



## Avaliação de membranas para o tratamento de água proveniente do processo de extração de petróleo

doi: 10.4136/ambi-agua.1578

Received: 18 Dec. 2014; Accepted: 05 Mar. 2015

Silvio Edegar Weschenfelder<sup>1,2\*</sup>; Cristiano Piacsek Borges<sup>3</sup>;  
Juacyara Carbonelli Campos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
Centro de Pesquisas

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
Departamento de Processos Inorgânicos - Escola de Química

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
Programa de Engenharia Química - COPPE

\* Autor correspondente: e-mail: silvioweschenfelder@petrobras.com.br,  
cristiano@peq.coppe.ufrj.br, juacyara@eq.ufrj.br

### RESUMO

Grandes quantidades de água são geradas durante o processo de extração de petróleo. A reinjeção deste efluente é frequentemente a opção mais adequada por considerações ambientais. Para esta finalidade a água produzida deve apresentar características que evitem o tamponamento das rochas do reservatório, ou seja, teores de sólidos suspensos e óleos e graxas devem ser inferiores a  $5 \text{ mg L}^{-1}$ . O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de membranas para o tratamento de água produzida por meio de ensaios de longa duração com efluente real, levando-se em conta a evolução do fluxo de permeado e as características do efluente gerado. Os resultados indicam que mediante o emprego de membranas com tamanho de poros igual  $0,1 \mu\text{m}$  é possível a obtenção de uma corrente de permeado com teores de sólidos inferiores a  $1 \text{ mg L}^{-1}$  e teores de óleos e graxas na faixa de 1 a  $3 \text{ mg L}^{-1}$ . Após 50 horas de permeação, os fluxos de permeado obtidos foram de  $50 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  para a membrana polimérica e  $300 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  para a membrana cerâmica. Com o processo de regeneração química foi possível o reestabelecimento de 95% da permeabilidade original da membrana cerâmica e 30% da permeabilidade da membrana polimérica. Considerando-se a qualidade do permeado, a eficiência de regeneração da membrana e o fluxo obtido, é possível apontar o processo de separação por membranas cerâmicas como uma tecnologia alternativa para o tratamento da água produzida, com a vantagem de ser um processo compacto e robusto.

**Palavras-chave:** regeneração da membrana, reúso, testes de longa duração.

### Evaluation of membranes for the treatment of oilfield-produced water

#### ABSTRACT

Large quantities of water are generated during oil extraction. Reinjection of this effluent is frequently the most suitable option for environmental considerations. For this purpose, the water produced must have characteristics that will prevent the plugging of the reservoir rocks, i.e., suspended solids and oil and grease content must be lower than  $5 \text{ mg L}^{-1}$ . This work

evaluated the performance of membranes for water treatment, based upon long-term experiments with real effluent, evaluating the permeate flux over time and the effluent characteristics. The results indicated that it is possible to obtain a permeate flux with suspended solids content with less than  $1 \text{ mg L}^{-1}$  oil and a grease concentration in the range of 1 to  $3 \text{ mg L}^{-1}$  using membranes with a pore size of  $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ . After 50 hours of permeation, the permeate fluxes obtained with the polymeric and ceramic membranes were equal to 50 and  $300 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , respectively. With a chemical regeneration procedure, it was possible to recover 95% of the ceramic membrane's original permeability and 30% of the polymeric membrane's permeability. Considering the permeate quality, the regeneration efficiency of the membrane and the fluxes achieved, it is possible to point out the use of ceramic membranes as a potential technology for treating oilfield-produced water, and it has the advantage of being a compact and robust process.

**Keywords:** long-term trials, membrane regeneration, reuse.

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo da vida produtiva de um campo de petróleo ocorre a produção simultânea de gás, óleo e água (Haghshenas e Nasr-El-Din, 2014). A água gerada, comumente denominada de água produzida, é considerada o maior resíduo obtido durante o processo de extração de petróleo e gás (Reynolds, 2003).

Este efluente contém uma mistura complexa de compostos orgânicos e inorgânicos, dissolvidos ou em suspensão, que necessitam ser parcialmente removidos antes do descarte ou reuso com a finalidade de recuperação secundária de petróleo (Judd et al., 2014). O volume e as características desta corrente podem sofrer grande variação em função do campo produtor e do tempo decorrido do início de produção do reservatório.

