

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
ENGENHARIA DE PETRÓLEO

ANDREW PORTO MOURA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE SORVENTES INORGÂNICOS NA  
REMEDIAÇÃO DE DERRAMAMENTO DE PETRÓLEO**

MACEIÓ – AL

2023

ANDREW PORTO MOURA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE SORVENTES INORGÂNICOS NA  
REMEDIAÇÃO DE DERRAMAMENTO DE PETRÓLEO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Colegiado do Curso  
de Engenharia de Petróleo do Centro  
de Tecnologia da Universidade  
Federal de Alagoas, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Petróleo.

Orientação: Prof. Dr. Leonardo  
Mendonça Tenório de Magalhães  
Oliveira

MACEIÓ – AL

2023

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

M929a Moura, Andrew Porto.

Análise da eficiência de sorventes inorgânicos na remediação de derramamento de petróleo / Andrew Porto Moura. – 2023.  
64 f. : il. color.

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

Bibliografia: f. 49-64.

1. Derramamento de óleo. 2. Técnicas de remediação. 3. Sorventes. I. Título.

CDU: 54-414 : 665.61

# FOLHA DE APROVAÇÃO

ANDREW PORTO MOURA

## ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE SORVENTES INORGÂNICOS NA REMEDIAÇÃO DE DERRAMAMENTO DE PETRÓLEO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do grau de Engenheiro de Petróleo.

Aprovado em 18 de julho de 2023.

### Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 Leonardo Mendonça Tenório de Magalha  
Data: 17/08/2023 13:55:52-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Leonardo Mendonça Tenório de Magalhães

Documento assinado digitalmente  
 VANDERSON BARBOSA BERNARDO  
Data: 17/08/2023 14:40:19-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

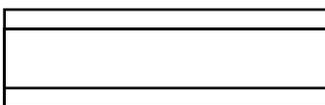
---

Prof. Vanderson Barbosa Bernardo

Documento assinado digitalmente  
 JOSE LEANDRO DA SILVA DUARTE  
Data: 27/08/2023 05:16:49-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. José Leandro da Silva Duarte



*Dedico este trabalho aos meus pais e a minha irmã, sem eles a minha caminhada até aqui  
não seria possível.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me guiado durante essa caminhada. Aos meus pais Washigton e Noélia, por todos ensinamentos, oportunidades e apoio. À minha irmã Andreza, por todo companheirismo e amizade.

Ao meu orientador, o Professor Doutor Leonardo Mendonça Tenório de Magalhães Oliveira, por toda paciência, sabedoria, compreensão e ensinamentos. Obrigado por tudo.

Aos professores da graduação, sou grato pelos conhecimentos e experiências passados.

Aos meus familiares e amigos que me acompanharam ao longo dessa jornada e que contribuíram de alguma forma para o meu crescimento profissional.

À Universidade Federal de Alagoas, por me proporcionar estudo de qualidade e experiências enriquecedoras.

“O saber a gente aprende com os mestres e os livros. A sabedoria se aprende é com a vida e com os humildes.”  
Cora Coralina

## RESUMO

A indústria petrolífera desde o processo de prospecção até o momento do transporte do petróleo, acaba gerando algum tipo de poluição ambiental. Referindo-se, especificamente, ao transporte marítimo, observa-se que, quando ocorrem derramamentos de óleo os impactos aos ecossistemas podem ser terríveis, com ameaça à biodiversidade, e a sociedade nos âmbitos ambiental, social e econômico. O presente trabalho revisou de forma abrangente o progresso feito na remediação de derramamento de óleo, especialmente dos sorventes inorgânicos. Para a pesquisa foram usados como fontes de dados científicos o Web of Science ScienceDirect (Elsevier), Scielo, Google Acadêmico, no período de novembro de 2022 a fevereiro de 2023. Os resultados obtidos indicaram que os sorventes com maior capacidade sorptiva são a espuma de grafeno/polipirrol e o polietileno. Os resultados também chegaram a conclusão que os sorventes inorgânicos possuem características desejáveis para a retirada de petróleo derramado no mar, como o baixo custo, a capacidade de não-inflamabilidade, o volume desse material existente no meio ambiente, dentre outras propriedades, porém sua produção em larga escala ainda é limitada.

**Palavras-chave:** Derramamento de óleo. Sorventes inorgânicos. Sorventes. Técnicas de remediação.

## ABSTRACT

The oil industry, from the prospecting process to the moment of oil transportation, ends up generating some kind of environmental pollution. Referring specifically to maritime transport, it is observed that, when oil spills occur, the impacts on ecosystems can be terrible, with a threat to biodiversity, and society in the environmental, social and economic spheres. The present work comprehensively reviewed the progress made in oil spill remediation, especially of inorganic sorbents, for the research the Web of Science ScienceDirect (Elsevier), Scielo, Google Scholar, were used as scientific data sources in the period of November from 2022 to February 2023. The results obtained indicated that the sorbents with the highest absorption capacity are graphene/polypyrrole foam and polyethylene. The results also reached the conclusion that inorganic sorbents have desirable characteristics for the removal of oil spilled at sea, such as low cost, non-flammability, the volume of this material existing in the environment, among other properties, however, its large-scale production is still limited.

**Keywords:** Oil spill. Inorganic sorbents. Sorvents. Remediation techniques.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Número de derramamentos médios (7–700 toneladas) e grandes (>700 toneladas) no período que vai da década de 1970 a 2020.....	15
Tabela 2: Principais sorventes aplicados na remediação de derramamento de petróleo.....	45

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Barreira tipo cortina.....	18
Figura 2: Recuperação do óleo por bombeamento na praia Barequeçara, 1994.....	19
Figura 3: Aplicação de dispersantes, Operação TEBAR V, em S. Sebastião – SP.....	20
Figura 4: Utilização da técnica de jateamento em derrame de óleo.....	22
Figura 5: Aplicação de turfa vegetal em limpeza de praia.....	23
Figura 6: Sistema de poço com uma bomba.....	25
Figura 7: Sistema de poço com duas bombas.....	26
Figura 8: Barreiras reativas permeáveis.....	27
Figura 9: Fases dos contaminantes presentes na matriz do solo.....	30
Figura 10: No processo de adsorção, as moléculas do adsorvato se acumulam na superfície do sorvente sem penetrar no adsorvente.....	31

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
2.1	Objetivo Geral .....	12
2.2	Objetivos Específicos .....	12
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
4.2	Derramamento de petróleo .....	14
4.3	Técnicas de Remediação Convencionais .....	16
4.3.1	Principais métodos de remediação em ambientes marinhos .....	16
4.3.2	Principais métodos de remediação em solo e lençóis freáticos .....	24
4.4	Materiais Sorventes .....	30
4.4.1	Sorventes naturais orgânicos .....	32
4.4.2	Sorventes naturais inorgânicos .....	33
4.4.3	Sorventes sintéticos .....	33
<b>5</b>	<b>SORVENTES INORGÂNICOS</b> .....	<b>35</b>
5.1	Zeólitas .....	36
5.2	Argilominerais .....	36
5.3	Adsorventes de sílica.....	37
5.4	Adsorventes minerais modificados .....	38
<b>6</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>40</b>
6.1	Principais materiais sorventes inorgânicos testados para derramamento de petróleo .....	40
6.2	Materiais sorventes amplamente aplicados em remediação de derramamento de óleo.....	43
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, os seres humanos intensificaram diversas ações diretas no meio ambiente. Com isso, estudiosos verificaram um aumento nos riscos de problemas ambientais decorrentes dessas ações. Um desses riscos ambientais são os desastres decorrentes de derramamento de óleo proveniente de acidentes que geram grandes danos por um longo período de tempo, atraindo a atenção de órgãos de proteção ambiental na tentativa de mitigar o problema (DE MOURA et al., 2022; ZHOU et al., 2017)

De acordo com Nikkiah et al. (2015), a quantidade de óleo produzida e transportada é muito elevada, o volume anual aproximado é de cinco milhões de toneladas de petróleo que são carregadas através de embarcações, navios, entre outros, por isso, quando ocorrem acidentes, geram impactos de grandes dimensões devido ao alto volume e a toxicidade do material. Segundo a ANP (2023), o volume de petróleo produzido é crescente no Brasil ao longo dos últimos anos e, no ano de 2022, bateu mais um recorde, com uma média 3,021 milhões de barris/dia produzidos.

Esses acidentes estão ocorrendo com maior frequência devido ao aumento da necessidade de petróleo e seus derivados pela sociedade e, conseqüentemente, maiores volumes produzidos e transportados. Com isso, os derramamentos de óleo no mar podem acarretar perda de oxigênio na superfície do oceano, podendo ocasionar inúmeras mortes dos animais que sobrevivem na região. Além disso, quando o óleo é levado à costa, é aderido à areia e pode prejudicar a maricultura, e os locais de turismo e causar danos à saúde os banhistas, aos trabalhadores (DE NEGREIROS et al., 2022).

Atualmente, existem alguns métodos que são aplicados na tentativa de remediar esses desastres de derramamento de petróleo, como *booms*, *skimmers*, métodos químicos como a inserção de dispersantes, de solidificantes, de agentes redutores e a queima do óleo. Porém, essas tecnologias podem ser de alto custo e com geração de resíduos que causam danos ao meio ambiente. (DONG et al. 2014; GE et al. 2014; NIKKHAH et al. 2015; XIONG et al. 2014).

Desse modo, houve um aumento significativo no interesse por parte dos estudiosos para comprovar a aplicabilidade de materiais sorventes em derramamentos de petróleo na tentativa de utilizá-la para remediação em cenários reais. Essa técnica consiste na inserção de

materiais que conseguem absorver, ou seja, penetrar e armazenar o óleo nos espaços internos vazios, e também adsorver, que consiste no acúmulo do óleo na superfície desse mesmo material. A junção dos processos de adsorção e absorção é denominada de sorção. Com isso, as análises indicam que essa técnica se mostra bastante eficiente devido ao baixo custo, a alta taxa de recuperação do petróleo e derivados, além da possibilidade de regeneração para reutilização do material (ANNUNCIADO et al., 2005; BAYAT et al., 2005b; DONG et al., 2014; LIM & HUANG, 2007; WANG et al., 2012).

Segundo Dong et al. (2014), a aplicação dessa técnica pode ocorrer com materiais inorgânicos, que geralmente possuem custo maior e baixa taxa de degradação, e orgânicos (sintéticos ou naturais). Em derramamentos, os materiais que são mais comumente utilizados são os sintéticos. Porém, os naturais são mais indicados pelo impacto ambientalmente positivo (LI et al., 2019; PINTO et al., 2016; TANOBE, 2007; LIM & HUANG, 2007).

Tendo em vista o que foi dito, este trabalho se propõe avaliar através de uma revisão bibliográfica os principais métodos de remoção de óleo, com ênfase no processo de sorção. Além de analisar quais são os principais sorventes de natureza inorgânica, e aferir a capacidade sorvente desses materiais e de outros tipos de materiais sorventes orgânicos e sintéticos para sorção de materiais oleosos para estabelecer uma relação de eficiência entre os materiais sorventes.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar, através de levantamento bibliográfico, a eficiência de materiais sorventes inorgânicos para a sorção de materiais oleosos advindos de derramamento de petróleo.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Levantar e avaliar os sorventes inorgânicos aplicados no derrame de óleo;
- Levantar e avaliar os principais sorventes orgânicos e sintéticos aplicados no derrame de óleo;
- Realizar uma comparação de eficiência da capacidade de sorção desses diferentes sorventes;

### 3 METODOLOGIA

Visando a realização dos objetivos do trabalho proposto, foi feita uma pesquisa bibliográfica através de levantamentos e análises da literatura a respeito da utilização de materiais naturais como agentes sorventes em cenários ambientais de acidentes envolvendo derramamento de petróleo.

Para presente trabalho, a pesquisa bibliográfica foi realizada através de diversas fontes de conhecimento como livros, teses, dissertações, artigos e revistas científicas, nacionais e internacionais, através de fontes de dados científicos como o Web of Science ScienceDirect (Elsevier), Scielo e Google Acadêmico. As referências utilizados na fundamentação deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foram encontradas com o uso das seguintes palavras-chaves: sorção de materiais oleosos, materiais naturais como agentes sorventes, regeneração de materiais naturais, sorption of oily materials, natural materials as sorbent agents, regeneration of natural materials, no período de novembro de 2022 a fevereiro de 2023.

Desse modo, este trabalho foi delimitado na realização de pesquisa bibliográfica sobre a utilização dos principais materiais sorventes utilizados como método de remediação de derramamento de óleo no mar. Com isso, foi realizada uma análise da eficiência desses materiais de acordo com diferentes características necessárias a um bom sorvente de petróleo como fluuabilidade, capacidade sorptiva, onerosidade, possibilidade de regeneração e níveis aceitáveis de contaminantes, de acordo com as normas técnicas vigentes, para que sejam reutilizados, ou até mesmo, descartados sem que hajam prejuízos ambientais, dentre outros parâmetros. Também foi pesquisada a possibilidade de utilizar técnicas modificadas, ou até o uso de mais de um método combinado, a fim de acelerar o processo de limpeza do petróleo no local poluído.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados tópicos provenientes da literatura que fundamentam os trabalhos realizados em relação a remediação de derramamento de petróleo e a utilização dos materiais sorventes. Dessa forma, os princípios dessa temática serão apresentados visando a compreensão da sua utilização.

### 4.2 Derramamento de petróleo

O petróleo e os produtos derivados dele são de extrema importância para as indústrias e demais usuários desses produtos. Com isso, sua demanda e a necessidade de seu transporte aumentaram consideravelmente nos últimos anos. Por apresentar vantagens econômicas e ambientais em relação a outros modais de transporte, o transporte marítimo é um dos meios mais utilizados para o transporte em longas distâncias desses produtos. (CELIK & TOPCU, 2009; ZAHUGI et al., 2012). Em paralelo, ao longo dos anos, há uma evolução tanto da indústria de produção de petróleo, quanto de tecnologias para seu transporte, com superpetroleiros e oleodutos de petróleo bruto e derivados cruzando os oceanos (ITOPF, 2011).

É necessário que o transporte de petróleo e derivados seja adequado e eficiente, pois seu mal uso ameaça ambiental, social e financeiramente o local de impacto em casos de ocorrência de derramamento de petróleo, podendo gerar imensos efeitos de longo prazo que podem durar décadas (ITOPF, 2011).

Segundo a Federação Internacional de Poluição de Proprietários de Petroleiros, o transporte de petróleo bruto no ano de 1980 dobrou quando comparado aos últimos 10 anos (ITOPF, 2020). Com isso, o aumento no número de navios, da densidade de tráfego e das operações portuárias ocorreu de maneira natural para suprir sua alta demanda. Desse modo, é necessário o aumento dos cuidados em prevenção de acidentes, pois o crescimento das atividades no ambiente marinho aumenta os riscos que podem levar a problemas humanos, econômicos e ambientais (YE et al., 2019).

