aquosa de ácido clorídrico de pH 1; b) imediato acondicionamento do material em um tubo de vidro contendo fluído de silicone suficiente para a imersão do cilindro; c) aquecimento a 150 °C por duas horas; d) lavagem com tetracloreto de carbono ou percloroetileno para retirada do excesso de silicone.

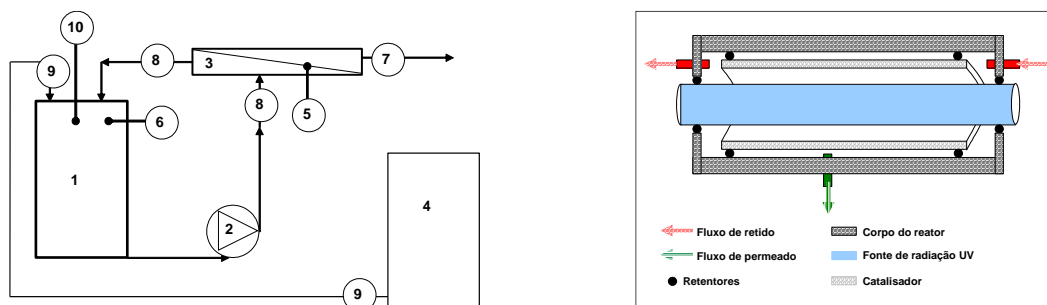
Permeação e testes fotocatalíticos

Realizaram-se os ensaios fotocatalíticos e de permeação no PMR, segundo o esquema do piloto apresentado na Fig. 4. Em destaque o PMR, ilustrando o fluxo no interior do reator entre a fonte radiativa e a membrana catalítica. Ao atravessar a membrana catalítica, o substrato constitui o fluído permeado, sofrendo simultanea separação e degradação oxidativa. Testes de

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

permeação foram realizados com as membranas (SIL-HT, SIL-HT-HFB e SIL-HT-P25). Os testes foram efetuados com fluxo interno de $102,24 \text{ L h}^{-1}$ e temperatura a $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Buscou-se a determinação do fluxo transmembranar em diferentes valores de pressão, medindo-se para tanto o valor da vazão em cada condição adotada, a fim de se obter os coeficientes de permeabilidade.

Fig. 4 - Representação esquemática do piloto de filtração fotocatalítica: **1)** reservatório de fluido (substrato); **2)** bomba de prospecção (centrífuga); **3)** reator membrana fotocatalítico; **4)** gás inerte para controle de pressão; **5)** par termelétrico; **6)** manômetro; **7)** válvula externa ao PMR para controle do permeado; **8)** válvulas internas ao PMR para controle de circulação do retido; **9)** válvula para ajuste de pressão; **10)** válvula para ajuste de pressão (respiro).



Fonte: [15].

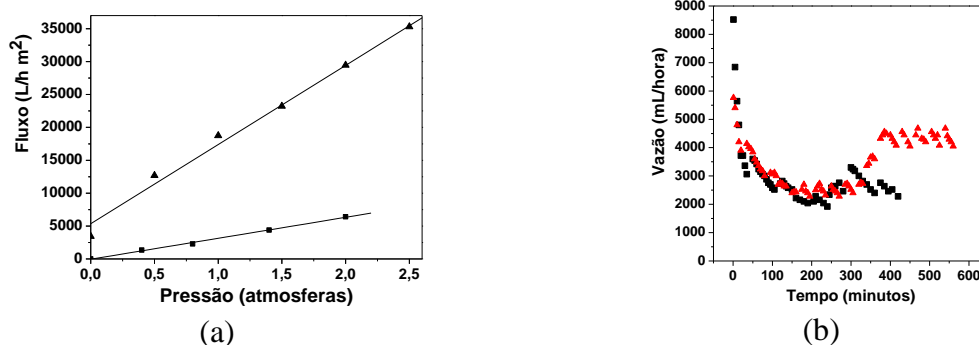
3. Resultados e Discussão

Permeabilidade das membranas (SIL-HT), (SIL-HT-HFB) e (SIL-HT-P25).

