



**1º Encontro Interdisciplinar em Energia, Programa de Pós-graduação em Energia, Ufes**



**Biocompósitos poliméricos e fibras naturais para separação óleo-água: uma revisão sobre materiais, modificações e desempenho**

***Polymeric biocomposites and natural fibers for oil-water separation: a review on materials, modifications, and performance***

Arieli Santos de Andrade Segantine<sup>1,\*</sup>, Paulo Sérgio da Silva Porto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

<sup>2</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

\*Autor para correspondência, E-mail: [arieli.segantine@edu.ufes.br](mailto:arieli.segantine@edu.ufes.br)

**Resumo:** A expansão contínua da industrialização, a demanda por energia e o desenvolvimento econômico têm sido diretamente correlacionados com o aumento da incidência de contaminação por óleo e a descarga de efluentes oleosos, configurando um risco ambiental e ecológico de magnitude global que ameaça a saúde humana e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos. O desenvolvimento de materiais sorventes sustentáveis para o tratamento de efluentes oleosos baseia-se primordialmente na valorização resíduos agrícolas de biomassa, cuja estrutura é majoritariamente composta por fibras naturais como celulose, hemicelulose e lignina. Este estudo realiza uma revisão sistemática da literatura recente sobre compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais aplicados ao tratamento de efluentes oleosos. A análise foca em estratégias de modificação e avalia o desempenho dos materiais quanto à capacidade de sorção, seletividade, reusabilidade e estabilidade.

**Palavras-chave:** Biocompósitos; Fibras naturais; Separação óleo-água; Sorção; Reutilização.

**Abstract:** The continuous expansion of industrialization, energy demand, and economic development has been directly correlated with the increasing incidence of oil spills and the discharge of oily effluents, posing an environmental and ecological risk of global magnitude that threatens human health and the sustainability of aquatic ecosystems. The development of sustainable sorbent materials for the treatment of oily effluents is primarily based on the valorization of agricultural biomass residues, whose structure is mainly composed of natural fibers such as cellulose, hemicellulose, and lignin. This study conducts a systematic review of the recent literature on natural fiber-reinforced polymer composites applied to the treatment of oily effluents. The analysis focuses on modification strategies and evaluates the materials' performance in terms of sorption capacity, selectivity, reusability, and stability.

**Keywords:** Biocomposites; Natural fibers; Oil–water; separation; Sorption; Reusability.

## 1 Introdução

A expansão contínua da industrialização, a crescente demanda por energia e o desenvolvimento econômico têm sido diretamente correlacionados ao aumento da incidência de derramamentos de óleo e da descarga de efluentes oleosos, configurando um risco ambiental e ecológico de magnitude global, que ameaça tanto a saúde humana quanto a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos (Alessandro et al., 2025). Os métodos de remediação e materiais convencionais, como zeólitas, apresentam limitações significativas: alto custo operacional, geração de poluição secundária, baixa eficiência, além de capacidade de sorção limitada,

seletividade restrita óleo/água e reduzida reusabilidade (Chen et al., 2024; Zhang et al., 2023; Liu et al., 2023). Neste contexto, fibras naturais surgem como alternativas sustentáveis e de baixo custo. Quando associadas a espumas poliméricas, formam compósitos com propriedades estruturais e funcionais aprimoradas, superando limitações dos materiais isolados (Calabrese, 2020; Verma et al., 2020).

As fibras naturais ou biofibras, provenientes de fontes renováveis como resíduos agrícolas, destacam-se por seu baixo custo, baixa densidade e biodegradabilidade (Viju et al., 2023). Sua composição é predominantemente formada por celulose, hemicelulose e lignina (Pham et al., 2023; Huang et al., 2022). Contudo, a principal limitação das fibras na separação de óleo e água decorre de sua natureza hidrofílica, atribuída à abundância de grupos hidroxila (-OH) em sua superfície, o que reduz sua seletividade por óleo. Para superar essa limitação, modificações superficiais são necessárias para conferir propriedades de hidrofobicidade (Khan et al., 2020).