Derramamentos de óleo ocorrem após liberações naturais, onde o óleo atinge a superfície sem interferência de elevação artificial. Mas também ocorrem através do transporte, durante a perfuração e colisão acidental ou naufrágio de petroleiros, falhas em oleodutos e plataformas, dentre outros. Esses derramamentos ocorrem com diferentes dimensões, onde os

menores são mais fáceis de conter com as tecnologias existentes que os derramamentos de maiores dimensões e com maior volume de petróleo (ITOPF, 2018).

O desastre de derramamento de óleo em mar afeta seriamente o ambiente marinho e costeiro, e esta situação resulta não apenas de problemas ambientais, como econômicos e sociais também. Na indústria de petróleo já ocorreram diversos acidentes de grande portes e que causaram impactos na região. Acidentes como o Torrey Canyon (1967), Amoco Cadiz (1978), Atlantic Empress (1979), Ixtoc 1 (1979), Exxon Valdez (1990), ABT Summer (1991) são alguns dos acidentes que causaram maiores efeitos ambientais na história. Devido a notoriedade dos impactos causados por alguns desses acidentes supracitados, estabeleceu-se regulamentações nacionais e internacionais para o transporte de petróleo marítimo, como a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL 73/78) (ABASCAL et al., 2010; TOPOUZELIS,2008; YE et al., 2019).

A Tabela 1 mostra uma redução ao longo dos anos de acidentes envolvendo derramamentos de petróleo. Segundo Itopf (2022), essa tendência acontece devido ao avanço de tecnologias navais, além da criação de regulamentações específicas que determinam como o petróleo deve ser conduzido em diferentes situações. Porém, apesar da diminuição, os números absolutos ainda são altos e necessitam de cuidados e métodos de remediação eficazes.

A Tabela 1 também mostra que os acidentes de grandes derramamentos foram menos numerosos e os pequenos derramamentos ocorrem com maior regularidade e frequência, podendo chegar a ser diários em alguns locais e épocas. Ao somar os derramamentos anuais médios, aproximadamente 120.000 toneladas de óleo por ano são derramados acidentalmente em diversos lugares, como por exemplo terminais de navios, perto de refinarias terrestres e outras instalações similares à medida em que ocorre a tentativa de retirada, transporte e armazenamento do óleo (ITOPF, 2018; ITOPF, 2020).

**Tabela 1:** Número de derramamentos médios (7–700 toneladas) e grandes (>700 toneladas) no período de 1970 a 2020.

<b>Período</b>	<b>7-700 toneladas</b>	<b>&gt;700 toneladas</b>
1970-1979	543	245
1980-1989	360	94
1990-1999	281	77

2000-2009	149	32
2010-2019	45	18
2020	3	0
Total	1381	466

**Fonte:** Adaptado de ITOPF (2020).

Devido aos graves riscos de danos provenientes do derramamento de óleo no meio ambiente, esse tópico é considerado uma importante área de pesquisa, na qual estudiosos realizam vários estudos em diferentes perspectivas desse problema para conhecer os melhores métodos utilizados para diminuir os impactos (GONG & PANG, 2019). Desse modo, segundo Marta-Almeida et al (2013), num caso de acidente, é importante que se monitore a evasão dos hidrocarbonetos em tempo real e escolher o melhor método de resposta para as organizações e autoridades que irão responder à poluição derivada desses acidentes.

#### 4.3 Técnicas de Remediação Convencionais

Niime (2013) diz que a escolha ideal da técnica de limpeza a ser utilizada em caso de acidentes envolvendo derrame de óleo, será em função das circunstâncias do incidente e das diferentes variáveis a serem consideradas, portanto, não há uma única técnica que seja a mais apropriada para todos os casos. Alguns autores como Etkin (1999), consideram que um dos fatores mais importantes para essa escolha é a localização do derramamento, pois envolvem fatores geográficos, políticos e legais do local.

##### 4.3.1 Principais métodos de remediação em ambientes marinhos

Em seguida, aborda-se as principais técnicas de remediação de desastres petrolíferos em ambientes marinhos a serem utilizadas antes da chegada e da contaminação do óleo na costa.

- Limpeza natural

Segundo CETESB (2022), esse tipo de técnica ocorre com a utilização de mecanismos naturais para a limpeza e remoção do petróleo em ambiente marinho. Alguns exemplos são a ação das ondas, das correntes, das marés, dos ventos, das chuvas, da biodegradação, da volatilização, da solubilização, da foto-oxidação, da dispersão, entre outros.

Porém, essas técnicas naturais possuem eficiências variáveis nos locais atingidos pelo derramamento dos hidrocarbonetos, pois dependem das características físicas de cada ambiente e também do tipo de óleo que causou o acidente. Por outro lado, é um método que é priorizado em alguns casos, principalmente nos de menores volumes de óleo, pois não causa danos adicionais às pessoas. No entanto, preferencialmente, deve-se conjugar outros métodos de contenção e limpeza aos naturais (CETESB, 2022).

O óleo derramado durante esses acidentes pode causar efeitos ambientais como toxicidade às determinadas bactérias encontradas no mar inicialmente, porém, ao longo do tempo, ocorre a evaporação das substâncias mais tóxicas ajudando na biodegradação que pode ser acelerada se adicionar alguns nutrientes que estimulam o desenvolvimento de bactérias ajudantes no processo de bio-degradação, ou ainda, pode ser adicionada mais bactérias no local do derramamento, combinando o método natural com outros e acelerando o processo.

Porém, os métodos naturais não combinados devem ser utilizados quando os demais, como a limpeza manual e os adsorventes, não forem indicados para o caso específico, não devendo confundir com negligência. (EPA, 1999; LOPES et al., 2007).

No entanto, Segundo Niime (2013), a utilização de apenas técnicas naturais não é bem vista pela mídia, ONGs e parte da sociedade, que criticam a não utilização de demais métodos mais dinâmicos. Entretanto, ao avaliar um cenário por especialistas, os métodos naturais pode ser escolhido como o mais eficiente para o caso específico.

- Barreiras e *skimmers*

A principal função desses equipamentos é a contenção para retirada do óleo derramado no mar, as barreiras estão representadas na Figura 1. Com isso, são úteis em cenários como o acúmulo de óleo em águas adjacentes a ambientes costeiros ou próximo a regiões de manguezais e marismas (CETESB, 2022).

**Figura 1: Barreira tipo cortina.**



**Fonte:** DAVE et al (2011).

De acordo com Craig et al. (2012), o mecanismo de sucção é o principal para a remoção do petróleo que está em contato direto com a água através de dispositivos de armazenamento temporário que, geralmente, são fáceis de utilizar em áreas onde há o acúmulo de óleo.

- Bombas

Segundo ITOPF (2022), o uso de bombas é ideal para conter o espalhamento do óleo no mar, contendo o movimento flutuante e sua dispersão, pois forma uma barreira para que o óleo não ultrapasse e não atinja áreas sensíveis que poderiam ser prejudicadas caso o óleo atingisse aquele local. Desse modo, o objetivo é que o óleo não desvie para outras regiões e direcioná-lo a um local de coleta para a recuperação.

Entre os impactos que podem causar, é a limitação da área que será feito o uso das bombas, dificuldade de utilizar de bombas portáteis, pois necessitam de fornecimento de energia elétrica em campo, a perturbação sonora e o alto tráfego de profissionais, equipamentos e caminhões para o transporte, que acontecem nas regiões próximas aos acidente quando o bombeamento é utilizado.

**Figura 2:** Recuperação do óleo por bombeamento na praia Barequeçara, 1994.



Fonte: CETESB (2022)

- Dispersantes

A Resolução CONAMA nº 269, de 14 de setembro de 2000 (BRASIL, 2001), regulamenta o uso de dispersantes químicos em derrames de óleo no mar, exemplificado na Figura 3.

Nessa resolução são discretizados os critérios para aplicação de dispersantes em casos distintos, por exemplo, quando existe risco à saúde humana, risco ao meio ambiente, perigo de incêndio, ou quando a contenção de petróleo não está sendo eficiente ou ainda, quando não é recomendado o uso de dispersantes em áreas proibidas (BRASIL, 2001).

**Figura 3:** Aplicação de dispersantes, Operação TEBAR V, em S. Sebastião – SP



**Fonte:** CETESB (2022).

Segundo Niime (2013), a utilização desse método também pode ser combinada com outras técnicas para aumentar a eficácia da retirada do óleo da água. Além disso, pode-se também aplicá-los em superfície e em subsuperfície na tentativa de retirar o petróleo mais denso.

Essa técnica acelera o processo de dispersão no local que foi atingido pela mancha de óleo. Além disso, esse processo é acelerado também com a agitação da água do mar, podendo ser natural, com a ação dos ventos e das correntezas, ou artificial, com a adição de aeronaves e embarcações que, utilizadas de maneira adequada, torna o método mais eficiente (CRAIG et al., 2012).

Ainda segundo Craig et al (2012), os dispersantes são compostos por surfactantes que atuam na interface entre a água e o petróleo. Isso ocorre pelo fato desses líquidos serem imiscíveis, onde naturalmente o processo de mistura seria dificultada. Com isso, a atuação dessa técnica permite que o óleo penetre na água em pequenas partículas, facilitando sua degradação, seja por bactérias ou solventes.

Eles apresentam efetividade menor em petróleo pesado, de baixa densidade e baixa viscosidade, e em óleo superficial, pois o dispersante penetra na água antes de penetrar nos hidrocarbonetos (CRAIG et al., 2012).

- Biorremediação

A técnica de biorremediação consiste na adição de substâncias que proporcionam a aceleração do processo de biodegradação para que o óleo presente na água seja removido. A melhor maneira de biorremediação a ser escolhida depende tanto das características do óleo, quanto das ambientais como o pH, temperatura, níveis de nutrientes e oxigênio, entre outros. (CRAIG et al., 2012; LOPES et al., 2007; MOREIRA, 2011).

Segundo Lee e De Mora (1999), a biorremediação pode ser com bioadição, em que são inseridos microorganismos, como bactérias, para que haja um aumento quantitativo, ou a bioestimulação, em que os microorganismos existentes são nutridos para que o proporcione um desenvolvimento de comunidades autóctones, aumentando a eficácia da degradação do óleo.

Essas culturas bacterianas que são inseridas são aquelas que aumentam a capacidade de degradação do poluente, pois utilizam o óleo para seu próprio crescimento, utilizando-os como fonte de carbono e energia, permitindo metabolizar o petróleo derramado de forma eficaz (Wetler-Tonini et al., 2010).

- Jateamento e lavagem com água corrente

Segundo Lopes et al. (2007), O jateamento pode ser realizado *onshore* ou *offshore*, porém ocorre em maior frequência quando é necessária a retirada de petróleo em costões rochosos ou outras estruturas sólidas. Desse modo, são liberados jatos em pressões variáveis para que o óleo se desprenda da região a ser limpa, como mostrado na Figura 4.

**Figura 4:**Utilização da técnica de jateamento em derrame de óleo.



**Fonte:** PARATEXT (2022)

A água utilizada durante a aplicação da liberação do jato pode ser doce ou salgada, em temperaturas variáveis. Além disso, se necessário, o jateamento pode ser combinado com outras técnicas, ou com substâncias químicas, como dispersantes, que auxiliem a limpeza da região contaminada (LOPES et al., 2007).

- Absorventes

Os absorventes são materiais capazes de absorver o óleo devido às propriedades oleofílicas que permitem retirar o óleo do local contaminado. Podem ser absorventes orgânicos, como a turfa, palha de pinho, e sintéticos ou minerais. O formato é diversificado, geralmente em “salsichões” ou “almofadas” e apresentam porosidade que permitem o armazenamento do líquido na parte interna quando aplicados diretamente sobre o óleo (CETESB, 2022).

Ainda segundo o mesmo autor, o método é bastante útil, pois é ecologicamente sustentável, causando mínimo dano ambiental. Esse produto é disponível em diversos produtos diferentes e deve ser realizada uma escolha ideal do absorvente a ser utilizado para cada caso específico, tipo de óleo e análise das características da região contaminada. Os mais utilizados são a turfa vegetal e outros produtos naturais (Figura 5). (CETESB, 2022).

**Figura 5:** Aplicação de turfa vegetal em limpeza de praia.



**Fonte:** CETESB (2022).

Os principais danos causados pelo uso dessa técnica é a não retirada dos absorventes do local posteriormente à absorção do óleo, pois a degradação natural ocorre em tempo prolongado, por esse motivo, após o acúmulo máximo de óleo no material é indicado a retirada do material junto ao petróleo absorvido por meio de bombas ou recolhedores, principalmente em ambientes sensíveis. Desse modo, apenas alguns absorventes de origem natural não necessitam ser retirados, pois degradam naturalmente (NIIME, 2013).

- Remoção mecânica e manual

De acordo com Lopes et al. (2007), a técnica de remoção mecânica ocorre para a retirada do óleo, principalmente na costa e zonas entre marés, através de equipamentos como retroescavadeiras, caminhões, tratores, dentre outros.

Um impacto negativo da remoção mecânica é que pode não ser possível separar o óleo com eficiência de outros materiais, como a areia, utilizando esse método isoladamente, com isso, retirando grande parte de sedimentos limpos desnecessariamente aumentando a quantidade de resíduos a ser descartados, podendo até ser maior que o volume de óleo retirado. Além disso, podem ocorrer sérios danos ao ecossistema se houver a retirada da fauna, flora e da comunidade biológica local junto da areia. Além disso, o uso de máquinas

pesadas pode causar a compactação do solo superficial, região onde contém maior concentração biológica, podendo alterar o equilíbrio dinâmico e promover processos erosivos (LOPES et al.,2007).

A remoção manual acontece com o auxílio de utensílios menos complexos como pás, carrinhos de mão, baldes, sacolas, dentre outros. Essa técnica é capaz de remover o petróleo de regiões menores e de difícil acesso aos equipamentos mecânicos, como fendas, espaço entre rochas e poças de marés e propicia um baixo impacto ambiental, pois permite uma melhor separação do óleo e da areia. Porém, torna-se um método mais trabalhoso em regiões de maiores dimensões (CETESB, 2022).

- Corte da vegetação

Esse procedimento consistena na retirada da vegetação que possui óleo impregnado podendo ser feito de modo manual ou mecânico. Esse método é geralmente utilizado para as espécies de macrófitas aquáticas tais como gramíneas marinhas e em locais de marismas e manguezais (CETESB, 2022; CASEIRO, 2011).

