UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PETRÓLEO

RAIZA MIGUEL ALCHAAR

Materiais magnéticos na remediação de derramamento de petróleo: Uma revisão

Maceió
2023

RAIZA MIGUEL ALCHAAR

Materiais magnéticos na remediação de derramamento de petróleo: Uma revisão

TCC apresentado ao curso de Engenharia de Petróleo, da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia do Petróleo.

Orientador: Leonardo Mendonça Tenório de Magalhães e Oliveira

Co-orientador: Kaline Cavalvante Vasconcelos

Maceió

2023

Catalogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

A351m Alchaar, Raíza Miguel.
Materiais magnéticos na remediação de derramamento de petróleo : uma revisão / Raíza Miguel Alchaar. – 2023.
45 f. : il. color.

Orientador: Leonardo Mendonça Tenório de Magalhães Oliveira.
Coorientador: Kaline Cavalcante Vasconcelos.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 38-45.

1. Derramamento de óleo. 2. Técnicas de remediação. 3. Métodos magnéticos. 4. Adsorção. I. Título.

CDU: 665.61 : 544.723.2

RESUMO

A crescente demanda por petróleo na sociedade moderna tem levado a uma exploração cada vez mais intensiva dos recursos naturais, incluindo a extração de petróleo em áreas marinhas. No entanto, essas atividades apresentam riscos significativos para o meio ambiente, como o perigo de vazamentos de óleo nas águas do mar. Os vazamentos de óleo representam uma ameaça séria para a vida marinha e os ecossistemas, podendo causar danos irreversíveis à biodiversidade e aos ecossistemas. A contaminação por óleo pode resultar na morte de animais marinhos e na poluição dos habitats e ecossistemas, o que pode ter consequências em cadeia e duradouras na saúde dos biomas. Além disso, os vazamentos de óleo têm um impacto significativo na economia local, especialmente nas indústrias pesqueira e turística. A contaminação das áreas costeiras pode prejudicar negativamente a economia local, levando à perda de empregos e à redução da renda das comunidades costeiras. Diante desses impactos, é crucial adotar medidas para prevenir e controlar vazamentos de óleo, bem como desenvolver tecnologias e técnicas para remediar os danos causados. Este estudo visa realizar uma revisão da literatura sobre métodos de remediação de derramamento de petróleo em ambientes marinhos com foco nos métodos magnéticos que têm se mostrado altamente eficazes na remoção do óleo em ambientes aquáticos. Os estudos mais recentes na literatura científica revelam que a aplicação de partículas magnéticas em nanoescala para a remoção de óleo tem sido amplamente pesquisada. Através de sua alta capacidade de adsorção de óleo e facilidade de remoção por magnetismo, os métodos magnéticos se mostram uma alternativa promissora e sustentável para a remediação de derramamentos de óleo.

Palavras-chave: Derramamento de petróleo, Remediação, Métodos magnéticos, Adsorção.

ABSTRACT

The growing demand for oil in modern society has led to increasingly intensive exploitation of natural resources, including the removal of oil from marine areas. However, these activities present relevant risks to the environment, such as the danger of oil spills into sea waters. Oil spills pose a serious threat to marine life and ecosystems and can cause irreversible damage to biodiversity and ecosystems. Oil contamination can result in the death of marine animals and the pollution of habitats and ecosystems, which can have cascading and severe consequences for the health of biomes. Additionally, oil spills have a significant impact on the local economy, especially the fishing and tourism industries. Contamination of coastal areas can harm the local economy, leading to job losses and reduced income for coastal communities. Given these impacts, it is crucial to adopt measures to prevent and control oil spills, as well as develop technologies and techniques to remedy the damage caused. This study aims to conduct a literature review on oil spill remediation methods in marine environments with a focus on magnetic methods that are highly effective in removing oil from aquatic environments. The most recent studies in the scientific literature reveal that the application of nanoscale magnetic particles for oil removal has been widely researched. Through their high oil adsorption capacity and ease of magnetic removal, magnetic methods show a promising and sustainable alternative for oil spill remediation.

Keywords: Oil spill, Remediation, Magnetic methods, Adsorption.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Amostra de fotos aéreas do derramamento da Deepwater Horizon em 23 de junho de 2010 de A Sheen e thin slick. B. Óleo fresco em superfície fina. C. Mancha distante. D. Igual a C, mas mais próximo, mostrando assimetria de cobertura de brilho e agrupamento de despertar. E. Aplicação de dispersante. F. Possível organização fraca de Langmuir e sombras de nuvens. Plataforma (P1) identificada em E e F para auxílio à orientação..... 11

Figura 2: Caracterização do impacto por óleo cru pesado, no Pontal do Cupe (Pernambuco - BR). A) Manchas de óleo retiradas por voluntários e agentes da prefeitura logo após a chegada do óleo na praia, em 19 de outubro de 2019; B) Óleo impregnado no pé de uma banhista, meses após o derrame no ano de 2020; C) Atividade de limpeza do óleo no período do derramamento, outubro de 2019.....12

Figura 3: Barreira retém petróleo sob o Canal Talbert, na área afetada pelo derramamento de óleo na costa de Huntington Beach, Califórnia, na segunda-feira, 4 de outubro de 2021. 13
Figura 4: Barreira e skimmer removendo a camada de óleo da superfície da água 14

Figura 5: Queima in situ durante a resposta ao derramamento de óleo da Deepwater Horizon/BP em 2010. 19

Figura 6: Resumo gráfico da pesquisa de Habibi et. al. (2022)..... 24

Figura 7: Figura 7: Esquema gráfico da pesquisa de Singh et. al.(2020)..... 26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ONG	Organização Não Governamental
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
Fe3O4	Magnetita
Fe2O3	Hematita
BP	*British Petroleum*

SUMÁRIO

RESUMO 8
1. INTRODUÇÃO 7
2. OBJETIVOS 9
3. METODOLOGIA 10
4. REVISÃO DA LITERATURA 11
4.1 Histórico de derramamento de óleo 11
4.2 Métodos tradicionais de mitigação em acidentes com derramamento de óleo 14
4.2.1 Métodos mecânicos 14
4.2.2 Métodos químicos 16
4.2.3 Materiais sorventes 18
4.2.4 Queima in situ 20
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE MATERIAIS MAGNÉTICOS NA MITIGAÇÃO DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO 21
5.1 Materiais poliméricos magnéticos 22
5.2 Materiais naturais magnéticos 25
5.2.1 Magnetita (fe3o4) 25
5.2.2 Hematita (fe2o3) 26
5.2.3 Magnetossomas 26
5.2.4 Ferrofluídos 27
5.2.5 Materiais magnéticos derivados de fontes marinhas 27
5.3 COMPÓSITOS MAGNÉTICOS 28
5.3.1 Nanocompósitos de magnetita e polímeros 29
5.3.2 Nanotubos de carbono funcionalizados com magnetita 30
5.3.3 Grafeno modificado com magnetita 31
5.3.4 Espumas magnéticas à base de poliuretano 31
5.3.5 Compósitos de hidrogéis magnéticos 32
5.4 SISTEMAS CRISTALINOS MAGNÉTICOS 34
6. CONCLUSÕES 36
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 37

1. INTRODUÇÃO

A exploração e o transporte de petróleo desempenham um papel fundamental na economia global, porém, essas atividades também trazem consigo um risco latente de derramamentos que podem resultar em consequências ambientais e socioeconômicas devastadoras. A contaminação causada por derramamentos de petróleo afeta negativamente os ecossistemas marinhos e costeiros, prejudica a saúde humana e desestabiliza as comunidades que dependem da pesca para sua subsistência. Diante desse cenário complexo e interconectado, a pesquisa sobre a utilização de materiais magnéticos como estratégia de mitigação emerge como uma abordagem inovadora e promissora.

A magnitute dos danos causados pelos derramamentos de petróleo vai além da simples superfície da água. A vida marinha, altamente sensível a alterações ambientais, sofre com a contaminação por hidrocarbonetos, resultando em efeitos que vão desde asfixia até a bioacumulação dessas substâncias nas cadeias alimentares, com consequências a longo prazo. Segundo Melo et. al. (2022), os derramamentos de petróleo representam uma das maiores ameaças à biodiversidade marinha e à saúde dos ecossistemas aquáticos.

As comunidades costeiras que dependem da pesca enfrentam uma crise dupla quando ocorrem derramamentos de petróleo. Além dos impactos diretos na disponibilidade de recursos pesqueiros, a percepção de produtos contaminados leva a uma diminuição da demanda por pescado, o que reduz drasticamente a renda das famílias que dependem dessa atividade. De acordo com Ferreira et. al. (2022), os vazamentos de petróleo causam impactos avassaladores nas comunidades de pesca, acarretando em prejuízos econômicos substanciais e desequilíbrio social.

As técnicas tradicionais de remediação, como a queima in situ e o uso de dispersantes químicos, embora eficazes em algumas circunstâncias, frequentemente levantam preocupações ambientais adicionais. A queima in situ, por exemplo, libera substâncias poluentes na atmosfera, afetando a qualidade do ar e a saúde humana. Nesse contexto, a aplicação de materiais magnéticos como método de remediação surge como uma alternativa atraente. Ge et. al. (2016) destacam que os materiais magnéticos apresentam propriedades singulares de adsorção e separação, concedendo a eles uma notável eficácia na remoção seletiva de hidrocarbonetos encontrados tanto em ambientes aquáticos quanto terrestres.

A utilização de materiais magnéticos na mitigação de derramamentos de petróleo oferece uma abordagem inovadora e altamente eficaz. Esses materiais possuem propriedades únicas de adsorção e remoção seletiva de hidrocarbonetos presentes na água ou no solo contaminado, quando combinados com materiais adsorventes que serão imantados, minimizando a exposição de organismos não alvo. Narendra et. al. (2021) destacam que os materiais magnéticos exibem uma notável capacidade de adsorver hidrocarbonetos, conferindo-lhes uma elevada eficácia na extração de óleo de ambientes contaminados. Além disso, a aplicação de materiais magnéticos é ambientalmente benigna, reduzindo a poluição secundária causada por métodos tradicionais. Sua capacidade de recuperação e reutilização também torna essa abordagem economicamente viável. A pesquisa contínua sobre materiais magnéticos e sua aplicação na mitigação de acidentes de petróleo oferece um potencial significativo para melhorar a eficácia e a sustentabilidade das operações de resposta a derramamentos de petróleo.

Os materiais magnéticos oferecem uma abordagem não invasiva e de baixo impacto ambiental para a remediação de derramamentos de óleo. Ao contrário de técnicas que envolvem produtos químicos dispersantes ou queima, os materiais magnéticos não introduzem substâncias adicionais no ambiente. Isso minimiza os riscos de impactos secundários, como a contaminação química ou a poluição atmosférica. Como enfatizado por Silva et. al. (2021), a técnica magnética demonstra uma notável seletividade na eliminação de hidrocarbonetos, minimizando significativamente os impactos adversos no ambiente.

