

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA HIDROCICLONE/MEMBRANA CERÂMICA PARA FINS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS OLEOSAS

Olívia Júlia Silva Gomes¹
Karine Oliveira da Costa²
Kepler Borges França³

RESUMO

No processo de produção de petróleo, tem-se a água como um dos contaminantes mais indesejáveis, a qual é produzida em grandes volumes e sua presença, provoca uma série de problemas nas etapas de produção. Então, com objetivo de avaliar o desempenho de um sistema composto por um hidrociclone e membrana cerâmica, para tratamento de águas, realizou-se a caracterização dos componentes, através da determinação do TOG e densidade, e determinou a eficiência do sistema. Assim, observou-se que 3,0 bar foi a melhor pressão de operação para as membranas e obteve-se fluxo médio de 240 L/h.m² para águas oleosas. De acordo com os dados obtidos a partir do hidrociclone, de concentrações dentro da faixa avaliada (60 a 350 mg/L), a remoção média de óleo foi de 90,61%, então podemos afirmar que o hidrociclone apresenta um desempenho bastante significativo, em termos de redução de óleo na corrente do *underflow*. Na determinação das densidades das correntes do hidrociclone conclui-se que o petróleo trabalhado após a passagem pelo hidrociclone, apresentou uma densidade média para alimentação, permeado e concentrado com °API de 9,718, 9,016 e 9,156 respectivamente; assim, pelo grau de API ser menor que 10, é considerado um petróleo extrapesado. A eficiência total do sistema híbrido é, em média, 85,93% de remoção do óleo na corrente do permeado da membrana, respeitando os padrões exigidos pelo CONAMA (2011). Por fim, em termos de qualidade de água permeada pelos os sistemas, observou-se que estão adequadas de acordo com o valor máximo permissível de acordo com a legislação que dispõe sobre efluentes.

Palavras-chave: Hidrociclone, Membrana Cerâmica, Tratamento de Água, Petróleo.

INTRODUÇÃO

No processo de produção de petróleo, tem-se a água como um dos contaminantes mais indesejáveis, a qual é produzida em grandes volumes e sua presença, provoca uma série de problemas nas etapas de produção. As emulsões se formam durante o percurso do óleo e da água do reservatório até a superfície e apresentam maior ou menor estabilidade em função principalmente do regime de fluxo e da presença de agentes emulsificantes que impedem a coalescência das gotículas de água. É necessário, então, tratar essa água a fim de recuperar parte do óleo emulsionado e condicioná-la para reinjeção ou para descarte (THOMAS *et al.*, 2001).

¹ Graduanda do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, olivia.gomes@eq.ufcg.edu.br;

² Graduanda do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, karine.costa@eq.ufcg.edu.br ;

³ Professor orientador: Titular, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, kepler123@gmail.com.

O efluente escolhido para os estudos e ensaios de laboratório é proveniente da perfuração de poços de petróleo da Fazenda Belém na cidade de Mossoró – RN. Foi construído um hidrociclone com base nos dados obtidos por Souza (2009). Os ensaios estão sendo realizados em escala de laboratório, no qual o hidrociclone será o pré-tratamento dessa água para obtermos uma remoção do óleo e dos parâmetros, tais como turbidez e cor nas membranas, seguindo de membrana cerâmica para melhor eficiência na remoção do óleo.

Os resultados obtidos poderão ser úteis posteriormente, numa unidade de tratamento em escala industrial, considerando sempre os efeitos de escala quando são comparados aos dados obtidos em equipamentos de laboratório com os de uma estação de tratamento (DI BERNARDO *et al.*, 2001).

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar o desempenho de um sistema composto com um hidrociclone e membrana cerâmica, para fins de tratamento de águas produzidas da perfuração de poços de petróleo em função da Taxa de Óleos e Graxas (TOG) na corrente das vazões do *overflow* e *underflow*, bem como estudar a qualidade do *underflow* do hidrociclone após sua permeação através de uma membrana cerâmica em termos de densidade e TOG.

METODOLOGIA

As atividades desenvolvidas no presente trabalho foram realizadas no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES, UFCG – PB) em conjunto com o Laboratório de Membranas Cerâmicas (LABCEM, UFCG – PB). Nestes laboratórios vêm sendo desenvolvidos projetos de pesquisa no tratamento de águas oleosas (águas produzidas) a partir de membranas cerâmicas, visando seu reuso bem como o descarte adequado atendendo as normas do CONAMA (2008).