Existem alguns riscos inerentes a esse processo como a retirada excessiva da flora na região contaminada, podendo provocar alterações no ciclo ambiental local. Além disso, pode ocorrer o pisoteio dos trabalhadores em regiões sensíveis como corais e manguezais, prejudicando as plantas, o substratos ou até espalhando e compactando o óleo em vegetações que não o possuíam, ficando assim mais exposta às substâncias tóxicas do petróleo (CASEIRO, 2011).

#### 4.3.2 Principais métodos de remediação em solo e lençóis freáticos

Segundo Tavares (2013), quando ocorre a contaminação em solo ou lençóis freáticos devem ser utilizadas técnicas que visam reduzir o teor de substâncias contaminantes à níveis considerados seguros e compatíveis com a legislação competetente. Desse modo, serão apresentados os principais processos de remediação em solo e lençóis freáticos.

- Bombeamento e tratamento (*Pump and Treat*)

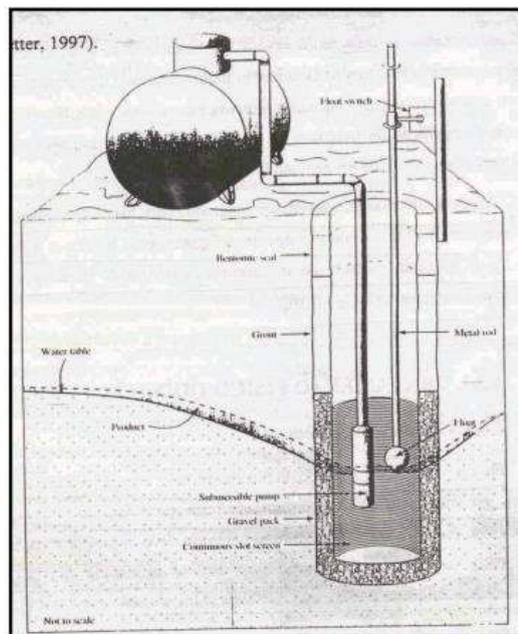
Segundo Tavares (2013), esse processo consiste no bombeamento e tratamento, inicialmente é feita a retirada da água contaminada através de bombeamento e posteriormente esses líquido são levados à superfície para que a água seja tratada

adequadamente utilizando diversas técnicas visando atingir um nível aceitável de descontaminação. Essa limpeza da água contaminada pode ser feita na superfície do local da qual foi retirada (*on-situ*) ou pode ser levada para outro lugar onde também será tratada(*off-situ*).

Para utilizar esse método de maneira adequada é indispensável que exista um alto conhecimento hidrogeológico da área para que o processo seja realizado sem grandes riscos ambientais. Caso necessário e com condições favoráveis, a água após a descontaminação poderá ser reinjetada no aquífero, pois um alto nível de bombeamento pode ocasionar num desequilíbrio ambiental devido ao gradiente hidráulico existente num curto espaço de tempo (TAVARES, 2013).

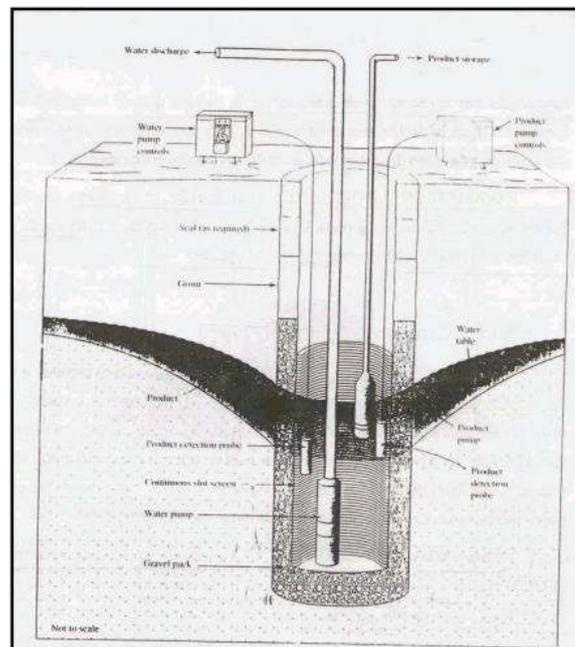
Ainda de acordo com Tavares (2013), o equipamento pode conter apenas uma bomba simples que faz a retirada da água contaminada (Figura 6) ou ainda, de duas bombas (Figura 7) em que uma delas diminui o nível da água subterrânea e outra retira o petróleo presente no aquífero. Esse método é fortemente usado devido a ser economicamente mais atraente que outras técnicas.

**Figura 6:** Sistema de poço com uma bomba.



**Fonte:** Tavares (2013).

**Figura 7:** Sistema de poço com duas bombas.



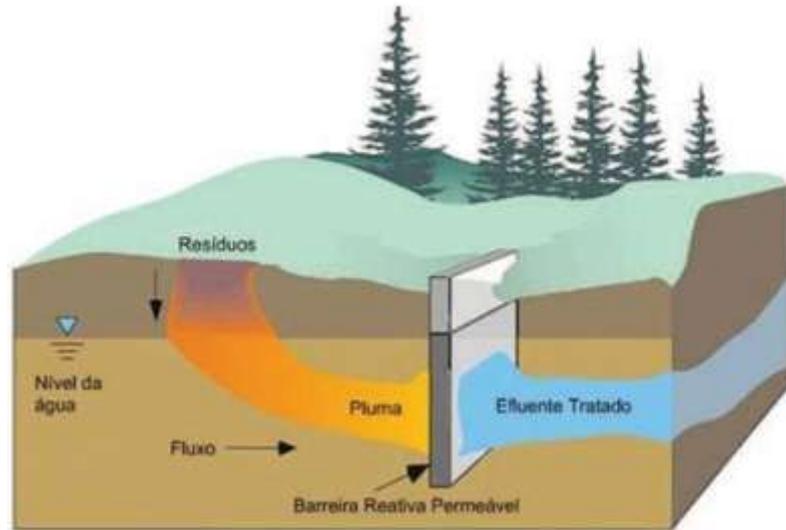
**Fonte:** Tavares (2013).

Ambas as técnicas, bomba única ou dupla, são indicadas para o uso em locais com alto teor de petróleo contaminando a região e pode ser associada com outras técnicas para que a remoção e a descontaminação ocorra de maneira mais rápida e eficaz. Além da remoção de petróleo, esse método também costuma ser bastante aplicado na remoção de hidrocarbonetos clorados, hidrocarbonetos monoaromáticos e chorume (FERREIRA; SILVA; SILVA, 2019).

- Barreiras reativas permeáveis (BRPs)

Uma barreira reativa permeável é um método que consiste na remediação de plumas contaminantes subterrâneas através da colocação de um material reativo no lençol freático que contém petróleo, onde esse material promove a limpeza do petróleo do aquífero, através de reações que aumentam a carga de contaminante, como mostrado na Figura 8 (THIRUVENKATACHARI et al., 2008).

**Figura 8:** Barreiras reativas permeáveis.



. Fonte: Tavares (2013).

Essas barreiras são permeáveis para que permita a passagem da água tratada, mas que realize a contenção do óleo a ser recuperado. Desse modo, ocorre a limpeza do lençol freático sem alterar o fluxo natural da água existente no aquífero e sem reduzir drasticamente o volume natural existente no local, evitando impactos ambientais (THIRUVENKATACHARI et al., 2008).

Assim, elas permitem a limpeza do local antes de contaminar a costa meio de processos físicos, químicos e/ou biológicos, promovendo a retirada dos contaminantes da água que flui através dela. Para isso, é realizada uma esvacação no local que será preenchido com o material reativo junto à aterro. Esse material pode ser carvão junto com areia ou brita, até a profundidade da lâmina d'água (FERREIRA; SILVA; SILVA, 2019).

De acordo com Oliveira (2001) e Tavares (2013), a barreira permeável pode ser feita a partir de diversos materiais que possuam porosidade a fim de permitir a passagem da água, onde cada material é indicado para um tipo de contaminante. A medida que a água contaminada atravessa a membrana, o petróleo fica retido por meio de adsorção, precipitação ou sofre degradação em compostos inócuos. No Brasil, esse método é bastante estudado por pesquisadores e os resultados encontrados são altamente eficazes, trazendo altas perspectivas para sua utilização.

- Dessorção térmica

A dessorção térmica é feita através do aquecimento dos líquidos que contém o petróleo com o intuito de volatilizar os compostos mais voláteis que a água. Desse modo, são injetados água em altas temperaturas para que os contaminantes sejam levados como vapor à uma fonte fria que os transformarão novamente em líquido, permitindo removê-los através de bombas (TAVARES, 2013).

De acordo com Pires (2004) e Tavares (2013), existem alguns pontos negativos com o uso dessa técnica, como a limitação em ser utilizada apenas em solos grosseiros com contaminação em baixas profundidades. Além disso, há o risco de morte da comunidade biológica local mais sensível às altas temperaturas.

A dessorção térmica pode ocorrer *in situ*, tratando os contaminantes no próprio local ou *ex situ*, onde o líquido contaminado deve ser transportado a um local de tratamento, aumentando custos e riscos de transporte, escavação ou drenagem (FERREIRA; SILVA; SILVA, 2019).

- Fitorremediação

Esse método pode ser usado em solos poluídos com petróleo, porém também é útil em solos contaminados com outras substâncias como agrotóxicos, solventes, explosivos e outros produtos industriais orgânicos ou não. Porém, existe maior dificuldade em realizar a fitorremediação em materiais orgânicos, devido a grande variedade molecular, da dificuldade de análise e das rápidas transformações a quão estão sujeitos. Os inorgânicos são mais fáceis de realizar análises pois não se transformam rapidamente, são menos variáveis e raramente formam metabólitos intermediários no local de contaminação, como ocorre na biodegradação dos orgânicos (Cunningham et al., 1996).

A fitorremediação é feita através da utilização de plantas para estimular a microbiologia local que são capazes de absorver as substâncias cominantes com alto teor de metais e outros elementos que podem ser tóxicos no ambiente. Também são associadas à rizosfera que permite a degradação, ou ainda isolar ou imobilizar esses elementos contaminantes do solo e da água (SOUZA *et al*, 2011).

Para a eficiência do método é necessário entender a relação entre a água, o solo, as plantas e os contaminantes presentes na região, pois são inúmeros os parâmetros que influenciam na efetividade da descontaminação dessas áreas poluídas. Desse modo, é

importante a escolha adequada das plantas que promovam uma boa absorção para o poluente específico que contaminou aquele local. Além disso, a interação dessa planta com a água dessa região deve ser estudada para que ela consiga se desenvolver bem e com alta taxa de crescimento (COUTINHO, 2015).

- Biorremediação

A biorremediação é feita através da inserção de microorganismos com o intuito de descontaminar o ambiente, pois estes são capazes de captar, transformar e biodegradar compostos como o petróleo. Outros resíduos que podem ser descontaminados através dessa técnica são os provenientes, principalmente, de depósitos de lixo e hidrocarbonetos incluindo os policíclicos aromáticos e os BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Xileno). Os microorganismos frequentemente utilizados na biorremediação são fungos ou bactérias que devem ser escolhidas de maneira personalizada para cada cenário de poluição. Esses microorganismos degradam, geralmente, poluentes menos tóxicos (TAVARES, 2013).

Além disso, a diversidade metabólica dos microrganismos resultou em diversos estudos sobre o potencial de remediação em regiões afetadas por derramamento de petróleo e outros contaminantes (FERREIRA; SILVA; SILVA, 2019).

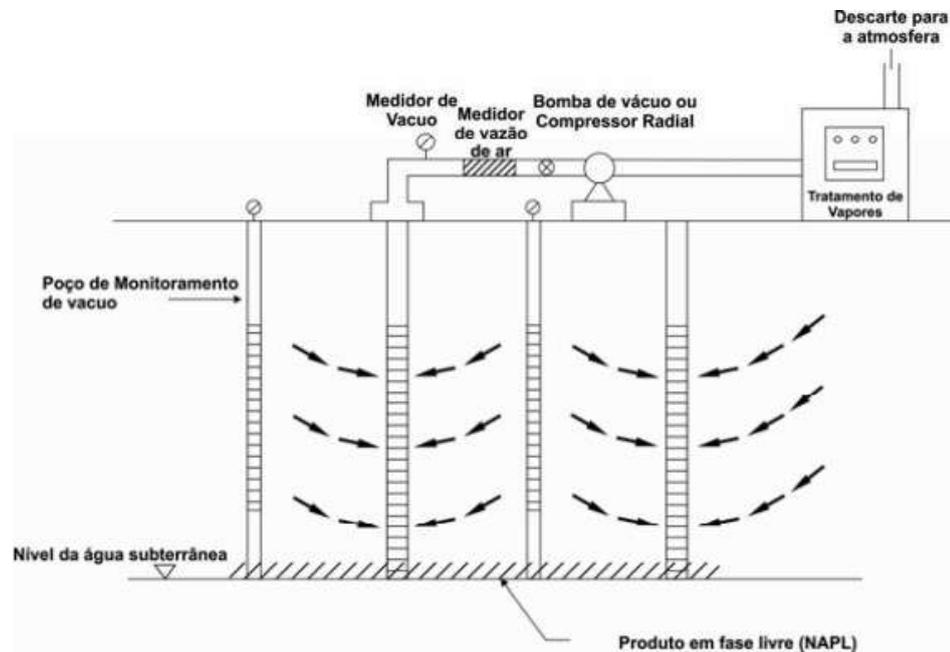
Segundo Santos et al (2007), a efetividade desse método depende de uma avaliação das condições químicas, físicas e biológicas do ambiente, do contaminante e dos microorganismos ideais para cada caso específico, também devem ser avaliadas as opções de realizar a técnica *in situ* ou *ex situ*.

- Extração de vapor do solo (SVE)

A técnica é realizada por extração à vácuo através de poços que são perfurados no solo ou em aquíferos subterrâneos, na região contaminada para extrair os materiais voláteis e semivoláteis que causam contaminação da região (SOARES, 2012; TAVARES, 2013).

Segundo Soares (2012), o processo ocorre com a intrusão de ar nas regiões não saturadas do solo ou do aquífero, com a aplicação de vácuo que aumenta a volatilização dos compostos, como mostra a Figura 9. Com isso, a extração de vapor do solo permite que aconteça transferência de massa, ou seja, transformação dos contaminantes líquidos para a fase de vapor.

**Figura 9:** Fases dos contaminantes presentes na matriz do solo.



Fonte: Soares (2012).