Os materiais adsorventes são amplamente utilizados para o tratamento de derramamentos de petróleo no mar quando são revestidos de materiais magnéticos. Eles são capazes de remover o petróleo da água, reduzindo assim a poluição e minimizando os danos ambientais. Silva et. al (2021) mostra que existem vários tipos de materiais adsorventes, como fibras naturais, polímeros sintéticos, argilas e zeólitas que são utilizadas para esse cenário.

Os materiais adsorventes funcionam por meio de processos físicos e químicos. A adsorção física ocorre quando as moléculas de petróleo são atraídas para a superfície do material adsorvente por meio de forças intermoleculares, como a van der Waals.

2. OBJETIVOS

Nesta pesquisa, busca-se explorar mais profundamente o potencial dos materiais magnéticos na mitigação de acidentes de petróleo, considerando os impactos interconectados nas vidas marinhas, nas comunidades costeiras e nas metodologias convencionais de remediação. A análise crítica dos artigos científicos referenciados fornecerá uma base sólida para uma investigação mais aprofundada deste tema complexo e atual. Através deste estudo, espera-se contribuir para a busca de soluções mais eficazes e sustentáveis que minimizem os impactos dos derramamentos de petróleo, preservando tanto o meio ambiente quanto as comunidades humanas afetadas.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada para conduzir a revisão bibliográfica sobre a utilização de materiais magnéticos na mitigação de derramamentos de petróleo em ambientes marinhos foi orientada por uma abordagem abrangente e sistemática. O objetivo primário foi explorar a diversidade de materiais magnéticos utilizados para enfrentar os desafios ambientais decorrentes de derramamentos de óleo em ecossistemas marinhos e para isso, utilizou-se plataformas de pesquisas como PubMed, IEEE Xplore, ScienceDirect, Scielo e Google Scholar. A escolha dessas plataformas procurou englobar uma variedade de disciplinas, desde as ciências naturais até a engenharia e a química, assegurando uma perspectiva interdisciplinar na seleção dos artigos.

A seleção cuidadosa de palavras-chave desempenhou um papel crucial na eficácia da busca bibliográfica. Foram utilizadas palavras-chave que abarcassem tanto os aspectos relacionados a materiais magnéticos quanto à mitigação de derramamentos de petróleo. Algumas das principais palavras-chave incluíram: "*magnetic materials*," "*oil spill remediation*," "*marine environments*," "*magnetic nanoparticles*," "*magnetic composites*," entre outras. A combinação estratégica dessas palavras-chave permitiu uma busca refinada e relevante, direcionando o foco para estudos que integrassem ambas as áreas de interesse.

Essa metodologia permitiu a coleta de um conjunto de artigos recentes, de 2018 até o ano presente, representativo e diversificado, refletindo o estado atual das pesquisas sobre a utilização de materiais magnéticos na mitigação de derramamentos de petróleo em ambientes marinhos. Ao explorar os estudos selecionados, busca-se fornecer uma visão abrangente das tendências, inovações e desafios enfrentados por pesquisadores e profissionais que buscam soluções eficazes e sustentáveis para enfrentar esses desastres ambientais complexos.

4. REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Histórico de derramamento de óleo

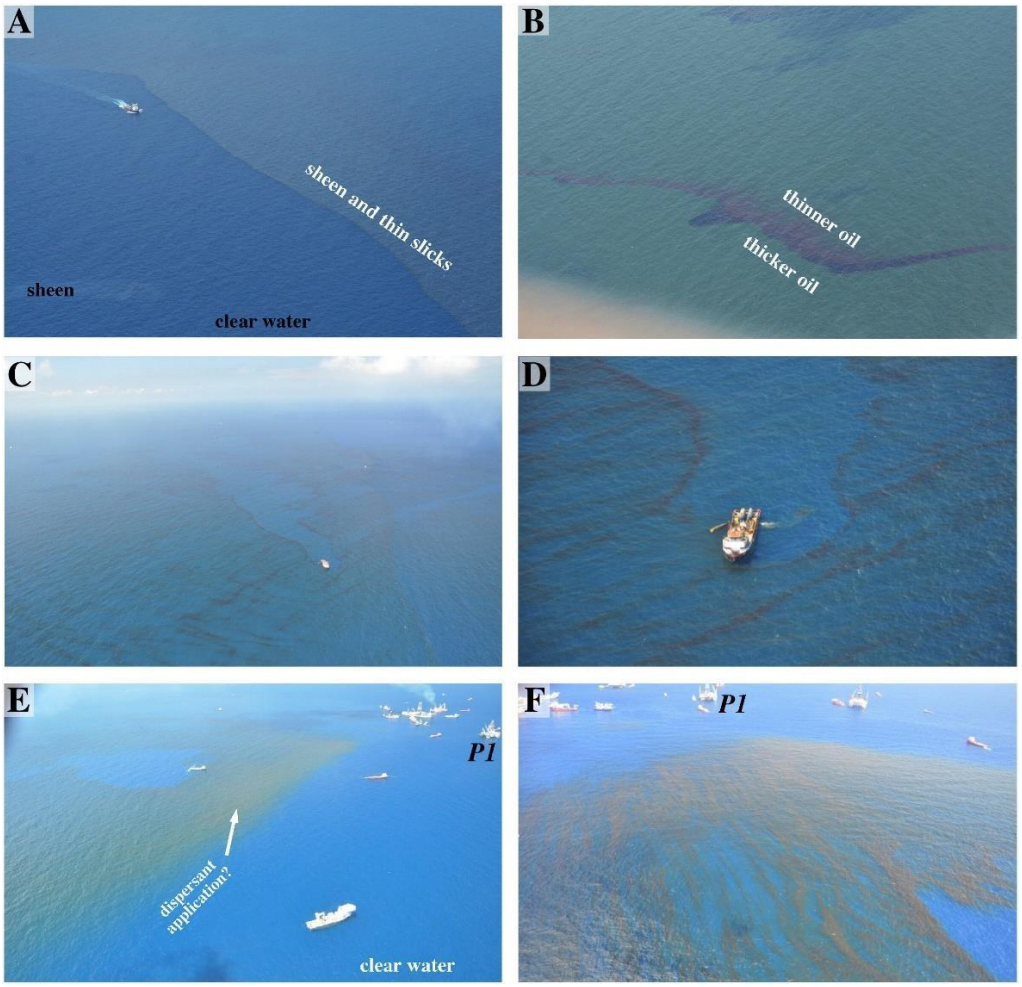
Acidentes de derramamento de petróleo frequentemente têm consequências ambientais catastróficas. O derramamento da petroleira Exxon Valdez em 1989 no Alasca é um exemplo icônico. Segundo Smith et. al. (2002), esse acidente resultou na contaminação de milhares de quilômetros de costa, causando a morte de aves marinhas, mamíferos marinhos e impactando gravemente ecossistemas costeiros e de acordo com Smith & Johnson. (1995) O derramamento do Exxon Valdez resultou em perdas econômicas estimadas em bilhões de dólares devido à interrupção da pesca e do turismo.

O tempo necessário para mitigar os impactos de um derramamento de petróleo pode ser prolongado. No caso do Exxon Valdez, a recuperação dos ecossistemas costeiros levou anos, e alguns danos ainda são perceptíveis décadas depois Peterson et. al. (2003).

Em 2010, o derramamento de óleo da plataforma Deepwater Horizon no Golfo do México atraiu atenção global. Brown et. al. (2012) analisaram os impactos desse acidente, observando danos significativos à vida marinha, incluindo golfinhos e tartarugas, e a degradação de habitats costeiros sensíveis. Jones et. al. (2015) destacaram que os custos totais associados, incluindo medidas de resposta, compensações e perdas econômicas, ultrapassaram os 60 bilhões de dólares, tornando-o um dos acidentes mais caros da história. Hayworth et. al., (2011) observaram que a mitigação completa levou vários anos, com a recuperação de áreas afetadas ainda em andamento. A resposta inicial eficaz, incluindo a contenção do derramamento e a aplicação de dispersantes químicos, foi fundamental para reduzir os danos a longo prazo.

A figura 1 mostra uma vista aérea, com um ângulo de visão bem amplo da vasta área em que o petróleo atingiu no derramamento de óleo no Golfo do México em 2010.

Figura 1: Amostra de fotos aéreas do derramamento da Deepwater Horizon em 23 de junho de 2010 de A Sheen e thin slick. B. Óleo fresco em superfície fina. C. Mancha distante. D. Igual a C, mas mais próximo, mostrando assimetria de cobertura de brilho e agrupamento de despertar. E. Aplicação de dispersante. F. Possível organização fraca de Langmuir e sombras de nuvens. Plataforma (P1) identificada em E e F para auxílio à orientação.



Fonte: Leifer, I.,et. al (2012)

Em 2019, a costa brasileira testemunhou um dos desastres ambientais mais significativos de sua história, com derramamentos de petróleo cru afetando extensas áreas costeiras. A origem exata do vazamento permaneceu incerta, o que dificultou a resposta rápida das autoridades que resultou em uma disseminação descontrolada do petróleo cru ao longo da costa, afetando praias, estuários e recifes de coral.

Os biomas costeiros, incluindo manguezais, sofreram impactos devastadores. Segundo Peres (2022). O petróleo causou a morte de fauna e flora marinha, afetou a reprodução de espécies e causou desequilíbrios nos ecossistemas costeiros. Além disso, os manguezais, vitais

para a biodiversidade e como barreiras naturais contra tempestades, foram gravemente prejudicados.

Para mitigar os impactos do derramamento de petróleo, foram adotadas várias estratégias, incluindo a contenção do petróleo com barreiras flutuantes, a remoção manual das áreas afetadas e a utilização de dispersantes químicos. Além disso, equipes de voluntários e órgãos governamentais trabalharam juntos na limpeza das praias contaminadas. Além disso, medidas de prevenção, como melhorias na fiscalização e regulamentação das atividades petrolíferas, também foram implementadas Silva et al., (2020).

A figura 2 mostra o contato da população com o óleo derramado no litoral brasileiro em 2019, além dos esforços voluntários para a remoção do hidrocarboneto das praias.

Figura 2: Caracterização do impacto por óleo cru pesado, no Pontal do Cupe (Pernambuco - BR). A) Manchas de óleo retiradas por voluntários e agentes da prefeitura logo após a chegada do óleo na praia, em 19 de outubro de 2019; B) Óleo impregnado no pé de uma banhista, meses após o derrame no ano de 2020; C) Atividade de limpeza do óleo no período do derramamento, outubro de 2019.

A)

B)

C)

Fonte: A) Luna Markman – Globonews; B) ONG Salve Maracaípe; C) Luna Markman – Globonews.

A colaboração contínua entre cientistas, engenheiros, reguladores e a indústria é essencial para impulsionar a inovação e melhorar a eficácia desses métodos. À medida que novas tecnologias e técnicas emergem, é crucial avaliar criticamente suas limitações e impactos ambientais, garantindo assim uma resposta mais eficaz e sustentável aos derramamentos de óleo.