A opção de descartar ou reutilizar a água produzida depende do tipo de instalação produtora de petróleo, disponibilidade de água, instalações de tratamento e dos requisitos de qualidade da água para injeção no reservatório.

As características do efluente a ser descartado em plataformas marítimas devem obedecer aos parâmetros estabelecidos na resolução CONAMA 393/2007. De acordo com a norma, apenas os compostos orgânicos suspensos, contabilizados como óleos e graxas, necessitam ser removidos e não devem exceder o limite médio mensal de  $29 \text{ mg L}^{-1}$ . Por outro lado, quando a finalidade é o reuso (reinjeção), torna-se necessária a remoção simultânea de sólidos suspensos e óleos e graxas. Para reservatórios mais restritivos, ambos os parâmetros devem ser inferiores a  $5 \text{ mg.L}^{-1}$  (Judd et al., 2014; Robinson et al., 2013). Esta limitação é decorrente da possibilidade destes contaminantes promoverem o entupimento das zonas de produção do reservatório e também por diminuírem eficiência de injeção de água.

A corrente de entrada da planta de tratamento de água possui um TOG na faixa de 0,02 a 0,2% e é comumente tratada por hidrociclones e flotadores. Estes equipamentos, no entanto, são incapazes de remover partículas suspensas com dimensões inferiores a  $5,0 \text{ }\mu\text{m}$ , assim como raramente atingir a qualidade da água para reinjeção em termos de TSS e TOG para reservatórios mais restritivos. Nestas condições as concentrações de ambos os parâmetros devem ser inferiores a  $5 \text{ mg L}^{-1}$ .

A filtração por membranas tem sido apontada com uma tecnologia alternativa mais eficiente para o tratamento de efluentes oleosos, como por exemplo, a água produzida (Zhang et al., 2013; Alzahrani et al., 2014; Ashaghi et al., 2007; Li e Lee, 2009; Silahi e Leiknes, 2001; Igunnu e Chen, 2012).

Alguns estudos relacionados ao tratamento de água produzida por membranas já foram reportados na literatura, porém empregando-se efluentes preparados sinteticamente. Diversos

parâmetros foram avaliados nestes estudos, como por exemplo: tipos de materiais e tamanhos de poros da membrana (na faixa de 0,05  $\mu\text{m}$  a 0,5  $\mu\text{m}$ ), pressão através da membrana (na faixa de 0,45 a 4,0 bar) e velocidade de escoamento cruzado (na faixa de 0,2 a 4,5  $\text{m s}^{-1}$ ). Srijaroonrat et al. (1999) observou que tamanhos de poros equivalente a 0,1  $\mu\text{m}$  resultam em maiores fluxos no estado estacionário, em comparação com membranas com tamanhos de poros de 0,05 e 0,5  $\mu\text{m}$ . Qaisrani et al. (2011) indicaram que os parâmetros velocidade de escoamento e pressão através da membrana (PAM) influenciam significativamente a incrustação orgânica (*fouling*) das membranas, resultando em alterações no desempenho do processo de filtração.

O cisalhamento promovido pelo escoamento cruzado é conhecido por ser eficaz para o controle do *fouling*, por reduzir a espessura da camada limite, e, conseqüentemente, a deposição de partículas sobre a superfície da membrana. Zhong et al. (2003) verificaram que o emprego de PAM acima de 2,0 bar, para membranas contendo poros de 0,2  $\mu\text{m}$ , afeta fortemente a qualidade de permeado. Este fato foi atribuído à aceleração do transporte de gotículas de óleo para a superfície da membrana, maximizando a deposição e aumentando o teor de óleo na corrente de permeado. Sob estas condições, as gotículas podem deformar e passar através dos poros da membrana. Membranas de diferentes materiais também já foram avaliadas em função da capacidade para separação de óleo e fluxo. Os resultados demonstraram praticamente a mesma eficiência na rejeição de óleo, porém fluxos diferenciados. Zhong et al. (2003) e Srijaroonrat et al. (1999) relatam fluxos superiores ao empregar membranas de óxido de zircônio para o tratamento de efluentes oleosos.

