

APLICAÇÃO DE FILTRO HÍBRIDO DE BUCHA VEGETAL E CERÂMICA POROSA NO TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA

C. S. Oliveira¹, V. R. S. Vieira², E. de Jesus^{1,2}
L. P. S. Rosa^{1,2}

¹*Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Brasil (vitoriaregina@academico.ufs.br)*

²*Programa de Pós-graduação em Engenharia Química - PEQ, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Brasil*

A água produzida é um dos principais efluentes gerado na indústria do petróleo, apresentando elevado potencial poluidor. Este trabalho avaliou o desempenho de um filtro composto por cerâmica porosa e bucha vegetal no tratamento da água produzida. O efluente foi filtrado e foram realizadas análises de turbidez, pH, salinidade e teor de óleos e graxas na água bruta e filtrada. Resultados evidenciaram remoção 98,4% do teor de óleos e graxas e redução de 41% da turbidez.

Palavras-chave: água produzida; bucha vegetal; cerâmica porosa; tratamento de efluente; teor de óleos e graxas.

INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo e gás exerce papel estratégico na economia mundial, sendo responsável pelo fornecimento de energia e matéria-prima para diversos setores produtivos. Entretanto, as atividades de exploração, produção, transporte e processamento de petróleo estão associadas à geração de resíduos e efluentes com elevado potencial de impacto ambiental.

Dentre esses efluentes, destaca-se a água produzida, considerada o principal resíduo líquido gerado durante a exploração e produção de petróleo e gás. De acordo com Ahmadun *et al.* (2009) e Al-Ghouti *et al.* (2019), a água produzida é o principal efluente gerado na exploração e produção de petróleo e gás, sendo constituída pela água presente nas formações geológicas, frequentemente associada à água de injeção e aos fluidos utilizados ao longo da operação.

Neff, Lee e DeBlois (2011) afirmam que sua composição inclui óleo disperso e dissolvido, sais em elevadas concentrações, metais, compostos orgânicos e aditivos químicos de processo, o que aumenta seu potencial poluidor e dificulta seu manejo.

Devido a essa composição, a água produzida tem recebido grande atenção na literatura, tanto pelos ambientais associados ao descarte inadequado quanto pelos desafios técnicos relacionados ao tratamento e ao reúso. Dessa forma, o tratamento destes efluentes é de extrema importância, uma vez que os

contaminantes representam riscos à saúde pública, aos animais, e todo ecossistema. (HEIDARI *et al.*, 2022).

Assim, segundo Amakari *et al.*, (2022), um desafio atual não é apenas remover contaminantes, mas desenvolver sistemas mais robustos, economicamente viáveis e ambientalmente eficazes para diferentes cenários operacionais.

Como alternativa de menor custo e apelo sustentável, a utilização de meios filtrantes porosos tem se destacado devido à sua elevada eficiência na remoção de partículas suspensas e contaminantes presentes em efluentes industriais. Dentre esses materiais, a cerâmica porosa apresenta características favoráveis, como elevada resistência mecânica, estabilidade química, alta porosidade. Diante disso, elas vêm sendo investigadas como meios filtrantes ou biossorventes, devido à sua estrutura fibrosa e capacidade de retenção de óleo (ANASTOPOULOS; PASHALIDIS, 2020).

Estudos recentes têm investigado o emprego de membranas cerâmicas, biocarvões e adsorventes lignocelulósicos para remoção de óleo de águas produzidas. Entretanto, muitos desses materiais apresentam elevado custo de fabricação ou dificuldades de regeneração. Nesse contexto, materiais naturais, como a bucha vegetal (*Luffa cylindrica*), surgem como alternativas promissoras devido à sua elevada porosidade, baixa densidade e afinidade por compostos hidrofóbicos.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação de um filtro híbrido, composto por

bucha vegetal e cerâmica porosa, no tratamento de água produzida. Para verificar a eficiência do meio filtrante proposto, foram realizadas análises de turbidez, teor de óleos e graxas (TOG), condutividade elétrica, salinidade e pH. Esses parâmetros foram determinados antes e após o processo de filtração, permitindo avaliar a eficiência de remoção dos contaminantes e o desempenho do sistema de tratamento.

MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta o fluxograma das operações unitárias empregadas neste estudo para o tratamento da água produzida. A suspensão submetida à etapa de filtração foi obtida após um tratamento preliminar da água produzida, composto por coagulação-floculação. Posteriormente, o efluente foi direcionado para um sistema de filtração utilizando um meio filtrante híbrido constituído por bucha vegetal e cerâmica porosa. Ressalta-se que parte dos resultados e das especificações técnicas associadas ao sistema desenvolvido será objeto de pedido de patente. Dessa forma, algumas informações relativas à configuração e ao funcionamento do processo não serão apresentadas neste trabalho.

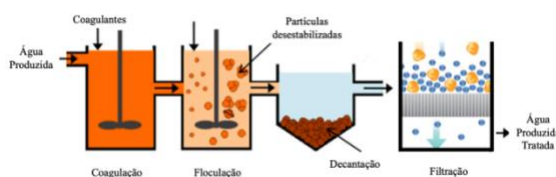


Figura 1: Etapas Processo de Tratamento de Água Produzida (Adaptação de Amakiri et al., 2022)

Sintetização da água produzida

A água produzida empregada nos testes foi sintetizada a partir de uma adaptação de Licona e Marques (2007), composta de uma mistura de cloreto de sódio, petróleo e água destilada, conforme concentrações mostradas na Tabela 1. Esta sintetização foi baseada em dados reais da água produzida fornecidos por um dos campos petrolífero de Sergipe. Em seguida, com o intuito de emulsificar o petróleo presente na amostra, será utilizado um misturador mecânico de alta rotação.

Tabela 1: preparo da água produzida sintética.

Parâmetros	Valor mg/L
Petróleo	150
NaCl	30000

Tratamento preliminar de água produzida

Nesta etapa do processo de tratamento, utilizou-se sulfato de alumínio como agente coagulante. Após a adição do coagulante, a água produzida sintética foi submetida à agitação em equipamento Jar Test (JT102) durante 20 minutos, empregando velocidades de agitação de 230 rpm. Em seguida, o sistema permaneceu em repouso por 2 horas para promover a sedimentação dos flocos formados. Após esse período, o sobrenadante foi coletado e submetido à etapa de filtração, utilizando um meio filtrante híbrido constituído por cerâmica porosa e bucha vegetal.

Parâmetros analíticos

A água produzida bruta, sintética e o efluente resultante da filtração foram caracterizados por meio da medições dos parâmetros teor de sólidos totais, turbidez da mistura, pH, teor de óleos e graxas (TOG), condutividade e salinidade. A eficiência do meio filtrante foi avaliada pela redução destes parâmetros.

a. Turbidez

A turbidez é um parâmetro associado à presença de partículas suspensas capazes de dispersar e absorver a luz incidente, reduzindo sua transmissão em linha reta através da amostra (Clesceri et al., 1998). Os resultados foram expressos em Unidade Nefelométrica de Turbidez (NTU). As análises de turbidez foram realizadas utilizando um turbidímetro modelo AP 2000, da marca Policontrol, seguindo os procedimentos recomendados pelo fabricante.

b. Teor de Óleos e Graxas

A determinação do teor de óleos pelo método espectrofotométrico pode ser dividida em três etapas: obtenção da curva de calibração, extração do material oleoso com solvente e leitura da absorbância do extrato no espectrofotômetro. De acordo com Enterprise (2009), a medição do teor de óleos e graxas (TOG) por infravermelho é baseada na capacidade dos hidrocarbonetos, como óleos e graxas, de serem extraídos da água ou do solo por meio de solventes e procedimentos de extração adequados. Os hidrocarbonetos extraídos absorvem energia infravermelha em um comprimento de onda específico, sendo que a quantidade de energia absorvida é proporcional à concentração de óleos e graxas no solvente. A seguir, as etapas serão detalhadas.

b.1 Curva de Calibração

Na construção da curva de calibração, foi preparada solução concentrada do óleo (petróleo) em n-hexano. A partir dessa solução, diferentes concentrações são

obtidas por meio de diluições sucessivas com n-hexano. No momento da análise, as soluções devem ser mantidas em temperatura ambiente e transferidas para uma cubeta apropriada para a leitura da absorbância no espectrofotômetro. Como resultado, cada solução apresentará um valor distinto de absorbância. Com esses dados, é possível traçar a curva de calibração, que relaciona a absorbância à concentração para o tipo específico de óleo analisado. Vale destacar que, antes das medições, o espectrofotômetro deve ser calibrado utilizando-se o n-hexano para uma leitura inicial e ajuste do zero do equipamento.