#### 4.4 Materiais Sorventes

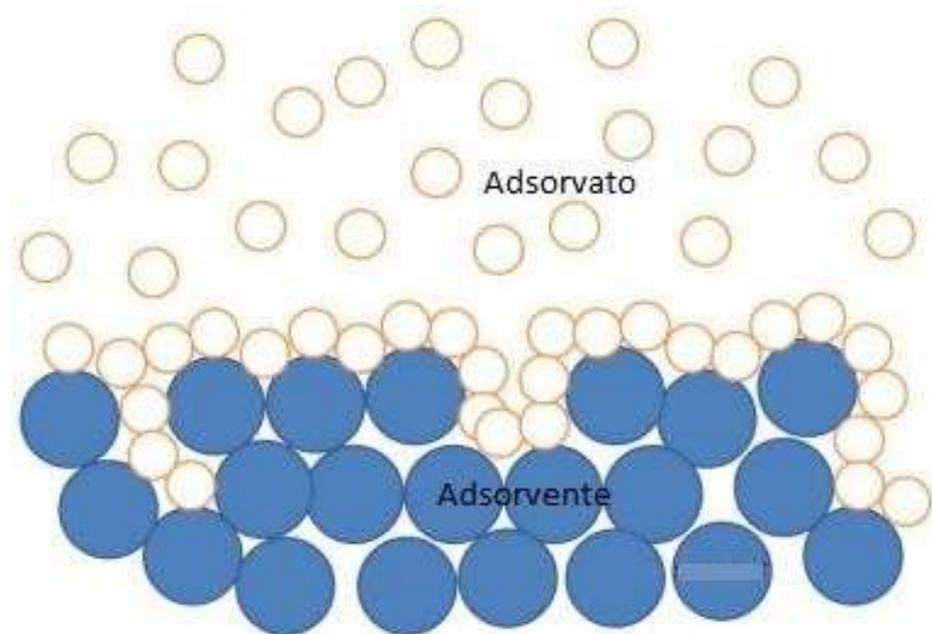
O derramamento de petróleo no mar, costa, solos ou em seres vivos causam grande impacto ambiental devido a elevada toxicidade. Com isso, os estudos a respeito da problemática e métodos de remediação e controle são recorrentes. Segundo Bayat et al (2005a), os métodos existentes que visam a limpeza do local contaminado são divididos em três grupos. O primeiro é o método físico como adsorventes, *booms* e *skimmers* (WONG & STEWART, 2003; TOPHAM, 2002), o segundo engloba os métodos químicos como dispersão, queimain situ e o uso de solidificantes (MULLIN & CHAMP, 2003), e o terceiro são os métodos biológicos ou biorremediação (ATLAS, 1995).

Os materiais sorventes possuem grande efetividade na recuperação do óleo, pois é um método econômico, ambientalmente amigável e possui grande capacidade de recuperar o óleo presente em cenários de poluição (BAYAT et al., 2005b).

A eficiência dos materiais com capacidade sorvente ocorre através da adsorção (Figura 10) que é a inserção do petróleo na superfície do sorvente e da absorção, que é a entrada do óleo dentro do absorvente. A medida em que ocorre a absorção e a adsorção, ao mesmo tempo, pelo sorvente, acontece a recuperação do óleo. Em caso do adsorvato ser petróleo, existe a possibilidade dos sorventes transformarem-no de líquido para semissólido

(BAYAT et al., 2005b).

**Figura 10:** No processo de adsorção, as moléculas do adsorvato se acumulam na superfície dosorvente sem penetrar no adsorvente.



**Fonte:** Adaptado de WAHI (2013).

Ainda de acordo com Bayat et al. (2005b), os materiais ideais para a recuperação de óleo em água são aqueles capazes de repelir a água, ou seja, possuir hidrofobicidade e possuir afinidade com o óleo (oleofilicidade). Desse modo, toda a capacidade de sorção do material será saturada com a substância poluente. Além disso, os materiais sorventes são amplamente utilizados nesses cenários por possuírem baixa densidade e conseguir flutuar no mar e facilidade de transportar, além de existirem variedade de materiais com essas características (ROTAR et al., 2009; WANG et al., 2012).

Um aspecto importante dos sorventes é a possibilidade de regeneração desses materiais. Desse modo, eles serão utilizados originalmente para a retirada do poluente e posteriormente passarão por um processo de regeneração para ser usados novamente. (ABDULLAH et al., 2010; LIM & HUANG, 2007; OLIVEIRA, 2001).

Esses materiais podem ser naturais, orgânicos ou não, provenientes da fauna, flora, dentre outros, ou sintéticos, que são aqueles que passam por um processo de produção após

retirados da natureza (ADEBAJO et al., 2003; WANG et al., 2012).

Os sintéticos mais utilizados são aqueles provenientes de polímeros não renováveis, pois possuem grande capacidade de sorção do óleo em que pode alcançar, em sua forma saturada, setenta vezes a sua massa original. Outros também comumente usados são o polietileno, poliestireno, polipropileno, poliuretano, além das poliamidas (ANNUNCIADO et al., 2005; DUONG & BURFORD, 2006; LI et al., 2013; LIM & HUANG, 2007; PINTO et al., 2016).

Já os sorventes naturais inorgânicos mais frequentes são as sílicas, zeólitas, vermiculitas, argilominerais, bentonitas, entre outros. Os orgânicos são aqueles com cadeias carbônicas em sua composição, como plantas, frutas e raízes (ASADPOUR et al., 2016; PAULAUSKIENÉ & JUCIKÉ, 2015).

#### 4.4.1 Sorventes naturais orgânicos

Os sorventes orgânicos são amplamente estudados devido a sua eficiência em recuperar alto volume de óleo que poluiu uma região. Além disso, possuem as características do seu uso não ser prejudicial ao meio ambiente e de também ser econômico. Alguns desses materiais são hidrofóbicos e oleofílicos, contendo óleos ou ceras naturais em sua composição, ajudando a recuperação mais efetiva do petróleo (AL-MAJED et al., 2012).

Além disso, a facilidade de encontrá-los e a diversidade de materiais orgânicos encontrados na natureza que podem atuar como sorventes, além da rapidez de degradação que possuem, motivam a atenção dos estudiosos. Já que muitos deles são provenientes de rejeitos industriais ou agrícolas, eles são mais econômicos que grande parte das outras técnicas, além de existir a possibilidade ser aplicados junto aos outros métodos, como a biorremediação, podendo aumentar o volume e a velocidade da recuperação (ABDULALAH, 2010; LIM & HUANG, 2007).

Fan e Fu (2016), dizem que o sorvente natural orgânico é uma boa alternativa aos sintéticos. Sua aplicabilidade também reduz a eliminação de dióxido de carbono na atmosfera, pois não exige nenhum processo industrial antecedente à sua inserção no meio contaminado como acontece com os sorventes sintéticos.

Alguns exemplos desses materiais naturais são palha de arroz, fibras naturais diversas, espiga de milho, serragem de árvores, algodão, sumaúma, cascas de alimentos,

bagago. Geralmente, a capacidade sorptiva desses são elevadas, podendo ser maiores que os sintéticos e os inorgânicos (INAGAKI et al., 2000; ADEBAJO et al., 2003).

#### 4.4.2 Sorventes naturais inorgânicos

Os materiais naturais inorgânicos mais utilizados com o intuito de sorção de petróleo são as argilas e os minerais. O uso dos minerais para esse fim é principalmente devido às características como a capacidade de não ser inflamável, a inércia química, à facilidade econômica e à alta variedade e disponibilidade no meio ambiente. Eles são, em geral, mais densos e de baixa granulometria que os sorventes orgânicos e por isso, são utilizados também para imergir o óleo encontrado na superfície da água (BANDURA et al., 2017; TIC & PIJARWSKI, 2015).

Segundo Davoodi et al. (2019), o petróleo penetra no sorvente, ficando armazenado internamente através do processo de absorção, bem como há uma interação com a área superficial do material, através da adsorção. Quando há a absorção e a adsorção, o material é considerado sorvente.

Porém, esses materiais não tem alta aplicabilidade em cenários reais de derramamentos em mar, devido a sua alta densidade e massa específica quando os grãos estão agregados entre si, o que impede a fluotabilidade. Também há formação de poeira durante a recuperação do óleo, o que traz a necessidade do uso de EPI's pelos trabalhadores (WAHI et al, 2013).

Desse modo, os sorventes inorgânicos tornam-se mais úteis em terra (*on-shore*), pois são aplicados para a sorção do petróleo, espalhando-os na região contaminada, e posteriormente são retirados do local junto ao óleo e levados para serem reciclados (WAHI et al, 2013).

#### 4.4.3 Sorventes sintéticos

Os sorventes sintéticos típicos são os polímeros e os plásticos. Os principais tipos atualmente utilizados para a sorção de contaminantes são poliuretano, polipropileno, poliestireno e cloreto de polivinila. Esses materiais são bons sorventes de óleo, pois possuem afinidade ao óleo e repelem a água, desse modo conseguem saturá-los da substância contaminante. Além disso, possuem baixa densidade, o que permite a flutuação e possuem grande disponibilidade para a produção em larga escala. A grande desvantagem do método é

que eles não conseguem degragar facilmente. Com isso, devem ser retirados do ambiente após o processo de sorção para que não contaminem a região (ASADPOUR et al., 2016).

O polipropileno e o poliuteroano possuem uma característica que dão prioridade ao seu uso quando comparado aos demais sorventes. Além de possuir alto teor sorptivo, esses materiais possuem capacidade de regeneração que permite a reutilização após um processo de sorção já realizado. Outras características positivas são a robustez, que permite a manutenção da integridade do material em alto mar e a possibilidade de fabricá-los a partir de resíduos plásticos. Com isso, além de recuperar o óleo, também permite dar utilidade aos resíduos, contornando maiores poluições. (SALEEM & MCKAY, 2016; SALEEM et al., 2015a; SALEEM et al., 2014; SALEEM et al., 2015b; SALEEM & GORDON, 2018).

## 5 SORVENTES INORGÂNICOS

Nesse tópico irá ser melhor detalhado os principais sorventes inorgânicos, objetivo do trabalho proposto, de modo a analisar as características de cada um deles e como elas influenciam como potencial material sorvente de petróleo.

A técnica de sorção é desempenhada com o uso de um material sólido que possui espaço poroso em sua estrutura, além de ser desejável uma alta área superficial que esteja apta a se ligar às moléculas do adsorvato. Com isso, os adsorventes são capazes de promover a limpeza de áreas contaminadas com determinadas substâncias (BANDURA et al., 2017).

Essa despoluição geralmente ocorre com petróleo e derivados que são acidentalmente derramados no mar, em costas, areia, estradas, dentre outros. Essas técnicas são bastante utilizadas devido ao baixo custo financeiro para aplicação, além de não prejudicar o meio ambiente, serem eficazes, ter alta disponibilidade e alta taxa de recuperação (BANDURA et al., 2017).

Na maioria dos casos, o contaminante consegue ser retirado do material sorvente e ele pode ser regenerado e reutilizado. Além disso, eles também são usados após a utilização inicial dos métodos mecânicos que removem a maior parte do óleo e após isso, é inserido o sorvente para retirar o óleo residual que não foi removido inicialmente ou pode ser usado ainda como uma barreira para mitigar a dispersão do petróleo. A taxa de sorção média é de 0,2-0,5 g/g (BANDURA et al. (2017); TIC & PIJAROWSKI, 2015).

Os inorgânicos são muito aplicados para esses fins, já que possuem algumas características que os tornam desejáveis como ser pouco dispendioso, não-inflamável, existir em grandes quantidades no ambiente e a inércia química. Por conta da alta densidade, são sorventes que são inseridos em pó ou granulados (com partículas de até 3 mm) no local poluído e afundam para submergir o óleo encontrado na superfície da água. A maioria deles é encontrado na natureza e não sofrem combustão e são resistentes a ácidos e bases, denominados adsorventes minerais (BANDURA et al. (2017); TIC & PIJAROWSKI, 2015).

A aplicação ocorre com a colocação do sorvente inorgânico no local que contém o contaminante e o posterior espalhamento das suas partículas, geralmente com o uso de uma escova, e é aguardado um tempo para que a sorção ocorra de maneira eficiente e o óleo seja inserido no corpo do material. Após ocorrer a sorção em valores próximos à saturação, o

sorvente é retirado junto ao óleo e levado para reciclagem (WAHI et al, 2013).

Quando o óleo é encontrado na superfície da água, geralmente outros métodos são indicados, pois os inorgânicos não possuem boa fluabilidade, diminuindo a taxa sorptiva que não alcança o valor desejado. Porém, podem sofrer transformações com compostos orgânicos que melhoram a aplicabilidade em ambiente aquoso (BANDURA et al, 2017; WAHI et al, 2013).

Dos materiais adsorventes inorgânicos podemos destacar as zeólitas, os argilominerais, os adsorventes de sílica e os adsorventes minerais modificados que serão melhor explicados em sequência (SHAHADAT et al., 2018; BANDURA et al, 2017).

### 5.1 Zeólitas

As zeólitas são materiais minerais inorgânicos que são consideradas a matéria-prima do século, pois seu arranjo estrutural permite desempenhar múltiplas funções necessárias no cotidiano, principalmente com funcionalidades ambientais, como a retirada de poluentes, sejam líquidos ou gasosos, mas também atuam na área agrícola, na área da saúde e em ambiente industrial (KRÓL, 2020; VILLA et al., 2022; HARDI et al., 2020; PABIS-MAZGAJ et al., 2022).

Além disso, pertencem ao grupo dos aluminossilicatos dos metais alcalinos e alcalino-terrosos, que contém tetraedros de silício de alumínio em sua composição com oxigênio fazendo a ligação entre eles. Elas também podem ser naturais ou sintéticas (PICHÓR et al., 2014; FRANUS et al., 2015).

A rede obtida com a composição desses tetraedros possui canais de até 3nm que permitem que ocorra a sorção dentro deles. Quimicamente, ocorre uma troca de  $\text{Si}^{4+}$  por  $\text{Al}^{3+}$ , com isso, é formada uma carga negativa compensada por íons de cálcio, sódio ou potássio. Os íons catiônicos são trocados pelo da solução envolvente, originando a possibilidade de troca iônica. Além disso, os grupos OH geram o potencial sorptivo, pois são responsáveis pela propriedade de polaridade do material. (PICHÓR et al., 2014; FRANUS et al., 2015; WDOWN et al., 2014; WDOWN, 2015; BELVISO, 2016).

### 5.2 Argilominerais

Os argilominerais abrangem grande parte do grupo dos filossilicatos. Eles são

encontrados no solo, pois são formados por mudanças naturais que ocorrem na crosta terrestre, como a diagênese ou alterações hidrotermais. Assim como outros materiais sorventes, sua formação química contém tetraedros de silício unidos entre si por átomos de oxigênio (BURHAM & SAYED, 2016; OUESLATI et al., 2015).