O objetivo principal deste estudo foi avaliar o comportamento do processo de filtração por membranas cerâmicas de óxido de zircônio e membranas poliméricas de poliamida através de experimentos de longa duração para o tratamento de água produzida real. Esta avaliação, realizada por meio da observação da evolução de fluxo de permeado com o tempo e rejeição de sólidos suspensos e óleos e graxas, fornece novas informações para a indústria de petróleo e gás, gerando dados importantes para o dimensionamento de plantas em grande escala. O processo de regeneração, por ser considerado de grande relevância, também fez parte do estudo.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Água Produzida

Para a realização dos experimentos foi empregada uma corrente de água produzida obtida em uma unidade terrestre de produção de petróleo. Este efluente possui as seguintes características físico-químicas: pH=6,6, condutividade=100  $\text{mS cm}^{-1}$ , TSS=60  $\text{mg L}^{-1}$ , TOG=25  $\text{mg L}^{-1}$ ,  $[\text{Fe}^{2+}]$ =6,3  $\text{mg L}^{-1}$ ,  $[\text{SO}_4^{2-}]$ =99,4  $\text{mg L}^{-1}$ ,  $[\text{Na}^+]$ =38150  $\text{mg L}^{-1}$ ,  $[\text{Cl}^-]$ =58800  $\text{mg L}^{-1}$ ,  $[\text{Mg}^{2+}]$ =1020  $\text{mg L}^{-1}$ ,  $[\text{Ca}^{2+}]$ =1940  $\text{mg L}^{-1}$ ,  $[\text{Sr}^{2+}]$ =48,8  $\text{mg L}^{-1}$ ,  $[\text{Ba}^{2+}]$ =2,0  $\text{mg L}^{-1}$ . Estas análises foram realizadas de acordo com os métodos padrões para análise de águas e efluentes (Eaton e Franson, 2005).

### 2.2. Características da membrana

Foram empregadas membranas poliméricas de fibra oca e membranas multitubulares cerâmicas para a realização da avaliação. A Tabela 1 apresenta as propriedades destas membranas.

### 2.3. Unidades de filtração

#### 2.3.1. Unidade de filtração para avaliação de membranas poliméricas

A unidade de filtração para avaliação de membranas poliméricas possui capacidade para tratar até 8  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$  de água produzida. O sistema construído em aço carbono pode suportar

pressões de operação de 4 bar e temperaturas de até 40°C. Nesta unidade a alimentação é realizada por meio de uma bomba centrífuga. A PAM é ajustada através de válvulas instaladas nas linhas de permeado e concentrado. Os módulos de filtração foram dispostos em paralelo e em série.

**Tabela 1.** Propriedades das membranas poliméricas e cerâmicas.

Características	Membrana polimérica	Membrana cerâmica
Diâmetro do canal	0,5 mm	3,5 mm
Superfície	75 m <sup>2</sup>	0,381 m <sup>2</sup>
Tamanho de poro	0,1 µm	0,1 µm
Número de canais	1395	19
Permeabilidade à água (25°C)	100 L h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> bar <sup>-1</sup>	1200 L h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> bar <sup>-1</sup>
Camada ativa	Poliamida	ZrO <sub>2</sub>
Camada Intermediária	---	TiO <sub>2</sub>
Suporte	---	TiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

### 2.3.2. Unidade de filtração para avaliação de membrana cerâmica

O sistema de permeação contendo membranas cerâmicas tem capacidade para processar 0,5 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> de efluente A unidade construída em aço inoxidável (AISI-316) pode suportar pressões de operação de 8 bar e temperaturas de até 80°C. A alimentação da água produzida é realizada através de uma bomba centrífuga e a temperatura de alimentação é controlada por um permutador de calor instalado no tanque de alimentação. O ajuste da PAM é realizado por meio das válvulas V-3 e V-4. A PAM é determinada através da diferença entre a pressão média dada por P-1 e PI-3 e a pressão obtida pela PI-2. A vazão de recirculação é medida por um medidor de vazão.

Uma representação esquemática e uma ilustração das unidades de filtração contendo membranas poliméricas e membranas cerâmicas são apresentadas na Figura 1a e Figura 1b, respectivamente.

