v7.n5.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

APLICAÇÃO DE BIOPOLÍMEROS PARA REMOÇÃO DE ÓLEOS E GRAXAS DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

APPLICATION OF BIOPOLYMERS FOR OIL AND GREASE REMOVAL FROM PETROLEUM INDUSTRY EFFLUENTS

APLICACIÓN DE BIOPOLÍMEROS PARA LA ELIMINACIÓN DE ACEITES Y GRASAS DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO

Jardel Dantas da Cunha[1], Francisco Medeiros de Andrade Neto[3], Keila Regina Santana[2], Antônio Robson Gurgel, Andréa Francisca Fernandes Barbosa[2]

e757808
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i5.7808

PUBLICADO: 05/2026

RESUMO

O Teor de Óleos e Graxas (TOG) é um parâmetro crítico para o descarte da água produzida na indústria petrolífera, demandando métodos de tratamento eficientes e sustentáveis. Este estudo avalia o uso dos biopolímeros Goma Guar (GG) e Hidroxipropilguar (HPG) como alternativas tecnicamente viáveis, biodegradáveis e atóxicas. O processo baseia-se na reticulação das cadeias poliméricas por íons borato em meio salino, promovendo o efeito salting out. Esse fenômeno reduz a solubilidade do sistema, resultando no colapso do gel, que aprisiona as gotículas de óleo e promove a separação das fases. A metodologia empregou um planejamento experimental fatorial para analisar o comportamento dos polímeros sob três níveis de concentração, variando também as concentrações de ácido bórico. O TOG foi monitorado por espectrofotometria UV-Vis em intervalos de 3, 6, 9 e 24 horas após o colapso. Os resultados indicaram uma eficiência de remoção superior a 90% para a Goma Guar (4 g/L) em apenas 3 horas. Em contrapartida, o Hidroxipropilguar (5 g/L) exigiu 6 horas para atingir o mesmo patamar, demonstrando que a GG apresenta uma cinética de remoção de óleo mais acelerada.

PALAVRAS-CHAVE: Água produzida. Goma Guar. Hidroxipropilguar.

ABSTRACT

Oil and Grease Content (OGC) is a critical parameter for the disposal of produced water in the oil industry, demanding efficient and sustainable treatment methods. This study evaluates the use of the biopolymers Guar Gum (GG) and Hydroxypropyl Guar (HPG) as technically viable, biodegradable, and non-toxic alternatives. The process is based on the cross-linking of polymer chains by borate ions in a saline medium, promoting the salting-out effect. This phenomenon reduces the system's solubility, resulting in the collapse of the gel, which traps oil droplets and promotes phase separation. The methodology employed a factorial experimental design to analyze the behavior of the polymers under three concentration levels, also varying the boric acid concentrations. OGC was monitored using UV-Vis spectrophotometry at intervals of 3, 6, 9, and 24 hours after collapse. The results indicated a removal efficiency higher than 90% for Guar Gum (4 g/L) in only 3 hours. In contrast, Hydroxypropyl Guar (5 g/L) required 6 hours to reach the same level, demonstrating that GG exhibits faster oil removal kinetics.

KEYWORDS: *Produced water. Guar gum. Hydroxypropylguar.*

[1] Dr. em Ciências e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, Brasil.
[2] Dra. em Química, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, Brasil;
[3] Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, Brasil.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

RESUMEN
El Contenido de Aceites y Grasas (CAG) es un parámetro crítico para la disposición del agua producida en la industria petrolera, lo que exige métodos de tratamiento eficientes y sostenibles. Este estudio evalúa el uso de los biopolímeros Goma Guar (GG) e Hidroxipropilguar (HPG) como alternativas técnicamente viables, biodegradables y no tóxicas. El proceso se basa en la reticulación de las cadenas poliméricas por iones borato en un medio salino, promoviendo el efecto salting out. Este fenómeno reduce la solubilidad del sistema, resultando en el colapso del gel, el cual atrapa las gotas de aceite y promueve la separación de fases. La metodología empleó un diseño experimental factorial para analizar el comportamiento de los polímeros bajo tres niveles de concentración, variando también las concentraciones de ácido bórico. El CAG fue monitoreado mediante espectrofotometría UV-Vis en intervalos de 3, 6, 9 y 24 horas después del colapso. Los resultados indicaron una eficiencia de eliminación superior al 90% para la Goma Guar (4 g/L) en solo 3 horas. Por el contrario, el Hidroxipropilguar (5 g/L) requirió 6 horas para alcanzar el mismo nivel, demostrando que la GG presenta una cinética de eliminación de aceite más acelerada.

PALABRAS CLAVE*: agua producida. Goma Guar. Hidroxipropilguar.*

1. INTRODUÇÃO

O meio ambiente sofre impactos diários decorrentes das atividades industriais. Diante disso, intensifica-se a busca por melhorias em técnicas e materiais para aperfeiçoar o tratamento de resíduos, visando à adequação às leis exigidas pelos órgãos ambientais (BALABAN; PAIXÃO, 2018).

A indústria do petróleo é dividida em segmentos específicos relacionados à exploração, produção, refino e distribuição. Esses setores são interligados e constituem o ciclo de vida do hidrocarboneto, desde a extração até o consumo final (ANP, 2023). Essa indústria gera diversos resíduos, tais como: sólidos (cascalho de perfuração), de refino (embalagens químicas e equipamentos descartados), águas residuais, emissões atmosféricas e insumos químicos de perfuração. Dentre eles, a água produzida é o que se encontra em maior volume e apresenta o maior desafio de tratamento para o setor (IBAMA, 2023). Trata-se de um subproduto inevitável, encontrado naturalmente em reservatórios subterrâneos e trazido à superfície junto ao óleo e gás durante a extração.

A água produzida origina-se de três fontes principais: água conata (presente nos reservatórios desde a formação geológica); água de injeção (introduzida para aumentar a pressão e a recuperação de petróleo); e água de formação (liberada das rochas durante a produção). A gestão desse efluente é complexa, pois ele frequentemente contém impurezas e alta salinidade. Estratégias de tratamento são implementadas para minimizar impactos ambientais e garantir a conformidade regulatória (IBP, 2020).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O volume de água produzida aumenta conforme a maturidade do poço, estágio em que a produção hídrica excede a de petróleo (ROCHA, 2018). Após a extração da mistura bifásica ou trifásica (gás, óleo e água), os elementos são separados no processamento primário. A água resultante pode ser descartada, reinjetada para manutenção de pressão ou reutilizada, por exemplo, na irrigação. Contudo, o volume gerado muitas vezes supera a capacidade dessas opções (ROCHA, 2018).