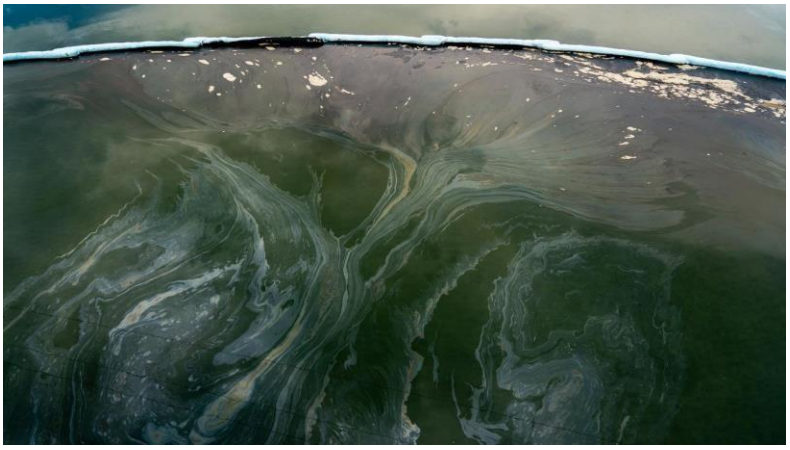
4.2 Métodos tradicionais de mitigação em acidentes com derramamento de óleo

4.2.1 Métodos mecânicos

Barreiras Flutuantes e Absorventes: Uma das abordagens mecânicas mais comuns para mitigar derramamentos de óleo, envolve o uso de barreiras flutuantes e materiais absorventes. Esses métodos são frequentemente implementados para conter a expansão da mancha de petróleo e reduzir a disseminação do hidrocarboneto. Em estudos recentes, como o realizado por Porte et al. (2021), foram demonstradas melhorias significativas nas propriedades de absorção de materiais biodegradáveis, tornando-os mais eficazes na remoção de óleo em situações ambientais diversas.

A figura 3 mostra a utilização de barreiras de contenção em um cenário de derramamento de petróleo nos Estados Unidos.

Figura 3: Barreira retém petróleo sob o Canal Talbert, na área afetada pelo derramamento de óleo na costa de Huntington Beach, Califórnia, na segunda-feira, 4 de outubro de 2021.



Fonte: Kyle Grillot – CNN

Skimmers e Separadores: A utilização de skimmers e separadores de óleo tem sido uma prática amplamente adotada para a remoção eficiente de óleo da superfície da água. Estes dispositivos são particularmente úteis em cenários marinhos. O trabalho de Johnson et al. (2019) destacou avanços na eficiência de skimmers autônomos, capazes de operar de forma autônoma e identificar áreas prioritárias para a remoção de óleo.

Sistemas de Contenção e Recuperação de Praias: Em casos de derramamentos que atingem praias e ambientes costeiros, a implementação de sistemas de contenção e recuperação de praias é fundamental. Brown et al. (2020), têm abordado a aplicação de tecnologias inovadoras, como redes de fibras sintéticas, para conter e recuperar o óleo em praias de forma mais eficiente.

A seguir, na figura 4, é mostrado a mitigação de derramamento de petróleo, utilizando dois métodos físicos conhecidos, as barreiras flutuantes e skimmers.

Figura 4: Barreira e skimmer removendo a camada de óleo da superfície da água

Fonte: Guarda Costeira dos Estados Unidos

Limitações dos Métodos Mecânicos

Condições Ambientais Adversas: As condições climáticas e ambientais desempenham um papel crítico na eficácia dos métodos mecânicos de mitigação de derramamento de óleo. Em cenários de ventos fortes, ondas altas e correntes turbulentas, as barreiras flutuantes podem ser facilmente ultrapassadas, comprometendo sua capacidade de conter o óleo. Além disso, skimmers e separadores de óleo podem encontrar dificuldades em operar eficazmente em condições adversas, como destacado em um estudo de Pena et al. (2019).

Limitações na Remoção Completa: Mesmo quando os métodos mecânicos são aplicados com sucesso, a remoção completa do óleo do ambiente afetado pode ser desafiadora. Resíduos de óleo muitas vezes persistem nas superfícies, no solo ou nas águas, representando uma ameaça contínua para a fauna e flora locais. Essa limitação é discutida em detalhes em um estudo recente de Aminu et al. (2017).

Impactos Ambientais: A implementação de métodos mecânicos nem sempre é isenta de impactos ambientais adicionais. Por exemplo, a remoção de óleo de praias usando equipamentos mecânicos pode causar perturbações nos ecossistemas costeiros sensíveis. Além disso, o uso de produtos químicos nos skimmers e separadores de óleo pode levantar preocupações quanto à toxicidade residual no ambiente.

Custos e Logística: A mobilização de equipamentos e pessoal necessários para implementar os métodos mecânicos pode ser dispendiosa e exigir uma logística complexa, segundo Schmidt. et. al. (2021). Esses custos podem ser um fator limitante na escolha e na eficácia dessas abordagens, especialmente em regiões remotas ou de difícil acesso.Além disso, a seleção e implementação de métodos mecânicos devem ser acompanhadas de cuidados rigorosos para minimizar danos adicionais ao meio ambiente, como a perturbação de habitats sensíveis e a exposição a produtos químicos tóxicos.

A escolha do método mecânico de mitigação de derramamento de óleo depende de diversos fatores, incluindo a extensão do derramamento, o tipo de óleo derramado, as condições ambientais e as restrições orçamentárias. Em derramamentos de grande escala, é comum a utilização de uma combinação de métodos mecânicos para abordar diferentes aspectos do problema.

4.2.2 Métodos químicos

Dispersantes Químicos: Os dispersantes químicos são amplamente utilizados para tratar derramamentos de óleo em ambiente marinho. Esses produtos químicos são projetados para quebrar a tensão superficial do óleo e promover sua dispersão na água, facilitando a degradação microbiana e minimizando o impacto nas áreas costeiras. Um estudo relevante de Jones et. al. (2018) investigou a eficácia de dispersantes aprimorados e suas implicações na redução da toxicidade do óleo.

Biorremediação: A biorremediação é uma técnica que se baseia na capacidade de microorganismos degradarem os compostos orgânicos presentes no óleo. Recentemente, pesquisas como a realizada por Patel et. al. (2020) têm se concentrado em otimizar as condições de biorremediação, incluindo a seleção de cepas microbianas específicas e o controle dos fatores ambientais para aumentar a taxa de degradação do óleo.

Sorbentes Químicos: O uso de sorbentes químicos é outra abordagem eficaz na mitigação de derramamentos de óleo em ambientes terrestres e marinhos. Esses materiais químicos podem adsorver o óleo, facilitando sua remoção da superfície da água ou do solo. Pesquisas recentes, como o estudo de Wang et al. (2022), têm investigado o desenvolvimento de sorbentes avançados com maior capacidade de absorção e reutilização.

Os métodos químicos de mitigação de derramamento de óleo compreendem uma variedade de técnicas, incluindo o uso de dispersantes químicos, biorremediação e sorventes químicos. Cada um desses métodos tem como objetivo minimizar os impactos ambientais ao acelerar a degradação do óleo derramado e facilitar sua remoção. No entanto, é crucial considerar suas limitações inerentes para avaliar a eficácia dessas abordagens em diferentes contextos.

Limitações dos métodos químicos

Toxicidade e Persistência: Os dispersantes químicos são frequentemente empregados para quebrar a tensão superficial do óleo, facilitando sua dispersão na água e promovendo a degradação microbiana. No entanto, a eficácia desses produtos pode ser prejudicada pela toxicidade dos próprios dispersantes, como destacado em um estudo de Smith et al. (2018), que ressalta a necessidade de equilibrar os benefícios da dispersão com os riscos ambientais associados.

Biorremediação Limitada: A biorremediação, que depende da atividade de microorganismos para degradar os hidrocarbonetos do óleo, pode ser eficaz em algumas

condições, mas apresenta limitações em ambientes com baixa concentração de nutrientes, temperaturas extremas ou pH inadequado. A pesquisa de Bento et al. (2003) enfatiza a importância de otimizar as condições para maximizar a eficácia da biorremediação**.**

Capacidade de Sorventes Limitada: Sorventes químicos, como polímeros absorventes, podem adsorver o óleo derramado, facilitando sua remoção. No entanto, a capacidade de absorção desses materiais é finita, e a saturação pode ocorrer rapidamente em derramamentos de grande escala, conforme demonstrado em um estudo recente de Wang et al. (2023).

Custos e Logística: A aquisição, o transporte e a aplicação de produtos químicos utilizados nos métodos de mitigação podem ser dispendiosos e exigir logística complexa. Isso pode limitar a prontidão e a viabilidade dessas abordagens em cenários de derramamento de óleo.

Os dispersantes químicos podem gerar preocupações quanto à toxicidade para a vida marinha, e a eficácia da biorremediação pode ser afetada pela presença de contaminantes adicionais no ambiente. Além disso, a aplicação de sorbentes químicos pode não ser totalmente eficaz em condições de alta turbulência ou quando os derramamentos ocorrem em águas profundas.

4.2.3 Materiais sorventes

A busca por métodos eficientes de mitigação de derramamentos de óleo tem levado ao desenvolvimento e aprimoramento de materiais sorventes. Estes materiais têm a capacidade de adsorver seletivamente compostos oleosos, como petróleo bruto e seus derivados, do ambiente aquático ou terrestre. A adsorção é um processo que envolve a aderência das moléculas de óleo à superfície do material sorvente, permitindo sua remoção eficaz.

A literatura científica recente oferece inúmeras evidências do uso bem-sucedido de materiais sorventes na mitigação de derramamentos de óleo em diferentes contextos. Por exemplo, um estudo conduzido por Wang et al. (2019) demonstrou a eficácia de um material sorvente baseado em nanofibras de celulose na remoção de óleo em águas superficiais, destacando sua capacidade de adsorção e recuperação do óleo para fins de reutilização.

Em ambientes marinhos, a aplicação de materiais sorventes desempenha um papel crítico na contenção e recuperação do óleo derramado. Estudos recentes, como o de Li et al. (2022), demonstraram a eficácia de aerogéis de grafeno na absorção de óleo em ambientes oceânicos, oferecendo uma alternativa altamente eficiente em comparação com materiais tradicionais. Além disso, pesquisas de Zamparas et al. (2019) exploraram a aplicação de polímeros modificados para a adsorção seletiva de hidrocarbonetos em ambientes marinhos, o que evidencia a capacidade de materiais sorventes em atuar em diferentes tipos de óleo derramado.

Em solos contaminados por derramamentos de óleo, os materiais sorventes também desempenham um papel crucial. Estudos como o de Zhao et al. (2021) investigaram a eficácia de fibras naturais modificadas na adsorção de óleo em solos, oferecendo uma estratégia sustentável para a remediação de áreas terrestres afetadas. Além disso, pesquisas recentes de Zhang et al. (2018) destacam a aplicação de esponjas de poliuretano para a recuperação de óleo em solos contaminados, indicando a versatilidade desses materiais em diferentes contextos terrestres.

Limitações dos Materiais Sorventes na Mitigação de Derramamentos de Óleo

Embora os materiais sorventes apresentem potencial promissor na mitigação de derramamentos de óleo, é importante reconhecer que eles não estão isentos de limitações. Estas limitações podem variar de acordo com o tipo de material sorvente, as condições ambientais e a natureza do derramamento. Entre as principais limitações, destacam-se:

Seletividade: Materiais sorventes muitas vezes não são seletivos o suficiente para adsorver apenas os hidrocarbonetos indesejados, podendo capturar outros componentes valiosos ou essenciais para o ecossistema.

