

DESTILAÇÃO POR MEMBRANAS APLICADA AO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS DA INDÚSTRIA QUÍMICA

Leticia Vieira Aimi – leticia.aimi@gmail.com

Universidade da Região de Joinville, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos
Rua Paulo Malschitzki, 10, Zona Industrial Norte, CEP 89219 070 – Joinville - SC

Regilene de Souza Silva – regilene.s@posgrad.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química

Alessandro Rogério Paulazzi – a.paulazzi@posgrad.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química

Cintia Marangoni – cintia.marangoni@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química

Noeli Sellin – noeli.sellin@univille.br

Universidade da Região de Joinville, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos

Resumo: Neste estudo foi avaliada a aplicação do processo de destilação por membranas de contato direto (DMCD) no tratamento de águas residuais de uma indústria química, visando a recuperação de contaminantes de interesse e a obtenção de água tratada para reuso. Nos experimentos realizados, em escala laboratorial, a membrana utilizada foi a comercial plana de politetrafluoretileno (PTFE) e as condições operacionais (vazões e temperatura da alimentação e do permeado) foram definidas com base na literatura. As águas residuais foram caracterizadas por análises físico-químicas após a realização dos experimentos. As membranas utilizadas nos experimentos foram caracterizadas para avaliar alterações na sua espessura e nos grupos funcionais da superfície. Foram avaliados os valores de fluxos de permeado, sendo o mais relevante obtido no Experimento 01 ($33,85 \text{ kg.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$). Nos permeados obtidos após a realização dos experimentos, os contaminantes iodo, cobalto, surfactante, nitrogênio e sólidos suspensos totais e a condutividade elétrica apresentaram resultados inferiores aos analisados nas águas residuais brutas, demonstrando assim a eficiência do processo de DMCD. As características da membrana contribuíram para as importantes eficiências de remoção de contaminantes, com destaque para a remoção dos sólidos suspensos totais (de 100%). A partir da caracterização das membranas, não foi observada alteração dos grupos químicos funcionais existentes. Nesse trabalho, foi comprovada a potencialidade do processo de DMCD para o tratamento de águas residuais da indústria química.

Palavras-chave: DMCD, Membrana, PTFE, Iodo, Cobalto.



MEMBRANE DISTILLATION APPLIED TO THE TREATMENT OF WASTEWATER FROM THE CHEMICAL INDUSTRY

Abstract: *This study evaluated the application of the direct contact membrane distillation (DCMD) process in the treatment of wastewater from a chemical industry, with the aim of recovering contaminants of interest and obtaining treated water for reuse. In the experiments carried out on a laboratory scale, the membrane used was a flat commercial polytetrafluoroethylene (PTFE) membrane and the operating conditions (flow rates and temperature of the feed and permeate) were defined based on the literature. The wastewater was characterized by physicochemical analyses after the experiments were carried out. The membranes used in the experiments were characterized to assess changes in their thickness and surface functional groups. The permeate flux values were evaluated, with the most relevant being obtained in Experiment 01 (33.85 kg.h⁻¹.m⁻²). In the permeates obtained after the experiments, the contaminants iodine, cobalt, surfactant, nitrogen and total suspended solids and electrical conductivity showed lower results than those analyzed in the raw wastewater, thus demonstrating the efficiency of the DMCD process. The characteristics of the membrane contributed to the significant contaminant removal efficiencies, especially the removal of total suspended solids (100%). The characterization of the membranes did not reveal any changes in the existing chemical functional groups. This work proved the potential of the DMCD process for treating wastewater from the chemical industry.*

Keywords: DCMD, Membrane, PTFE, Iodine, Cobalt.

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos do planeta estão se esgotando gradativamente e, além da poluição dos rios e dos mananciais, o consumo irresponsável e sem fundamentação sustentável no desenvolvimento econômico, é um fator relevante no processo de redução da água (DETONI e DONDONI, 2007). A importância da água não está relacionada apenas às suas funções na natureza, mas ao papel que exerce na saúde, economia e qualidade de vida humana (SOUZA et al., 2014). Neste quadro, a preocupação por manter esse recurso natural vital para o futuro faz parte da rotina das pessoas e das grandes empresas. Para a maioria delas, a água é um dos insumos básicos para as suas operações (CNI, 2017).