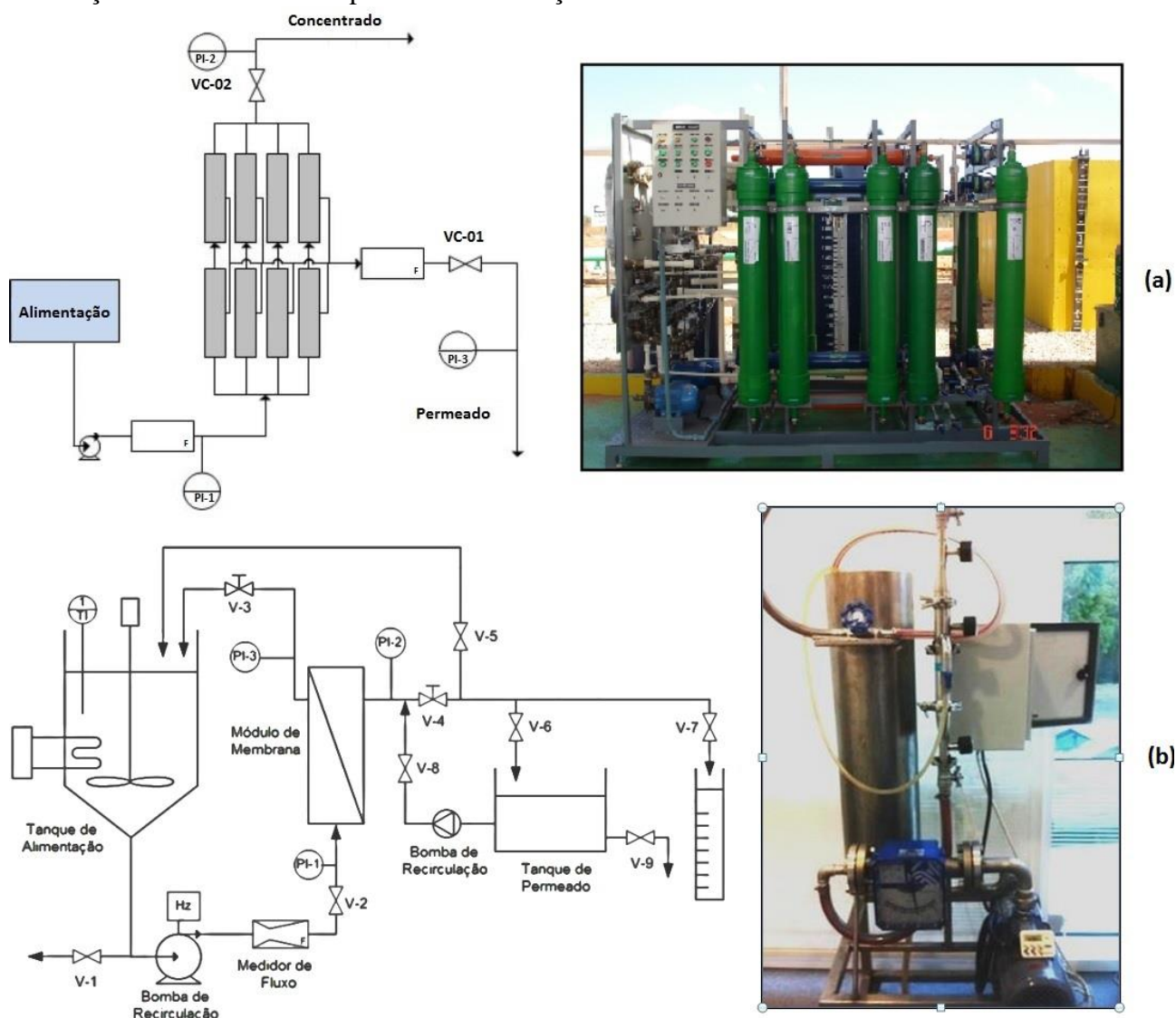
### 2.4. Procedimento Experimental

Os sistemas de permeação foram alimentados continuamente com vazões de 8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> para a unidade contendo membranas poliméricas e 0,5 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> para a unidade contendo membranas cerâmicas. A recuperação global, determinada pela fração da corrente de permeado obtida em relação à alimentação, foi mantida em patamares na faixa de 70 a 80% em ambos os sistemas. A PAM permaneceu constante e igual a 2,0 bar. Para as membranas cerâmicas foi adotado um sistema de recirculação capaz de promover uma velocidade de escoamento na superfície da membrana equivalente a 3 m s<sup>-1</sup>.