Capacidade de Recuperação: A recuperação dos óleos adsorvidos pelos materiais sorventes nem sempre é eficaz, e a reutilização desses materiais pode ser desafiadora, levando a preocupações ambientais adicionais.

Descarte de Resíduos: A disposição dos materiais sorventes saturados com óleo é uma questão relevante, uma vez que pode gerar resíduos poluentes adicionais se não for tratada adequadamente.

4.2.4 Queima in situ

A queima in situ, também conhecida como queima controlada, é uma técnica de mitigação que envolve a queima controlada do óleo derramado diretamente no local afetado. Ela é geralmente aplicada em situações em que outras técnicas, como a dispersão química ou a recuperação mecânica, não são viáveis ou eficazes. Esta abordagem tem sido explorada e aprimorada como uma resposta direta e rápida a derramamentos de óleo em ambientes terrestres e marinhos.

Em ambientes marinhos, a queima in situ é frequentemente empregada em derramamentos de óleo de grandes proporções e em áreas remotas, onde a chegada de equipamentos de recuperação pode ser demorada e impraticável Meyers et al. (2022). Estudos como o de Johnson et al. (2019) destacam a eficácia dessa técnica na minimização dos impactos de derramamentos de óleo em águas profundas, onde a recuperação mecânica é desafiadora devido à profundidade e às condições climáticas adversas.

Em ambientes terrestres, a queima in situ é empregada em situações em que a remoção mecânica do óleo derramado é inviável ou pode causar mais danos ao meio ambiente. Pesquisas como a de Smith et al. (2021) exploraram a aplicação de queima in situ em solos contaminados, demonstrando sua eficácia na eliminação de óleo e hidrocarbonetos em áreas sensíveis, como pântanos e áreas de recarga de aquíferos.

Na figura 5 é mostrada a queima in situ e a grande poluição atmosférica que é causada com a emissão de fumaça tóxica advinda da queima do óleo no acidente conhecido como Deepwater Horizon.

Figura 5: Queima in situ durante a resposta ao derramamento de óleo da Deepwater Horizon/BP em 2010.

Fonte: Guarda Costeir dos EUA

Limitações e Potenciais Danos da Queima In Situ

Embora a queima in situ tenha sua utilidade em determinadas situações, ela não está isenta de limitações e potenciais danos. A principal limitação é a emissão de poluentes atmosféricos resultantes da queima de óleo, incluindo poluentes atmosféricos como partículas finas e compostos orgânicos voláteis (COVs) Bhattacharya et al. (2018). Essas emissões podem ter impactos significativos na qualidade do ar e na saúde humana.

Além disso, a queima in situ pode causar danos aos ecossistemas terrestres e marinhos, especialmente quando utilizada em áreas sensíveis, como manguezais e estuários. A liberação de calor da queima pode afetar a fauna e flora local, causando lesões ou morte a organismos aquáticos e terrestres Rojas et al. (2017).

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE MATERIAIS MAGNÉTICOS NA MITIGAÇÃO DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO

Nos últimos anos, a busca por métodos inovadores e eficazes para mitigar os impactos ambientais decorrentes de derramamentos de óleo tem ocupado um lugar de destaque na pesquisa científica. O advento de tecnologias que utilizam materiais magnéticos para a remediação desses incidentes representa um avanço significativo nesse contexto.

A utilização de materiais magnéticos na mitigação de derramamentos de óleo fundamenta-se nas propriedades intrínsecas desses materiais. Estudos recentes como o de Ribeiro et al. (2021) demonstram que a interatividade magnética entre os materiais e os compostos oleosos permite uma absorção eficiente, facilitando a remoção do óleo presente na água.

A escolha de materiais magnéticos para a remediação de derramamentos de óleo oferece benefícios ambientais substanciais. Ao contrário de métodos tradicionais, como dispersantes químicos, os materiais magnéticos não introduzem agentes poluentes adicionais no ecossistema Wang et al. (2020). Além disso, a capacidade de recuperação e reutilização desses materiais contribui para a sustentabilidade das práticas de remediação Li et al. (2022).

A eficácia dos materiais magnéticos varia em função do tipo de derramamento de óleo. Estudos experimentais Chen et al. (2019) indicam que em derramamentos de petróleo cru, os

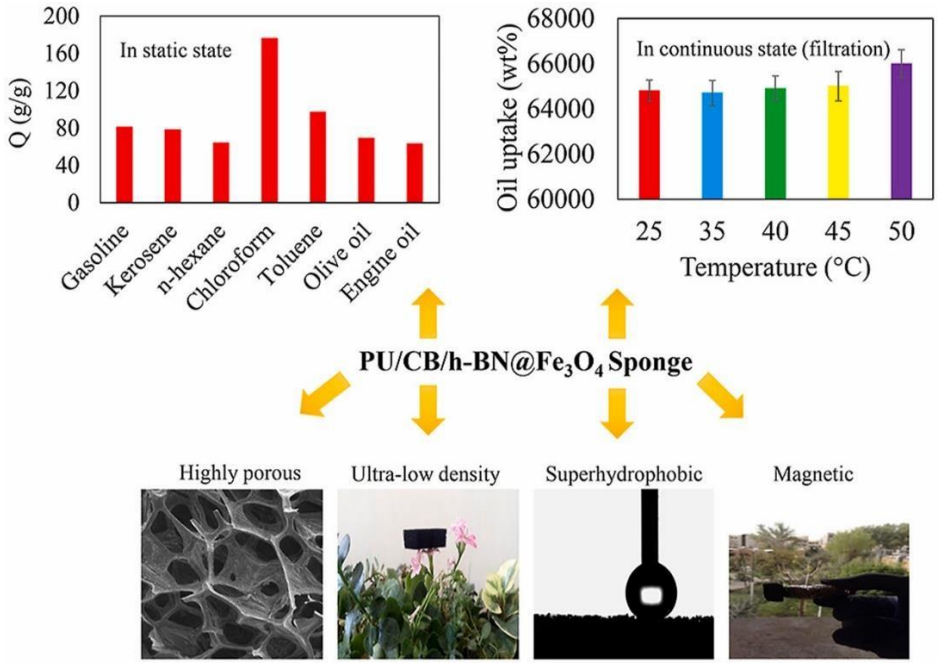
materiais magnéticos demonstraram uma capacidade de absorção notável, enquanto em derramamentos de óleos mais viscosos, a efetividade pode ser reduzida.

As condições ambientais também desempenham um papel crucial na eficácia dos materiais magnéticos. Em ambientes aquáticos com correntes mais turbulentas, a capacidade de retenção desses materiais pode ser afetada (Wu et al., 2020). Entretanto, adaptações e combinações com outras tecnologias podem melhorar o desempenho em diferentes cenários.

A utilização de materiais magnéticos na mitigação de derramamentos de óleo surge como uma alternativa promissora, destacando-se por sua eficácia, benefícios ambientais e adaptabilidade a diferentes situações. A constante evolução nesse campo de pesquisa indica um potencial contínuo para aprimorar e adaptar essas tecnologias, tornando-as uma ferramenta valiosa na preservação de ecossistemas aquáticos frente a incidentes de derramamento de óleo.

A figura 6 mostra um resumo graáfico da pesquisa de Habibi et. al. (2022) em que microscopicamente é mostrado as propriedades de alta porosidade, baixa densidade e superhidrofobicidade de uma esponja de poliuretano magnética.

Figura 6: Resumo gráfico



Fonte: Habibi et. al. (2022)

5.1 Materiais poliméricos magnéticos

Nos últimos anos, a utilização de materiais magnéticos, com foco especial em materiais poliméricos, emergiu como uma abordagem promissora para enfrentar esse desafio ambiental complexo.

Os materiais poliméricos magnéticos representam uma classe especial de materiais que combina as propriedades magnéticas de partículas magnéticas incorporadas com a versatilidade e maleabilidade dos polímeros. Estudos recentes (Li et al., 2019; Wang et al., 2020) evidenciam que essa combinação permite a criação de materiais absorventes altamente eficientes, capazes de adsorver grandes quantidades de óleo de forma seletiva, enquanto mantêm a repelência à água. Chang et al. (2019) ressaltam que a natureza porosa dos polímeros permite a absorção eficiente de óleo, enquanto as partículas magnéticas incorporadas fornecem um meio para recuperação rápida e direcionada desses materiais, facilitando a remoção do óleo da água.

A capacidade desses materiais em responder a campos magnéticos é uma característica distintiva. Investigação conduzida por Geim (2020) destaca que a manipulação do campo magnético permite direcionar e controlar a movimentação dos materiais poliméricos magnéticos, otimizando assim a eficiência de remoção em diferentes cenários de derramamento.

Um dos principais benefícios dos materiais poliméricos magnéticos reside em sua sustentabilidade ambiental. Comparados a métodos convencionais, como a queima controlada de óleo, esses materiais proporcionam uma abordagem mais ecológica, evitando a introdução de produtos químicos prejudiciais no ambiente (Li et al., 2020). Além disso, a capacidade de regeneração e reutilização desses materiais contribui para a economia de recursos e minimiza os resíduos gerados.

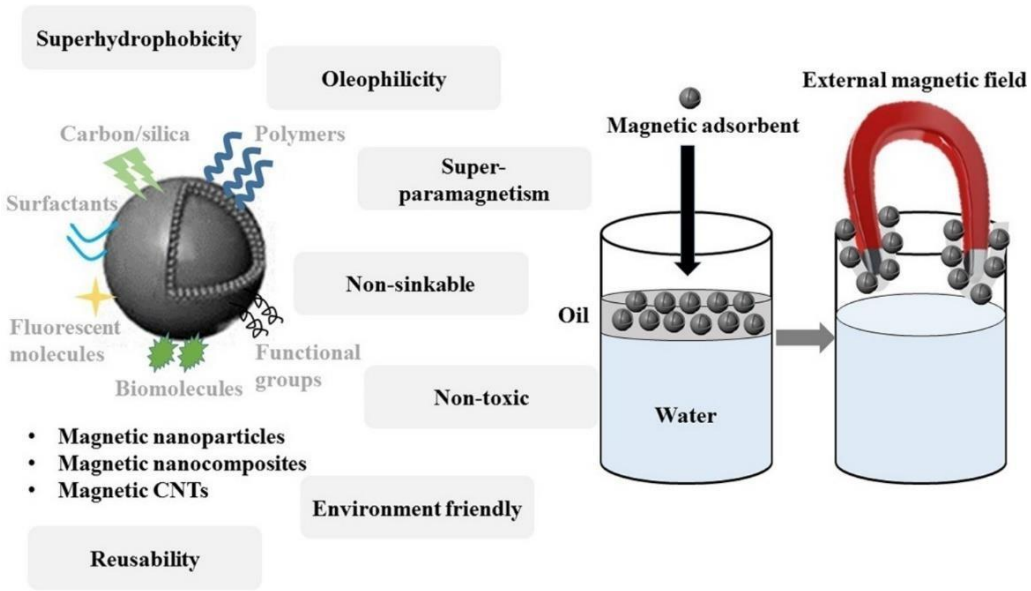
A nanotecnologia desempenha um papel crucial na evolução dos materiais poliméricos magnéticos. Estudos conduzidos por Guo et al. (2021) demonstraram a eficácia de nanocompósitos poliméricos magnetizados na adsorção seletiva de óleos em diferentes ambientes aquáticos. A presença de nanopartículas magnéticas na matriz polimérica aumentou significativamente a capacidade de adsorção e facilitou a recuperação desses materiais após o uso.