Apesar de ser um importante contribuinte para a economia, a indústria química requer elevados volumes de água e diversos produtos químicos auxiliares ao longo de uma complexa cadeia produtiva. Nos processos, estão incluídas reações químicas que resultam em uma nova substância, separações baseadas na carga iônica dos elementos, em mudanças de fases, além de transformações por aquecimento ou por outros métodos (WILLIAM, 2014). A partir dos diversos processos são gerados efluentes altamente complexos, que podem conter substâncias comprovadamente tóxicas, como compostos fenólicos, herbicidas, pesticidas, hidrocarbonetos aromáticos polinucleares, entre outros, além do fato de muitas vezes apresentarem altas salinidade, temperatura, reatividade e toxicidade (PELEGRINI e MELCHIOR, 2005; LEFEBVRE e MOLLETTA, 2006).

A geração de efluentes e seu respectivo lançamento nos corpos hídricos, ainda causam contaminação e outros impactos negativos ao meio ambiente. Como forma de monitorar e minimizar tais impactos, a Resolução Federal CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011 e a Resolução CONSEMA nº 182 de 06 de agosto de 2021, do Estado de Santa Catarina, dispõem sobre as condições e os padrões de lançamento dos efluentes. Desta forma, cada vez mais, torna-se importante, tratar os efluentes e



reutilizá-los como água de reúso para fins benéficos, tais como irrigação, uso industrial e fins urbanos não-potáveis.

Dentre os processos de tratamento de efluentes mais empregados visando destinação adequada e reuso podem ser citados os processos convencionais, como a precipitação química, coagulação, floculação, sedimentação e adsorção em carvão ativado e os processos avançados, como oxidação com ozônio, dióxido de cloro e peróxido de hidrogênio, separação por membranas (microfiltração, ultrafiltração, nano filtração e osmose reversa), eletrólise reversa, troca iônica, destilação, entre outros (MANCUSO e SANTOS, 2003; MIERZWA e HESPANHOL, 2005; METCALF e EDDY, 2003).

Processos de Separação por Membrana (PSM) têm surgido como alternativa aos métodos convencionais de tratamento de águas residuais químicas devido à evolução desta tecnologia e às vantagens associadas, entre elas, a operação contínua com baixo consumo energético e a facilidade de ser combinado com outros processos de separação (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

Devido a sua versatilidade, as membranas estão sendo amplamente utilizadas nas indústrias de alimentos, químicas, farmacêuticas, têxteis, tratamento de água e efluente (BALANNEC et al., 2005; BALDASSO et al., 2011). Em geral, poucas pesquisas aplicadas ao tratamento de águas residuais das indústrias vêm sendo realizadas para um melhor entendimento dos PSM não-isotérmicos se comparado aos PSM isotérmicos, como a ultrafiltração (UF) e a nanofiltração (NF). Entre os PSM não-isotérmicos, destaca-se o processo de Destilação por Membrana (DM) como um potencial candidato ao tratamento de águas residuais industriais devido a resultados promissores de permeabilidade.

A Destilação por Membrana (DM) é uma tecnologia avançada de separação térmica, em que uma solução aquosa é destilada através de uma membrana hidrofóbica porosa, permitindo a completa rejeição dos componentes não voláteis na alimentação, como sais. O processo pode ser operado a temperaturas relativamente baixas e pode, portanto, utilizar fontes térmicas sustentáveis, como a energia solar, ou mesmo fontes potencialmente livres, como fluxos de calor residual oriundos do processo industrial (HITSOV et al., 2017).

A maioria das publicações acadêmicas sobre o processo de DM está focada no processo de dessalinização para tratamento de água. Segundo Ramlow (2018), conforme pesquisas na base de dados Web of Science, no período de 2000 a 2017, existem 1455 e 10 trabalhos aplicando o processo de DM, respectivamente, para dessalinização de água do mar e para o tratamento de água residual têxtil. Para o tratamento de águas residuais da indústria química, não foram encontrados trabalhos que aplicaram este processo como tratamento. Apesar do desenvolvimento importante já alcançado, novas pesquisas são fundamentais para permitir o tratamento de águas residuais químicas pelo processo de DM.