O processo de regeneração da membrana polimérica foi realizado por meio da recirculação de detergente contendo dodecil sulfonato de sódio na concentração de 1%, durante 1h, conforme recomendado pelo fornecedor PAM Membranas. Já o protocolo de limpeza química para as membranas cerâmicas, conforme recomendação do fornecedor Likuid Nanotek, envolveu as seguintes etapas: recirculação de uma solução alcalina contendo KOH (100 mg L<sup>-1</sup>) e NaOCl (12 mg L<sup>-1</sup>) durante 30 minutos e recirculação de solução ácida contendo ácido cítrico (100 mg L<sup>-1</sup>) também durante 30 minutos.

A eficiência do processo de regeneração foi verificada através de ensaios de permeabilidade hidráulica da membrana. Para tal determinação, registrou-se o fluxo de permeado com água destilada, a 25°C, em diferentes PAM: 1.0, 2.0 e 3.0 bar. A

permeabilidade hidráulica foi considerada como sendo o coeficiente angular obtido através da correlação linear do fluxo de permeado em função da PAM.



**Figura 1.** Sistema de permeação para membranas poliméricas (a) e para membranas cerâmicas (b).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

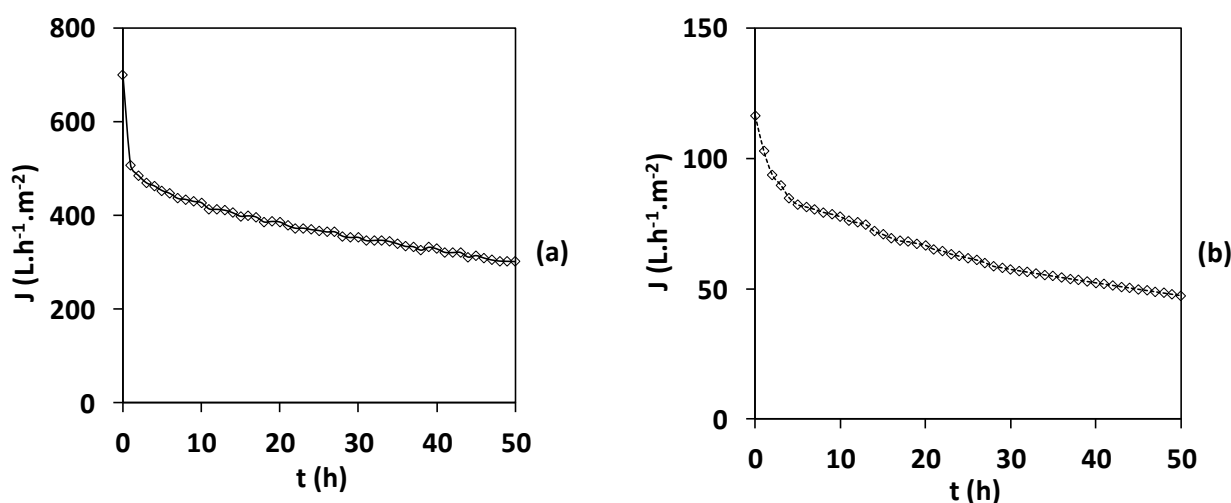
Os principais parâmetros físico-químicos que necessitam ter seus teores reduzidos, visando o reuso (reinjeção) da água produzida, são os sólidos suspensos e os óleos e graxas. Para evitar problemas na injeção de água no reservatório, os valores de TSS e TOG da corrente de permeado devem ser inferiores a  $5 \text{ mg L}^{-1}$ . Os resultados indicaram que este requisito de qualidade pode ser atendido satisfatoriamente. O TOG se manteve na faixa de 1 a  $3 \text{ mg L}^{-1}$  enquanto que o TSS não pode ser detectado em função do limite de detecção do método (superior a  $1 \text{ mg L}^{-1}$ ). Os demais parâmetros, citados na seção 2.1 não sofreram variação em função do processo de permeação.

Na Figura 2 é possível observar uma amostra do efluente bruto (à esquerda) e do permeado obtido com o processo de filtração (à direita). Para ambas as membranas, polimérica e cerâmica, o aspecto visual da corrente de permeado foi semelhante.



**Figura 2.** Imagem da amostra do efluente bruto e da corrente de permeado obtido após a filtração com membranas cerâmicas e poliméricas.