Essa rede tetraédrica forma uma rede octaédrica com a união de íons catiônicos (Al, Mg, Fe ou Ca), ânions de oxigênio e grupos hidroxila. As proporções de filossilicato variam conforme a forma das folhas tetraédricas e octaédricas. Assim temos: 1:1 (mesmo número de redes tetraédricas e octaédricas intercaladas), 2:1 (duas tetraédricas e uma octaédrica) e 2:1:1 (duas camadas 2:1 com uma folha octaédrica entre elas) (BURHAM & SAYED, 2016; OUESLATI et al., 2015).

Os argilominerais possuem características únicas, como o potencial de inchamento e de troca iônica, além da capacidade de adsorção na sua alta área superficial, devido também aos grupos hidroxila que estão contidos na superfície. Além disso, são considerados materiais de baixo custo financeiro e possuem resistência mecânica de extrema importância para limpeza de locais com ondas. (BANDURA et al., 2017; RAJAKOVIC et al., 2007; SARI et al., 2007).

A caulinita, a sepiolita e a montmorilonita (bentonita) os argilominerais mais utilizados, e dentre eles, a bentonita é a mais usada como sorvente, pois a área superficial ( $\sim 800 \text{ m}^2/\text{g}$ ) é maior que outras como a sepiolita ( $\sim 300 \text{ m}^2/\text{g}$ ), por exemplo, podendo alcançar valores maiores que o dobro devido à alta porosidade que possui. Porém, a sepiolita possui diversas aplicabilidades diferentes como em cosméticos, na indústria, tinturas, dentre outros (BANDURA et al, 2017; RAJAKOVIC et al., 2008; SABAH & MAJDAN, 2009).

### 5.3 Adsorventes de sílica

Segundo Aivalioti et al (2010) e Tic e Pijarowski (2015), o potencial dos adsorventes de realizar a sorção de poluentes como o petróleo acontece por dois mecanismos que ocorrem ao mesmo tempo, o primeiro é a absorção pela alta porosidade encontrada, e o outro é a adsorção devido aos grupos hidroxila existentes na área superficial.

Os adsorventes de sílica podem ser encontrados como rochas (terras siliciosas, terras de diatomáceas, diatomitas) e perlita que são, geralmente, do grupo dos mineralóides. A opala sofre um processo de transformação contínua e é substituída pela calcedônia

progressivamente, sendo essas duas os principais mineralóides (TIC & PIJAROWSKI, 2015).

A opala é um material formado por tetraedros de sílica sem uma ordem pré-estabelecida entre si e com moléculas de água na região central dos vazios formados por eles, desse modo forma-se um adsorvente de estrutura amorfa. Durante o processo de secagem, a água é liberada progressivamente (TIC & PIJAROWSKI, 2015).

As algas celulares (diatomáceas) possuem uma importante função na formação dos adsorventes de sílica. Seus exoesqueletos formam uma estrutura que ao longo de muitos anos geram os adsorventes de sílica, pois são os espaços livres entre os exoesqueletos que produzem a porosidade suficiente para o acúmulo de óleo a ser absorvido (AIVALIOTI et al, 2010; TIC, PIJAROWSKI, 2015).

#### 5.4 Adsorventes minerais modificados

A modificação na estrutura físico-química dos materiais adsorventes é uma possibilidade para a criação de características mais favoráveis ao processo de sorção. Essas propriedades alteradas podem ser a porosidade, alterações na superfície para melhoria da adsorção, dentre outros. Porém, normalmente, a produção desses materiais modificados é dispendiosa. Desse modo, é necessário que as vantagens obtidas sejam superior ao custo gasto (BANDURA et al., 2017; TIC & PIJAROWSKI, 2015).

Algum mineral que sofreu alteração térmica (por exemplo, calcinação) modifica o tamanho da área superficial (podendo aumentar de 0,5 g/g para 1,3 g/g) que será útil no processo adsorção do petróleo, além disso, também diminui o valor da massa específica, ajudando na flutuação do material em água, durante a recuperação do poluente. Esse processo pode acontecer, por exemplo, com a diatomita, enquanto a expansão ocorre também com a perlita e a vermiculita. Essa expansão também diminui a densidade consideravelmente e aumenta a área superficial, permitindo a retirada do adsorvato que se encontra na superfície da água (BASTANI et al, 2006).

A técnica de transformação desses materiais ganhou grande importância para os estudiosos por promover diversas melhorias na capacidade sorvente dos materiais. Dentre esses métodos, o procedimento realizado na superfície do solvente por meio de surfactantes promove mudanças na afinidade à água. Um material hidrofóbico é recomendado, pois consegue saturar o espaço poroso totalmente com o líquido poluente, aumentando o potencial

de recuperação do óleo. Com isso, essa característica de hidrofobicidade pode ser obtida por meio desse procedimento com os surfactantes, pois eles são capazes de promover mudanças na molhabilidade do material. (PINTO, 2022; SIMPSON & BOWMAN, 2009; EMAM, 2013).

O hexadeciltrimetilamônio (HDTMA-Br) é um composto que normalmente é utilizado para obter melhorias de materiais sorventes, ligando sua estrutura aos materiais por meio da força eletrostática através de troca iônica (Na, K e Ca). Normalmente, são utilizados em elementos argilosos, porém, estudiosos estão analisando a eficácia da inserção dele também em zeólitas para modificar estruturas a fim de adquirir propriedades específicas (SZALA et al., 2015; MOAZED & VIRARAGHAVAN, 2005; MOWLA et al., 2013; MUIR & BAJDA, 2016).

A síntese das zeólita é um processo realizado a partir do silicato de sódio,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  com o aluminato de sódio,  $\text{NaAlO}_2$ . Além disso, utilizam materiais como argilominerais, perlita, dentre outros (WDOWIN et al., 2014; WDOWIN, 2015; BELVISO, 2016)

As modificações na sílica, geralmente, propõe aumento do volume poroso para a absorção ser mais efetiva, além de adaptá-la para tornar-se hidrofóbica. A eficiência dessas modificações também estão sendo estudadas para aplicá-las aos aerogéis de sílica (ZHANG et al., 2017).

Em uma dessas análises, aerogéis de sílica foram sintetizados para se tornarem hidrofóbicos através da formação de  $\text{Si-O-CH}_3$  ou  $\text{Si-O-CF}_3(\text{CH}_2)_2$ , gerando maiores volumes de óleo recuperado junto a um volume irrisório de água. Essa modificação também aumentou o volume de espaços vazios (98%-99%) e a área superficial ( $700\text{-}1000 \text{ m}^2/\text{g}$ ), além de baixa massa específica ( $\sim 3 \text{ kg/m}^3$ ), permitindo uma melhor flutuação do material (HAN et al., 2010; SHI et al., 2014; WANG et al., 2011).

A alteração nas propriedades dos sorventes promove aumento do valor econômico para produção do material e pode acarretar em uma maior quantidade de liberação de substâncias tóxicas, gerando necessidade de cuidados para o correto descarte ou reciclagem sem que haja prejuízos ambientais decorrentes do processo de sorção (SARKAR et al., 2013).

## 6 ESTADO DA ARTE

Estado da arte é uma pesquisa que consiste em mapear e discutir determinado assunto através de uma análise bibliográfica com diversos autores, gerando conhecimento de pontos similares, discussões e inovações acerca da temática envolvida.

Nesta seção será realizada uma avaliação dos principais sorventes inorgânicos e dos materiais comercialmente utilizados na remediação da problemática de derramamentos de petróleo. Essa análise é baseada em revisões da literatura de acordo com trabalhos científicos recentes.

### 6.1 Principais materiais sorventes inorgânicos testados para derramamento de petróleo

#### a) Bentonitas

De acordo com Koch (2002) e Nones et al. (2016), o nome do material 'bentonita' faz alusão ao local em que iniciou a venda do material, na cidade de *Fort Benton*, EUA. Sua composição consiste de 60% a 80%, de montmorilonita. De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral, ela é composta predominantemente por argilominerais esmectícios.

As pirofitas podem gerar esses argilominerais esmectícios, através de água molecular em camadas que contém cátions livres. Com isso, essas camadas de água molecular são capazes de sofrer expansão e, desse modo, as esmectitas conseguem aumentar o seu volume original em até 20 vezes, aumentando significativamente sua área superficial, em até 800 m<sup>2</sup>/g, com capacidade de troca catiônica entre 60 a 170 meq/100g e tixotropia, que é o fenômeno de diminuição da viscosidade do material com a agitação. Devido a algumas dessas características, a bentonita é usada como remediadora de derramamentos (REZENDE et al., 2006).

De acordo com Shen (2001), as bentonitas sódicas são aquelas em que a capacidade de inchamento e expansão é devido à presença de cátions interlamelares de compensação, os íons de sódio Na<sup>+</sup>. Essas são as únicas bentonitas que possuem essa característica específica, porém, outros íons podem existir em sua composição, geralmente Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> e Ca<sup>2+</sup>.

Porém, quando uma bentonita não é expansível, pode-se transformá-la para que ela adquira essa capacidade. Esse procedimento é muito utilizado no Brasil devido a dificuldade de encontrar as originalmente expansíveis. Esse processo é feito através da inserção de carbonato de sódio nas bentonitas comuns (SHEN, 2001).

Desse modo, as bentonitas tornam-se muito visadas pelas indústrias para diversas finalidades, devido a sua diversidade encontrada no meio ambiente e a possibilidade de convertê-las para que adquiram características específicas desejadas pelas indústrias. Desse modo, nos últimos anos, houve um aumento nos estudos que buscam compreender a transformação de suas

características para fins específicos (CARMODY et al., 2007; BERGAOUI et al., 2018).

b) Zeólitas

Segundo Falcão (2005), as zeólitas são aluminossilicatos hidratados, do grupo dos metais alcalinos e terrosos e possuem a característica de cristalinidade. Assim como as bentonitas, possuem íons de compensação em suas cavidades, sendo os principais:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . Possui porosidade devido à sua estrutura que possui uma rede tridimensional com tetraedros alumínio e sílica ( $\text{AlO}_4$  e  $\text{SiO}_4$ ) que são unidos entre si pelos oxigênios comuns a eles.

Desse modo, há a compensação de carga entre os íons de alumínio com cátions alcalinos. Com isso, o alumínio e o silício ocupam a região central e o oxigênio permanece nos vértices dos tetraedros, havendo compartilhamento deles entre as estruturas. Esse compartilhamento gera o dobro de átomos de oxigênio quando comparado aos átomos centrais (SAWYER, 2000; WILSON, 2002).

c) Sepiolita

Segundo Coelho (2007), a sepiolita é um mineral de argila do grupo dos filossilicatos. É composta de um complexo de silicatos de magnésio hidratados com uma camada octaédrica de magnésio entre duas camadas de tetraedros de silício. O principal diferencial desse mineral, em nível molecular, em comparação aos outros do mesmo grupo é a forma da sua estrutura interna. A maioria deles é composto por átomos que formam uma estrutura laminar, porém a sepiolita possui o formato longitudinal em que a cada seis átomos de silício, há uma inversão da camada tetraédrica, formando assim o formato transversal característico das sepiolitas.

Desse modo, o formato da estrutura longitudinal oferece canais que proporcionam o acúmulo de petróleo, além do aumento da área superficial, proporcionando uma alta taxa sorptiva pelo mineral. Com isso, a adsorção de óleo pela sepiolita é capaz de ocorrer com valores maiores que  $300 \text{ m}^2/\text{g}$  e o volume absorvido quando saturado é de aproximadamente 2,5 vezes o peso do sorvente em água. Além disso, possui propriedades reológicas que aumentam seu desempenho em dispersões aquosas e em solventes orgânicos promovendo um elevado potencial remediador (COELHO et al., 2007).

d) Vermiculita

A vermiculita, do grupo dos filossilicatos, é formada essencialmente por aluminossilicato hidratado de ferro e de magnésio. A característica principal que a diferencia é a capacidade de aumentar o seu tamanho em até vinte vezes, essa propriedade é denominada de esfoliação. Esse fenômeno ocorre quando a vermiculita é submetida a altas temperaturas, que variam entre  $800^\circ\text{C}$  e  $1000^\circ\text{C}$ , que transforma as partículas de água existentes entre suas lâminas em forma de vapor, e com isso, permite a expansão de sua estrutura, formando blocos sanfonados (UGARTE, SAMPAIO, FRANÇA, 2008).

Desse modo, a vermiculita quando expandida possui características que geram um potencial de aplicação na remediação de desastres contendo derramamento de petróleo, pois possui baixa densidade, o que gera fluutuabilidade; alta área superficial, permitindo a adsorção e carga superficial negativa que permite a troca catiônica, geralmente entre potássio e magnésio, entre 100 a 130 meq/100g. (FRANÇA, UGARTE, SILVA, 2008).

Além de atuar como excelente sorvente de petróleo e seus derivados em derramentos, a vermiculita expandida é utilizada com várias outras finalidades. Como sorvente, também pode ser usada para retirar outros tipos de poluentes como os metais pesados e sais em águas contaminadas. A diversidade de granulações diferenciadas confere propriedades úteis também no setor agrícola, retendo e transportando água, bem como, atua inserindo a vermiculita saturada com nutrientes no solo para que ocorra a liberação deles ao longo de um tempo determinado. Além disso, pode servir como isolante térmico e acústico na construção civil (FRANÇA et al., 2005; CUCINELLI NETO, 2007; DOS SANTOS & MASINI, 2007).

#### e) Sílica

A sílica ( $\text{SiO}_2$ ) é um material bastante visado pelos estudiosos devido a capacidade que possui de se transformar e se adaptar a fim de atingir diferentes objetivos no meio industrial e por isso, é usada na fabricação de vários produtos do cotidiano, como em vidros. Sua estrutura química é composta de tetraedros em que compartilham átomos de oxigênio entre si, formando uma estrutura tridimensional que lhe confere formas distintas encontradas na natureza. (CALLISTER, 2012; NASSAR & SERRA, 2000).

Seu formato original, antes da transformação sintética, pode ser encontrado em solos, rochas, argilas e areia, no formato de mica, silicatos forsterita, talco ou outros, combinada com outros elementos ou não e os principais minerais encontrados são cristobalita, quartzo, minerais argilosos e carbonatos (CALLISTER, 2012; NASSAR & SERRA, 2000; TIC & PIJAROWSKI, 2015).

#### f) Sílica Gel

De acordo com Callister (2012) e Estella et al. (2007), alguns materiais podem ser produzidos a partir da síntese da sílica. Dentre esses materiais produzidos, a sílica gel simples possui grande relevância devido a sua funcionalidade. A sílica também apresenta formatos de quartzos, cristobalitas ou tridimitas.