b.2 Extração do material oleoso com solvente

As misturas aquosas contendo óleo, à temperatura ambiente, foram ser transferidas para um funil de separação de 250 mL devidamente limpo e vedado. Em seguida, adicionou-se aproximadamente 30 mL de n-hexano ao balão que continha a mistura, agitou-se vigorosamente e transferiu-se esse conteúdo para o funil de separação. O funil deve ser agitado de forma vigorosa por 2 minutos, com aberturas periódicas para liberar o excesso de pressão. Caso se forme uma emulsão entre as fases e essa emulsão ultrapasse um terço do volume da camada de solvente, devem-se empregar técnicas de quebra de emulsão para completar a separação das fases. Como alternativa, pode-se adicionar 2 mL de etanol ou álcool isopropílico para cada 250 mL de solução. Após a agitação, o funil deve permanecer em repouso por pelo menos 10 minutos, até que a separação das fases orgânica e aquosa seja claramente observada. A fase aquosa foi drenada do funil para o recipiente original, registrando-se o volume observado. Já a fase orgânica (extrato) deve ser transferida para um recipiente distinto do inicial. Depois, monta-se um sistema de filtração utilizando papel filtro e 10 g de sulfato de sódio PA anidro, lavando-o previamente com uma pequena quantidade de n-hexano. O líquido de enxágue deve ser descartado. Em seguida, filtra-se a fase orgânica separada, garantindo a remoção completa da água. O filtrado obtido será utilizado na etapa seguinte.

O processo de extração deve ser repetido mais duas vezes com novas porções de 30 mL de n-hexano, combinando-se os extratos em um balão de fundo redondo. Após as extrações, lavou-se a ponta do funil de separação, o papel filtro e o funil com pequenas porções de n-hexano (3–5 mL), coletando os enxágues no balão.

b.3 Leitura da absorbância em espectrofotômetro

O extrato obtido na separação anterior, deve ser direcionado a cubeta apropriada para leitura da absorbância no espectrofotômetro, devidamente calibrado. De posse desse valor e da equação que representa a curva de calibração, obtém-se o TOG das amostras.

c. pH

O pH foi determinado pelo método potenciométrico e, usando-se um pHmetro marca Lutron, modelo pH-206, devidamente calibrado.

d. Condutividade e Salinidade

De acordo com BAGLEY, AMACHER, POE, (1997), a salinidade refere-se à quantidade total de sais minerais dissolvidos na água e pode ser determinada pelos sólidos dissolvidos totais e pela condutividade elétrica. Para a determinação da condutividade um condutivímetro da marca MARCONI, modelo CA150, previamente calibrado, será utilizado. A condutividade será expressa na unidade mS/cm a 24 °C. A partir do resultado da condutividade calculou-se o valor da salinidade da água através da Equação:

$$C_s = \frac{Cd}{0,0017} \quad (01)$$

onde C_s é a salinidade em mg/L e Cd é a condutividade elétrica em mS/cm. Para a realização dessa análise, dilui-se a amostra com água destilada utilizando-se uma proporção conhecida, por exemplo, 1:10 (1 parte da amostra para 9 partes de água destilada).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a montagem do sistema de filtração, foi preparada uma água produzida sintética contendo 30 g de sal e 0,150 g de óleo por litro de água destilada, sendo a mistura mantida sob agitação intensa durante 20 min para promover a dispersão homogênea do óleo na fase aquosa. Em seguida, foi adicionado o sulfato de alumínio, e a mistura foi submetida ao ensaio de Jar Test, seguido de um período de decantação de aproximadamente 2 h, visando a separação dos flocos formados e a obtenção de uma fração clarificada. Posteriormente, a porção sobrenadante foi submetida ao processo de filtração em leito constituído por cerâmica porosa e 10,885 g de bucha vegetal triturada. Ao final do tratamento, amostras da água produzida sintética antes e após a filtração foram coletadas e analisadas quanto aos parâmetros físico-químicos previamente descritos, permitindo a avaliação da eficiência do sistema híbrido de tratamento.