O desempenho do processo de filtração também foi avaliado mediante a observação da evolução do fluxo de permeado em função do tempo de operação para PAM constante e igual a 2,0 bar e  $T=25^{\circ}\text{C}$ . Na Figura 3 são apresentados os resultados do fluxo de permeado em função do tempo de operação para a membrana cerâmica (Figura 3a) e para a membrana polimérica (Figura 3b).



**Figura 3.** Fluxo de permeado em função do tempo de operação para a membrana cerâmica (a) e membrana polimérica (b). PAM=2,0 bar e  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

Conforme pode ser observado na Figura 3, um declínio inicial no fluxo de permeado foi observado, assim como era esperado. Este fenômeno pode ser atribuído à rejeição ao óleo por parte da membrana, promovendo o aumento da incrustação e, conseqüentemente, a elevação da resistência à permeação. Após aproximadamente 5 horas, para ambas as membranas, foi possível observar a aproximação do estado estacionário, verificado pelo fato do fluxo iniciar um processo de estabilização com o tempo.

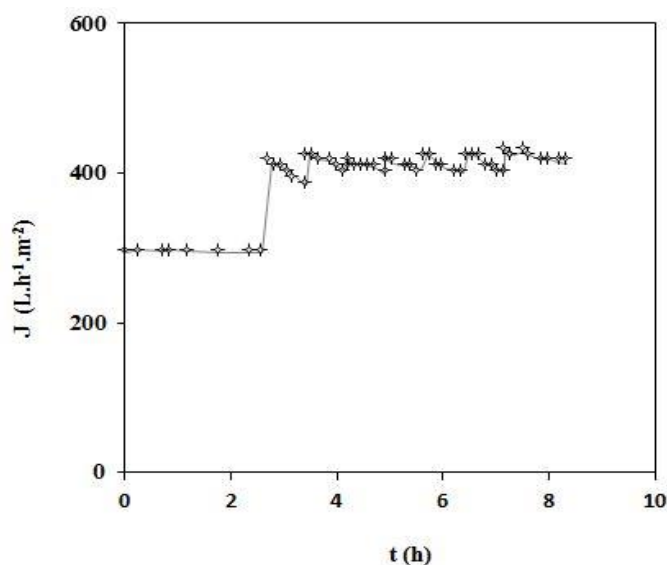
O fluxo resultante na membrana polimérica foi reduzido em aproximadamente 60%, atingindo níveis na ordem de  $50 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , após 50 horas de permeação. No caso da membrana cerâmica o fluxo ainda apresentava valores bastante elevados, na ordem de  $300 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Estes resultados são significativamente superiores aos apresentados na literatura e podem ser atribuídos ao elevado teor de sais presentes na água produzida (Mueller et. al., 1997; Schulz et al., 2004; Ebrahimi et al., 2009; 2010; Yang et al., 2011). É possível inferir que, neste caso, diferentemente dos estudos prévios com efluente sintéticos sem a presença de sais, que uma

alta concentração iônica diminui a espessura da dupla camada elétrica em torno das gotículas de óleo emulsionadas, diminuindo a barreira eletrostática a coalescência, produzindo gotas maiores que, conseqüentemente, conduzem a uma menor resistência à permeação (Zhang et al., 2013).

Cabe ressaltar que os resultados foram obtidos a partir de duas unidades de filtração com dimensões e configurações bastante diferentes. Porém, considerando a possibilidade de escalonamento, apresentada por este tipo de tecnologia, e também devido ao fato do teste ter sido conduzido em condições controladas de operação, é possível afirmar que as comparações realizadas neste estudo são satisfatórias.

Em função do desempenho satisfatório do processo de separação por membranas cerâmicas, testes complementares foram realizados apenas com este tipo de membrana. Neste sentido optou-se por avaliar o efeito da retrolavagem como alternativa à redução da polarização de incrustação seguindo os mesmos parâmetros operacionais adotados anteriormente (PAM=2,0 bar e T=25°C). Após a estabilização do fluxo de permeado com o tempo, foi iniciado o processo de retrolavagem a cada 30 minutos, invertendo-se o sentido do fluxo (na linha de permeado), aplicando-se uma pressão de 2,0 bar.