Preparação das soluções óleo/água

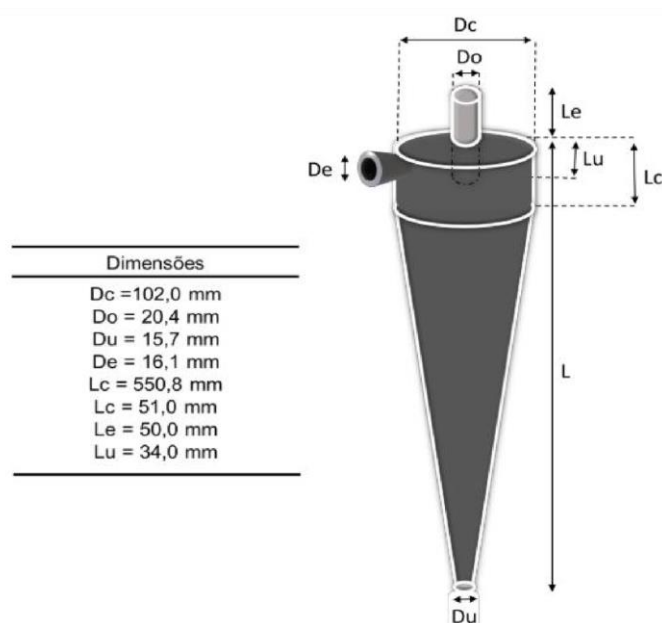
Para cada solução, foi pesado o óleo em uma balança de precisão, após a pesagem sua massa foi dividida em dez porções para o preparo da solução óleo/água, da seguinte forma; cada porção foi misturada com 24 L de água deionizada, com auxílio de um agitador do tipo Ultra Turrax – IKA T18 Basic, durante meia hora e em seguida colocada em no tanque de alimentação (250 L) do sistema.

Foi usado um líquido tensoativo não iônico chamado, Renex (nonilfeno-etoxilado 9,5 OE), três gotas para cada 20 L de solução, que tem a função de minimizar a aderência do óleo nas superfícies de contato. Mesmo assim, foi observado uma aderência com o tempo de mistura, uma diminuição da concentração de óleo nas soluções das águas oleosas estudadas.

Hidrociclone – LABDES

O hidrociclone foi construído no LABDES (Figura 01) com geometria do hidrociclone foi baseada em pesquisas de artigos relacionados a simulação de hidrociclones para separação de água/óleo, onde a autora Souza (2009) fez um estudo sobre dimensionamento de um hidrociclone para separação de águas oleosas, com características da alimentação similares a este projeto.

Figura 01. Dimensões hidrociclone utilizadas para construção do hidrociclone.



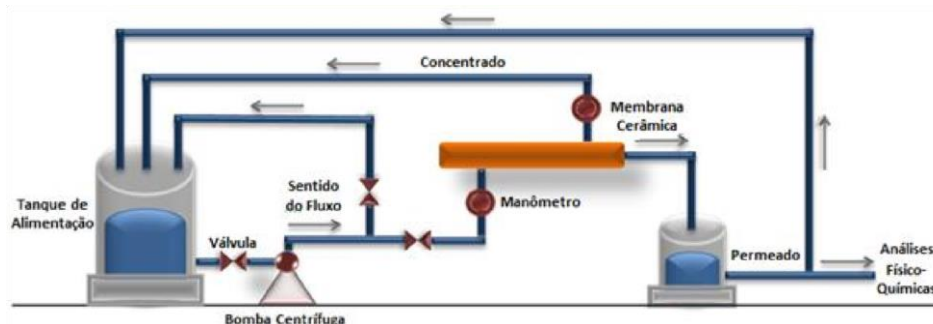
Fonte: SOUZA (2018).

Caracterização da membrana cerâmica com água deionizada

A primeira etapa desta pesquisa consistiu no estudo do desempenho do sistema apenas com membrana cerâmica de microfiltração tendo água deionizada como alimentação para a observação do comportamento do fluxo de permeado com o tempo.

Para a caracterização foi definido o parâmetro: pressão de entrada de 1, 2, 3 e 4 bar, essa variação ocorreu alterando-se a abertura de uma válvula de esfera. O ensaio consiste em bombear a água do reservatório através da membrana, e medir a vazão de água que é permeada através de sua parede, com finalidade de verificar qual a melhor pressão de operação para uso nos experimentos seguintes, como é mostrado na Figura 02.