A escolha do tratamento depende dos compostos a serem removidos e do destino final do efluente. Muitos métodos convencionais carecem de eficiência, exigem etapas secundárias ou apresentam alto custo. Assim, pesquisas buscam soluções economicamente viáveis e eficazes. Entre as técnicas e materiais utilizados, destacam-se hidrociclones, osmose reversa, flotação, processo Fenton, tratamentos biológicos, membranas e adsorção em materiais como carvão ativado, argila orgânica, zeólitas e resinas (MOTTA, 2013).

A busca por materiais naturais para a remoção de compostos orgânicos via adsorção é crescente, com resíduos renováveis mostrando elevado potencial (LIU, 2010). Os biopolímeros surgem como uma excelente alternativa, pois permitem modificações estruturais que melhoram sua performance. Além disso, são biodegradáveis, de baixo custo, atóxicos e derivados de fontes naturais (plantas, bactérias ou algas), o que reduz riscos operacionais e preserva os ecossistemas aquáticos.

Nesse contexto, o objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar o desempenho dos polímeros Goma Guar e Hidroxipropilguar na remoção do Teor de Óleos e Graxas (TOG) da água produzida, por meio do processo de reticulação com o íon borato.

2. REFERENCIAL TEÓRICO (procedimentos/Técnicas aplicados na pesquisa)

2.1. Petróleo

O petróleo é uma substância oleosa, inflamável e menos densa que a água, com uma cor que varia do negro ao castanho-claro. Composto predominantemente por hidrocarbonetos, o petróleo contém uma vasta gama de compostos químicos, tornando praticamente impossível separá-los em substâncias puras. Para sua utilização, o petróleo é fracionado em diferentes produtos com base na faixa de ebulição de seus componentes (THOMAS, 2004). Esse recurso tem sido de grande importância histórica, especialmente durante a Revolução Industrial, quando passou a ser fundamental para o crescimento das indústrias e da indústria automobilística.

No Brasil, as primeiras evidências de petróleo datam do século XVII, quando foi observado nas praias do nordeste. A primeira perfuração comercial ocorreu em 1897, em Bofete (SP), a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

produção de petróleo no país cresceu consideravelmente ao longo dos anos. A criação da Petrobras, na década de 1950, foi um marco importante para o avanço da pesquisa e produção de petróleo no Brasil, que, ao longo das décadas, viu sua produção aumentar significativamente, superando 182.000 m³/dia no final dos anos 90 (THOMAS, 2004). Atualmente, o Brasil é um dos maiores produtores de petróleo do mundo, com a produção de 3,14 milhões de barris por dia em 2022, ocupando a 9ª posição no ranking global.

Após a extração da mistura bruta, os componentes (óleo, gás natural e água) são processados em sistemas de separação trifásicos. O petróleo segue para as refinarias para remoção de impurezas, enquanto o gás é tratado para remoção de contaminantes como CO_2 e H_2S. A água produzida, em grandes volumes, pode ser utilizada em processos como reinjeção no poço ou descartada de acordo com as diretrizes ambientais, sempre após tratamento adequado. A gestão eficiente desses três componentes é essencial para a operação da indústria petrolífera (GAUTO, 2016).

2.2. Água Produzida

A água produzida, também denominada água de produção, é composta pela mistura da água conata (presente no reservatório desde a sua formação geológica) com a água de injeção, utilizada nos métodos de recuperação secundária de petróleo (AMINI et al., 2012). Trata-se do maior efluente gerado na etapa de extração e, devido à complexidade de sua composição química, configura-se como um dos principais desafios ambientais do setor petrolífero (CHAKRABARTY; GHOSHAL; PURKAIT, 2010).

O volume de água gerado é diretamente proporcional ao tempo de amadurecimento do poço: quanto mais maduro o reservatório, maior é a quantidade de água extraída. Essa relação é inversa no que tange à produção de petróleo (CARVALHO, 2016). Com o declínio da pressão natural do reservatório ao longo do tempo, a injeção de água torna-se necessária para manter a energia do sistema e garantir a ascensão do óleo à superfície. Consequentemente, esse processo resulta em um incremento contínuo no volume de água produzida (CURBELO, 2002).

A água produzida possui uma composição química variada e complexa, cujas características dependem primordialmente das propriedades geológicas do reservatório. Em termos gerais, ela é constituída por hidrocarbonetos dispersos e dissolvidos, uma ampla variedade de metais pesados e elevada salinidade (RIBEIRO et al., 2014).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.3. Teor de óleos e graxas

O Teor de Óleos e Graxas (TOG) é um dos principais parâmetros analisados na água produzida. Sua remoção representa um desafio técnico, dada a eficiência limitada das tecnologias convencionais, que frequentemente demandam processos secundários para garantir a eliminação adequada do óleo (EBRAHIMI et al., 2009). A determinação do TOG pode ser realizada por diversas técnicas analíticas, como as espectroscopias no infravermelho, colorimetria e fluorescência, além das cromatografias gasosa (GC), gasosa acoplada à espectrometria de massa (GC-MS) e líquida de alta eficiência (HPLC) cada uma com particularidades na identificação e quantificação dos compostos (MINTY; RAMSEY; DAVIES, 2000).

O óleo pode apresentar-se na água nas formas livre, dispersa, emulsionada e solubilizada. O óleo livre e o disperso, que possuem gotas maiores que 20 µm, podem ser removidos por separação gravitacional, embora a presença de agentes estabilizantes possa dificultar a segregação da fase dispersa. Por outro lado, o óleo emulsionado (gotas menores que 20 µm) exige técnicas avançadas, como centrifugação, flotação ou dosagem de agentes químicos. Já o óleo solubilizado representa a maior complexidade de remoção, sendo necessário recorrer a métodos como extração por solventes ou processos eletroquímicos (OLIVEIRA, 1995).