A fim de verificar modificações em propriedades de separação em relação às membranas de sílica (SIL-HT) realizaram-se os ensaios de permeação com membrana hidrofóbica (SIL-HT-HFB) e (SIL-HT-P25).

A partir das curvas de fluxo transmembranar em relação à pressão, conforme apresentada na figura 5a, obteve-se o coeficiente de permeabilidade ($Q_w / \text{L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ atm}^{-1}$) e o fluxo transmembranar à pressão nula ($J_0 / \text{L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$) para (SIL-HT) e (SIL-HT-HFB), conforme Tab. 1. É perceptível o efeito da modificação da superfície da sílica sobre Q_w , verificada a nulificação do fluxo a pressão nula (J_0), ao se tratar de (SIL-HT-HFB), enquanto para (SIL-HT) tem-se o valor de $J_0 = 5355 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, além da diminuição nos valores de Q_w .

Fig. 5 - a) Curvas de permeabilidade: **▲**) (SIL-HT); **■**) (SIL-HT-HFB); b) Variação temporal da vazão para água deionizada em membrana assimétrica de dióxido de titânio sob pressão de: **▲**) $0,6 \text{ atm}$; **■**) $1,0 \text{ atm}$.



Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

Fonte: Autoria própria

Tab. 1 - Propriedades de permeação para membrana hidrofobizada (SIL-HT-HFB) comparada à membrana de sílica sem modificação (SIL-HT).

Membrana	P_0 / atm	J_0 / L h ⁻¹	Q_w / L h ⁻¹ m ⁻²
SIL-HT	- 0,44	5343,58	12038,35
SIL-HT-HFB	0	0	3187

Fonte: Autoria própria.

Apresenta-se ainda na figura 5b dados brutos em valores de pressão de 0,6 e 1,0 atmosferas para a permeação com água bidestilada em membranas (SIL-HT-P25), propondo-se o comparativo com (SIL-HT) e (SIL-HT-HFB). Incluiu-se a ativação da fonte de radiação ultravioleta como um diferencial neste estudo, após o sistema ter entrado em regime de fluxo. Considerando-se a curva referente ao experimento realizado a 0,6 atm, observa-se o comportamento coerente do sistema, com o estabelecimento do patamar dos valores de fluxo em torno 150 minutos de experimento, aceito como regime de trabalho.

Após manutenção do regime por quase 200 minutos, ativou-se a fonte de radiação, verificando-se brusca elevação nos valores de J, até o estabelecimento de um novo regime de fluxo, de magnitude maior do que o anterior. Estimou-se a vazão ao tempo infinito durante o regime sem radiação (V_∞), e durante o regime sob radiação (V_0), sendo apresentados na Tab. 2. O coeficiente angular (B) e o coeficiente de correlação linear de Pearson denotam que não há relação linear entre as variáveis, ou seja, estabeleceu-se patamar de fluxo transmembranar.

Embora pareça óbvio um aumento na permeabilidade da membrana, o único relato encontrado na literatura sobre esta variação no comportamento de resistência ao fluxo transmembranar para membranas de dióxido de titânio é atribuído a degradação da membrana suporte polimérica [11]. Em trabalho pioneiro sobre reatores fotocatalíticos, verificou-se considerável diminuição na resistência ao fluxo transmembranar. Atribuiu-se o efeito à oclusão de poros pela degradação do suporte polimérico, não sendo abordado o fenômeno da ultra-hidrofilicidade fotoinduzida pela interação de radiação UV com o TiO₂ [16-19]. Entretanto, em nosso caso não há suporte a ser degradado, cabendo a influência da ultra-hidrofilicidade fotoinduzida sobre o valor da permeabilidade da membrana. Devido ao comportamento apresentado, estas apresentam dois valores de Q_w , um sem radiação e outro sob radiação.