No presente estudo, foi avaliada a aplicação do processo de DMCD ao tratamento de águas residuais de uma indústria química, que produz sais inorgânicos a base de iodo, cobalto e selênio, visando a recuperação de contaminantes de interesse e obtenção de água tratada para reuso. A potencialidade da tecnologia de DM para tratamento e valorização das águas residuais da indústria química foi o aspecto motivador para a realização do presente trabalho. Ainda, as características das águas residuais utilizadas, como a temperatura elevada, também foram incentivadoras a realização deste tema de pesquisa

2. METODOLOGIA

As amostras de águas residuais avaliadas no presente estudo foram cedidas por uma indústria química, localizada na região norte de Joinville/SC, as quais foram coletadas em um tanque de equalização que recebe por processo de batelada as águas residuais originadas nos processos produtivos dos sais de iodo, cobalto e selênio, assim como as águas das purgas dos lavadores de gases e bacias de contenção em tanques de 50 e 100 m³. Devido à variação dos parâmetros físico-químicos das águas residuais, foram testadas três amostras coletadas em dias diferentes, com características distintas



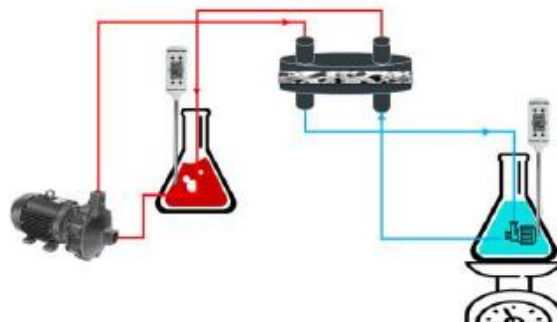
apresentadas na Tabela 1. As amostras coletadas foram armazenadas em frascos de 5 L, limpos e identificados, os quais permaneceram refrigerados até o momento dos experimentos.

Tabela 1 - Características das águas residuais

Parâmetro	Água Residual A	Água residual B	Água residual C
Iodo (mg/L)	254	622	1006
Cobalto (mg/L)	23	<1	5,32
Nitrogênio (mg/L)	160	260	300
Surfactantes (mg/L)	0,73	10,40	20
Condutividade (µs/cm)	15230	34600	36000
SST (mg/L)	386	4680	8390

A unidade experimental de DMCD, utilizada no estudo é composta pelo módulo de folha plana, um reservatório de alimentação, um reservatório de permeado, uma bomba peristáltica um banho termostático digital e um banho ultratermostático.

Figura 1 - Esquema experimental do Sistema de DMCD



Os experimentos foram conduzidos utilizando-se membrana plana comercial de PTFE (PTFE023001 Sterlitech Corporation), que possui um suporte macroporoso de PP e é heterogênea e simétrica (camada ativa).

Ao total foram realizados três experimentos de DMCD, com as águas residuais da indústria química, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Experimentos de DMCD realizados

Água residual utilizada	Número do experimento
Água residual A	1
Água residual B	2
Água residual C	3

As condições operacionais dos experimentos foram pré-estabelecidas, com base nas literaturas (RAMLOW, 2018; SILVA, 2019) e estão expressas na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições operacionais dos experimentos de DMCD

Condição operacional	Valor estabelecido
Temperatura da alimentação (°C)	60,0
Temperatura de permeado (°C)	20,0
Vazão da alimentação (L/min)	1,50
Vazão do permeado (L/min)	0,70
Tempo de operação (horas)	4,00



Após finalizados os experimentos, os volumes retidos nos reservatórios de alimentação e permeado foram enviados para análises para determinação dos parâmetros iodo, cobalto, nitrogênio, surfactantes, sólidos suspensos totais e a condutividade.

O fluxo de permeado J ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) obtido durante cada operação foi calculado através da Eq. 1, onde são Δm as massas de permeado (kg), A é a área efetiva da membrana (m^2) e Δt é o tempo total de operação (h).

$$J = \frac{\Delta M}{A \times \Delta t} \quad (1)$$

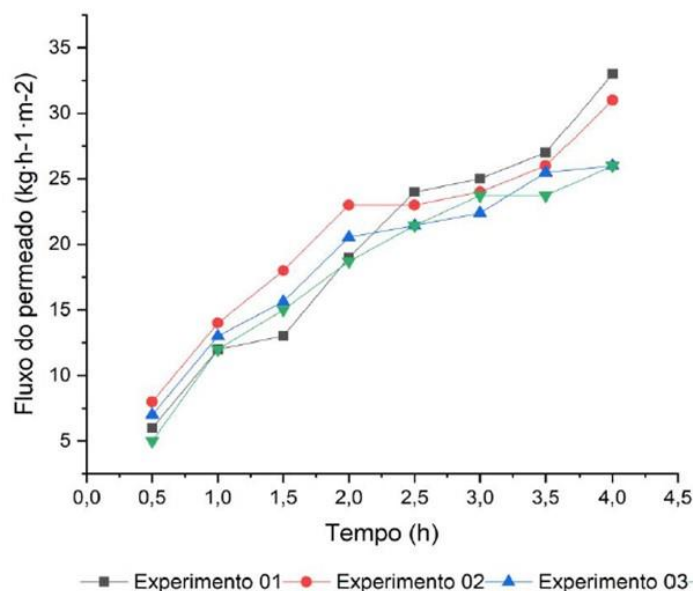
Para caracterização das membranas intactas e contaminadas foi utilizada a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para análise da morfologia superior e a Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) para avaliação dos compostos presentes. A espessura das membranas foi determinada por meio de um micrômetro digital.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Fluxo do permeado

Na Figura 2 é apresentado o fluxo de permeado em função do tempo de operação do processo de DMCD aplicado ao tratamento das águas residuais da indústria química, com a membrana de PTFE.