2.4. Polímeros e Biopolímeros

Os polímeros são macromoléculas formadas por unidades repetitivas ligadas por ligações covalentes, podendo ser naturais (biopolímeros) ou sintéticos, com massa molar entre 10^4 e 10^6 (CANEVAROLO, 2006). Suas cadeias podem ser lineares, ramificadas ou reticuladas (AKCELRUD, 2007). A classificação dos polímeros considera a estrutura química, método de preparação, comportamento mecânico e desempenho. Estruturalmente, dividem-se em polímeros de cadeia carbônica e heterogênea. Quanto ao método de preparação, podem ser de adição ou condensação, sendo que os últimos eliminam pequenas moléculas como água ou metanol (AKCELRUD, 2007).

No comportamento mecânico, os polímeros são plásticos, elastômeros ou fibras. Os plásticos podem ser termoplásticos, termorrígidos ou baroplásticos. Os elastômeros se deformam e retornam ao estado original devido à sua estrutura flexível e baixa densidade de ligações cruzadas. As fibras, por sua vez, apresentam alta flexibilidade e finura (CANEVAROLO, 2006). No desempenho mecânico, os polímeros variam desde termoplásticos convencionais, como poliolefinas e PVC, até polímeros de engenharia, como policarbonatos e poliuretanos (AKCELRUD, 2007).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

No tratamento de água produzida, polímeros sintéticos e biopolímeros demonstram alta eficiência. Resinas poliméricas foram utilizadas por Queiros et al. (2006) na remoção de óleo de águas residuais por adsorção em colunas de leito fixo, alcançando até 97% de remoção. Biopolímeros, como a quitosana, têm a vantagem de serem biodegradáveis e não tóxicos. Grem et al. (2013) estudaram esferas de quitosana para remoção de óleo de águas produzidas, atingindo quase 100% de eficiência. Da mesma forma, Souza et al. (2017) aplicaram biopolímeros no tratamento de efluentes da indústria de papel e celulose, utilizando processos oxidativos avançados e esferas de quitosana como catalisador, obtendo resultados satisfatórios.

A Goma Guar é outro biopolímero amplamente empregado como floculante. Balaban e Paixão (2018) estudaram sua aplicação na clarificação de salmouras e águas produzidas, conseguindo até 97,79% de remoção de óleo. Gupta e Ako (2005) testaram sua eficácia na indústria alimentícia, demonstrando seu potencial como alternativa não tóxica aos polímeros sintéticos.

Os polissacarídeos, ou glicanos, são polímeros naturais derivados de plantas, sementes ou animais, constituídos por cadeias de monossacarídeos ligados por ligações glicosídicas. Eles são amplamente utilizados devido à sua biodegradabilidade, baixo custo e ausência de toxicidade (MANO; MENDES, 2018). Quando possuem alta massa molar, são denominadas gomas e apresentam alta solubilidade em água. Essas gomas, como a Goma Guar, influenciam as propriedades reológicas de sistemas aquosos, estabilizando emulsões e suspensões (AKCELRUD, 2007).

2.4.1. Reticulação polimérica

A reticulação polimérica é um processo químico ou físico que resulta na formação de ligações cruzadas entre as cadeias de polímeros, levando à criação de uma estrutura tridimensional. Essa reação de reticulação é essencial para modificar as propriedades físicas e químicas dos polímeros, conferindo-lhes maior resistência, rigidez e estabilidade térmica (ODIAN, 2004). Para que as ligações ocorram é necessária a adição de substâncias, conhecidas como agente reticulante, normalmente são substâncias de baixa massa molar e com sítios reativos que formam ligações intermoleculares ou intramoleculares (BERGER et al., 2004).

2.4.2. Hidrogéis poliméricos

Os hidrogéis são estruturas que possuem um alto potencial em absorver água. Se constituem de uma ou mais redes poliméricas tridimensionalmente estruturadas, construídas por cadeias de macromoléculas conectadas por ligações cruzadas, seja por ligações covalentes ou

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

reticulações, ou interações físicas (OVIEDO et al., 2008). Os hidrogéis possuem uma caracteristica derivada do grau de conectividade (ligações cruzadas e entrelaçamento físico) entre as cadeias, que é a insolubilidade em água, isso proporciona uma estrutura em rede e a integridade física do sistema (GUPTA et al., 2002). Devido a sua flexibilidade sobre outros materiais poliméricos, os hidrogéis vêm sendo utilizados em diferentes indústrias, que vão desde a medicina até a indústria do petróleo. Os hidrogéis podem responder a estímulos como variações de pH, força iônica, temperatura e corrente elétrica, e devido essa capacidade de responder rapidamente a esses estímulos, tais sistemas são chamados de materiais “inteligentes” (SOPPIMATH et al., 2001).

3. MÉTODOS

3.1. Formulação da água produzida

Para a água produzida sintética foi utilizada uma metodologia adaptada de Rocha (2018). Primeiramente, em um balão volumétrico, foi preparado dois litros de salmoura, utilizando água destilada com adição de cloreto de sódio e cloreto de cálcio numa proporção de 10:1, para uma concentração de 55.000 ppm. sob agitação constante em um agitador magnético. A solução foi colocada sob agitação de 16.000 rpm por cinco minutos. Então foi adicionado o petróleo, cerca de um grama, e deixado sob agitação por mais cinco minutos. Passado o tempo, foi acrescentado o restante da salmoura e agitado por mais 10 min. Posteriormente, a solução ficou em repouso por 30 min e depois, com o auxílio de papel filtro, foi retirado o óleo sobrenadante.