Como pode ser observado na Figura 4, este processo teve um efeito positivo sobre o desempenho da filtração da membrana, acarretando em um incremento de aproximadamente 35% no fluxo de permeado. Deste modo pode-se concluir que a opção por utilizar esta estratégia de redução de incrustação orgânica permite a obtenção de maiores fluxos, resultando na diminuição de área de filtração requerida e, por conseguinte, na redução do espaço ocupado pela unidade de filtração (Blanpain-Avet et al., 2009; Silahi e Leiknes, 2009).



**Figura 4.** Efeito da retrolavagem sobre o fluxo de permeado em função do tempo de filtração. T=25°C, PAM=2,0 bar (filtração) e PAM=-2,0 bar (retrolavagem).

Conforme mencionado anteriormente, a etapa de regeneração da membrana é extremamente importante para a continuidade operacional do sistema de filtração, principalmente em se tratamento de efluentes oleosos, que costumam aderir às membranas com grande intensidade.

Para a regeneração da membrana cerâmica, por se tratar de uma membrana altamente resistente ao ataque químico, foi empregada a sequência de limpeza com solução aquosa alcalina (KOH + NaOCl) seguida de limpeza com solução de ácido cítrico. O fluxo original

da membrana cerâmica foi de  $640 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  e após o processo de regeneração aproximadamente 95% da permeabilidade foi reestabelecida. Por outro lado, para a membrana polimérica foram empregados detergentes menos agressivos (solução aquosa de dodecil sulfonato de sódio), em função de sua elevada sensibilidade ao ataque químico. O fluxo original da membrana polimérica, que era de  $120 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , foi apenas parcialmente recuperado, atingindo um valor equivalente a 30% do fluxo inicial.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste estudo foram avaliadas membranas poliméricas de poliamida no formado de fibra oca e membranas multitubulares cerâmicas de óxido de zircônio. Ambas as membranas foram capazes de produzir uma corrente de permeado com teor de óleos e graxas na faixa de 1 a  $3 \text{ mg L}^{-1}$  e sólidos suspensos inferior a  $1 \text{ mg L}^{-1}$ , atendendo desta forma os requisitos para reuso (reinjeção em reservatórios). O fluxo médio obtido após 50 horas de permeação, mediante aplicação de uma pressão através da membrana de 2,0 bar, foi de aproximadamente  $300 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  para a membrana cerâmicas e  $50 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  para a membrana polimérica. Com a utilização de retrolavagens a cada 30 minutos foi possível incrementar o fluxo da membrana cerâmica em 35%.

O fluxo inicial de permeado da membrana polimérica foi de  $120 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Após o processo de regeneração química apenas 30% deste valor foi reestabelecido. Este fato foi atribuído à adesão do óleo à membrana e também à sensibilidade da membrana ao ataque químico, inviabilizando o uso de produtos químicos mais agressivos. Para a membrana cerâmica, após o processo de regeneração, foi possível o reestabelecimento de aproximadamente 95% do fluxo original de permeado, que foi de  $640 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

Os resultados obtidos neste estudo indicam o grande potencial de aplicação do processo de separação por membranas cerâmicas para tratamento de água produzida, em função do elevado fluxo e da sua capacidade de regeneração.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Pesquisas da Petrobras pela disponibilização de suas instalações e pelo fornecimento de amostras para a realização dos experimentos.

#### 6. REFERÊNCIAS

- ALZHRANI, S.; MOHAMMAD, A. W. Challenges and trends in membrane technology implementation for produced water treatment: a review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 4, p. 107-133, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.09.007>
- AMERICAN PUBLIC HEALTH WATER - APHA; WATER WORKS ASSOCIATION – WWA; WATER ENVIRONMENT FEDERATION - WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington, 2005. 1200 p.
- ASHAGHI, K. S.; EBRAHIMI, M.; CZERMAK, P. Ceramic ultra- and nanofiltration membranes for oilfield produced water treatment: a mini review. **The Open Environmental Journal**, v. 1, p. 1-8, 2007. <http://dx.doi.org/10.2174/187423350701011053>