A Tabela 2 apresenta os resultados das análises físico-químicas realizadas nas amostras de água produzida

sintética antes e após o processo de filtração. Foram avaliados os parâmetros de turbidez, pH, condutividade elétrica, salinidade e teor de óleos e graxas (TOG), com o objetivo de determinar a influência do sistema filtrante sobre as características físico-químicas da água e verificar sua eficiência na remoção dos contaminantes presentes na água produzida sintética.

Tabela 2. Parâmetros físico-químicos da água bruta e água filtrada

Parâmetro	Água bruta	Água filtrada	Remoção (%)
Turbidez (NTU)	4,95	2,92	41
pH	4,35	4,67	Aumento de 0,32
Condutividade (mS/cm)	5,24	4,33	17,4
Salinidade (mg/L)	30822,5	25470,0	17,4
TOG (mg/L)	1362,8	21,8	98,4

Os resultados apresentados na Tabela 2 evidenciam que o sistema filtrante promoveu melhorias na qualidade da água produzida sintética, com destaque para a remoção de compostos oleosos. A turbidez foi reduzida de 4,95 para 2,92 NTU, correspondendo a uma eficiência de remoção de 41%. O valor final obtido encontra-se abaixo do limite de 5 NTU estabelecido pela legislação brasileira para águas tratadas, indicando que o processo foi capaz de diminuir a quantidade de partículas suspensas e dispersas presentes no meio.

O parâmetro que apresentou maior redução foi o teor de óleos e graxas (TOG), que diminuiu de 1362,8 para 21,8 mg/L, resultando em uma eficiência de remoção de 98,4%. Esse resultado demonstra a elevada capacidade do filtro híbrido constituído por cerâmica porosa e bucha vegetal em reter a fração oleosa presente na água produzida sintética. A elevada remoção de TOG pode ser atribuída à combinação entre os mecanismos de retenção física proporcionados pela estrutura porosa da cerâmica e a elevada área superficial e natureza lignocelulósica da bucha vegetal, que favorecem o aprisionamento de gotículas de óleo.

Em relação ao pH, observou-se um pequeno aumento de 4,35 para 4,67, correspondendo a uma variação de apenas 0,32 unidades. Embora indique uma leve tendência à neutralização do meio, essa alteração não foi suficientemente expressiva para modificar significativamente as características ácido-base da

água produzida sintética, evidenciando que o sistema filtrante apresenta baixa influência sobre esse parâmetro.

A condutividade elétrica apresentou redução de 5,24 para 4,33 mS/cm, representando uma diminuição de 17,4%. De forma semelhante, a salinidade reduziu-se de 30.822,5 para 25.470,0 mg/L, também correspondendo a uma redução de aproximadamente 17,4%. Embora esses resultados indiquem alguma retenção de espécies dissolvidas, a eficiência observada foi consideravelmente inferior à obtida para o TOG. A remoção limitada de sais era esperada, uma vez que os mecanismos predominantes no leito filtrante são a retenção de partículas suspensas e a adsorção de compostos hidrofóbicos, enquanto os íons dissolvidos, devido às suas pequenas dimensões e elevada mobilidade em solução, tendem a atravessar o meio poroso com menor resistência.

Além disso, verificou-se um aumento da massa da bucha vegetal de 10,885 g para 18,857 g ao final do ensaio, correspondendo a um acréscimo de 7,972 g. Esse incremento de massa sugere a absorção de água e a retenção de material removido durante a filtração, corroborando os resultados de elevada remoção de óleos e graxas e de redução da turbidez. Entretanto, esse aumento de massa, por si só, não permite inferir retenção significativa de sais dissolvidos, uma vez que as reduções observadas na condutividade e na salinidade foram relativamente modestas.