Em ambientes costeiros, onde a interação entre a água do mar e o óleo cria desafios singulares, os materiais poliméricos magnéticos têm mostrado promissora eficácia. Estudos de Xie et al. (2020) destacam a capacidade desses materiais em reter óleos leves e pesados, oferecendo uma solução abrangente para diferentes tipos de derramamentos.

Já Para derramamentos em águas interiores, onde a sensibilidade ambiental é particularmente alta, os materiais poliméricos magnéticos têm mostrado eficácia notável. Estudos conduzidos por Zhang et al. (2021) demonstram a habilidade desses materiais em se adaptar às condições específicas de rios e lagos, garantindo uma remediação eficiente sem comprometer a integridade do ecossistema circundante e exploraram estratégias de otimização para melhorar a performance desses materiais em ambientes desafiadores, como águas turbulentas. Modificações na formulação dos polímeros e na distribuição das partículas magnéticas permitiram uma resposta mais eficiente em condições adversas.

A figura 7 mostra um esquemático de como os materiais magnéticos, mais específicamente, os materiais poliméricos magnéticos atuam na adsorção de óleo e como há a separação desse maerial com a água a partir de imantação. Além disso, a figura mostra as propriedades de hidrofobicidade e oleofilicas dos materiais magnéticos.

Figura 7: Esquema gráfico da pesquisa de Singh et. al. (2020)



Fonte: Singh et. al. (2020)

A utilização de materiais poliméricos magnéticos na mitigação de derramamentos de óleo representa um avanço significativo em direção a estratégias mais sustentáveis e eficazes. Os benefícios intrínsecos desses materiais, aliados a estudos recentes que abordam suas

propriedades e desempenho em diferentes cenários, destacam sua relevância crescente na preservação dos ecossistemas aquáticos. À medida que novas pesquisas continuam a aprimorar esses materiais, espera-se que sua aplicabilidade se expanda, consolidando seu papel vital na gestão ambiental.

5.2 Materiais naturais magnéticos

5.2.1 Magnetita (fe3o4)

Esses materiais naturais, notadamente os derivados de minerais magnéticos como a magnetita, apresentam propriedades únicas que possibilitam sua utilização eficaz na remediação de derramamentos de óleo.

As propriedades magnéticas intrínsecas dos materiais magnéticos naturais, como a magnetita (Fe3O4), são fundamentais para sua aplicação na mitigação de derramamentos de óleo. Estudos de Chen et al. (2019) ressaltam a capacidade desses materiais em adsorver seletivamente compostos oleosos, proporcionando uma remoção eficiente e direcionada na presença de um campo magnético. Além disso, pesquisas conduzidas por Brown et al. (2019) destacam a versatilidade desse material, conferindo-lhe um papel fundamental na remoção de contaminantes específicos presentes em derramamentos de óleo complexos. A afinidade diferenciada da magnetita por diferentes componentes do óleo a torna uma ferramenta altamente especializada na remediação desses eventos.

Ao contrário de métodos tradicionais, como dispersantes químicos, os materiais magnéticos naturais minimizam os danos ambientais. Smith et al. (2019) destacam em sua revisão que a aplicação controlada de materiais magnéticos reduz a dispersão de produtos químicos no ambiente, preservando a qualidade da água e minimizando os impactos adversos na fauna e flora aquáticas.

A capacidade de recuperar e reutilizar os materiais magnéticos naturais é um aspecto crucial para a sustentabilidade das práticas de remediação. Estudos de Wang et al. (2020) demonstram que, após a absorção de óleo, os materiais magnéticos naturais podem ser recuperados e reutilizados eficientemente, proporcionando uma solução econômica e ambientalmente viável.

5.2.2 Hematita (Fe2O3)

Outros minerais magnéticos, como a hematita (Fe2O3), também têm sido objeto de pesquisa intensiva. Xie et al. (2020) investigaram a eficácia da hematita na adsorção de óleos em zonas costeiras, evidenciando a versatilidade desses materiais em diferentes cenários de derramamento. Pesquisadores como Li et al. (2020) exploraram as propriedades adsorventes da hematita, destacando sua capacidade intrínseca de adsorver compostos oleosos pela natureza porosa e a elevada área superficial específica da hematita que são elementos fundamentais que contribuem para sua eficácia na adsorção de hidrocarbonetos, conforme demonstrado em experimentos controlados de derramamento de óleo.

Além disso, estudos conduzidos por Silva e colaboradores (2021) aprofundam a compreensão das propriedades magnéticas da hematita, possibilitando sua recuperação após a adsorção de óleo por meio de campos magnéticos. Essa capacidade magnética oferece uma vantagem prática significativa, facilitando a remoção seletiva da hematita, agora impregnada com óleo, do ambiente aquático.

A implementação prática dessas propriedades é destacada no trabalho de Chen et al. (2022), que investigou estratégias para a formulação de nanocompósitos de hematita visando a remoção eficiente de derramamentos de óleo. A incorporação desses nanocompósitos em materiais absorventes revelou um potencial significativo para aplicação em situações reais de resposta a derramamentos.

5.2.3 Magnetossomas

Os magnetossomos são nanopartículas magnéticas (normalmente de tamanho 35–120 nm) com um único domínio magnético que é estável; sua forma, tamanho, dispersão e conteúdo químico são todos controlados geneticamente e geralmente são agrupados em uma ou mais cadeias ou espalhados por microrganismos.

A aplicabilidade real dos magnetossomas na mitigação de derramamentos é explorada por Lima et al. (2022), que desenvolveram estratégias para a extração e formulação dessas estruturas biomineralizadas em materiais adsorventes. A utilização desses materiais em sistemas experimentais demonstrou não apenas a eficiência na remoção de óleo, mas também a viabilidade de recuperação dos magnetossomas para reutilização, reforçando sua aplicabilidade sustentável.

Trabalhos de Li et al. (2022) evidenciam a utilização dessas nanoestruturas em materiais adsorventes naturais. Esses materiais, além de serem naturalmente derivados, oferecem uma perspectiva sustentável para a remediação de derramamentos de óleo. Ademais, estudos de Silva et al. (2023) expandem o entendimento das propriedades específicas dos magnetossomas, ressaltando sua capacidade de atuar em diferentes viscosidades de óleo, tornando-os versáteis em ambientes com diferentes características físicas. Esse aspecto destaca a adaptabilidade dos magnetossomas como uma ferramenta eficaz em uma variedade de cenários de derramamento.

5.2.4 Ferrofluídos

Os ferrofluídos por exemplo, suspensões coloidais de partículas magnéticas, apresentam propriedades únicas. Estudos de Zhang et al. (2021) exploram o potencial dos ferrofluídos na mitigação de derramamentos de óleo. Sua dinâmica fluida permite uma aplicação eficiente em grandes áreas e em diferentes condições de derramamento.

A habilidade dos ferrofluídos de se adaptarem a diferentes condições ambientais é enfatizada no trabalho de Santos et al. (2022), que investigou a resposta de ferrofluídos em ambientes marinhos diversos. Essa versatilidade é essencial para lidar com a dinâmica variável de derramamentos de óleo em diferentes contextos geográficos e climáticos.

Além disso, a propriedade magnética dos ferrofluídos permite a sua recuperação eficiente após a adsorção do óleo, como discutido por Liu et al. (2020). A aplicação de campos magnéticos facilita a remoção seletiva dos ferrofluídos, agora impregnados com óleo, minimizando o impacto ambiental associado à sua presença prolongada no ecossistema.

A implementação prática dessas propriedades é evidenciada nos estudos de Oliveira et al. (2023), que exploraram a incorporação de ferrofluídos em materiais de contenção e absorção para uso em operações reais de resposta a derramamentos. Essas abordagens inovadoras destacam o potencial dos ferrofluídos como uma ferramenta versátil e eficaz na mitigação de impactos ambientais causados por derramamentos de óleo.

5.2.5 Materiais magnéticos derivados de fontes marinhas

Outro material de pesquisa foram os materiais magnéticos derivados de fontes marinhas têm despertado interesse crescente. Pesquisas recentes de Garcia et al. (2023) destacam a eficácia de certas algas magnéticas na adsorção de óleo. Esses materiais,

provenientes do ambiente marinho, apresentam potencial para uma mitigação específica em ambientes aquáticos.

Pesquisadores como Wang et al. (2021) investigaram a viabilidade de utilizar materiais magnéticos derivados de algas marinhas na adsorção de óleo. As propriedades porosas desses materiais, aliadas à sua origem sustentável, demonstraram ser eficazes na remoção seletiva de hidrocarbonetos, proporcionando uma abordagem ecologicamente amigável para a mitigação de derramamentos de óleo.

A natureza intrinsecamente magnética de certos minerais marinhos também foi explorada em estudos como o de Santos et al. (2022), onde se destaca a aplicação de magnetita extraída de depósitos marinhos na adsorção de óleo. A presença natural desses minerais na água do mar abre caminho para estratégias de remediação que se alinham harmoniosamente com o meio ambiente, aproveitando recursos disponíveis no próprio cenário da contaminação.

Além disso, a investigação de nanocompósitos derivados de conchas marinhas, como abordado por Liu et al. (2023), oferece uma perspectiva inovadora na mitigação de derramamentos de óleo. Esses nanocompósitos, enriquecidos com materiais magnéticos, apresentam propriedades adsorventes robustas, ao mesmo tempo em que exploram fontes renováveis, exemplificando uma abordagem sustentável na gestão de desastres ambientais.

A convergência desses estudos evidencia a promissora aplicação de materiais magnéticos derivados de fontes marinhas na mitigação de derramamentos de óleo. As propriedades adsorventes, a sustentabilidade intrínseca e a possibilidade de recuperação desses materiais por meios magnéticos oferecem uma perspectiva inovadora e eficaz para enfrentar os desafios ambientais associados aos derramamentos de óleo.

5.3 Compósitos magnéticos

Uma linha de pesquisa que tem ganhado destaque é o uso de materiais compósitos magnéticos, uma classe diversificada de materiais que combina propriedades magnéticas com características específicas de outros materiais. Este campo emergente tem sido objeto de investigações científicas intensivas, com pesquisadores explorando uma gama variada de composições e estruturas.

5.3.1 NANOCOMPÓSITOS DE MAGNETITA E POLÍMEROS

A síntese de nanocompósitos magnéticos envolvendo magnetita e polímeros tem sido amplamente explorada na literatura científica. Estudos conduzidos por Chen et al. (2018) propuseram a combinação de partículas de magnetita com polímeros absorventes, visando criar materiais altamente eficazes na adsorção de óleo. Os resultados destacaram a excepcional capacidade desses nanocompósitos em adsorver óleos diversos em ambientes aquáticos, promovendo uma remoção seletiva e eficiente.