- BLANPAIN-AVET, P.; MIGDAL, J. F.; BÉNÉZECH, T. Chemical cleaning of a tubular ceramic microfiltration membrane fouled with a whey protein concentrate suspension- Characterization of hydraulic and chemical cleanliness. **Journal of Membrane Science**, v. 337, p. 153-174, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2009.03.033>
- EBRAHIMI, M.; ASHAGHI, K. S.; ENGEL, L.; WILLERSHAUSEN, D.; MUND, P.; CZERMAK, P. Characterization and application of different ceramic membranes for the oil-field produced water treatment. **Desalination**, v. 245, p. 533-540, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2009.02.017>
- EBRAHIMI, M.; WILLERSHAUSEN, D.; ASHAGHI, K.S.; ENGEL, L.; PLACIDO, L.; MUND, P. et al. Investigations on the use of different ceramic membranes for efficient oil-field produced water treatment. **Desalination**, v. 250, p. 991-996, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.088>
- HAGHSHENAS, A.; NASR-EL-DIN, H. A. Effect of dissolved solids on reuse of produced water at high temperature in hydraulic fracturing jobs. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 21, p. 316-325, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2014.08.013>
- IGUNNU, E. T.; CHEN, G. Z. Produced water treatment technologies. **International Journal of Low-Carbon Technology**, 2012. <http://dx.doi.org/10.1093/ijlct/cts049>
- JUDD, S.; QIBLAWEY, H.; AL-MARRI, M.; CLARKIN, C.; WATSON, S.; AHMED, A. et al. The size and performance of offshore produced water oil-removal technologies for reinjection. **Separation and Purification Technology**, v. 134, p. 241-246, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2014.07.037>
- LI, L.; LEE, R. Purification of Produced water by Ceramic Membranes: Material Screening, Process Design and Economics. **Separation Science and Technology**, v. 44, p. 3455-3484, 2009. <http://dx.doi.org/10.1080/01496390903253395>
- MUELLER, J.; CEN, Y.; DAVIS, R.H. Crossflow microfiltration of oily water. **Journal of Membrane Science**, v. 129, p. 221-235, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0376-7388\(96\)00344-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0376-7388(96)00344-4)
- QAISRANI, T.; SAMHABER, W. Impact of gas bubbling and backflushing on fouling control and membrane cleaning. **Desalination**, v. 266, p. 154-161, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2010.08.019>
- REYNOLDS, R. R. **Produced water and associated issues: a manual for the independent operator**. Norman: Oklahoma Geological Survey, 2003. 56 p. Open-file Report, v. 6.
- ROBINSON, D. Oil and gas: treatment of produced waters for injection and reinjection. **Filtration + Separation**, v. 50, n. 4, p. 38-43, 2013. [http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882\(13\)70168-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882(13)70168-X)
- SCHULZ, C. K.; NOBREGA, R.; BORGES, C. P. Tratamento de efluentes oleosos utilizando processo de separação por membranas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 14., 26-29 set. 2004, Curitiba. **Proceedings...** Curitiba:ABEQ, 2004. 1 CD-ROM.
- SILAH, S. H. D.; LEIKNES, T. High frequency back-pulsing for fouling development control in ceramic microfiltration for treatment of produced water. **Desalination and Water Treatment**, v. 28, p. 137-152, 2001. <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2011.2482>

- SILAH, S. H. D.; LEIKNES, T. Cleaning strategies in ceramic microfiltration membranes fouled by oil and particulate matter in produced water. **Desalination**, v. 236, p. 160-169, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2007.10.063>
- SRIJAROONRAT, P.; JULIEN, E.; AURELLE, Y. Unstable secondary oil/water emulsion treatment using ultrafiltration: fouling control by back Fushing. **Journal of Membrane Science**, v. 159, p. 11-20, 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0376-7388\(99\)00044-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0376-7388(99)00044-7)
- YANG, Y.; CHEN, R.; XING, W. Integration of ceramic membrane microfiltration with powdered activated carbon for advanced treatment of oil-in-water emulsion. **Separation and Purification Technology**, v. 76, p; 373-377, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2010.11.008>
- ZHANG, H.; SHONG, Z.; XING, W. Application of ceramic membranes in the treatment of oilfield-produced water: effects of polyacrylamide and inorganic salts. **Desalination**, v. 309, p. 84-90, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2012.09.012>
- ZHONG, J.; SUN, X.; WANG, C. Treatment of oily wastewater produced from refinery processes using flocculation and ceramic membrane filtration. **Separation and Purification Technology**, v. 32, p. 93-98, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S1383-5866\(03\)00067-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1383-5866(03)00067-4)