Figura 2 - Fluxo de permeado em função do tempo de operação, do processo de DMCD aplicados aos experimentos das águas residuais da indústria química



Verifica-se aumento no fluxo de permeado com o aumento do tempo de tratamento por DMCD para todas as amostras de águas residuais testadas, sendo o maior fluxo de permeado obtido no tratamento da água residual A no Experimento 01 ($31 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$).

A variação do fluxo de permeado verificada nos experimentos realizados pode ser explicada devido à estabilização do sistema às condições operacionais. O mesmo foi observado e relatado por Mokhtar et al. (2016), durante a recuperação de efluentes têxteis.



3.2. Remoção dos contaminantes das águas residuais da indústria química

As concentrações de iodo obtidas nos experimentos de DMCD com as águas residuais da indústria química estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Concentrações de iodo obtidas nos processos de DMCD aplicada as águas residuais da indústria química.

Experimento	Concentração de Iodo (mg/L)		
	Água residual	Retido	Permeado
Experimento 01	254,8	186,9	25,48
Experimento 02	622,0	789,1	213,3
Experimento 03	1006,7	840,3	51,19

Observa-se que em todos os experimentos realizados, as concentrações de iodo no permeado foram inferiores à alimentação (analisados nas amostras das águas residuais da indústria química), sendo o menor valor encontrado no Experimento 01 com a Água residual A (25,48 mg/L).

Nota-se que tanto nos permeados gerados nos experimentos, quanto nas águas residuais, os valores de iodo são elevados e isso se deve ao fato da empresa possuir como um dos principais produtos os sais de iodo.

Na Tabela 5 estão dispostas as concentrações de cobalto obtidas nos experimentos de DMCD com as águas residuais da indústria química.

Tabela 5 – Concentrações de cobalto obtidas nos processos de DMCD aplicada as águas residuais da indústria química.

Experimento	Concentração de Cobalto (mg/L)		
	Água residual	Retido	Permeado
Experimento 01	21,9	24,1	<1
Experimento 02	<1	<1	<1
Experimento 03	5,32	5,38	<1

Devido ao equipamento utilizado para a determinação deste parâmetro possuir limite mínimo de detecção de 1,00 mg/L, resultados abaixo deste valor não foram detectados. Por este motivo, não foi possível calcular a eficiência de remoção.

As resoluções CONAMA nº 430/2011 e CONSEMA nº 182/2021, que dispõem sobre as condições de lançamento de efluentes, não estabelecem limites máximos para este contaminante, no entanto o limite de cobalto nos rios de acordo com a resolução CONAMA 357/2005 de classe 3 é de 0,2 mg/L. No estado do Rio Grande do Sul, por exemplo, a resolução SEMA nº 419/2020, que estabelece os critérios para água de reuso para fins agrícolas e florestais, apresenta o limite de 0,05 mg/L para este parâmetro.

As concentrações de nitrogênio obtidas nos experimentos de DMCD com as águas residuais da indústria química estão dispostas na Tabela 6.

Tabela 6 – Concentrações de nitrogênio obtidas nos processos de DMCD aplicada as águas residuais da indústria química.

Experimento	Concentração de Nitrogênio (mg/L)		
	Água residual	Retido	Permeado
Experimento 01	160	420	<10
Experimento 02	260	260	16
Experimento 03	300	900	17



Para remoção de nitrogênio em efluentes, comumente são utilizadas a nitrificação e a desnitrificação por meio de processos biológicos aeróbicos e anaeróbicos. Zoppas (2012) aplicou estes processos em soluções sintéticas e obteve remoção média de nitrogênio de 96,6%, valor próximo aos encontrados nos Experimentos 03 e 04, nos quais foram obtidas eficiências de 93,8 e 94,3% respectivamente. Atualmente, o parâmetro nitrogênio não é limitado pelas resoluções CONAMA nº 430/2011 e CONSEMA nº 182/2021 quanto ao seu lançamento em efluentes, entretanto, o parâmetro nitrogênio amoniacal deve atender o limite de 20 mg/L conforme exigido pela resolução CONAMA nº 430/2011.