Tab. 2 - Intervalos de confiança relativos aos regimes de vazão sem aplicação de radiação e com aplicação de radiação.

P/atm	V_∞ /L h ⁻¹	Radiação inativa		Radiação ativa		
		A ₂	t _{1/2} /min	V_0 /L h ⁻¹	B/L min ⁻²	r
0,6	2,5±0,1	2,8±0,2	55,47±10,58	4,4±0,1	-0,0396±0,15	-0,151
1,0	2,1±0,1	5,8±0,1	27,75±1,36	2,7±0,9	-0,09±0,17	-0,054

Fonte: Autoria própria.

4. Considerações finais

Hidrofobizar membranas de sílica por PDMS modificou significativamente as propriedades de permeação do material, com a nulificação do fluxo a baixos valores de pressão

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

transmembranar e diminuição da constante de permeabilidade a 25 % do valor inicial. Estas membranas têm grande perspectiva de aplicação na retirada de compostos orgânicos da água.

As propriedades da membrana de TiO₂ sofrem influência da radiação UV, com indícios de permeabilidade fotoinduzida devido à variação da hidrofiliidade do TiO₂.

Este trabalho propõe a combinação dos conceitos de recuperação de compostos aromáticos por membranas (MARS) e de reatores membranares fotocatalíticos (PMR), resultando em membranas hidrofóbicas com atividade fotocatalítica potencializada para purificação de águas residuais ou atmosferas contaminadas por poluentes prioritários. Os estudos acerca deste tema tiveram início há quase vinte anos, entretanto verifica-se ainda o interesse sobre o tema e o quanto há ainda a se desenvolver [22-25].

Agradecimentos

Ao Instituto de Química de Araraquara / UNESP; Ao Prof. Dr. Miguel Jafelicci Jr.

Referências

- [1] ARMOA, M. H.; JAFELICCI JUNIOR, M. Princípios e aplicações de processos de separação por membranas inorgânicas. *Ciência & Tecnologia*, [S. l.], v. 2, n. 1, 2011. Disponível em: <https://citec.fatecjab.edu.br/index.php/citec/article/view/67>. Acesso em: 13 set. 2023.
- [2] HAN, S.; FERREIRA, F. C.; LIVINGSTON, A. Membrane aromatic recovery system (MARS) — a new membrane process for the recovery of phenols from wastewaters. *Journal of Membrane Science*, v. 188, p. 219-233, 2001.
- [3] FERREIRA, F. C.; HAN, S.; LIVINGSTON, A. G. Recovery of aniline from aqueous solution using the membrane aromatic recovery system (MARS). *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 41, p. 2766-2774, 2002.
- [4] HAN, S.; FERREIRA, F. C.; LIVINGSTON, A. Membrane aromatic recovery system (MARS) — a new membrane process for the recovery of phenols from wastewaters. *Journal of Membrane Science*, v. 188, p. 219-233, 2001.
- [5] DASTGIR, M. G. *et. al.* The synthesis of polypropylene glycol based polyethers and their use in membranes for the membrane aromatic recovery system (MARS). *Journal of Membrane Science*, v. 261, p. 87-97, 2005.
- [6] BROOKES, P. R.; LIVINGSTON, A. G. Aqueous-aqueous extraction of organic pollutants through tubular silicone rubber membranes. *Journal of Membrane Science*, v. 104, p. 119-137, 1995.
- [7] ILISZ, I. *et. al.* Photocatalytic water treatment with different TiO₂ nanoparticles and hydrophilic/hydrophobic layer silicate adsorbents. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, v. 230, p. 89-97, 2004.
- [8] MOGYORÓSI, K. *et. al.* TiO₂-based photocatalytic degradation of 2-chlorophenol adsorbed on hydrophobic clay. *Environmental Science & Technology*, v. 36, p. 3618-3624, 2002.
- [9] JARONIEC, M. Organosilica the conciliator. *Nature (Materials Science)*, v. 442, p. 638-640, 2006.
- [10] SARMENTO, L. A. V.; SPRICIGO, C. B.; PETRUS, J. C. C.; CARLSON, L. H. C.; MACHADO, R. A. F. Performance of reverse osmosis membranes in the separation of supercritical CO₂ and essential oils. *Journal of Membrane Science*, v. 237, p. 71-76, 2004.