Callister (2012) diz que o arranjo químico presente nesse material permite a formação de materiais tanto amorfos quanto cristalinos. Desse modo, os tetraedros existentes na sílica cristalino são regulares e ordenados de maneira tridimensional, enquanto as estruturas emorfas possuem uma

desordenação dos tetraedros, tornando-os sem um ordenamento previsível.

Segundo Abdullah (2009), a sílica gel é formada a partir de sol-gel que é um procedimento que hidrolisa o composto e posteriormente realiza a condensação, transformando o material de vapor para a fase líquida através de um material precursor de silício. Além disso, no equipamento contém também água e álcool que auxiliam o processo. Desse modo, é formada a sílica gel, material de estrutura amorfa e com alta porosidade.

Desse modo, a sílica gel promove a conexão da rede de dióxido de silício com o a rede tetraédrica de silício hidratada, através de pontes contendo dois átomos de silício e um de oxigênio que promovem essa interconexão com um ordenamento aleatório no interior da rede química. Com isso, esse material consegue desempenhar a função de adsorvente. Uma característica essencial para que consiga ser útil para essa finalidade é que a sílica gel possui grupos funcionais silanóis que estão localizados na superfície do material, o que acarreta eficiência para executar essa funcionalidade (ABDULLAH, 2009).

Esses grupos silanóis são muito importantes, pois conseguem reagir com alguns elementos a fim de modificar a matriz para a formação de um novo material com benefícios práticos diversos a serem aplicadas em diferentes casos. Desse modo, essa é uma das principais propriedades do material devido a sua alta adaptabilidade às necessidades. Assim, o potencial adsorvente é um exemplo desses casos que possui grande relevância para os estudiosos (PRADO et al. 2005; JOSÉ, PRADO 2005).

## 6.2 Materiais sorventes amplamente aplicados em remediação de derramamento de óleo

Os sorventes são materiais que possuem a função de limpar regiões que estão contaminadas com petróleo, principalmente em desastres de derramamento. Alguns desses materiais mais frequentemente encontrados na literatura são zeólitos, material de carbono, queratina, argila, derivados de açúcar, nanopartículas, polímeros, dentre outros. Eles possuem excelente eficiência e promovem impacto positivo também na separação entre o óleo e água (HARIDHARAN, 2022). Desse modo, analisaremos a seguir os principais sorventes remediadores.

### a. Polímeros

Segundo Ge et al. (2014), os polímeros possuem boa taxa de sorção e recuperação de petróleo devido às suas características intrínsecas como alta porosidade, permitindo armazenamento do poluente, além de terem estruturas com células abertas que facilita a entrada no sorvente, alta elasticidade que os tornam capazes de adaptar o formato ao necessário no ambiente, dentre outras propriedades. Além disso, existe a possibilidade de modificar os polímeros para que melhorem as características nanoestruturais, como a oleofilidade e a hidrofobicidade, que são indispensáveis para

um bom remediador de petróleo promover a seletividade dos meios aquosos.

Desse modo, há uma alta taxa de sorção pelos polímeros, formando uma estrutura emborrachada que evita o desprendimento do óleo e o avanço da contaminação no mar. A hidrofobicidade o torna capaz de flutuação nesse ambiente aquoso, porém a alta massa específica que possui o torna capaz de penetrar no petróleo e enriquecer a ligação (GE et al., 2014).

Com isso, após o contato de materiais à base de polímeros com o petróleo, é formado um tipo de gel macio que combina um meio sólido e oleoso. A recuperação proveniente dessa técnica é alta, com vários galões já coletados, que ajudaram a diminuir significativamente a poluição ambiental em diversas regiões, recuperando nossos recursos naturais (HARIDHARAN, 2022).

#### b. Materiais nanoporosos

Esses materiais possuem ampla gama de aplicações que o tornam capazes de atender às necessidades em múltiplos setores industriais devido às características físico-químicas que possuem (BIENER et al., 2009).

Segundo Abe e Ariga (2016), os nanoporosos possuem capacidade sorptiva devido à estrutura que mantém um volume poroso com alta área superficial. Além da finalidade sorptiva, a estrutura nanométrica também os tornam úteis para promover outros processos ambientais (BIENER et al., 2009).

Além da área superficial, os materiais nanoporosos dispõem de propriedades que os qualificam como um dos mais eficazes métodos de remediação de petróleo, como a possibilidade de tratamento do óleo *in situ* e a alta reatividade (HARIDHARAN, 2022).

Os materiais provenientes de carbono também promovem uma excelente taxa de recuperação de óleo. Além do volume recuperado, também conseguem ser regenerados para reutilização em ambientes poluídos similares. Eles também apresentam características desejáveis como a super-hidrofobicidade e superoleofílicidade na estrutura (HARIDHARAN, 2022).

Após destacar os sorventes inorgânicos e outros materiais sorventes bastante utilizados na limpeza de derramamento de óleo, apresenta-se a Tabela 2, na qual é possível avaliar a eficiência da capacidade de sorção de óleo e seus derivados, nesses diferentes materiais sorventes.

**Tabela 2:** Principais sorventes aplicados na remediação de derramamento de petróleo.

<b>Sorvente</b>	<b>Poluente</b>	<b>Capacidade de sorção (g/g)</b>	<b>Referência</b>
Bentonita	Óleo bruto	7,12	Okiel et al. (2011)
Carvão ativado em pó	Óleo bruto	2,58	Okiel et al. (2011)
Carbono depositado	Óleo bruto	9,23	Okiel et al. (2011)
Poliuretano modificado com argila	Óleo bruto	21,5	Nikkhah et al. (2015)
Perlita expandida	Óleo bruto	3,25	Nikkhah et al. (2015)
Espuma de poliuretano	Óleo bruto	18,5	Nikkhah et al. (2015)
Montmorilonita	Óleo bruto	5,8	Akpomie et al. (2018)
Vermiculita	Óleo SAE 40	0,5	Ugarte et al. (2005)
Propileno comercial	Óleo bruto	8	Bayat et al. (2005b)
Dimetil polissiloxano (PMDS) poroso expansível	Gasolina	22	Zang et al. (2013)
Aerogel de grafite/isobutileno-isopreno	Óleo diesel	22	Hu et al. (2013)
Espuma de grafeno/polipirrol	Óleo diesel	108	Wu et al. (2014)
Polietileno	Óleo diesel	315	Saleem et al. (2014)
Sílica porosa	Óleo lubrificante	11,51	Yu et al. (2015)
Sílica porosa	Óleo diesel	5,59	Yu et al. (2015)
Sepiolita	Óleo comestível	0,49	Zadaka-Amir (2013)
Aerogel de sílica organomodificado	Óleo motor	6,94	El-Shahidy et al. (2019)
Bentonita	Óleo motor	0,150 – 0,176	Rajakovic-Oggnjanivic et al. (2008)
Zeólita	Óleo motor	0,166 – 0,192	Rajakovic-Oggnjanivic et al. (2008)

---

Argila natural	Óleo bruto	6,9	Akpomie et al. (2019)
Casca de arroz- montmorilonita	Óleo bruto	9,7	Akpomie et al. (2018)
Sepiolita	Óleo motor	0,174 – 0,184	Rajakovic- Oggnjanivic et al. (2008)

---

**Fonte:** Autor (2023).

A partir da Tabela 2 é possível analisar que os principais materiais com maior capacidade sorptiva para retirar óleo bruto, com capacidade maior que 10 vezes a sua massa inicial são poliuretano modificado com argila e a espuma de poliuretano e o dimetil polissiloxano para a gasolina.

O óleo diesel mostrou os maiores valores sorvidos com a Espuma de grafeno/polipirrol e o Polietileno, em comparação aos demais estudados.

Também é visto que um mesmo material pode gerar volumes ou massa sorvida diferentes para poluentes diversos, por exemplo, a sílica porosa com 11,51 g/g para o óleo lubrificante e 5,59 g/g com o óleo diesel.

## 7 CONCLUSÃO

Através do levantamento bibliográfico sobre o tema, utilizando como fonte de dados científicos, o presente trabalho concluiu que é muito alto o volume de petróleo derramado acidentalmente todos os anos em todas as etapas da cadeia petrolífera e, principalmente, durante o transporte.

Desse modo, o trabalho apresentou que os métodos de remediação utilizados em ambientes marinhos são limpeza natural, barreiras e *skimmers*, bombas, biorremediação, jateamento e lavagem com água corrente, corte da vegetação, remoção mecânica e manual do petróleo, além do uso de materiais sorventes.

Dentre esses métodos, foi visto que o ponto inicial para considerar o material como um bom sorvente é a massa de líquido poluente que consegue ser retirada do local contaminado para cada massa inicial de sorvente, denominada capacidade sorptiva, as melhores estudadas no trabalho foi a espuma de grafeno/polipirrol e o polietileno.

Também foi visto que em ambiente marinho torna-se necessário outras características para que os sorventes sejam realmente úteis, como a capacidade de fluotabilidade se o óleo for leve, a resistência mecânica em locais com ondas e a hidrofobicidade para preencher o sorvente sem acumular água.

Já em solo e lençóis freáticos, o trabalho indicou que os remediadores utilizados são bombeamento e tratamento, barreiras reativas permeáveis, dessorção térmica, fitorremediação, biorremediação e a extração de vapor do solo.

O bombeamento é mais indicado quando o petróleo está acumulado em um local específico e com baixa dispersão. As barreiras reativas são indicadas quando ainda há fluxo de contaminante em um sentido único, permitindo a limpeza eficiente. Enquanto a dessorção térmica é limitada apenas aos solos grosseiros e com o óleo em baixa profundidade.

A fitorremediação é um método que é colocada plantas para estimular a biologia local. Assim, o tempo de descontaminação se torna maior que outros métodos supracitados, sendo mais indicada para retirar líquidos inorgânicos do que orgânicos. Já na biorremediação é necessária a escolha do microorganismo ideal para cada contaminante específico para que obtenha eficiência na descontaminação e a extração de vapor do solo se torna mais onerosa à medida que o petróleo é mais profundo, pois é necessário a perfuração do solo até o local que

o óleo está presente.

Também foi visto que os materiais sorventes são classificados em orgânicos, sintéticos e inorgânicos. Em que os inorgânicos mais utilizados, foco desse trabalho, são zeólitas, argilominerais, adsorventes de sílica e adsorventes minerais modificados.

É possível também concluir através da análise bibliográfica realizada que os materiais sorventes inorgânicos possuem características desejáveis para a retirada de petróleo derramado no mar, como o baixo custo, a capacidade de não-inflamabilidade, o volume desse material existente no meio ambiente, dentre outras propriedades.

Porém, também foram pontuados casos em que esses materiais inorgânicos não são indicados como remediadores, por exemplo, quando o petróleo está flutuando, devido à densidade desses materiais que tendem a afundar, diminuindo a capacidade de sorver o óleo.

Em contra partida, foi apresentada a possibilidade de fazer modificações na superfície e na estrutura dos poros dos materiais sorventes, que favorecem o aumento da capacidade de sorção desses materiais, aprimorando a remoção mais eficiente de derramamentos de óleo e melhorando a aplicabilidade em ambiente aquoso. Os autores estudados durante esse trabalho destacam que, apesar dos materiais sorventes serem capazes de modificar suas propriedades e as tornarem melhores separar a mistura óleo/água, a produção em larga escala, em nível industrial, ainda é limitada.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, J. J. F. Como fazer uma pesquisa bibliográfica. Fortaleza, CE: Universidade Federal do Ceará, 2007. Disponível em: <http://200.17.137.109:8081/xiscanoe/courses-1/mentoring/tutoring/Como%20fazer%20pesquisa%20bibliografica.pdf>

ANP. **Produções de petróleo e de gás natural bateram recordes em 2022**. 2023. Disponível em [https://www.gov.br/anp/pt-br/canais\\_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/producoes-de-petroleo-e-de-gas-natural-bateram-recordes-em-2022](https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/producoes-de-petroleo-e-de-gas-natural-bateram-recordes-em-2022).

CELIK, Metin; TOPCU, Y. Ilker. **Use of an ANP to prioritize managerial responsibilities of maritime stakeholders in environmental incidents: An oil spill case**, 2009.

ABASCAL, Ana J. et al. Analysis of the reliability of a statistical oil spill response model. **Marine Pollution Bulletin**, v. 60, n. 11, p. 2099-2110, 2010.

ABDULLAH, A Z; SULAIMAN, N S; KAMARUDDIN, A H. Biocatalytic esterification of citronellol with lauric acid by immobilized lipase on aminopropyl-grafted mesoporous SBA-15. *Biochemical Engineering Journal*, v. 44, n. 2-3, p. 263-270, 2009.

ABDULLAH, M. A.; RAHMAH, Anisa Ur; MAN, Z. Physicochemical and sorption characteristics of Malaysian Ceiba pentandra (L.) Gaertn. as a natural oil sorbent. **Journal of hazardous materials**, v. 177, n. 1-3, p. 683-691, 2010.

ADEBAJO, Moses O. et al. Porous materials for oil spill cleanup: a review of synthesis and absorbing properties. **Journal of Porous materials**, v. 10, n. 3, p. 159-170, 2003.

Abe, H., Liu, J., & Ariga, K. (2016). Catalytic nanoarchitectonics for environmentally compatible energy generation. *Materials Today*, 19(1), 12-18.

AIVALIOTI, Maria; VAMVASAKIS, Ioannis; GIDARAKOS, Evangelos. BTEX and MTBE adsorption onto raw and thermally modified diatomite. **Journal of Hazardous Materials**, v. 178, n. 1-3, p. 136-143, 2010.

AKPOMIE, Kovo G. et al. Abstraction and regeneration potential of temperature-enhanced rice husk montmorillonite combo for oil spill. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 34711-34719, 2018.

AKPOMIE, Kovo G. et al. Natural aluminosilicate clay obtained from south-eastern Nigeria as potential sorbent for oil spill remediation. **Journal of African Earth Sciences**, v. 155, p. 118-123, 2019.

AKTAŞ, Özgür; ÇEÇEN, Ferhan. Bioregeneration of activated carbon: a review. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 59, n. 4, p. 257-272, 2007.

AKTAŞ, Özgür; ÇEÇEN, Ferhan. Cometabolic bioregeneration of activated carbons loaded with 2-chlorophenol. **Bioresource technology**, v. 100, n. 20, p. 4604-4610, 2009.

AL-MAJED, Abdul Aziz; ADEBAYO, Abdulrauf Rasheed; HOSSAIN, M. Enamul. A sustainable approach to controlling oil spills. **Journal of environmental management**, v. 113, p. 213-227, 2012.