Na Tabela 7 estão dispostas as concentrações de surfactantes obtidas nos experimentos de DMCD com as águas residuais.

Tabela 7 – Concentrações de surfactantes obtidas nos processos de DMCD aplicada as águas residuais da indústria química.

Experimento	Concentração de Surfactantes (mg/L)		
	Água residual	Retido	Permeado
Experimento 01	0,73	3,02	0,369
Experimento 02	10,4	49,6	0,36
Experimento 03	20,4	14,8	0,16

Observa-se que em todos os experimentos realizados, os valores de surfactantes no permeado atenderam à legislação estadual, visto que a resolução CONSEMA nº 182/2021 limita este contaminante em 2,00 mg/L, sendo o menor valor identificado no Experimento 03 (0,16 mg/L). A resolução CONAMA nº 430/2011 não limita o parâmetro em questão, quanto ao seu lançamento em efluentes.

Importante ressaltar que a maioria dos compostos incrustantes, como componentes orgânicos, são removidos da superfície da membrana por limpeza física e/ou química adequada, mas alguns compostos, como por exemplo surfactantes, podem se unir quimicamente à superfície da membrana de maneira que não possam ser facilmente removidos (RAMLOW, 2018). Desta forma, caso a membrana esteja incrustada, o processo de DMCD pode ter resultados comprometidos, como a redução do fluxo de permeado e o saturamento precoce das membranas.

As condutividades elétricas obtidas nos experimentos de DMCD aplicada às águas residuais da indústria química estão dispostas na Tabela 8.

Tabela 8 – Condutividade elétrica das águas residuais obtidas nos experimentos de DMCD.

Experimento	Condutividade (µs/cm)		
	Água residual	Retido	Permeado
Experimento 01	15230	17000	18,27
Experimento 02	34600	38000	24,70
Experimento 03	36000	40100	20,00

Devido aos processos produtivos da indústria química e os produtos gerados, as águas residuais muitas vezes são consideravelmente salinas e possuem, consequentemente, valores altos de condutividade elétrica, conforme observado na Tabela 7.

Nos permeados, o menor valor de condutividade elétrica obtido foi para o Experimento 01 (de 18,27 µs/cm), no qual utilizou-se a água residual A. Os valores de condutividade elétrica iniciais dessas águas residuais foram muito próximos, indicando que a filtração não influenciou neste parâmetro, o que ocorreu devido à água residual da indústria química ser constituída, principalmente, de sólidos solúveis dissolvidos.



Elevados valores de condutividade no permeado estão associados à passagem de soluções salinas através da membrana e isso pode ser explicado pela redução de sua hidrofobicidade, devido à cristalização na sua superfície e no interior de seus poros (QTAISHAT; MATSUURA, 2015).

Ressalta-se que as resoluções CONAMA nº 430/2011 e CONSEMA nº 182/2021 também não estabelecem limites máximos para este parâmetro, em relação ao lançamento de efluentes. Entretanto, a NBR 16783/2019, que trata a respeito de fontes alternativas de água não potável em edificações, estabelece o limite de 3200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para este parâmetro. Além disso, a Deliberação Normativa nº 65/2018, do Estado de Minas Gerais, cita que para o reuso de efluentes tratados na modalidade agrossilvipastoril, a condutividade elétrica deve atender o limite máximo de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Desta forma, em todos os experimentos realizados, os permeados apresentaram valores aceitáveis para o uso em atividades como lavagem de veículos, irrigação para fins paisagísticos, sistema de resfriamento de telhado e descarga de bacias de sanitários/mictórios.

As concentrações de sólidos suspensos totais obtidas nos experimentos de DMCD com as águas residuais da indústria química estão dispostas na Tabela 9.

Tabela 9 – Concentrações de sólidos suspensos totais obtidas nos processos de DMCD.

Experimento	Concentração de Sólidos Suspensos Totais (mg/L)		
	Água residual	Retido	Permeado
Experimento 01	386	868	0
Experimento 02	4680	4010	130
Experimento 03	8390	4390	190

Observa-se que em todos os experimentos realizados houve a redução na concentração de sólidos suspensos totais, sendo que no Experimento 01 não foram identificados sólidos suspensos totais no permeado. Weschenfelder (2015) fez a aplicação de membranas cerâmicas no tratamento de águas produzidas em unidades marítimas de produção de petróleo e também obteve redução no parâmetro sólidos suspensos totais.