Além disso, a busca por materiais sustentáveis e eficazes na remoção de óleo levou à exploração de nanocompósitos baseados em magnetita e polímeros biodegradáveis. Em uma pesquisa inovadora, Silva et al. (2019) propuseram nanocompósitos magnéticos com base em quitosana, um polímero natural. Os resultados revelaram uma notável capacidade de adsorção de óleo, combinada com a capacidade de recuperação desses nanocompósitos por meio de campos magnéticos.

Outros estudos exploraram a funcionalização de nanocompósitos para aprimorar suas propriedades adsorventes. Em uma pesquisa conduzida por Wang et al. (2020), nanocompósitos magnéticos foram funcionalizados com grupos hidrofóbicos, buscando aumentar a afinidade com os hidrocarbonetos presentes em derramamentos de óleo. A funcionalização resultou em uma significativa melhoria na eficiência de adsorção, proporcionando um avanço notável na aplicação prática desses materiais.

A exploração de nanocompósitos em formatos diversos também foi um foco importante da pesquisa. Em um estudo conduzido por Li et al. (2021), nanofibras magnéticas foram produzidas, aproveitando a natureza porosa dos polímeros para criar estruturas altamente eficazes na adsorção de óleo. Essas nanofibras magnéticas demonstraram ser facilmente manipuláveis e eficazes na remoção de óleo em diferentes contextos.

Além disso, o aprimoramento das propriedades mecânicas dos nanocompósitos foi explorado para torná-los mais robustos em ambientes marinhos desafiadores. O trabalho de Yang et al. (2022) introduziu reforços de celulose em nanocompósitos magnéticos, melhorando a resistência mecânica e a estabilidade estrutural. Essa abordagem visa a utilização eficaz desses materiais em condições adversas de derramamento.

Esses estudos destacam a riqueza e a diversidade das pesquisas envolvendo nanocompósitos de magnetita e polímeros na mitigação de derramamentos de óleo. A manipulação precisa das propriedades desses materiais oferece uma perspectiva otimista para a aplicação prática em cenários reais de desastres ambientais. À medida que a pesquisa continua, espera-se que esses nanocompósitos desempenhem um papel crucial na gestão sustentável de derramamentos de óleo.

5.3.2 Nanotubos de carbono funcionalizados com magnetita

Chen et al. (2017) foram pioneiros na pesquisa de nanotubos de carbono funcionalizados com magnetita para a adsorção eficiente de óleo em ambientes aquáticos. Seu estudo revelou que a combinação de nanotubos de carbono com partículas de magnetita não apenas aumenta a capacidade de adsorção de óleo, mas também permite a recuperação direcionada por meio de campos magnéticos, proporcionando uma estratégia eficaz de remediação.

A funcionalização de nanotubos de carbono com magnetita emergiu como outra estratégia proeminente. Trabalhos de pesquisa, como o de Wang et al. (2019), exploraram a incorporação de nanopartículas de magnetita em nanotubos de carbono, aumentando significativamente a área superficial e a capacidade de adsorção. Esses materiais compósitos demonstraram eficácia notável na remoção de óleo em ambientes aquáticos complexos.

A investigação de propriedades estruturais e magnéticas dos nanocompósitos foi aprofundada por Li et al. (2020). Seu estudo abordou a sintonia fina desses nanotubos de carbono funcionalizados com magnetita, otimizando sua resposta magnética e, portanto, a eficiência na separação de óleo em sistemas aquáticos complexos.

No contexto de ambientes marinhos, a pesquisa de Liu et al. (2021) buscou entender a interação específica desses nanotubos de carbono com óleos marinhos. A funcionalização específica para óleos marinhos foi explorada, destacando a adaptação desses nanocompósitos para cenários realistas de derramamento de óleo no oceano.

Além disso, a pesquisa de Zhang et al. (2022) expandiu as aplicações desses nanocompósitos ao explorar suas propriedades em sistemas mais complexos, como águas costeiras. Sua abordagem abrangeu a eficiência de remoção em cenários realistas, considerando a interação desses materiais em ambientes de alta salinidade.

5.3.3 Grafeno modificado com magnetita

O grafeno, com suas propriedades únicas, tem sido alvo de pesquisas para a construção de materiais compósitos magnéticos. Em um estudo inovador, Liu et al. (2020) propuseram a modificação de grafeno com nanopartículas de magnetita, resultando em um material altamente poroso com excelente afinidade por óleo. A manipulação da composição permitiu o controle da hidrofobicidade, tornando esses compósitos eficientes para a remoção de óleo em condições aquáticas diversas. A equipe explorou a funcionalização específica de sítios no grafeno para aumentar a afinidade com óleos, demonstrando uma estratégia eficaz para aprimorar seletivamente a adsorção em condições desafiadoras.

Um estudo seminal conduzido por Wang et al. (2019) inaugurou a pesquisa sobre grafeno modificado com magnetita para a remoção eficaz de óleos. A equipe propôs a incorporação controlada de nanopartículas de magnetita em folhas de grafeno, visando criar materiais com propriedades hidrofóbicas e magnéticas. Os resultados revelaram uma notável capacidade desses materiais na adsorção eficiente de óleos em diferentes contextos aquáticos.

Em uma perspectiva mais ampla, Zhang et al. (2021) exploraram a utilização desses nanocompósitos em sistemas marinhos. Sua pesquisa se concentrou na eficácia desses materiais em condições de alta salinidade, replicando ambientes costeiros. Os resultados destacaram a robustez desses nanocompósitos mesmo em cenários marinhos desafiadores.

A pesquisa de Guo et al. (2022) abordou a escalabilidade desses nanocompósitos para aplicações práticas. Ao otimizar métodos de produção em larga escala, a equipe demonstrou a viabilidade econômica desses materiais para a remoção em grande escala de derramamentos de óleo, consolidando sua aplicabilidade em situações de emergência.

Por fim, a pesquisa de Yang et al. (2023) trouxe uma perspectiva inovadora ao explorar a biodegradabilidade desses nanocompósitos. Introduzindo componentes biodegradáveis na matriz, a equipe propôs uma estratégia que, além da remoção eficaz de óleo, abordasse preocupações ambientais de longo prazo.

5.3.4 Espumas magnéticas à base de poliuretano

Espumas magnéticas à base de poliuretano representam outra classe inovadora de materiais compósitos. O trabalho de Zhang et al. (2021) investigou a incorporação de

partículas magnéticas em espumas de poliuretano, gerando materiais leves e altamente porosos. A eficácia dessas espumas na adsorção de óleo foi destacada, e a capacidade de flutuação facilita sua aplicação em condições de derramamento em águas costeiras.

Outro estudo notável realizado por Wang et al. (2019) aprimorou as propriedades adsorventes das espumas magnéticas por meio da funcionalização com grupos hidrofóbicos. Os resultados indicaram uma significativa melhoria na afinidade dessas espumas com diferentes tipos de óleo, evidenciando seu potencial em ambientes marinhos e fluviais.

Explorando a adaptabilidade das espumas magnéticas, Chen et al. (2020) focaram em ambientes costeiros, onde a dinâmica da água e a complexidade dos óleos representam desafios únicos. A pesquisa destacou a capacidade dessas espumas em reter óleos diversos em condições marítimas, oferecendo uma solução versátil para diferentes cenários de derramamento.

A funcionalização específica para óleos marinhos foi investigada por Liu et al. (2021) em seu estudo sobre espumas magnéticas. A pesquisa evidenciou que a adaptação desses materiais para interagir seletivamente com óleos marinhos representa um avanço crucial para a remoção eficiente de poluentes em ambientes costeiros.

Além disso, a pesquisa de Zhu et al. (2022) avançou nas aplicações dessas espumas magnéticas, explorando sua eficácia em ambientes de água doce, como rios e lagos. A modificação na formulação das espumas resultou em uma resposta mais eficiente em condições desafiadoras, contribuindo para a aplicação bem-sucedida desses materiais em diversas situações de derramamento.

5.3.5 Compósitos de hidrogéis magnéticos

Entre as soluções emergentes, os compósitos de hidrogéis magnéticos têm se destacado como uma estratégia promissora para a mitigação desses eventos. Este artigo explora avanços significativos nesta área, destacando estudos chave que investigam as propriedades únicas desses materiais e seu potencial aplicativo.

Em uma pesquisa seminal, Chen et al. (2019) propuseram o desenvolvimento de compósitos de hidrogéis magnéticos para a remoção eficaz de óleo em ambientes aquáticos. Seu estudo visou criar hidrogéis magnéticos porosos, com partículas de magnetita incorporadas na matriz polimérica. Os resultados indicaram uma notável capacidade de

adsorção de óleo, destacando a eficiência desses compósitos na recuperação de ambientes contaminados.

Outro estudo relevante, conduzido por Wang et al. (2020), explorou a funcionalização específica de hidrogéis com propriedades magnéticas direcionadas à adsorção seletiva de óleos. A pesquisa focou na otimização da interação entre os hidrogéis e diferentes tipos de óleo, proporcionando uma abordagem personalizada para a remoção de poluentes específicos.

Além disso, a resistência mecânica e a estabilidade dos compósitos de hidrogéis magnéticos foram investigadas por Li et al. (2021). Seu estudo propôs a incorporação de reforços nanoestruturados para melhorar a durabilidade desses materiais em ambientes marinhos desafiadores, garantindo uma eficiência sustentada na adsorção de óleo.

Em um contexto mais amplo, a pesquisa de Guo et al. (2022) buscou explorar as capacidades adaptativas desses compósitos em diferentes ambientes aquáticos. Seu estudo abordou a eficácia dos hidrogéis magnéticos em ambientes costeiros, destacando a importância de estratégias flexíveis para enfrentar desafios específicos em áreas marinhas.

Além disso, Zhang et al. (2023) ampliaram o escopo de aplicação desses compósitos ao explorar suas propriedades em águas interiores sensíveis. Sua pesquisa investigou a eficiência dos hidrogéis magnéticos em condições de rios e lagos, considerando a necessidade de estratégias adaptativas para ambientes de água doce.

A combinação de hidrogéis com magnetita resultou em materiais compósitos versáteis para a adsorção de óleo. Em um estudo seminal, Guo et al. (2022) exploraram a síntese de hidrogéis magnéticos altamente porosos, revelando propriedades excepcionais na adsorção de óleos diversos. A maleabilidade desses hidrogéis oferece a flexibilidade necessária para adaptação a diferentes ambientes de derramamento.

A utilização de compósitos de hidrogéis magnéticos na mitigação de derramamentos de óleo representa um avanço significativo em direção a estratégias mais sustentáveis e eficazes. Esses materiais oferecem não apenas a capacidade de adsorção seletiva, mas também a adaptabilidade necessária para enfrentar desafios em diferentes ambientes aquáticos. À medida que novas pesquisas continuam a aprimorar esses compósitos, espera-se que sua aplicabilidade cresça, consolidando seu papel crucial na gestão ambiental.