De modo geral, os resultados demonstram que o filtro híbrido composto por cerâmica porosa e bucha vegetal apresenta elevada eficiência na remoção de contaminantes associados à fração oleosa e de parte do material suspenso presente na água produzida sintética. Em contrapartida, sua capacidade de remover constituintes dissolvidos é limitada, indicando que sua aplicação é mais adequada como uma etapa de pré-tratamento ou de polimento voltada principalmente para a remoção de óleo e sólidos suspensos, podendo ser associada a processos complementares quando o objetivo for a dessalinização ou a remoção mais expressiva de espécies iônicas dissolvidas.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, a água produzida sintética foi tratada por meio de um filtro híbrido constituído por cerâmica porosa e bucha vegetal. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema apresentou elevada eficiência na remoção da fração oleosa, evidenciada pela expressiva redução do teor de óleos e graxas (98,4%), além da diminuição da turbidez e da absorbância após a filtração. Esses resultados indicam que o material possui elevado potencial para a

retenção de óleo e de parte do material suspenso presente na água produzida sintética.

Em contrapartida, as reduções observadas na condutividade elétrica e na salinidade foram relativamente modestas, enquanto a variação do pH foi pouco significativa, evidenciando a limitada capacidade do sistema em remover espécies dissolvidas e alterar as características ácido-base do efluente. Dessa forma, a utilização isolada do filtro não se mostrou suficiente para promover um tratamento completo da água produzida sintética.

De maneira geral, conclui-se que o sistema de filtração proposto constitui uma alternativa tecnicamente viável para a redução da carga oleosa e de sólidos suspensos, apresentando potencial de aplicação como etapa de pré-tratamento ou complementar em processos mais abrangentes de tratamento de águas produzidas. Ademais, os resultados obtidos incentivam o desenvolvimento de estudos futuros voltados à otimização das condições operacionais do sistema, incluindo a avaliação da vazão de alimentação, do tempo de operação, da capacidade de adsorção, da perda de desempenho ao longo do uso e da possibilidade de regeneração e reutilização do meio filtrante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCMat), ao Laboratório de Química Industrial (LQI) e à Universidade Federal de Sergipe (UFS) pela assistência técnica e pelo suporte fornecidos ao longo desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AHMADUN, Fakhru'l-Razi; PENDASHTEH, Alireza; ABDULLAH, Luqman Chuah; BIAK, Dayang Radiah Awang; MADAENI, Sayed Siavash; ABIDIN, Zurina Zainal. Review of technologies for oil and gas produced water treatment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 170, n. 2-3, p. 530–551, 2009. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.05.044.

AL-ARFAJ, Muhammad; LUYBEN, William L. Comparison of Alternative Control Structures for an Ideal Two-Product Reactive Distillation Column. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [S.L.], v. 39, n. 9, p. 3298-3307, set. 2000. American Chemical Society (ACS).

AL-GHOUTI, Mohammad A.; AL-KAABI, Maryam A.; ASHFAQ, Mohammad Y.; DA'NA, Dana Adel. **Produced water characteristics, treatment and reuse: A review**. Journal of Water Process Engineering, v. 28, p. 222–239, 2019. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.02.001.

AMAKIRI, Kingsley Tamunokuro; RAMIREZ CANON, Anyela; MOLINARI, Marco; ANGELIS-DIMAKIS, Athanasios. **Review of oilfield produced water treatment technologies**. *Chemosphere*, v. 298, art. 134064, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134064

ANASTOPOULOS, Ioannis; PASHALIDIS, Ioannis. **Environmental applications of Luffa cylindrica-based adsorbents**. *Journal of Molecular Liquids*, v. 319, p. 114127, 2020. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.114127.

FELDER, Richard M. **Princípios elementares dos processos químicos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. Tradução Martín Aznar.

GUIMARÃES, D. H. P.; ARCE, P. F. C.; AGUIRRE, L. R. Experimental and prediction of physics and chemical properties of biodiesel. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 22., 2018, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Blucher, 2018chemical-properties-of-biodiesel-28421.

Maryam Kavousi Heidari; Mona Fouladi; Houman Asghari Sooreh; Omid Tavakoli. **Superhydrophobic and super-oleophilic natural sponge sorbent for crude oil/water separation**. Journal of Water Process Engineering, v. 47, Article 102783, 2022. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102783.

NEFF, Jerry; LEE, Kenneth; DEBLOIS, Elisabeth M. **Produced water: overview of composition, fates, and effects**. In: Produced Water. New York: Springer, 2011. p. 3–54. DOI: 10.1007/978-1-4614-0046-2_1.