3.2. Planejamento experimental

O estudo consiste em um planejamento experimental fatorial para avaliar o comportamento de dois polímeros distintos: Goma Guar (GG) e Hidroxipropilguar (HPG). Para cada um deles, foram estabelecidos três níveis de concentração de polímero (4 g/L, 4,5 g/L e 5 g/L), que são cruzados com três níveis de concentração de ácido bórico (2,5 g/L, 2,75 g/L e 3 g/L), resultando em um total de 18 formulações Tabela 1.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 1. Formulação dos géis de Goma Guar e Hidropropilguar

Polímero	Concentração do Polímero (g/L)	Concentração do Ácido Bórico (g/L	Amostra
Goma Guar (GG)	4,0	2,5	1
		2,75	2
		3,0	3
	4,5	2,5	4
		2,75	5
		3,0	6
	5	2,5	7
		2,75	8
		3,0	9
Hidroxipropilguar (HPG)	4,0	2,5	1
		2,75	2
		3,0	3
	4,5	2,5	4
		2,75	5
		3,0	6
	5	2,5	7
		2,75	8
		3,0	9

3.3. Mapeamento por superfície e resposta e diagrama de Pareto

Para o mapeamento por superfície de resposta, com o intuito de mapear os principais efeitos e suas interações durante o processo de complexação, foi adotado como resultado a eficiência de remoção de óleos e graxas após o planejamento fatorial 2^3. Os níveis dos fatores foram denominados -1 (mínimo), 0 (médio) e 1 (máximo). Para o processamento dos dados, foi utilizado o programa estatístico *Statistic Software*, versão 7.0, para obtenção das superfícies de respostas dos modelos ajustados (linear e quadrático) para a viscosidade aparente com base nos intervalos dos parâmetros avaliados. Após uma triagem dos fatores de planejamento fatorial, uma análise da superfície de resposta usando planejamento central composto foi realizada para mapear a influência da viscosidade aparente com base nas variáveis e níveis utilizados. Para o

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

diagrama de Pareto foram realizados para cada vaiável independente, sendo avaliados estes efeitos e a interação entre as variáveis: goma guar e ácido bórico, com significância e $p \leq 0,05$.

3.4. Teor de Óleos e Graxas (TOG)

A análise experimental iniciou-se com a construção de uma curva de calibração de absorbância em função da concentração, utilizando padrões de óleo cru em concentrações de 0 a 200 mg/L. Essas soluções foram analisadas em um espectrofotômetro UV-Vis para correlacionar a resposta óptica à quantidade de analito presente. Para avaliar a eficiência do biopolímero no tratamento da água produzida, empregou-se uma metodologia adaptada de Silva (2020), conduzindo-se os ensaios nos intervalos temporais de 3, 6, 9 e 24 horas após o colapso do sistema. O procedimento de quantificação consistiu na coleta de 10 mL da amostra tratada, os quais foram transferidos para um funil de decantação para a realização de uma extração líquido-líquido. Adicionou-se 10 mL de n-hexano como solvente extrator, submetendo a mistura à agitação manual vigorosa por um minuto. Após o período de repouso necessário para a completa separação das fases, a fração aquosa foi descartada, e uma alíquota da fase orgânica (n-hexano) foi coletada para leitura espectrofotométrica. A concentração de óleo remanescente em cada intervalo foi determinada pela aplicação dos valores de absorbância obtidos na equação da reta da curva analítica previamente estabelecida.

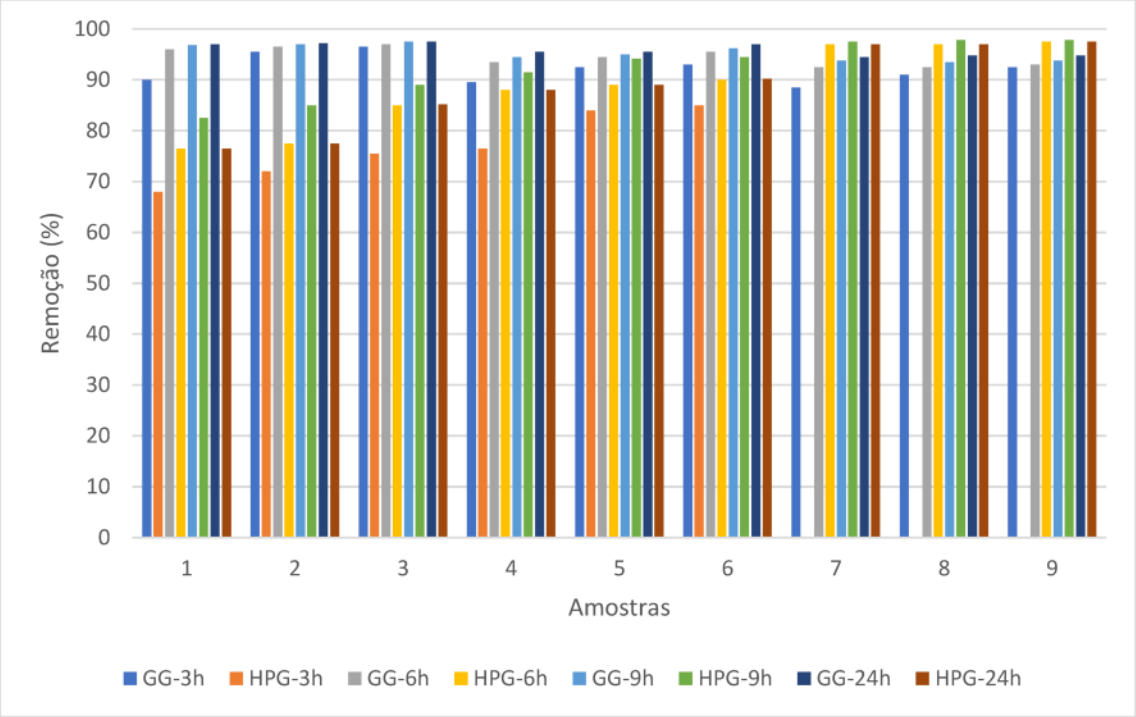
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Remoção do óleo em água produzida sintética

A Figura 1, comparam a remoção obtida com o polímero da Goma Guar (GG) com a remoção obtida com o Hidroxipropilguar (HPG), em tempos de 3, 6, 9 e 24 h após a complexação dos polímeros na água produzida sintética, respectivamente.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Remoção do óleo das amostras com tempo de 3, 6, 9 e 24 horas após o colapso



Fonte: Autoria própria.

Os resultados demonstram que, para a Goma Guar (GG), a maior variação no sistema ocorre nas primeiras três horas, evidenciando uma cinética de complexação rápida que reduz drasticamente a concentração de óleos e graxas (TOG). Contudo, nesse intervalo, nenhuma das concentrações testadas foi suficiente para atingir o limite estabelecido pelo CONAMA. Entre as 3 e 24 horas, observou-se uma redução contínua, embora menos acentuada, da absorbância. Destaca-se a amostra 3, que atingiu o parâmetro legal (17,658 mg/L) em 6 horas, seguida pelas amostras 1 e 2 em 9 horas, e a amostra 6 após 24 horas. As amostras 7, 8 e 9 não atingiram conformidade em nenhum dos tempos analisados.