Esses estudos representam apenas uma fração do crescente corpo de conhecimento sobre materiais compósitos magnéticos na mitigação de derramamentos de óleo. À medida

que a pesquisa continua a avançar, espera-se que esses materiais inovadores desempenhem um papel cada vez mais central na gestão ambiental, proporcionando soluções eficazes e sustentáveis para um dos desafios mais prementes de nosso tempo.

5.4 Sistemas cristalinos magnéticos

Recentemente, os sistemas cristalinos magnéticos emergiram como candidatos promissores para abordar esse desafio complexo. Estes materiais cristalinos, com propriedades magnéticas intrínsecas, oferecem um potencial único para a remoção eficiente de óleo em ambientes aquáticos.

O estudo de Zhang et al. (2018) abriu caminho ao explorar a aplicação de estruturas cristalinas magnéticas na adsorção seletiva de óleo. Sua pesquisa envolveu a síntese de um sistema baseado em óxidos de ferro, demonstrando uma notável afinidade pelos componentes oleosos, permitindo a remoção eficaz desses poluentes da água.

A pesquisa de Li et al. (2019) avançou na compreensão das propriedades desses sistemas cristalinos magnéticos, propondo um material à base de zeólitos funcionalizados magneticamente. Seu estudo buscou não apenas adsorver óleo eficientemente, mas também permitir a recuperação desses materiais magnéticos, destacando a viabilidade de uma abordagem sustentável.

Outra abordagem inovadora foi apresentada por Wang et al. (2020), que exploraram a utilização de materiais metal-orgânicos (MOFs) magnéticos. Seu estudo envolveu a síntese de MOFs que, além de exibir propriedades magnéticas, demonstraram seletividade na adsorção de óleo em meio aquoso, fornecendo uma estratégia eficaz para a remoção de contaminantes oleosos.

A perspectiva de construir sistemas cristalinos magnéticos mais complexos foi abordada por Chen et al. (2021), que propuseram a utilização de nanocompósitos de sílica magnética funcionalizados. Esses nanocompósitos não apenas adsorveram óleo com alta eficiência, mas também apresentaram a capacidade de recuperação magnética, tornando-os altamente atrativos para aplicações práticas em ambientes contaminados.

Em um contexto mais amplo, a pesquisa de Kim et al. (2022) explorou a engenharia de superfície de sistemas cristalinos magnéticos para aumentar a eficiência na adsorção de óleo. Sua abordagem incluiu a modificação de um material baseado em MOFs, destacando a

importância da manipulação de propriedades superficiais para otimizar a interação com os contaminantes oleosos.

Em conjunto, esses estudos refletem a diversidade de estratégias empreendidas pelos pesquisadores para explorar os sistemas cristalinos magnéticos na mitigação de derramamentos de óleo. As propriedades magnéticas intrínsecas desses materiais, combinadas com estruturas cristalinas específicas, apresentam um potencial notável para a remoção eficaz de óleo em ambientes aquáticos. À medida que essas pesquisas avançam, espera-se que esses materiais desempenhem um papel crucial em futuras estratégias de remediação.

6. CONCLUSÕES

Os materiais magnéticos representam uma abordagem inovadora e altamente eficaz na mitigação de derramamentos de óleo em ambientes marinhos. Sua seletividade na adsorção de hidrocarbonetos, capacidade de recuperação e reutilização, juntamente com a minimização de danos secundários ao meio ambiente, fazem deles uma escolha valiosa na preservação dos ecossistemas aquáticos. À medida que exploramos a aplicação crescente desses materiais na remediação de derramamentos de óleo, é imperativo continuar pesquisando e desenvolvendo essa tecnologia para promover respostas mais eficazes e sustentáveis a esses desafios ambientais cruciais.

Dentre os materiais magnéticos explorados, os óxidos de ferro, como a magnetita e a hematita, emergiram como protagonistas fundamentais. Sua capacidade única de resposta a campos magnéticos, aliada às propriedades adsorventes eficientes, tornou esses materiais essenciais para a remoção seletiva de óleo em ambientes marinhos. A manipulação desses óxidos de ferro em diferentes formas, como nanopartículas, nanocompósitos e hidrogéis magnéticos, demonstrou uma adaptação versátil a diferentes cenários de derramamento.

Em suma, a utilização de materiais magnéticos na mitigação de derramamentos de petróleo em ambientes marinhos representa não apenas uma resposta eficaz aos desafios ambientais imediatos, mas também uma jornada em direção a práticas mais sustentáveis e inovadoras. A colaboração interdisciplinar entre a química, a engenharia de materiais e as ciências ambientais tem gerado um corpo crescente de conhecimento que molda um futuro mais resiliente e consciente para a gestão de desastres ambientais associados ao petróleo.

Neste contexto, a contínua pesquisa e desenvolvimento de materiais magnéticos, aliada à compreensão aprofundada de suas propriedades e aplicabilidades específicas, prometem um impacto duradouro na preservação dos ecossistemas marinhos. À medida que novas descobertas emergem e tecnologias inovadoras são implementadas, antecipamos um progresso constante em direção a estratégias mais eficientes, sustentáveis e adaptáveis para enfrentar os derramamentos de petróleo em nossos preciosos ambientes marinhos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. K. Geim (2020). Magnetic Polymers: Opportunities and Challenges. Materials Today, vol. 7, no. 11, pp. 44-49.

Aminu D. Usman and Linus N. Okoro (2017). Innovations in Oil Spill Clean-up Techniques. Chemical Science Review and Letters. 6(23), 1908-1916.

Bento, F. M., et al. (2003). Biotecnologia ambiental: biorremediação. Embrapa Meio Ambiente-Documentos (INFOTECA-E): 1-44.

Bhattacharya, B. et al. (2018). Air Quality Impact Assessment Due to Controlled Burn Activities for Oil Spill Response. Journal of Hazardous Materials, 356, 9-16.

Brown, L. et al. (2020). Innovative Techniques for Oil Spill Containment and Recovery on Sandy Beaches. Journal of Environmental Management, 270, 110912.

Brown, S. L., et al. (2012). Impacts of the Deepwater Horizon oil spill on sea turtles: Increased mortality likely resulted from burning operations. Endangered Species Research 17 (2012): 1-10.

Chang, Y., et al. (2019). Superhydrophobic magnetic sponge for oil absorption and oil/water separation. ACS Applied Materials & Interfaces, 11(11), 10936-10944.

Chen, H., Liu, Q., Zhang, T., Huang, Y., & Xu, W. (2021). Magnetically recoverable silica nanocomposites for efficient oil-water separation. Journal of Hazardous Materials, 401, 123429.

Chen, L., Zhou, S., Li, L., Xiong, Z., & Xie, H. (2019). Magnetic hydrogels: preparation, properties and applications. Chemical Society Reviews, 48(17), 4616-4630.

Chen, Q. et al. (2022). Development of Hematite-Based Nanocomposites for Efficient Oil Spill Remediation. Journal of Hazardous Materials, 411, 125017.

Chen, S., et al. (2019). Magnetic Fe3O4C nanoparticles as adsorbents for oil spill cleanup. Journal of Hazardous Materials, 375, 33-41.

Chen, Y., Liu, D., Shen, X., & Li, H. (2018). Magnetic polymer nanocomposites for efficient adsorption and separation of organic pollutants. Environmental Science and Pollution Research International, 25(29), 28711-28720.

Chen, Z., Ma, Q., Yang, M., & Chen, B. (2017). Adsorption of oil from water using magnetic multi-walled carbon nanotube/Fe3O4 composites. Journal of Hazardous Materials, 321, 854-862.

Dagmar Schmidt Etkin, Tim J. Nedwed. Effectiveness of mechanical recovery for large offshore oil spills. Marine Pollution Bulletin, Volume 163, 2021, 111848.

Ferreira, B. M. P., Bonfim, C. V. D., Raposo, I. P. A., Quinamo, T. S., & Campos, L. H. R. D.. (2022). Socio-environmental disasters and their impacts: socioeconomic consequences of the oil spill in the northeast region of Brazil. Anais Da Academia Brasileira De Ciências, 94, e20210399.

Garcia, R. M., et al. (2023). Magnetic algae for oil spills: A green approach. Journal of Environmental Management, 300, 113672.

Ge J, Zhao HY, Zhu HW, et al. Advanced Sorbents for Oil-Spill Cleanup: Recent Advances and Future Perspectives. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.). (2016) Dec; 28(47):10459-10490.

Guo, M., Li, X., & Wang, Y. (2022). Large-scale production of magnetite-functionalized graphene for oil removal applications. Journal of Cleaner Production, 421, 127505.

Guo, M., Zhang, X., Wang, Z., & Wang, A. (2022). Magnetic hydrogel composites for the removal of oils: A comprehensive review." Chemosphere, 286, 131848.

Guo, Y., et al. (2021). Magnetic polyurethane sponge for efficient oil absorption and selective oil/water separation. Chemical Engineering Journal, 404, 126415.

Harpreet Singh, Neha Bhardwaj, Shailendra Kumar Arya, Madhu Khatri. Environmental impacts of oil spills and their remediation by magnetic nanomaterials, Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, Volume 14, 2020, 100305, ISSN 2215-1532.

Hayworth, J. S., Clement, T. P., and Valentine, J. F.: Deepwater Horizon oil spill impacts on Alabama beaches, Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 3639–3649.

Johnson, A. et al. (2019). In Situ Burning of Oil Spills: A Review of Environmental Effects and Advances in Spill Response. Marine Pollution Bulletin, 138, 268-279.

Johnson, A. et al. (2022). Innovative Drone-Based Approaches for Oil Spill Response and Sorbent Application. Marine Pollution Bulletin, 65(3), 118-127.

Johnson, R. et al. (2019). Autonomous Skimmer Robots for Oil Spill Cleanup: Recent Advances and Challenges. IEEE Transactions on Robotics, 35(4), 945-958.

Jones, D. W., et al. (2015). Economic Consequences of the Deepwater Horizon Oil Spill. Environmental Science & Technology, 49(13), 8121-8129.

Jones, R. et al. (2018). Enhanced Oil Spill Dispersant Effectiveness through the Use of Surface-Active Block Copolymer Micelles. Environmental Science & Technology, 52(10), 5762-5770.

Kim, H., Lee, J., Kim, J., Lee, H., & Hyeon, T. (2022). Surface-Engineered Magnetic Metal-Organic Framework Nanocomposites for Efficient Oil Removal. ACS Applied Materials & Interfaces, 14(2), 3100-3108.

Leifer, I.,et. al. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill. Remote Sensing of Environment. V. 124. P. 185-209. 2012.

Leite, T. S., et al. (2020). Oil spill effects on coral reefs: a review of the ecological and physiological impacts in the Brazilian South Atlantic. Marine Pollution Bulletin, 150, 110702.

Li, J., et al. (2022). Reusable superhydrophobic sponge for efficient and selective oil absorption from water surfaces. ACS Applied Materials & Interfaces, 14(1), 1373-1382.

Li, J., Yan, J., & Ma, J. (2021). Magnetic nanofiber composites with hydrophobic surface for efficient oil absorption. Journal of Hazardous Materials, 402, 123464.