A remoção dos sólidos suspensos totais previne fatores que possam interferir, de maneira negativa no processo DMCD. De acordo com Dunham e Kronmiller (1995), existem quatro agentes causadores de *fouling*: sólidos dissolvidos, sólidos suspensos e compostos orgânicos de origem biológica e não biológica.

3.3. Caracterização das membranas utilizadas

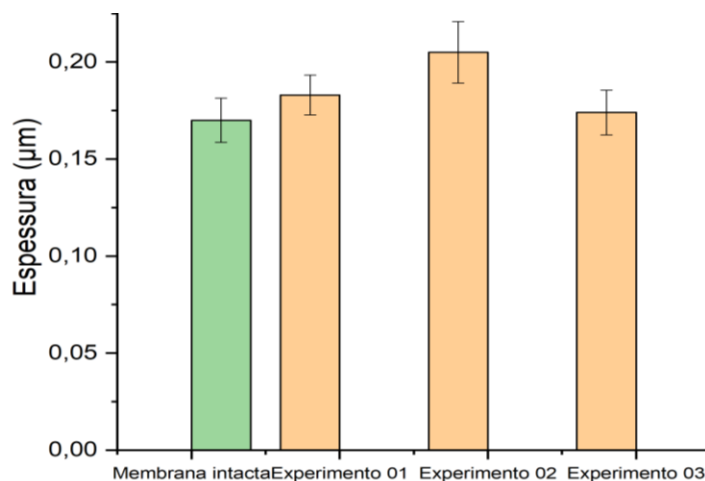
Na Figura 3 são apresentados os valores médios de espessura das membranas intactas e após a realização dos experimentos com as águas residuais da indústria química.

As membranas intactas utilizadas nos experimentos apresentaram espessuras médias de $0,170 \pm 0,011 \mu\text{m}$. Após os experimentos, exibiram valores distintos, variando entre 0,1724 e 0,205 μm . O aumento observado após o tratamento das águas residuais por DMCD pode ser justificado devido ao acúmulo de compostos químicos e sólidos presentes nas águas residuais, evidenciados nas análises físico-químicas realizadas. Importante destacar que não foram obtidos desvios padrões relevantes quanto à espessura das membranas, o que pode ser concluído devido aos baixos desvios associados às medidas realizadas (MARAFIGA, 2022).

Foram identificados no espectro da membrana intacta os números de onda em 1205 e 1153 cm^{-1} , indicando a presença do grupo químico organofluorado, que contém ligações carbono-flúor, características da membrana de PTFE.

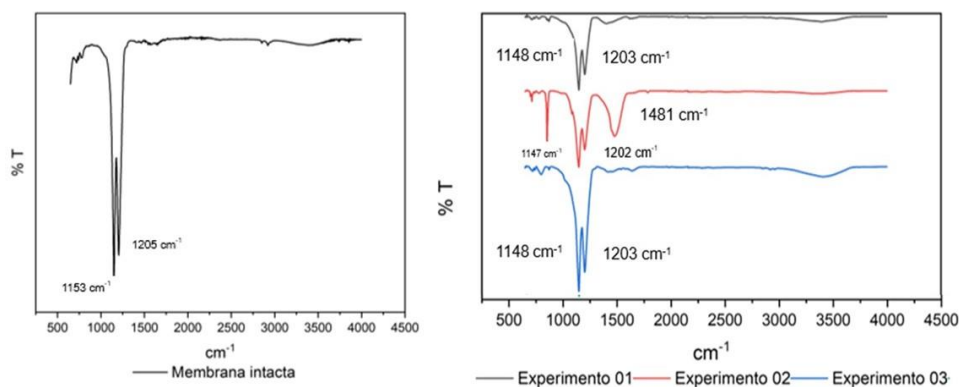


Figura 3 - Espessuras das membranas intactas e após os experimentos de DMCD com as águas residuais da indústria química.



Na Figura 4 são apresentados os espectros de FTIR-ATR das membranas contaminadas, ou seja, utilizadas nos experimentos de DMCD com as diferentes amostras de águas residuais da indústria química, filtrada e não filtradas.

Figura 4 – Espectro de FTIR-ATR das membranas intacta e utilizadas no Experimentos de DMCD com as águas residuais da indústria química.