A redução da absorbância ao longo do tempo sugere uma formação progressiva de íons borato e sua subsequente complexação com o polímero. Entretanto, observou-se que o aumento da concentração de polímero nem sempre favorece a remoção. Nas amostras com 4,5 g/L de GG, o excesso de polímero em relação aos íons borato disponíveis parece ter prejudicado a formação do hidrogel, mantendo o óleo disperso na solução.

Quanto ao Hidroxipropilguar (HPG), o polímero apresentou desempenho inferior à GG nas primeiras 3 horas. Para as concentrações mais elevadas (amostras 7, 8 e 9), a alta

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

viscosidade inicial (Figura 12) retardou a formação do hidrogel, impossibilitando a leitura nesse intervalo. Todavia, após 6 horas, essas mesmas amostras apresentaram uma inversão de desempenho, exibindo os melhores resultados de remoção do estudo. Aos 9 e 24 horas, o hidrogel mostrou-se devidamente estruturado, alcançando uma eficiência de remoção de 98,43%.

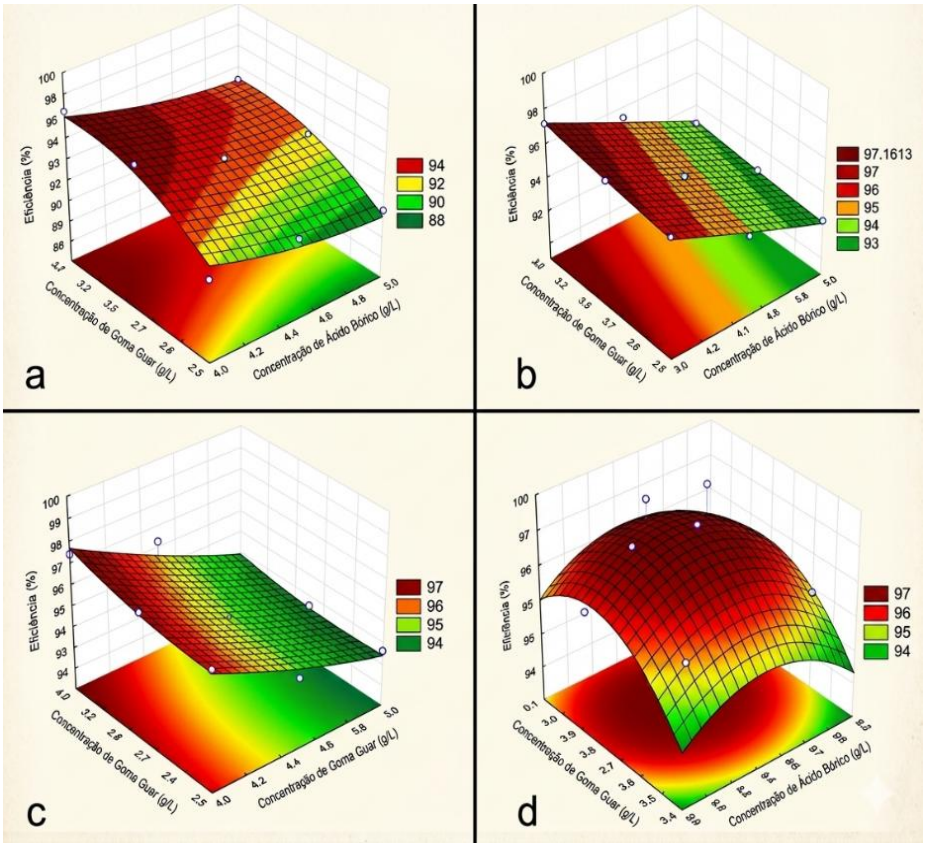
Para as demais amostras de HPG (1 a 5), a concentração do polímero mostrou-se insuficiente para atingir os padrões normativos, com exceção da amostra 6, que atingiu conformidade apenas após 24 horas. Em suma, enquanto a GG apresenta uma resposta inicial mais rápida, o HPG (em concentrações adequadas) demonstra uma capacidade de remoção final superior, apesar da cinética de complexação mais lenta.

4.2. Mapeamento por superfície de resposta

A Figura 2 informa os resultados quanto ao mapeamento por superfície de resposta após o tratamento com o polímero de Goma Guar (GG) em tempos de 3, 6, 9 e 24h. Para o tratamento realizado com o Hidroxipropilguar (HPG), os resultados do mapeamento estão representados na Figura 3. Não foi possível analisar a amostra de 3h do Hidroxipropilguar por falta de resultados para esse tempo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

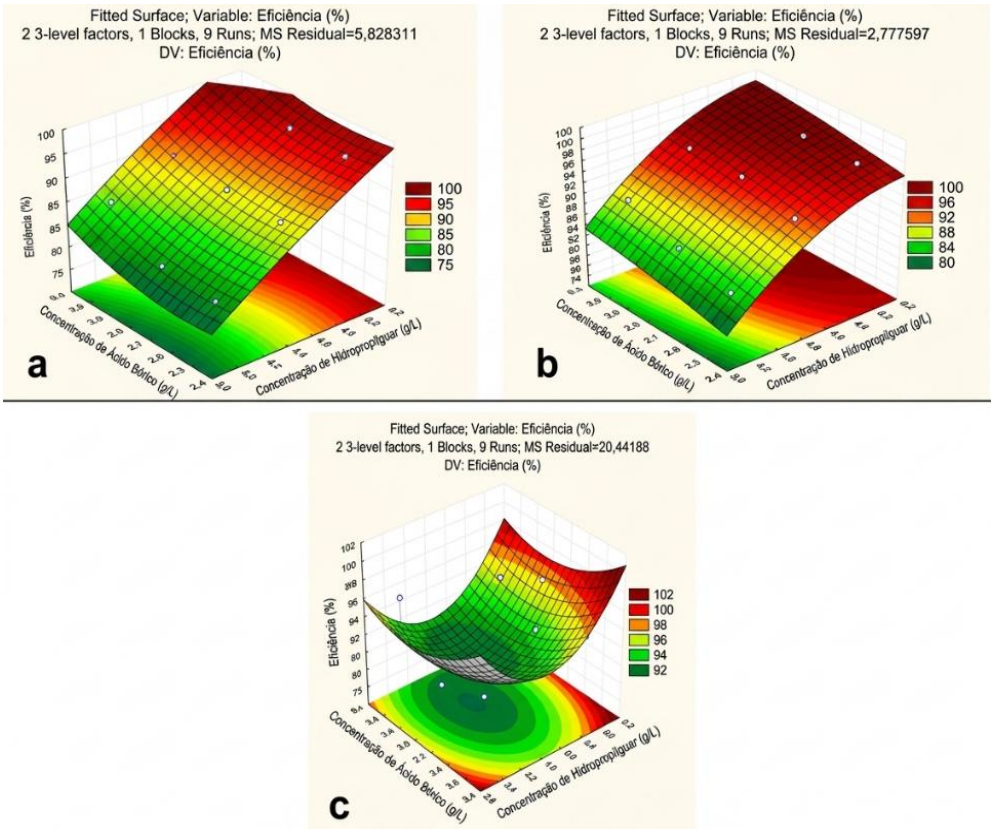
Figura 2. Mapeamento por superfície de resposta para a Goma Guar (GG) com tempo de: a) 3 h; b) 6 h; c) 9 h e d) 24 h