Figura 02. Ilustração do sistema tratamento de água com membrana cerâmica.



As bateladas tem como procedimento a verificação da vazão do permeado e concentrado em intervalos de 10 minutos em função da pressão de alimentação do sistema, tendo uma duração total de 90 min. Com tais dados, torna-se possível a verificação qual melhor pressão a membrana testada trabalha.

Determinação do TOG (Teor de Óleo e Graxas)

Nesta etapa foram utilizadas parcelas de clorofórmio: uma de 20 mL e duas de 30 mL para a extração de 400 mL de água oleosa. A fase orgânica foi drenada em um funil analítico contendo papel de filtro e 10 gramas de sulfato de sódio anidro umedecido com clorofórmio e recolhido dentro de balão volumétrico de 100 mL de capacidade.

O equipamento foi zerado com uma parcela de clorofórmio limpo. A amostra foi colocada na cubeta e a leitura da concentração foi realizada diretamente no espectrofotômetro Biochrom modelo Libra S60 na faixa de comprimento de onda de 400 nm. O valor de TOG foi calculado através da seguinte Equação 01:

$$TOG = \frac{\text{leitura do TOG na curva de calibração(mg/L)} \times \text{volume do balão (50 ml)}}{\text{volume final da proveta (ml)}} \quad (01)$$

Determinação da densidade

De acordo com Cunha (2013), o grau de API é uma unidade adimensional no qual é usualmente utilizada para medir a densidade do petróleo e é expressa da seguinte forma:

$$API = \frac{141,5}{D} - 131,5 \quad (02)$$

Sendo D o valor da densidade da amostra de petróleo, cujo grau API deseja se determinar. Vale a nota que a densidade da amostra é obtida a temperatura ambiente, 60 °F, em relação à densidade da água na mesma temperatura (CUNHA, 2013).

Uma maneira de medir a densidade de uma determinada substância é através do picnômetro, que é um frasco pequeno de vidro, feito de maneira que o volume do fluido que o preencher seja sempre o mesmo. A tampa de vidro esmerilhada possui um orifício capilar longitudinal.

Então obteve-se a densidade relativa (em relação à água) da substância em questão com a Equação 03.

$$d_{amostra} = \frac{m_{amostra}}{m_{H_2O}} = \frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_1} \quad (03)$$

Determinação da eficiência total do sistema

De acordo com Alves (2012), a eficiência total do sistema representa a porcentagem de óleo retirado da alimentação foi calculada através da Equação 04.

$$E(\%) = \frac{W_{of}}{W_{Al}} = \frac{C_{of}Q_{of}}{C_{Al}Q_{Al}} \quad (04)$$

Onde: C_{of} – Concentração do overflow (mg/L); C_{Al} – Concentração da alimentação (mg/L); Q_{of} – Vazão do overflow (L/min); Q_{Al} – Vazão da alimentação (L/min); W_{of} – Vazão mássica do overflow (L/min); W_{Al} – Vazão mássica da alimentação (L/min).

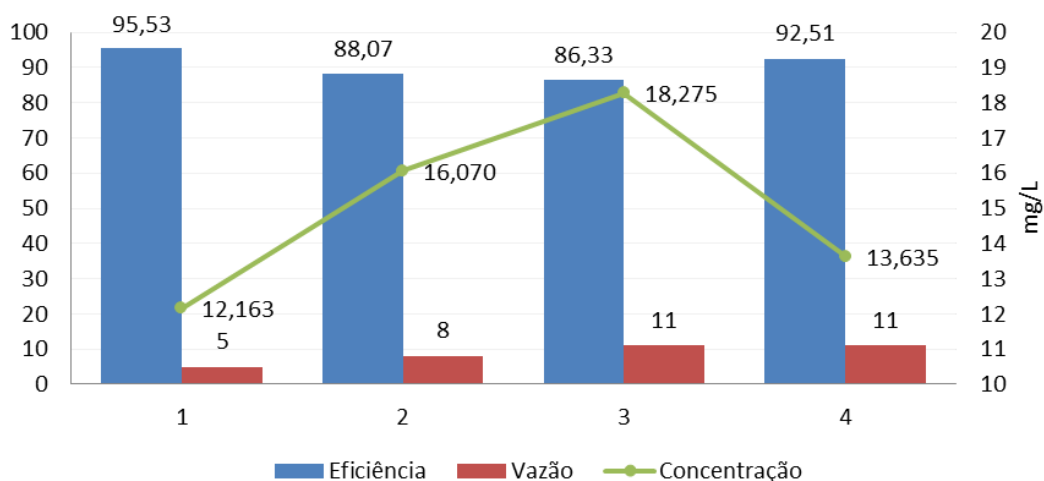
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sistema hidrociclone