Annunciado, T.R., Sydenstricker, T.H.D., Amico, S.C., 2005. Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills. *Mar. Pollut. Bull.* 50, 1340–1346.

ASADPOUR, Robabeh et al. Acetylation of oil palm empty fruit bunch fiber as an adsorbent for removal of crude oil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 12, p. 11740-11750, 2016.

ATLAS, Ronald M. Petroleum biodegradation and oil spill bioremediation. **Marine pollution bulletin**, v. 31, n. 4-12, p. 178-182, 1995.

Bandura, Lidia, Agnieszka Wozuk, Dorota Kołodyńska, and Wojciech Franus. "Application of mineral sorbents for removal of petroleum substances: a review." *Minerals* 7, no. 3 (2017): 37.

BARNA, L. et al. Thermodynamic and kinetic parameters for the supercritical extraction of biphenyl from a contaminated soil. **Chemical engineering science**, v. 51, n. 15, p. 3861-3873, 1996.

BASTANI, Dariush et al. Study of oil sorption by expanded perlite at 298.15 K. **Separation and Purification Technology**, v. 52, n. 2, p. 295-300, 2006.

BAYAT, Ahmad et al. Oil spill cleanup from sea water by sorbent materials. **Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology**, v. 28, n. 12, p. 1525-1528, 2005a.

Bayat, A., Aghamiri, S. F., Moheb, A., & Vakili-Nezhaad, G. R. (2005b). Oil spill cleanup from sea water by sorbent materials. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, 28(12), 1525-1528.

BERGAOUI, Manel et al. Novel insights into the adsorption mechanism of methylene blue onto organo-bentonite: Adsorption isotherms modeling and molecular simulation. **Journal of molecular liquids**, v. 272, p. 697-707, 2018.

Biener, J., Wittstock, A., Baumann, T. F., Weissmüller, J., Bäumer, M., & Hamza, A. V. (2009). Surface chemistry in nanoscale materials. *Materials*, 2(4), 2404-2428.

BOCCATO, V. R. C. Metodologia da pesquisa bibliográfica na área odontológica e o artigo científico como forma de comunicação. *Rev. Odontol. Univ. Cidade São Paulo, São Paulo*, v. 18, n. 3, p. 265-274, 2006. Disponível em

<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/rdbci/article/view/1896>> Acesso em: 03 de set. 2020.

Belviso, C. **EMT-type zeolite synthesized from obsidian. Microporous Mesoporous Mater.** 2016.

BRASIL. CONAMA. Resolução nº 269, de 14 de setembro de 2000. Regulamenta o uso de dispersantes químicos em derrames de óleo no mar. *Diário Oficial da União*, nº 9, de 12 de janeiro de 2001, Seção 1, p. 58-61.

BURHAM, Nagwa; SAYED, Mahmoud. Adsorption behavior of Cd<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> onto natural Egyptian bentonitic clay. **Minerals**, v. 6, n. 4, p. 129, 2016.

CALLISTER, W. D. A estrutura dos sólidos cristalinos. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**, v. 5, p. 37, 2012.

CARMODY, Onuma et al. Adsorption of hydrocarbons on organo-clays—implications for oil spill remediation. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 305, n. 1, p. 17-24, 2007.

CASADO, Juan; FORNAGUERA, Jordi; GALÁN, María Isabel. Mineralization of aromatics in water by sunlight-assisted electro-Fenton technology in a pilot reactor. **Environmental science & technology**, v. 39, n. 6, p. 1843-1847, 2005.

CASEIRO, A. M. **Simulação de um eventual vazamento de óleo no oleoduto da Baía da Babitonga – SC**. 2011. 74p. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2011.

CETESB. (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). Governo do Estado de São Paulo. Disponível em: < [Limpeza de ambientes costeiros | Emergências Químicas \(cetesb.sp.gov.br\)](http://www.cetesb.sp.gov.br). Acessado em 23 de dezembro de 2022.

COELHO, Antonio C. Vieira; SANTOS, Pérsio de Souza; SANTOS, Helena de Souza. Argilas especiais: o que são, caracterização e propriedades. **Química Nova**, v. 30, p. 146-152, 2007.

COUTINHO, P.W.R. Alternativas de Remediação e Descontaminação de Solos – Biorremediação e Fitorremediação. *Nucleus*, v. 12, n. 1, p. 59-68, abr. 2015.

CRAIG, A.P.L.; SENA, E.; MAGALHÃES, L.; KRAUSE, M.C.; NEVES, P.R.;

SILVA, M.J. Técnicas de limpeza de vazamentos de petróleo em alto mar. In: Cadernos de Graduação -Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 1., n.15, UNIT, Aracaju, 2012, p. 75-86.

CUCINELLI NETO, Roberto Pinto. Utilização de vermiculita em sistema dessalinizador com colunas percoladas. 2007.

CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Adv. Agron.**, v. 56, p. 55-114, 1996.

DAVOODI, Seyyed Mohammadreza et al. Hydrophobic dolomite sorbent for oil spill clean-ups: Kinetic modeling and isotherm study. **Fuel**, v. 251, p. 57-72, 2019.

DE JONGE, ROBERT J.; BREURE, Anton M.; VAN ANDEL, JOHAN G. Bioregeneration of powdered activated carbon (PAC) loaded with aromatic compounds. **Water research**, v. 30, n. 4, p. 875-882, 1996.

DE MOURA, Nájla Vilar Aires et al. Deep-water oil-spill monitoring and recurrence analysis in the Brazilian territory using Sentinel-1 time series and deep learning. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 107, p. 102695, 2022.

DE NEGREIROS, Ana Cláudia Souza Vidal et al. Oil spills characteristics, detection, and recovery methods: A systematic risk-based view. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 80, p. 104912, 2022.

Dong, T., Wang, F., Xu, G., 2014. Theoretical and experimental study on the oil sorption behavior of kapok assemblies. *Ind. Crops Prod.* 61, 325–330.

DOS SANTOS, Allan C. Vieira; MASINI, Jorge C. Evaluating the removal of Cd (II), Pb (II) and Cu (II) from a wastewater sample of a coating industry by adsorption onto vermiculite. **Applied Clay Science**, v. 37, n. 1-2, p. 167-174, 2007.

DUONG, Hien TT; BURFORD, Robert P. Effect of foam density, oil viscosity, and temperature on oil sorption behavior of polyurethane. **Journal of applied polymer science**, v. 99, n. 1, p. 360-367, 2006.

EFAQ, A. N. et al. Supercritical carbon dioxide as non-thermal alternative technology for safe handling of clinical wastes. **Environmental Processes**, v. 2, p. 797-822, 2015.

EMAM, Eman Abdelwahab. Modified activated carbon and bentonite used to adsorb petroleum hydrocarbons emulsified in aqueous solution. **Am J Environ Prot**, v. 2, n. 6, p. 161-169, 2013.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Understanding oil spill and oil spill response. E.U.A, 1999.

ESTELLA, Juncal *et al.* Effects of aging and drying conditions on the structural and textural properties of silica gels. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2007.

ETKIN, D. **Estimating cleanup costs for oil spills. In: the Proceedings of 1999 International Oil Spill Conference**, 1999.

FALCÃO, Gabriela Ferreira. Caracterização de zeólita e sua aplicação como adsorvente de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. 2005.

FAN, Mizi; FU, Feng (Ed.). **Advanced high strength natural fibre composites in construction**. Woodhead Publishing, 2016.

FERREIRA, Emanuelle Craveiro; SILVA, Fernanda Coura; SILVA, Priscila Kimberlim

Almeida da. Avaliação dos métodos de remediação de solos contaminados por chumbo. 2019.

FERRO-GARCIA, M. A. et al. Regeneration of activated carbons exhausted with chlorophenols. **Carbon**, v. 31, n. 6, p. 857-863, 1993.

FRANÇA, S. C. A.; ARRUDA, G. M.; UGARTE, J. F. O. Vermiculite utilization on the treatment of water contaminated with organic compounds. **Proceedings of the Enpromer**, 2005.

FRANÇA, S. C. A.; ARRUDA, G. M.; UGARTE, J. F. O. Rochas & minerais industriais: usos e especificações, 2008.

FRANÇA, Silvia Cristina Alves; UGARTE, José Fernandes de Oliveira; SILVA, Adriana de Aquino Soeiro da. Minerais aplicados à tecnologia ambiental: minerais verdes. 2008.

FRANUS, Małgorzata et al. Removal of environmental pollutions using zeolites from fly ash: A review. **Fresenius Environ. Bull**, v. 24, p. 854-866, 2015.

Ge, J., Ye, Y.D., Yao, H., Bin, Zhu, X., Wang, X., Wu, L., Wang, J.L., Ding, H., Yong, N., He, L.H., Yu, S.H., 2014. Pumping through porous hydrophobic/oleophilic materials: an alternative technology for oil spill remediation. *Angew. Chem. Int. Ed.* 53, 3612–3616.

GEISSDOERFER, Martin et al. The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. **Journal of cleaner production**, v. 143, p. 757-768, 2017.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo, SP: Atlas, 2002.

GONG, Jianbo; PANG, Liang. Application of marine oil spill model based on Monte Carlo method in Laoshan Bay. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2019. p. 042003.

HARIDHARAN, Neelamegan; SUNDAR, Dhivyasundar; KURRUPASAMY, Lakshmanan; ANANDAN, Sambandam; LIU, Chen-Hua; WU, Jerry J. **Oil spills adsorption and cleanup by polymeric materials: A review**, 2022.

HARDI, Gilar Wisnu et al. A review of natural zeolites and their applications: Environmental and industrial perspectives. **Int. J. Appl. Eng. Res**, v. 15, p. 730-734, 2020.

HAN, G. F. et al. Preparations and adsorption properties of hydrophobic silica aerogels. **Journal of Nanjing University of Technology**, v. 32, n. 1, p. 59-62, 2010.

HOFFMANN, Michael R. et al. Environmental applications of semiconductor photocatalysis. **Chemical reviews**, v. 95, n. 1, p. 69-96, 1995.

Hu, Y., Liu, X., Zou, J., Gu, T., Chai, W., & Li, H. (2013). Graphite/isobutylene-isoprene rubber highly porous cryogels as new sorbents for oil spills and organic liquids. *ACS applied materials & interfaces*, 5(16), 7737-7742.

HUMAYUN, Raashina et al. Supercritical fluid extraction and temperature-programmed desorption of phenol and its oxidative coupling products from activated carbon. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 37, n. 8, p. 3089-3097, 1998.

INAGAKI, Michio et al. Sorption and recovery of heavy oils by using exfoliated graphite Part II: Recovery of heavy oil and recycling of exfoliated graphite. **Desalination**, v. 128, n. 3, p. 213-218, 2000.

INDAH, S.; HELARD, D.; BINUWARA, A. Studies on desorption and regeneration of natural pumice for iron removal from aqueous solution. **Water Science and Technology**, v. 2017, n. 2, p. 509-515, 2018.

ITOPF. Oil Tanker Spill Statistics 2011; The International Tanker Owners Pollution Federation Limited: London, UK, 2011.

ITOPF. Statistics—ITOPF (2018). Available online: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/> (acessado em 1 dezembro 2022).

ITOPF . STATISTICS, Oil Tanker Spill. (2019). 2020.

ITOPF. Oil Tanker Spill Statistics 2020. Available online: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/> (acessado em 1 dezembro 2022)

ITOPF. Tanker Spill Statistics 2022. Available online: <https://www.itopf.org/news-events/news/tanker-spill-statistics-2022/#:~:text=Data%20from%20ITOPF%20shows%20that,numbers%20reported%20in%20earlier%20decades.> 2022. (acessado em 1 dezembro 2022)

JOSÉ, N. M., & PRADO, L. A. S. D. A. (2005). Materiais híbridos orgânico-inorgânicos: preparação e algumas aplicações. *Química Nova*, 28, 281-288.

KLIMENKO, Nataliya et al. Role of the physico-chemical factors in the purification process of water from surface-active matter by biosorption. **Water Research**, v. 36, n. 20, p. 5132-5140, 2002.

KLIMENKO, Nataliya, et al. "Bioregeneration of activated carbons by bacterial degraders after adsorption of surfactants from aqueous solutions." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 230.1-3 (2003): 141-158.

KOCH, Dietrich. Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls. **Applied clay science**, v. 21, n. 1-2, p. 1-11, 2002.

KRÓL, Magdalena. Natural vs. synthetic zeolites. **Crystals**, v. 10, n. 7, p. 622, 2020.

KWON, Taik-Nam; JEON, Choong. Desorption and regeneration characteristics for previously adsorbed indium ions to phosphorylated sawdust. **Environmental Engineering Research**, v. 17, n. 2, p. 65-67, 2012.

LEE, K.; DE MORA, S. **In situ bioremediation strategies for oiled shoreline environments**. *Env. Technol.*, London, v. 20, n. 8, p. 783- 794, 1999.

LI, Hua; LIU, Lifan; YANG, Fenglin. Oleophilic polyurethane foams for oil spill cleanup. **Procedia Environmental Sciences**, v. 18, p. 528-533, 2013.

LI, M., Yin, X., Li, J., 2019. Robust superhydrophobic/superoleophilic sponge for efficient removal of oils from corrosive aqueous solutions. *J. Adhes. Sci. Technol.* 33, 1426–1437.

LIM, T.T., Huang, X., 2007. Evaluation of hydrophobicity/oleophilicity of kapok and its performance in oily water filtration: comparison of raw and solvent-treated fibers. *Ind. Crops Prod.* 26, 125–134.

LIU, Junbiao et al. Regeneration of adsorbents using heterogeneous photocatalytic oxidation. **Journal of Environmental Engineering**, v. 122, n. 8, p. 707-713, 1996.

LOPES, C.F.; MILANELLI, J.C.C.; POFFO, I.R.F. Ambientes costeiros contaminados por óleo: procedimentos de limpeza –manual de orientação. São Paulo: Secretaria de Estado

do Meio Ambiente, 2007, 120 p

MARTA-ALMEIDA, Martinho et al. Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking. **Marine pollution bulletin**, v. 71, n. 1-2, p. 139-151, 2013.

MENDES, Marisa F.; COELHO, Gerson LV. Desorption processes: supercritical fluid regeneration of modified clays. **Adsorption**, v. 11, n. 2, p. 139-146, 2005.

MOAZED, H.; VIRARAGHAVAN, T. Removal of oil from water by bentonite organoclay. **Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management**, v. 9, n. 2, p. 130-134, 2005

MOGYORÓSI, Károly et al. TiO<sub>2</sub>-based photocatalytic degradation of 2-chlorophenol adsorbed on hydrophobic clay. **Environmental science & technology**, v. 36, n. 16, p. 3618-3624, 2002.