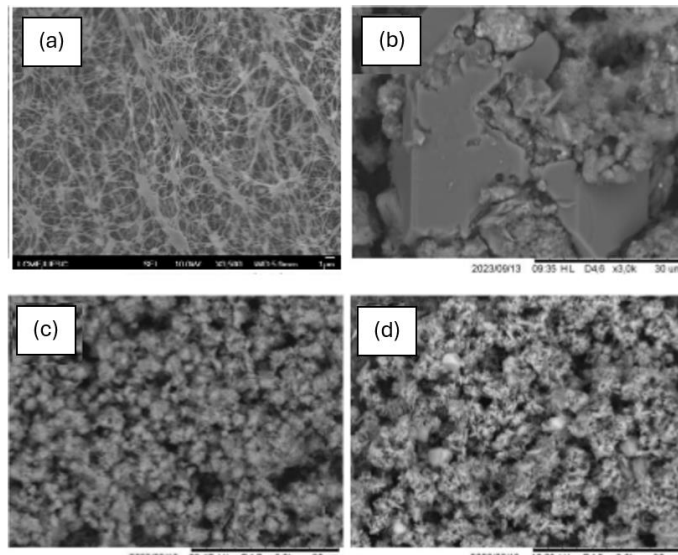
Com base nos resultados dos espectros FTIR-ATR, pode-se afirmar que não foram identificadas alterações significativas dos grupos químicos característicos do material da membrana intacta, visto que as membranas contaminadas apresentaram picos em 1147 e 1203 cm^{-1} , correspondentes a grupos funcionais com ligações carbono-flúor.

Foram identificadas bandas de 1481 cm^{-1} , o que corresponde a grupos alcanos (CH_2 e CH_3) (FONTES et al., 2009; DOMINGUEZ; MENENDEZ, 2006), indicando assim a possível presença de derivados de óleo na membrana. Nos processos da indústria química não são utilizados derivados de óleo, entretanto, durante as atividades de manutenção são utilizados óleos hidráulicos. Gryta e Karakulski (1999) sugerem a combinação da tecnologia DM com um sistema de separação de óleo, a fim de evitar a permeação deste contaminante no permeado.

As imagens obtidas pela análise de MEV, com ampliação de 3000x, para os experimentos de DMCD aplicada as águas residuais da indústria química são apresentadas na Figura 5.



Figura 5 - Fotomicrografias da superfície superior da membrana de PTFE geradas por MEV ampliadas em 3000x, sendo (a) referente a membrana intacta e (b), (c) e (d) aos experimentos realizados com as águas residuais da indústria química A, B e C, respectivamente.



Nota-se um acúmulo relevante de partículas sobre as membranas de PTFE após a aplicação do processo de DMCD com as águas residuais da indústria química. Este fenômeno pode ser justificado devido às substâncias presentes nas águas residuais, evidenciadas a partir das análises realizadas, como iodo, cobalto e os sólidos suspensos totais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi comprovada a potencialidade da aplicação do processo de DMCD ao tratamento de águas residuais reais da indústria química, com a remoção e recuperação de compostos de interesse, como o iodo, cobalto, nitrogênio, surfactantes e sólidos suspensos totais, e a obtenção de água residual tratada, para possível reuso. A partir da utilização de membranas planas comerciais de PTFE, no lado do permeado, os contaminantes apresentaram reduções, sendo obtidas elevadas eficiências de remoção. No lado de alimentação, uma água com alta rejeição de contaminantes e concentração de compostos químicos foi obtida. Devido ao adequado diâmetro médio dos poros, alta porosidade volumétrica, alta hidrofobicidade, baixo grau de absorção de líquido e morfologia superficial uniforme, os experimentos realizados com a membrana de PTFE apresentaram excelentes resultados de remoção dos contaminantes. As águas residuais apresentaram diferentes desempenhos de fluxo de permeado ao longo do tempo e isso ocorreu devido às diferentes concentrações de produtos químicos existentes em cada uma delas.

Embora haja atualmente diversos estudos na literatura sobre as membranas utilizadas no processo de DM, sua disponibilidade no mercado ainda é limitada, devido principalmente à escassez de membranas altamente eficientes e prontamente disponíveis para comercialização. Atualmente, estão sendo desenvolvidas membranas específicas para o processo DMCD, entretanto as mesmas não são amplamente comercializadas. Além dos avanços feitos no desenvolvimento de membranas em laboratório, a exploração das membranas comerciais pode proporcionar uma nova visão sobre a utilização e aplicação no processo de DM.



São necessários progressos significativos, em termos de custos e aceitação de novas tecnologias pela indústria, para que o processo de DM se torne mais competitivo, alcançando assim maior crescimento no mercado.