A eficiência do hidrociclone foi averiguada com a realização de 4 bateladas, variando a concentração da alimentação e a vazão de produção da água do *underflow*, visando analisar sua eficiência total, a qual foi obtida pela da Equação 04. Foi observado que a pressão de alimentação do sistema permaneceu estável (2,2 bar), mesmo variando as vazões de produção.

O gráfico abaixo apresenta os valores obtidos das eficiências das bateladas realizadas, em função da concentração e vazão do *underflow* das soluções de água/óleo do sistema hidrociclone.

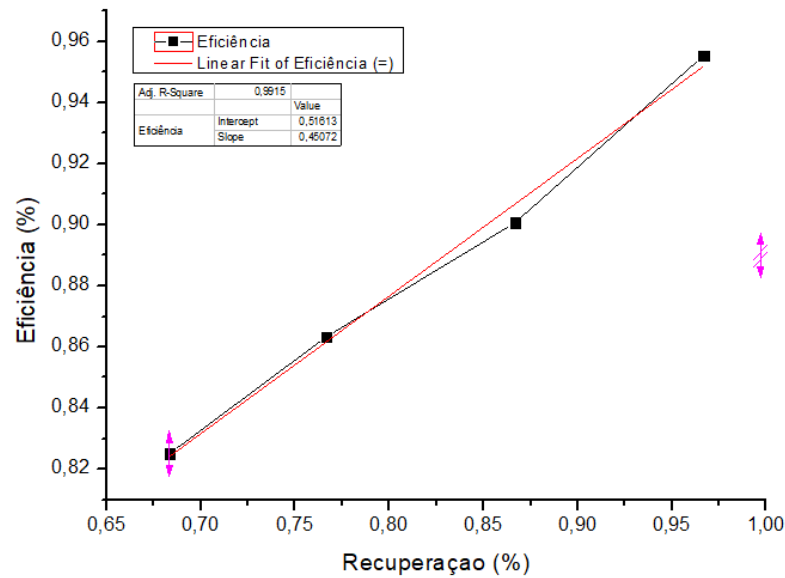
Gráfico 01. Eficiência total do hidrociclone em função da concentração da alimentação do sistema.



Considerando que as variações das eficiências foram relativamente próximas em termos numéricos uma da outra, dar para entender que a eficiência do hidrociclone independeu da concentração de óleo presente no meio aquoso. Fazendo a média da eficiência total dos experimentos realizados é de aproximadamente 90,61%, então podemos dizer que o sistema apresenta um desempenho bastante significativo, em termos de redução de óleo na corrente do *underflow*.

Posteriormente, buscou-se a influência da recuperação total sobre a eficiência total de separação do hidrociclone. O Gráfico 02 apresenta a variação desta eficiência com a recuperação total.

Gráfico 02. Eficiência total de separação versus a recuperação total.



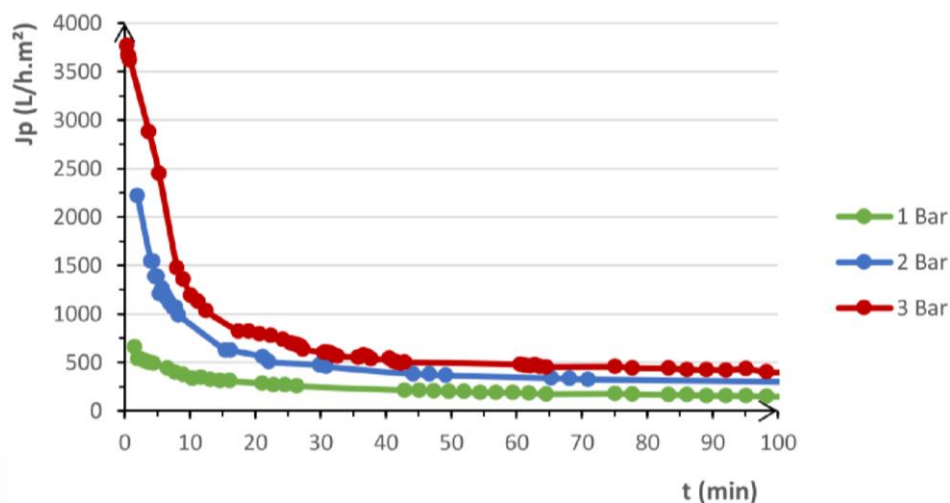
O Gráfico 02 mostra que a eficiência é linearmente em função recuperação, dada por:

$$E(\%) = 0,451 \cdot Re(\%) + 0,516 \quad (05)$$

Caracterização das membranas cerâmicas com águas deionizada

O Gráfico 03 está representando o comportamento da variação do fluxo do permeado durante o experimento ao longo de 100 minutos para três valores de pressões, (1,0, 2,0 e 3,0) bar.

Gráfico 03. Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica (MR01-10).

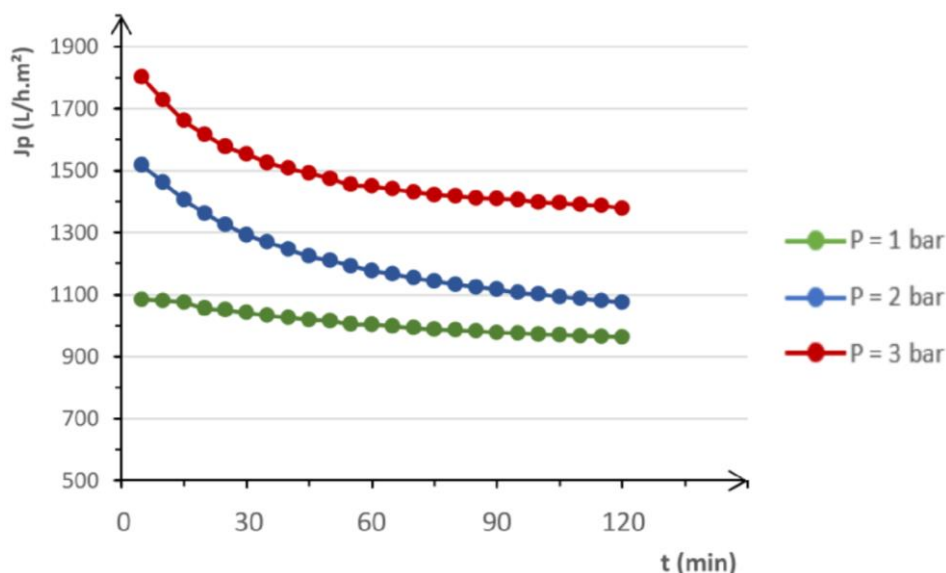


Os experimentos foram realizados até o fluxo atingir o estado estacionário, o qual tomou-se como ponto de referência, conforme comportamento de Marshall e Daufin (1995), para estudar o desempenho da membrana.

Para os casos estudados, observou-se que a pressão de 3,0 bar foi a que apresentou melhor fluxo, onde o fluxo médio para as três caracterizações realizadas foi determinado em função do valor do fluxo no estado estacionário, conforme mostra o comportamento de cada experimento. Para as figuras acima o valor médio do fluxo foi na ordem de 430 L/h.m².

O Gráfico 04 mostra a curva do fluxo para a membrana cerâmica do tipo MR01-20, para a mesma faixa de pressão de operação dada para a membrana do tipo MR01-10.

Gráfico 04. Variação do fluxo do permeado da membrana cerâmica (MR01-20).