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

- [11] CHIN, S. S. *et. al.* The stability of polymeric membranes in a TiO₂ photocatalysis process. *Journal of Membrane Science*, v. 275, p. 202-211, 2006.
- [12] KIM, D. S.; PARK, Y. S. Photocatalytic decolorization of rhodamine B by immobilized TiO₂ onto silicone sealant. *Chemical Engineering Journal*, v. 116, p. 133–137, 2006.
- [13] SOPAJAREE, K. *et. al.* An integrated flow reactor-membrane filtration system for heterogeneous photocatalysis. Part II: experiments on the ultrafiltration unit and combined operation. *Journal of Applied Electrochemistry*, v. 29, p. 1111-1118, 1999.
- [14] SOPAJAREE, K. *et. al.* An integrated flow reactor-membrane filtration system for heterogeneous photocatalysis. Part I: experiments and modelling of a batch-recirculated photoreactor. *Journal of Applied Electrochemistry*, v. 29, p. 533-539, 1999.
- [15] ARMOA, M. H. **Síntese hidrotérmica de nanopartículas de TiO₂, de nanocompósitos metal/TiO₂ e degradação oxidativa de 4-clorofenol em reator membranar fotocatalítico.** 2007. 153 f. Thesis (doctorate) - Institute of Chemistry, Paulista State University, Araraquara, 2007.
- [16] AMÉZAGA-MADRID, P.; NEVÁREZ-MOORILLÓN, G. V.; ORRANTIA-BORUNDA, E.; MIKI-YOSHIDA, M. Photoinduced bactericidal activity against *Pseudomonas aeruginosa* by TiO₂ based thin films. *FEMS Microbiology Letters*, v. 211, p. 183-188, 2002.
- [17] NAKAJIMA, A.; KOIZUMI, S.; WATANABE, T.; HASHIMOTO, K. Effect of repeated photo-illumination on the wettability conversion of titanium dioxide. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, v. 146, p. 129-132, 2001.
- [18] IRIE, H.; MORI, H.; HASHIMOTO, K. Interfacial structure dependence of layered TiO₂/WO₃ thin films on the photoinduced hydrophilic property. *Vacuum*, v. 74, p. 625-629, 2004.
- [19] YU, J.; ZHAO, X. Effect of surface treatment on the photocatalytic activity and hydrophilic property of the sol-gel derived TiO₂ thin films. *Materials Research Bulletin*, v. 36, p. 97-107, 2001.
- [20] LONG-FEI, R. *et. al.* Phenol separation from phenol-laden saline wastewater by membrane aromatic recovery system-like membrane contactor using superhydrophobic/organophilic electrospun PDMS/PMMA membrane, *Water Research* 135 (2018) 31- 43.
- [21] INAMUDDIN, BODDULA, R. ASIRI, A. M. Self-standing Substrates Materials and Applications, Engineering Materials, p. 119-145, Springer Nature Switzerland 2020.
- [22] ZAKRIA, H. S. *et. al.* Immobilization techniques of a photocatalyst into and onto a polymer membrane for photocatalytic activity. *RSC Adv.*, 2021, 11, 6985.
- [23] AINALI, N.M. *et. al.* Insights into Biodegradable Polymer-Supported Titanium Dioxide Photocatalysts for Environmental Remediation. *Macromol* 2021, 1, 201–233. <https://doi.org/10.3390/macromol1030015>