REFERÊNCIAS

- BALANNEC, B; VOURCH, M; RABILLER-BAUDRY, M; CHAUFER, B. Estudo comparativo de diferentes membranas de nanofiltração e osmose reversa para tratamento de efluentes lácteos por filtração sem saída. **Set Purif Techno**, v. 42, p. 195-200, 2005.
- BALDASSO, C.; BARROS, T. C.; TESSARO, I. C. Concentration and Purification of Whey Proteins by Ultrafiltration. **Desalination**, v. 278, p. 381–386, 2011.
- CNI. O uso racional da água no setor industrial. [S.l.: s.n.], 2017.
- DETONI, T.; DONDONI, P.; PADILHA, E. A. P. **A escassez da água: um olhar global sobre a sustentabilidade e a consciência acadêmica**. XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2007.
- DOMINGUEZ, A.; MENÉNDEZ, J.A.; PIS, P.P. Hydrogen rich fuel gas production from the pyrolysis of wet sewage sludge at high temperature. **J. Anal. Appl. Pyrol.**, v.77, p.127-132, 2006.
- DUNHAM, S. R.; KRONMILLER, D. L. (1995) **Membrane cleaning under the microscope: successful cleaning means knowing the foulant**. Disponível em: <<http://www.pwtchemicals.com/science.shtml>>. Acesso em: 20, ago. 2023.
- FONTES, I.; AZUARA, M.; GEA, G.; MURILLO, M.B. Study of the pyrolysis liquids obtained from different sewage sludge. **J. Anal. Appl. Pyrol.**, v. 85, p.184-191, 2009.
- GRYTA, M.; KARAKULSKI, K. The application of membrane distillation for the concentration of oil water emulsions. **Desalination**, v. 121, n. 1, p. 23-29, 1999.
- HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de Separação por Membranas**. 1. ed. Rio de Janeiro: E papers, 180 p, 2006.
- HITSOV, I.; EYKENS, L.; SCHEPPER, W. De; SITTER, K. De; DOTREMONT, C.; NOPENS, I. Full scale direct contact membrane distillation (DMCD) model including membrane compaction effects. **Journal of Membrane Science**, [s.l.], v. 524, p. 245-256, 2017.
- LEFEBVRE, O. MOLETTA, R. Treatment of organic pollution in industrial saline wastewater: A literature review, **Water Research**, v. 40, p. 3671-3682, dec. 2006. Elsevier.
- MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reúso de Água**. NISAM USP, Barueri, SP, 579 p, 2003.
- MARAFIGA.; MARANGONI, C. **Desenvolvimento de membranas de poli(fluoreto de vinilideno)/poli(etilenoglicol) com carvão ativado e grafeno para a recuperação de água de efluente têxtil via destilação por membranas**. 2022. 144 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022
- METCALF; EDDY. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3. ed. New York : McGraw Hill, 1991.
- MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. Programa para gerenciamento de águas e efluentes nas indústrias, visando ao uso racional e a reutilização. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, ABES, v. 4, n. 1, p.11-15, 2000.
- MOKHTAR, N. M. The potential of direct contact membrane distillation for industrial textile wastewater treatment using PVDF Cloisite 15A nanocomposite membrane. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 111, p. 284-293, 2016.
- PELEGRINI, R.; MELCHIOR, S. C. **Influência do Ambiente Químico na Microbiota nos Processos de Tratamento Biológicos**. In: V Fórum de Estudos Contábeis, 2005, João Pessoa, 2005.
- QTAISHAT, M.R; MATSUURA, T. **Modelling of pore wetting in membrane distillation compared with pervaporation**. In: (ed) Pervaporation, Vapour Permeation and Membrana Distillation, United Kingdom: Elsevier, 2015. Cap. 13, p.385-413.



RAMLOW, H. **Destilação por membrana aplicada ao tratamento de águas residuais da indústria.** 2018. 145 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SILVA, R.; MARANGONI, C. **Condições ótimas para tratamento de efluente têxtil usando destilação por membrana por contato direto.** 2019. 117 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

SOUZA, J. et al. **A Importância da Qualidade da Água e os seus Múltiplos Usos: Caso Rio Almada,** Sul da Bahia, Brasil. REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA, Fortaleza, v. 8, n. 1, abr. 2014. ISSN 1982.

WESCHENFELDER, S. **Aplicação de membranas cerâmicas para o tratamento de água produzida em unidades marítimas de produção de petróleo.** Rio de Janeiro, 2015. 247 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

WILLIAM, F. A indústria química e o seu desenvolvimento no âmbito da engenharia. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 30, p. 1 36, 2014.