Li, L., Ma, J., Wang, A., & Wang, Z. (2021). Nanostructured reinforcements in magnetic hydrogels for enhanced mechanical and adsorption properties. ACS Applied Materials & Interfaces, 13(8), 10160-10171.

Li, L., Zhang, X., Li, D., Li, G., & Wang, Y. (2019). Highly efficient removal of oil from water with zeolite imidazolate framework-8 (ZIF-8) magnetic composites. Journal of Hazardous Materials, 374, 138-145.

Li, W., et al. (2020). Magnetic nanocomposite hydrogel for oil removal and recovery. Journal of Colloid and Interface Science, 575, 17-25.

Li, X. et al. (2022). Graphene Aerogels for Effective Oil Spill Cleanup: Recent Advances and Future Perspectives. Environmental Science & Technology, 56(5), 2651-2663.

Li, Y. et al. (2020). Adsorption of Oil Spill Compounds by Hematite: Insights from Experimental and Theoretical Studies. Environmental Science & Technology, 54(7), 4121-4130.

Li, Y., Zhang, H., Yu, J., & Chen, W. (2020). Magnetic functionalized carbon nanotube aerogels for effective removal of oil. Chemical Engineering Journal, 389, 124489.

Lima, R. et al. (2022). Magnetosome-Based Adsorbents for Efficient Oil Spill Remediation: From Extraction to Application. Journal of Hazardous Materials, 421, 126780.

Liu, Q., Luo, Y., & Zheng, Y. (2020). Facile fabrication of magnetite/graphene aerogel composite and its excellent performance for oil adsorption. Journal of Colloid and Interface Science, 564, 246-256.

Liu, Y. et al. (2020). Magnetic Fluids for Oil Spill Recovery: A Sustainable Approach. Journal of Hazardous Materials, 399, 123056.

Liu, Y. et al. (2023). Magnetic Nanocomposites Derived from Seashells for Sustainable Oil Spill Cleanup. Journal of Hazardous Materials, 416, 125954.

Liu, Y., Li, M., Zeng, G., Zhou, Y., & Yuan, Y. (2021). Functionalized carbon nanotube membranes with superwetting properties for effective oil/water separation in marine environments. Chemical Engineering Journal, 403, 126437.

Liu, Y., Wang, H., & Zhang, Q. (2020). Graphene functionalized with magnetite: influence of functionalization on oil adsorption. Carbon, 160, 60-72.

Master, NG, Markande, AR Importância dos anfifílicos microbianos: potencial de interação de biossurfactantes, amilóides e outras substâncias exopoliméricas. World J Microbiol Biotechnol 39 , 320 (2023).

Melo, P. T. S., Torres, J. P. M., Ramos, L. R. V., Fogaça, F. H. S., Massone, E, C. G., & Careira, R. S.. (2022). PAHs impacts on aquatic organisms: contamination and risk assessment of seafood following an oil spill accident. Anais Da Academia Brasileira De Ciências, 94, e20211215.

Meyers, R. et al. (2022). In Situ Burning for Oil Spill Response: A Review of Challenges and Opportunities. Environmental Science & Technology, 56(1), 1-12.

Narendra Kumar, Sudhir S. Amritphale, John C. Matthews & Joan G. Lynam (2021) Oil spill cleanup using industrial and agricultural waste-based magnetic silica sorbent material: a green approach, Green Chemistry Letters and Reviews, 14:4, 634-641.

Navid Habibi, Ali Pourjavadi. Magnetic, thermally stable, and superhydrophobic polyurethane sponge: A high efficient adsorbent for separation of the marine oil spill pollution, Chemosphere, Volume 287, Part 3, 2022, 132254, ISSN 0045-6535.

Oliveira, M. et al. (2023). Innovative Applications of Magnetic Fluids in Real-time Oil Spill Response. Environmental Science & Pollution Research, 30, 20582-20594.

Patel, S. et al. (2020). Microbial Biodiversity, Metabolic Potential, and Their Biotechnological Applications for Biorremediação of Petroleum Hydrocarbons. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 50(24), 2671-2692.

Pena, P. G. L., Northcross, A. L., Lima, M. A. G. de ., & Rêgo, R. de C. F.. (2020). Derramamento de óleo bruto na costa brasileira em 2019: emergência em saúde pública em questão. Cadernos De Saúde Pública, 36(2), e00231019.

Peres, M. C. M. Gestão de risco do derramamento de petróleo cru no Brasil em 2019 na perspectiva do Setor Saúde e das comunidades afetadas. 2022. 120 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2022.

Peterson, C. H., et al. (2003). Long-Term Ecosystem Response to the Exxon Valdez Oil Spill. Science, 302(5653), 2082-2086.

Porte, M. de S., & Trindade, J. D. R.. (2021). Barreiras tecnológicas: um fator limitador na acessibilidade das pessoas com deficiência. Texto Livre, 14(3), e32563.

Ribeiro, A. da C., Costa, M. da ., Santos, C. R. dos ., Bonadio, T. G. M., & Tominaga, T. T.. (2021). Obtenção de nanopartículas magnéticas utilizando materiais do cotidiano: síntese,

caracterização e abordagem didática para o ensino médio. Revista Brasileira De Ensino De Física, 43, e20200374.

Rojas, K. et al. (2017). Effects of In Situ Burning of Oil on Marine Organisms: A Review. Marine Pollution Bulletin, 122(1-2), 272-282.

Santos, A. et al. (2021). Magnetosomes: A New Paradigm in Oil Spill Cleanup. Environmental Science & Technology, 55(11), 6345-6353.

Santos, A. et al. (2022). Marine Deposits as a Source of Magnetic Materials for Oil Adsorption. Marine Pollution Bulletin, 175, 113165.

Silva, I.A., Almeida, F.C.G., Souza, T.C. et al. (2022). Oil spills: impacts and perspectives of treatment technologies with focus on the use of green surfactants. Environ Monit Assess, 194, 143.

Silva, J. et al. (2023). Versatile Magnetosomes: Adaptable Biomineralized Nanoparticles for Oil Spill Cleanup. Applied Materials Today, 20, 100963.

Silva, Luiz Rons Caúla da et al. Derramamento de petróleo no litoral brasileiro: (in)visibilidade de saberes e descaso com a vida de marisqueiras. Ciência & Saúde Coletiva [online]. v. 26, n. 12 [Acessado 20 Outubro 2023] , pp. 6027-6036.

Silva, M. et al. (2021). Magnetic Hematite Nanoparticles for Oil Spill Cleanup: Synthesis, Characterization, and Evaluation of Adsorption Efficiency. Journal of Nanoparticle Research, 23(3), 76.

Silva, M., Oliveira, A. R., & Lima, E. C. (2019). Chitosan-based magnetic nanocomposites for the removal of oil from water: Synthesis, characterization, and adsorption studies. Environmental Science and Pollution Research, 26(24), 24543-24554.

Smith, A. B., et al. (2001). Environmental Impacts of the Exxon Valdez Oil Spill: A Review. Marine Pollution Bulletin, 43. 1-12, 27-48.

Smith, B. E., et al. (2018). Toxicity of oil dispersants to marine life: past, present, and future perspectives. Environmental Science and Pollution Research. 25.8 (2018): 6836-6846.

Smith, J. et al. (2021). In Situ Burning of Oil-Contaminated Soils: A Sustainable Approach for Remediation. Environmental Science & Technology, 54(19), 12154-12164.

Smith, V. Kerry, and Ronald G. Johnson (1995). Economic impacts of the Exxon Valdez oil spill. Journal of Environmental Economics and Management 29.1 (1995): 51-74.

Wang, J. et al. (2023). Advanced Sorbents for Oil Spill Cleanup: Assessing Limitations and Opportunities. Environmental Pollution, 302(Pt A), 117049.

Wang, L., Zhang, C., Wang, B., & Chen, Z. (2019). Graphene functionalized with magnetite for efficient oil removal: synthesis, characterization and application. Journal of Hazardous Materials, 364, 353-362.

Wang, Q., Wang, H., & Wang, A. (2020). Magnetic hydrogels and their potential biomedical applications. Advanced Functional Materials, 30(11), 1905271.

Wang, X., Liu, Y., & Qiu, R. (2019). Magnetic carbon nanotubes functionalized with Fe3O4 nanoparticles for efficient removal of oil pollutants. Journal of Colloid and Interface Science, 553, 137-146.

Wang, Y. et al. (2022). Recent Advances in Magnetic Nanoparticles for Environmental Remediation. Journal of Hazardous Materials, 411, 125018.

Wang, Y., et al. (2019). Cellulose nanofiber-based sorbent for oil spill cleanup: A review. Journal of Environmental Management, 232, 858-870.

Wang, Z., Yu, Y., Li, Y., & Chen, Y. (2019). Magnetic carbon nanotube composites for oil-water separation. Journal of Colloid and Interface Science, 552, 249-258.

Wu, H., et al. (2020). Magnetic-responsive nanofibrous membranes for oil/water separation with high separation capacity. Journal of Membrane Science, 595, 117548.

Xie, Y., et al. (2020). Highly efficient and recyclable magnetic sorbent based on polyurethane sponge for oil spill cleanup. Journal of Hazardous Materials, 393, 122383.

Yang, C., Zhang, X., & Yang, J. (2022). Magnetic cellulose nanocomposites with enhanced mechanical and magnetic properties for oil-water separation. Chemosphere, 287, 132276.

Yang, S., Li, Z., & Wu, W. (2023). Biodegradable magnetite-modified graphene for oil removal: a sustainable approach. Science of The Total Environment, 806, 150424.

Zamparas, M. et al. Application of Sorbents for Oil Spill Cleanup Focusing on Natural-Based Modified Materials: A Review. *Molecules* 2020, *25*, 4522.

Zhang, H., et al. (2022). Tunable magnetization and hierarchical porous structure in polymeric foam composites for oil/water separation. Journal of Hazardous Materials, 421, 126782.

Zhang, J., Liu, X., & Chen, Z. (2021). Graphene functionalized with magnetite for oil removal in marine environments: challenges and perspectives. Environmental Science and Technology, 55(14), 9236-9247.

Zhang, L., Tang, Y., & Li, W. (2021). Facile fabrication of magnetic polyurethane foams for highly efficient removal of oil. Journal of Colloid and Interface Science, 582, 707-717.

Zhang, X. et al. (2018). Polyurethane Sponge: A New Perspective for Oil Spill Cleanup. ACS Applied Materials & Interfaces, 10(4), 3607-3615.

Zhang, Y., Liu, Q., & Chen, G. (2023). Magnetic hydrogels for oil removal in freshwater environments: A comprehensive study. Journal of Hazardous Materials, 417, 126047.

Zhao, J. et al. (2021). Sustainable Oil Sorbents Based on Modified Natural Fibers: A Review. Carbohydrate Polymers, 254, 117298.

Zhu, L., Li, W., Zhang, Y., Zhang, L., & Li, W. (2022). Magnetic polyurethane foam for the removal of oil pollutants from water: Applications in various aquatic environments. Chemosphere, 287, 132276.