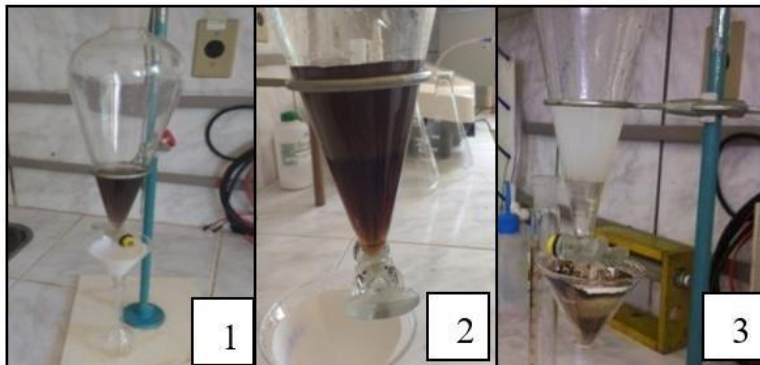


Tomando como base o mesmo raciocínio anterior, os melhores comportamentos de fluxos foram sob a pressão de 3 bar. O fluxo médio obtido foi da ordem de 1180 L/h.m². Esse valor foi superior a 2,7 vezes ao do fluxo obtido com a membrana do tipo MR01-10.

Determinação do TOG

Utilizando a metodologia descrita no item 3.5, a Figura 03 a seguir mostra as três etapas do processo e é possível observar a separação das duas fases visível a olho nu.

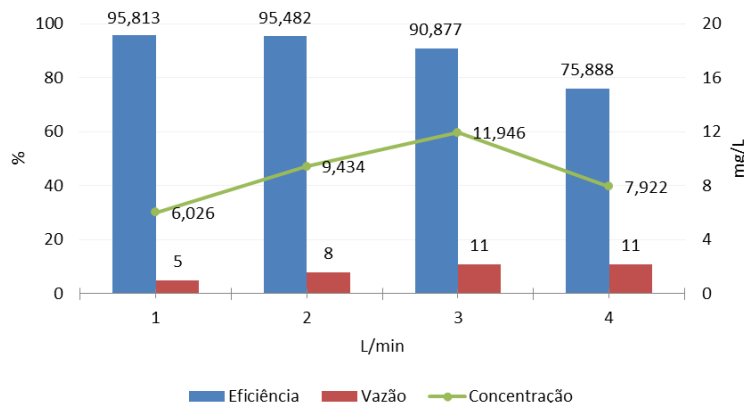
Figura 03. Aspectos físicos do processo de separação em duas fases água/óleo



- 1) Transferência da amostra de petróleo para o funil.
- 2) Início do processo de extração do óleo.
- 3) Indicação do fim da extração pela coloração esbranquiçada nas duas fases.

O Gráfico 05 mostra o teor do óleo nas correntes de alimentação e permeado da membrana cerâmica para cada batelada realizada sob as mesmas condições operacionais já estabelecidas. Foi observado que a pressão de alimentação do sistema permaneceu estável (2,2 bar), mesmo variando as vazões de produção.

Gráfico 05. Variação das concentrações de óleo do sistema membrana cerâmica em função do tempo para batelada.



Pode-se observar que, em todas as bateladas realizadas, o sistema produziu um permeado com concentração de óleo média igual ou menor que 20 mg/L, dentro dos padrões exigidos pelo CONAMA (2011). O sistema estudado mostrou uma remoção de óleo acima de 75%, independente da concentração de óleo encontrada na emulsão de alimentação do sistema.

A partir dos resultados dos experimentos do sistema hidrociclone/membrana cerâmica, pode-se concluir que o sistema é eficaz na sua utilização como sistema de tratamento de águas produzidas das perfurações de poço de petróleo.

Determinação da densidade

O estudo da densidade teve como intuito averiguar como seria o comportamento das águas oleosas produzidas em laboratório após passar pelo sistema de hidrociclone/membrana e comparar com valores de referência em outros estudos.

A Tabela 01 mostra os valores das densidades das três correntes da membrana.

Tabela 01. Dados de densidade média das amostras de água/óleo.

Batelada	Alimentação	Permeado	Concentrado
1	1,012	1,002	1,021
2	1,015	1,006	1,029
3	1,019	1,009	1,035
4	1,021	1,017	1,041

Segundo Szklo (2008), os óleos em relação a densidades podem ser categorizados em leves, médios, pesados e extrapesados de acordo com o *American Petroleum Institute* – API. São considerados extrapesados os óleos que tem °API menor que 10, pesados são os que possuem entre 10 e 22, médios são os óleos entre 22 e 30 e leves maiores que 30.

Para o caso do referente trabalho, fazendo a média das densidades das 4 bateladas para cada corrente obteve-se os resultados apresentados na Tabela 02 onde estão representados os valores médios de densidade e do grau de API das correntes do hidrociclone.

Tabela 02. Densidade média, grau de API e tipo de petróleo para amostras.