MOREIRA, I.T.A. Avaliação da eficiência de modelos de remediação aplicados em sedimentos de manguezal impactados por atividades petrolíferas. Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, 2011, 163 p.

MOWLA, Dariush; KARIMI, Gholamreza; SALEHI, Kobra. Modeling of the adsorption breakthrough behaviors of oil from salty waters in a fixed bed of commercial organoclay/sand mixture. **Chemical Engineering Journal**, v. 218, p. 116-125, 2013.

MUIR, Barbara; BAJDA, Tomasz. Organically modified zeolites in petroleum compounds spill cleanup—Production, efficiency, utilization. **Fuel processing technology**, v. 149, p.153-162, 2016.

MULLIN, Joseph V.; CHAMP, Michael A. Introduction/overview to in situ burning of oil spills. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 8, n. 4, p. 323-330, 2003.

NASSAR, Eduardo José; SERRA, Osvaldo Antonio. Propriedades fotofísicas de Eu<sup>3+</sup> e Tb<sup>3+</sup> imobilizados em sílica gel funcionalizada com beta-Dicetonas. **Química Nova**, v. 23, p. 16-19, 2000.

NIKKHAH, Amir Ahmad et al. Removal of oil from water using polyurethane foam modified with nanoclay. **Chemical Engineering Journal**, v. 262, p. 278-285, 2015.

NIIME, Fernanda Nosse. Levantamento e análise de técnicas utilizadas nas operações de emergência de derramamento de óleo em ambientes costeiros e fluviais. 2013.

NONES, Janaína et al. Organophilic treatments of bentonite increase the adsorption of aflatoxin B1 and protect stem cells against cellular damage. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 145, p. 555-561, 2016.

NOMAN, Efaq A. et al. Supercritical fluid CO2 technique for destruction of pathogenic fungal spores in solid clinical wastes. **CLEAN–Soil, Air, Water**, v. 44, n. 12, p. 1700-1708, 2016.

OKIEL, Khaled; EL-SAYED, Mona; EL-KADY, Mohamed Y. Treatment of oil–water emulsions by adsorption onto activated carbon, bentonite and deposited carbon. **Egyptian journal of petroleum**, v. 20, n. 2, p. 9-15, 2011.

OLIVEIRA, E. Barreiras Reativas. Boletim Informativo da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, São Paulo. n.115, junho 2001. Disponível em:

<<http://www.abas.org/abasinforma/115/paginas/20.htm>>. Acesso em: 22 de dezembro de 2022.

OLIVEIRA, Leonardo MTM et al. Sorption as a rapidly response for oil spill accidents: A material and mechanistic approach. **Journal of Hazardous Materials**, v. 407, p. 124842, 2021.

OUESLATI, Walid; AMMAR, Marwa; CHORFI, Nejmeddine. Quantitative XRD analysis of the structural changes of Ba-exchanged montmorillonite: effect of an in situ hydrous perturbation. **Minerals**, v. 5, n. 3, p. 507-526, 2015.

PABIS-MAZGAJ, Ewelina; PICHNIARCZYK, Pawel; STEMPKOWSKA, A; GAWENDA, Tomasz. **Possibility of Using Natural Zeolite Waste Granules Obtained by Pressure Agglomeration as a Sorbent for Petroleum Substances from Paved Surfaces**, 2022.

PARATEXT. Disponível em: [3 Ways Adequate Insurance Coverage Improves Oil Spill Response Management - Paratext. \(paratextsupport.com\)](https://www.paratextsupport.com/3-Ways-Adequate-Insurance-Coverage-Improves-Oil-Spill-Response-Management). Acessado em 22 de dezembro de 2022.

PAULAUSKIENĖ, Tatjana; JUCIKĖ, Indrė. Aquatic oil spill cleanup using natural

sorbents. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 19, p. 14874-14881, 2015.

PICHÓR, W. et al. Synthesis of the zeolites on the lightweight aluminosilicate fillers. **Materials Research Bulletin**, v. 49, p. 210-215, 2014.

Pinto, J., Athanassiou, A., Fragouli, D., 2016. Effect of the porous structure of polymer foams on the remediation of oil spills. *J. Phys. D Appl. Phys.* 49, 145601

PINTO, Roberta Tristão. **Injeção de surfactantes na recuperação avançada de óleo**, 2022.

PIRES, P.J.M. Desenvolvimento de Um Sistema de Dessorção Térmica *In Situ* para Remediação de Materiais Contaminados por Hidrocarbonetos de Petróleo. 2004. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2004.

PRADO, Alexandre G.S.; FARIA, Elaine A.; PADILHA, Pedro M. Aplicação e modificação química da sílica gel obtida de areia. *Quimica Nova*, 2005.

RAJAKOVIC, V. et al. Efficiency of oil removal from real wastewater with different sorbent materials. **Journal of hazardous materials**, v. 143, n. 1-2, p. 494-499, 2007.

RAJAKOVIĆ-OGNJANOVIĆ, Vladana; ALEKSIĆ, G.; RAJAKOVIĆ, Lj. Governing factors for motor oil removal from water with different sorption materials. **Journal of hazardous materials**, v. 154, n. 1-3, p. 558-563, 2008.

REZENDE, M. M.; SILVA, L. R.; CANO, T. M. Sumário Mineral. 2006.

RYU, Young-Ki; KIM, Kyung-Lim; LEE, Chang-Ha. Adsorption and desorption of n-hexane, methyl ethyl ketone, and toluene on an activated carbon fiber from supercritical carbon dioxide. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 39, n. 7, p. 2510-2518, 2000.

Rotar, O.V., Iskrizhitskaya, V.D., Iskrizhitsky, A.A., Oreshina, AA., 2014. Cleanup ofmwater surface from oil spills using natural sorbent materials. *Proced. Chem.* 10, 145–150

SABAH, E.; MAJDAN, M. Removal of phosphorus from vegetable oil by acid-activated sepiolite. **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 3, p. 423-427, 2009.

SANTOS, F.S. *et al.* Chemical Amendment and Phytostabilization of An Industrial Residue Contaminated with Zn and Cd. *Scientia Agricola*, v. 64, n. 5, p. 506-512. 2007.

SALEEM, Junaid *et al.* Super-fast oil uptake using porous ultra-high molecular weight polyethylene sheets. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 25, n. 10, p. 1181-1185, 2014.

SALEEM, Junaid *et al.* Application of strong porous polymer sheets for superior oil spill recovery. **Chemical Engineering & Technology**, v. 38, n. 3, p. 482-488, 2015a.

SALEEM, Junaid *et al.* Combating oil spill problem using plastic waste. **waste management**, v. 44, p. 34-38, 2015b.

SALEEM, Junaid; MCKAY, Gordon. Waste HDPE bottles for selective oilsorption

SALEEM, Junaid; RIAZ, Muhammad Adil; GORDON, McKay. Oil sorbents from plastic wastes and polymers: A review. **Journal of hazardous materials**, v. 341, p. 424-437, 2018.

SARI, Ahmet *et al.* Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of adsorption of Pb (II) from aqueous solution onto Turkish kaolinite clay. **Journal of hazardous materials**, v. 149, n. 2, p. 283-291, 2007.

SARKAR, Binoy *et al.* Toxicity of organoclays to microbial processes and earthworm survival in soils. **Journal of hazardous materials**, v. 261, p. 793-800, 2013.

SAWYER Cl-Química para Ing. Ambiental 4ta edición. Mc Grawhill-Colombia, p: 295-297, 2000.

SHAHADAT, Mohammad *et al.* Regeneration performance of clay-based adsorbents for the removal of industrial dyes: a review. **RSC advances**, v. 8, n. 43, p. 24571-24587, 2018.

SHEN, Yun-Hwei. Preparations of organobentonite using nonionic surfactants. **Chemosphere**, v. 44, n. 5, p. 989-995, 2001.

SHI, Hong-xin *et al.* Preparation of silica aerogel and its adsorption performance to organic molecule. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2014, 2014.

SIMPSON, Joshua A.; BOWMAN, Robert S. Nonequilibrium sorption and transport of volatile petroleum hydrocarbons in surfactant-modified zeolite. **Journal of contaminant**

**hydrology**, v. 108, n. 1-2, p. 1-11, 2009.

SIROTKIN, K. A. Ippolitov and L. Koshkina, Bioregeneration of activated carbon in BAC filtration, Proceedings of Biological Activated Carbon Filtration IWA Workshop, 2002, pp. 29–31.

SOARES, Lélia Cristina da Rocha. Estudo do comportamento da pluma de benzeno em fase dissolvida na água subterrânea sob a influência do sistema de remediação integrado: injeção de ar e extração de vapores do solo, no município de Cubatão-SP. 2012.

SIDHESWARAN, Meera A. et al. Energy efficient indoor VOC air cleaning with activated carbon fiber (ACF) filters. **Building and Environment**, v. 47, p. 357-367, 2012.

SON, H. K. et al. Electrothermal adsorption and desorption of volatile organic compounds on activated carbon fiber cloth. **Journal of Hazardous Materials**, v. 301, p. 27-34, 2016.

SOUZA. L.A. *et al.* Tolerância e Potencial Fitorremediador de *Stizolobiumaterrimum* Associada ao Fungo micorrízicoarbuscular *Glomusetunicatum* em Solo Contaminado por Chumbo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.35, n.3, p.1441-1451, 2011.

SZALA, Barbara et al. BTX sorption on Na-P1 organo-zeolite as a process controlled by the amount of adsorbed HDTMA. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 202, p. 115-123, 2015.

SZEWCZYK, Susana Beatrís Oliveira. Processos envolvidos em um derramamento de óleo no mar. In: **Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO)**. 2006.

TANOBE, Valcineide Oliveira de Andrade. Desenvolvimento de sorventes à base de espumas de poliuretanos flexíveis para o setor do petróleo. 2007.

TAVARES, SR de L. Técnicas de remediação. **Embrapa Solos-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2013.

TIC, Wilhelm J.; PIJAROWSKI, Piotr M. Characteristics of adsorbents used to remove petroleum contaminants from soil and wastewater. **Przemysl Chemiczny**, v. 94, n. 3, p. 301-306, 2015.

THIRUVENKATACHARI, R.; VIGNESWARAN, S.; NAIDU, R. Permeable reactive barrier

for groundwater remediation. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 14, n. 2, p. 145-156, 2008.

TOLEDO, Luciana Cássia et al. Application of Fenton's reagent to regenerate activated carbon saturated with organochloro compounds. **Chemosphere**, v. 50, n. 8, p. 1049-1054, 2003.

TOPHAM, D. R. An analysis of the performance of weir type oil skimmers. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 7, n. 5-6, p. 289-297, 2002.

TOPOUZELIS, Konstantinos N. Oil spill detection by SAR images: dark formation detection, feature extraction and classification algorithms. **Sensors**, v. 8, n. 10, p. 6642-6659, 2008.d

TUUTIJÄRVI, T. et al. As (V) adsorption on maghemite nanoparticles. **Journal of hazardous materials**, v. 166, n. 2-3, p. 1415-1420, 2009.

UGARTE, JF de O.; MONTE, M. B. M.; MIDDEA, A. Adsorção e Dessorção de Óleo em Vermiculita. **XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa-ENTMME, Natal-RN**, 2005.

VILLA, Cristian C. et al. Zeolites for food applications: A review. **Food Bioscience**, p. 101577, 2022.

WAHI, Rafeah et al. Oil removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: an overview. **Separation and Purification Technology**, v. 113, p. 51-63, 2013.

WANG, Ding et al. Adsorption of organic compounds in vapor, liquid, and aqueous solution phases on hydrophobic aerogels. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 50, n. 21, p. 12177-12185, 2011.

Wang, J., Zheng, Y., Wang, A., 2012. Effect of kapok fiber treated with various solvents on oil absorbency. *Ind. Crops Prod.* 40, 178–184.

WDOWIN, Magdalena et al. The conversion technology of fly ash into zeolites. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, p. 1217-1223, 2014.

WDOWIN, M. **Raw kaolin as a potential material for the synthesis of a-Type Zeolite. Gospodarka Surowcami Mineralnymi Miner. Resour. Manag**, 2015.

WETLER-TONINI, Rita Maria Costa. REZENDE, Carlos Eduardo. GRATIVOL, Adriana Daudt. **Degradação e biorremediação de compostos do petróleo por bactérias: Revisão.** 2010.

WILSON M.J. “Clay Mineralogy:Spectroscopic and Chemical Determinative Methods” Head, Division of Soils, FRSE, New York, 45-49, 2002.

WONG, Kau-Fui Vincent; STEWART, Hugh O. Oil spill boom design for waves. **Spill science & technology bulletin**, v. 8, n. 5-6, p. 543-548, 2003.

Wu, D., Wu, W., Yu, Z., Zhang, C., & Zhu, H. (2014). Facile preparation and characterization of modified polyurethane sponge for oil absorption. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(52), 20139-20144.

Xiong, W., Bernesky, R., Bechard, R., Michaud, G., Lang, J., 2014. A tiered approach to distinguish sources of gasoline and diesel spills. *Sci. Total Environ.* 487, 452–462.

YE, Xudong et al. A simulation-based multi-agent particle swarm optimization approach for supporting dynamic decision making in marine oil spill responses. **Ocean & Coastal Management**, v. 172, p. 128-136, 2019.

Yu, L., Hao, G., Liang, Q., & Jiang, W. (2015). Fabrication of magnetic porous silica submicroparticles for oil removal from water. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(38), 9440-9449.

ZADAKA-AMIR, Dikla; BLEIMAN, Nimrod; MISHAEL, Yael G. Sepiolite as an effective natural porous adsorbent for surface oil-spill. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 169, p. 153-159, 2013.

Zhang, A., Chen, M., Du, C., Guo, H., Bai, H., & Li, L. (2013). Poly (dimethylsiloxane) oil absorbent with a three-dimensionally interconnected porous structure and swellable skeleton. *ACS applied materials & interfaces*, 5(20), 10201-10206.

ZHANG, Wenbin et al. Capturing CO<sub>2</sub> from ambient air using a polyethyleneimine–silica adsorbent in fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, v. 116, p. 306-316, 2014.

ZHANG, Chengzhao et al. Regeneration of mesoporous silica aerogel for hydrocarbon adsorption and recovery. **Marine pollution bulletin**, v. 122, n. 1-2, p. 129-138, 2017.

ZHOU, Z. X. et al. Trade-offs between carbon, water, soil and food in Guanzhong-Tianshui economic region from remotely sensed data. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 58, p. 145-156, 2017.

Zahugi, E.M.H., Mohamed, M.S., Prasad, T.V. **Design of multi-robot system for cleaning up marine oil spill**, 2012.