Fonte: Autoria própria.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. **Mapeamento por superfície de resposta para o Hidroxipropilguar (HPG) com tempo de: a) 6h; b) 9h; c) 24h**



Fonte: Autoria própria.

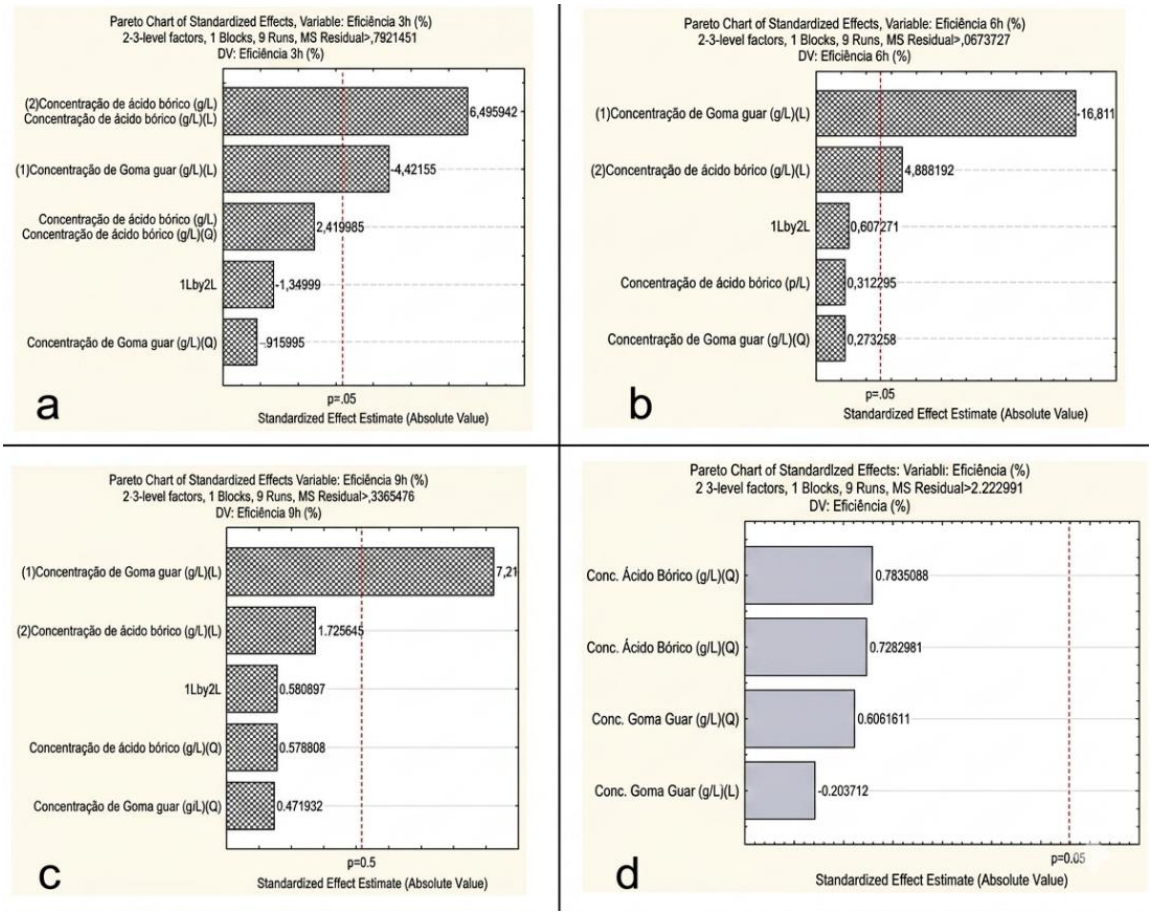
Analisando os dados apresentados percebe-se uma mudança de comportamento com o aumento do tempo de reticulação. Para a Goma Guar (GG), ao modo em que o tempo de reticulação aumenta a eficiência de remoção também aumenta principalmente nas três primeiras horas. O ácido bórico desempenha um papel fundamental para a Goma Guar , a eficiência de remoção aumenta conforme a quantidade de ácido bórico aumenta. Já para o Hidroxipropilguar (HPG) a concentração do polímero desempenha um papel superior ao ácido bórico, onde a eficiência de remoção aumenta conforme aumenta-se a concentração do polímero. Após 6h de reticulação o Hidroxipropilguar começa a apresentar os resultados e já começa com uma concentração de óleo ótima para a maior concentração de polímero.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4.3. Diagrama de Pareto

A Figuras 4 apresenta os resultados quanto ao diagrama de Pareto após o tratamento com o polímero de Goma Guar (GG) em tempos de 3, 6, 9 e 24h. Para o tratamento realizado com o Hidroxipropilguar (HPG), os resultados do diagrama de Pareto estão representados na Figura 5. Não foi possível analisar a amostra de 3h do Hidroxipropilguar (HPG) por falta de resultados para esse tempo.