	Alimentação	Permeado	Concentrado
Densidade	1,017	1,009	1,032
°API	7,635	8,738	5,612

Percebe-se que os graus de °API das amostras foram menores que 10, logo o petróleo é considerado extrapesado. E de fato o petróleo em questão era muito viscoso e denso, de difícil manejo.

Determinação da eficiência total do sistema

Semelhante ao avaliado para o hidrociclone, pode-se determinar a eficiência total do sistema através da Equação (04). A Tabela 05 abaixo apresenta os valores obtidos das

eficiências do sistema híbrido, em função da concentração e vazão de alimentação do sistema hidrociclone e do permeado da membrana cerâmica.

Tabela 05. Eficiência do sistema híbrido hidrociclone/membrana cerâmica.

Batelada	Eficiência (%)
1	87,74
2	82,18
3	84,56
4	89,23

Assim, a eficiência total do sistema híbrido é, em média, 85,93% de remoção do óleo na corrente do permeado da membrana, respeitando os padrões exigidos pelo CONAMA (2011).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da caracterização em água deionizada das membranas cerâmicas MR01-10 e MR01-20, produzidas no LABCEM/UFCEG, observou-se que 3,0 bar foi a melhor pressão de operação. O fluxo médio para as membranas cerâmicas MR01-10 foi de 430 L/h.m² e para MR01-20 foi da ordem de 1.180 L/h.m². Esse valor foi superior a 2,7 vezes ao do fluxo obtido com a membrana do primeiro tipo.

Já para caracterização em águas oleosas, observou-se que apesar de apresentarem um comportamento inicial distinto entre si, elas estabilizaram o fluxo permeado na mesma faixa de tempo de 45 minutos e com um valor de fluxo bem aproximado, sendo 240,33 L/h.m² para 100 mg/L e 249,57 L/h.m² para 60 mg/L.

De acordo com os dados obtidos a partir do hidrociclone, de concentrações dentro da faixa avaliada (60 a 350 mg/L), a remoção média de óleo foi de 90,61%, então podemos afirmar que o hidrociclone apresenta um desempenho bastante significativo, em termos de redução de óleo na corrente do *underflow*.

Na determinação das densidades das correntes do hidrociclone conclui-se que o petróleo trabalhado após a passagem pelo hidrociclone, apresentou uma densidade média para alimentação, permeado e concentrado de 1,017 g/ml, 1,009 g/ml e 1,032 g/ml, com °API de 9,718, 9,016 e 9,156 respectivamente, todavia pelo grau de API ser menor que 10 é considerado um petróleo extrapesado.

A eficiência total do sistema híbrido é, em média, 85,93% de remoção do óleo na corrente do permeado da membrana, respeitando os padrões exigidos pelo CONAMA (2011).

Por fim, em termos de qualidade de água permeada pelos os sistemas, observou-se que estão adequadas de acordo com o valor máximo permissível de acordo com a legislação que dispõe sobre efluentes.

REFERÊNCIAS

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 396 de 3 de abril de 2008**. Dispõe sobre classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e da outras providências. Diário Oficial da União, 2008.

CUNHA, J. S. **Análise da metodologia de cálculo do preço mínimo das correntes de petróleo no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia de Petróleo, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

DI BERNARDO, L.; PÁDUA, V.L.; DI BERNARDO, A.S. **Desenvolvimento de instalação de laboratório para determinação da dosagem de coagulante na filtração direta**. Anais eletrônicos do IX SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

EBRAHIMI, M.; WILLERSHAUSEN, D.; ASHAGHI, K. S.; ENGEL, L.; PLACIDO, L.; MUND, P.; BOLDUAN, P.; CZERMAK, P. **Investigations on the use of different ceramic membranes for efficient oil-field produced water treatment**. Revista Desalination 250, 2010.

SOUZA, J. S. **Estudo numérico da termofluidodinâmica da separação de óleos pesados de uma corrente de águas oleosas via hidrociclone**, Dissertação de mestrado apresentada na Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2009.

SZKLO, S. ALEXANDREKI; ULLER, V. COHEN. **Fundamentos do refino de petróleo: Tecnologia e Economia**. 2 ed. Interciências, 2008.

THOMAS, J. P. et al. **Fundamentos de Engenharia do Petróleo**, Ed. Interciência. Petrobrás, 2001.