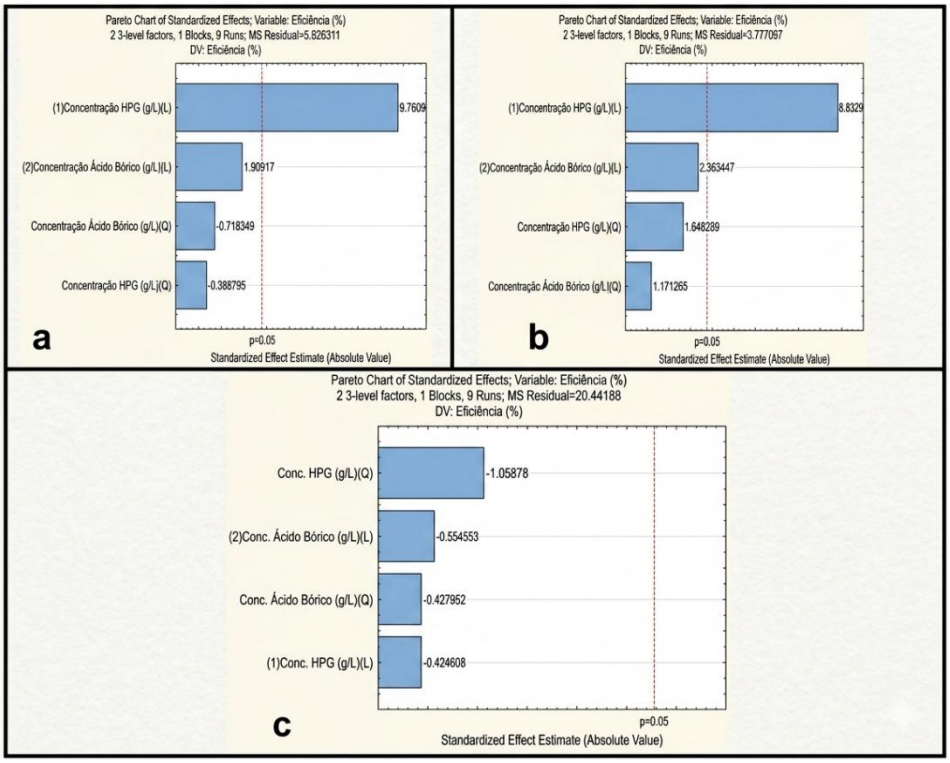
Figura 4. Diagrama de Pareto para a Goma Guar (GG) em diferentes tempos de: a) 3 h; b) 6 h; c) 9 h e d) 24 h



Fonte: Autoria própria.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 5. Diagrama de Pareto para o HPG em diferentes tempos de: a) 6 h; b) 9 h; c) 24 h



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise dos diagramas de Pareto, o qual analisa a influência das variáveis estudadas e suas interações na variável resposta (percentual de Remoção), para uma faixa de 95 % de confiança. Para a Goma Guar (GG), nas três primeiras horas o ácido bórico, é a variável que possui maior significância, isso significa que ao modo que a concentração de ácido bórico aumenta o percentual de remoção também aumenta. Percebe-se que a significância do ácido bórico diminui ao longo do tempo, e a concentração do polímero se torna a vaiável com maior significância. Para a o Hidroxipropilguar (HPG) a concentração do polímero é a vaiável que possui maior significância mesmo ao longo do tempo. Para os dois polímeros no tempo de 24h

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

as variáveis não possuem mais significância, e o percentual de remoção não aumenta mais. Alguns valores ficaram negativos, isso significa uma relação inversa, ou seja, à medida que essa vaiável aumenta o percentual de remoção diminui.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises demonstraram que a presença dos sais NaCl e $CaCl_2$ no sistema foi determinante para o desempenho dos biopolímeros Goma Guar (GG) e Hidroxipropilguar (HPG), uma vez que o efeito de *salting-out* promoveu o colapso da estrutura polimérica. Esse fenômeno reduziu a solubilidade dos polímeros, induzindo sua precipitação e, consequentemente, a remoção do óleo presente no sobrenadante. Para a Goma Guar, os resultados apontam que a concentração de 4 g/L de polímero associada a 3 g/L de ácido bórico proporcionou uma eficiência de remoção de até 98,55% ao longo do tempo. Já para o Hidroxipropilguar, a combinação de 5 g/L de polímero com 3 g/L de ácido bórico foi responsável por uma remoção de até 98,43%. Paralelamente, outras variações de massa também permitiram atingir teores de Óleos e Graxas (TOG) dentro dos parâmetros normativos estabelecidos pelo CONAMA.

A análise do mapeamento por superfície de resposta indicou que ambos os biopolímeros apresentam uma tendência estatística de máxima eficiência, aproximando-se de níveis de remoção integrais dentro das condições otimizadas pelo modelo. A sutil divergência observada em relação aos valores experimentais pode ser atribuída a fatores como o grau de pureza dos reagentes, variações de temperatura e parâmetros operacionais de agitação. Através do diagrama de Pareto, evidenciou-se que, para a Goma Guar, o ácido bórico é a variável de maior influência na remoção, enquanto para o Hidroxipropilguar, a concentração do polímero exerce o papel principal. Em termos de viabilidade técnica e econômica, a Goma Guar destaca-se por apresentar alta eficiência em concentrações mais baixas, o que a torna preferível para aplicações em larga escala, visando a otimização do consumo de reagentes e a redução de custos operacionais no tratamento de efluentes da indústria do petróleo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Dados gerais do setor. Brasília, DF: ANP, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/acesso-a-informacao/institucional/historia-anp-setor. Acesso em: 11 set. 2023.

AKCELRUD, L. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. 1. ed. Rio de Janeiro: Manole, 2007.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

AMINI, S. et al. **Mathematical modelling of a hydrocyclone for the down-hole oil–water separation (DOWS)**. Chemical Engineering Research and Design, [S. l.], v. 90, n. 12, p. 2186-2195, dez. 2012. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876212001785. Acesso em: 7 maio 2023.

BALABAN, R. C.; PAIXÃO, M. V. G. **Application of guar gum in brine clarification and oily water treatment**. International Journal of Biological Macromolecules, [S. l.], v. 108, p. 119-126, mar. 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813017323279. Acesso em: 17 fev. 2023.

BERGER, J. et al. **Structure and interactions in covalently and ionicallycrosslinked chitosan hydrogels for biomedical applications**. European Journal Of Pharmaceutics And Biopharmaceutics, [S. l.], v. 57, p. 19-34, jan. 2004. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0939641103001619. Acesso em: 5 abr. 2023.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.

CARVALHO, P. C. de A. P. **Tratamento combinado da água produzida de petróleo - filtração, adsorção e foto-fenton**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

CHAKRABARTY, B.; GHOSHAL, A. K.; PURKAIT, M. K. **Crossflow ultrafiltration of stable oil-in-water emulsion using polysulfone membranes**. Chemical Engineering Journal, [S. l.], v. 165, n. 2, p. 447-456, 1 dez. 2010. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894710008612. Acesso em: 14 maio 2023.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº 393, de 8 de agosto de 2007. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 153, p. 72-73, 9 ago. 2007.

CURBELO, F. D. da S. **Estudo da remoção de óleo em águas produzidas na indústria de petróleo, por adsorção em coluna utilizando a vermiculita expandida e hidrofobizada**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

EBRAHIMI, M. et al. **Characterization and application of different ceramic membranes for the oil-field produced water treatment**. Desalination, [S. l.], v. 245, n. 1-3, p. 533-540, 15 set. 2009. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916409003683. Acesso em: 6 jun. 2023.

GAUTO, M. Petróleo e gás: princípios da exploração, produção e refino. Porto Alegre: Bookman, 2016.

GREM, I. C. S. et al. Microesferas De Quitosana Como Adsorvente Natural Para O Tratamento De Águas Oleosas Sintéticas. Congresso Brasileiro de Polímeros. Jan. 2013. Disponível em: http://e-democracia.com.br/cbpol/anais/2013/pdf/6FEA.pdf. Acesso em: 15 maio. 2023.

GUPTA, B. S.; AKO, J. E. Application of guar gum as a flocculant aid in food processing and potable water treatment. European Food Research and Technology, [S. l.], v. 221, n. 6, p. 746-

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

751, 5 ago. 2005. Disponível em: http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00217-005-0056-4. Acesso em: 15 mar. 2023.

GUPTA, P.; VERMANI, V.; GARG, S. Hydrogels: from controlled release to pH-responsive drug delivery. Drug Discovery Today, India, v. 7, p. 569 – 579, 2002. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359644602022559. Acesso em 03 jun. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Resíduos oleosos: instrução normativa nº 12, de julho de 2013. Brasília, DF: IBAMA, 2023. Disponível em: https://www.ibama.gov.br. Acesso em: 11 set. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. Água Produzida. Caderno de Boas Práticas E&P, Diretrizes para o licenciamento ambiental de atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural em terra reate 2020. Brasília, DF: IBP, 2023. Disponível em: https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2021/12/reate-2020.pdf. Acesso em: 11 set. 2023.

LIU, D. et al. A new fracturing fluid with combination of single phasemicroemulsion and gelable polymer system. Journal Of Petroleum Science And Engineering, China, v. 73, p.267- 271,set. 2010. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410510001440. Acesso em: 7 maio 2023.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. A natureza e os polímeros: meio ambiente, geopolímeros, fitopolímeros e zoopolímeros. 1. ed. São Paulo: Blücher, 2018.

MINTY, B.; RAMSEY, E. D.; DAVIES, I. Development of an automated method for determining oil in water by direct aqueous supercritical fluid extraction coupled on-line with infrared spectroscopy. The Analyst, [S. l.], v. 125, n. 12, p. 2356-2363, 21 nov. 2000. Disponível em: http://pubs.rsc.org. Acesso em: 12 maio 2023.

MOTTA, A. R. P. Tratamento de água produzida de petróleo para remoção de óleo por processos de separação por membranas: revisão. Engenharia Sanitária e Ambiental, [S. l.], v. 18, n. 1, p. 15-26, jan./mar. 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/esa/v18n1/a03v18n1. Acesso em: 13 dez. 2022.

ODIAN, G. Principles of Polymerization. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

OLIVEIRA, G. R. C. Estudo de variáveis operacionais e interfaciais na flotação de óleo por gás dissolvido. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

OVIEDO, I. R. et al. Design of a Physical and Nontoxic Crosslinked Poly(Vinyl Alcohol) Hydrogel. International Journal Of Polymeric Materials And Polymeric Biomaterials, [S. l.], v. 57, n. 12, p. 1095-1103, 20 out. 2008. Disponível em: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00914030802341661. Acesso em: 12 mar. 2023.

QUEIROS, Y. G. C. et al. Materiais poliméricos para tratamento de água oleosa: utilização, saturação e regeneração. Polímeros: ciência e tecnologia, Rio de Janeiro, v. 16, n. 3, p. 224-229, jan. 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282006000300012. Acesso em: 4 maio 2023.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

RIBEIRO, F. A.; ROSÁRIO, F. F.; BEZERRA, M. C.; WAGNER, R. C.; BASTOS, A. L.; MELO, V. L.; POPPI, R. J. Evaluation of chemical composition of waters associated with petroleum production using Kohonen neural networks. Fuel, v. 117, pp. 381-390, 2014.

ROCHA, B. S. Avaliação de metodologia combinada com uso de tensoativos e polieletrólitos para tratamento de água produzida. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

SILVA, D. C. et al. Removal of oil from produced water by ionic flocculation using saponified babassu coconut oil. Journal of Materials Research and Technology, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 4476-4484, 2020.

SOPPIMATH, K. S.; KULKARNI, A. R.; AMINABHAVI, T. M. Chemically modified polyacrylamide-g-guar gum-based crosslinked anionic microgels as pH-sensitive drug delivery systems: preparation and characterization. Journal of Controlled Release, [S. l.], v. 75, n. 3, p. 331-345, 10 ago. 2001. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168365901004047. Acesso em: 15 maio 2023.

SOUZA, K. V. et al. Utilização de biopolímero no tratamento de efluentes da indústria de papel e celulose por processo oxidativo avançado. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 45, n. 114, p. 363-372, jun. 2017. Disponível em: https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr114/cap12.pdf. Acesso em: 16 maio 2023.

THOMAS, José Eduardo (org.). **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

Digitally signed by RECIMA21 REVISTA CIENTIFICA MULTIDISCIPLINAR LTDA:40166538000195.
Timestamp: 2026-04-23 14:09:39 -03.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.