O desenvolvimento de materiais compósitos poliméricos baseados em biomassa tem se mostrado uma estratégia promissora para superar estas limitações, possibilitando a obtenção de materiais com desempenho superior na separação seletiva óleo/água (Lang et al., 2025). A incorporação de polímeros ou revestimentos de baixa energia superficial aumenta a durabilidade, resistência mecânica, estabilidade química e hidrofobicidade. Entre os exemplos recentes destacam-se o poli(ácido láctico) (PLA) (Chhaged et al., 2022), o poli(vinilideno fluoreto) (PVDF) (Alessandro et al., 2025), o poliuretano (PU) (Maia et al., 2024) e biopolímeros como as espumas de amido termoplástico (TPS) (Nugroho, 2023).

Diante deste panorama, a presente pesquisa parte da hipótese de que a incorporação de fibras naturais a matrizes poliméricas pode resultar em compósitos sorventes sustentáveis e altamente eficientes na remoção de óleo de emulsões óleo/água.

### **1.1 Estratégias de modificação de fibras naturais para biocompósitos aplicados na separação óleo/água**

O desenvolvimento de biocompósitos sustentáveis reforçados com fibras naturais para a sorção de óleo baseia-se na valorização de recursos de biomassa, como as fibras de kapok, palha de milho, palha de arroz e bagaço, investigadas devido à sua abundância, baixo custo e alta porosidade (Maia et al., 2024; Chen et al., 2023; Chhaged et al., 2022). Contudo, o principal desafio é a hidrofília intrínseca da celulose, cujo excesso de grupos hidroxila (-OH) resulta na co-adsorção de água e na redução da capacidade de sorção de óleo (Alessandro et al., 2025; Lei et al., 2023).

Para contornar este problema, a modificação da superfície das fibras é essencial para conferir super-hidrofobicidade e oleofilia (Das e Goud, 2023; Chen et al., 2024). Tais modificações visam reduzir a energia superficial do material por meio de rotas químicas e físicas, destacando-se a silanização, que emprega agentes como metiltrimetoxissilano (MTMS) para substituir os grupos -OH por grupos alquílicos de baixa energia (Chen et al., 2024); a acetilação, que converte a celulose em derivados como o triacetato de celulose (CTA); e o revestimento polimérico, que utiliza polímeros de baixa energia superficial como PDMS ou PLA para maximizar a repelência à água (Alessandro et al., 2025).

Essas abordagens orientam o desenvolvimento de compósitos poliméricos avançados, cuja eficiência depende da manipulação da porosidade, molhabilidade e robustez estrutural, em conformidade com os princípios da química verde (Maia et al., 2024). Pesquisas recentes apontam a transição de polímeros petroquímicos para bio-polímeros, como os derivados de óleo de rícino, ampliando o caráter sustentável dos materiais. Compósitos de espuma de PU (PUF) podem ser sintetizados pela técnica de espumação *one-step*, e a adição de resíduos de casca de macadâmia (MW) demonstrou aumentar o ângulo de contato hídrico e a densidade, mantendo elevada reusabilidade (Maia et al., 2024). Outras modificações, como a funcionalização com sílica (Si-PUF) obtida de biomassa, elevam a capacidade de sorção para valores entre 8.6 a 37.10 vezes o seu peso, com boa estabilidade cíclica (Ibrahim e Hanafi, 2024).

Por outro lado, o Poli(vinilideno fluoreto) (PVDF), polímero de alta resistência e hidrofobicidade, apresenta baixa porosidade. Alessandro et al. (2025) demonstraram que a incorporação de CTA derivado de kapok aumenta a porosidade da membrana e otimiza a absorção de óleo. De modo similar, Chhaged et al. (2022) aplicaram o PLA como revestimento hidrofóbico, alcançando ângulos de contato de até 114° e maior resistência mecânica. Embora o Polipropileno (PP) seja utilizado como sorvente, sua natureza não biodegradável limita sua aplicação sustentável (Sinha et al., 2020; Chhaged et al., 2022). Como alternativas renováveis, destacam-se o Poliestireno Expandido (EPS) e as espumas de amido termoplástico (TPS). Para o TPS, Nugroho (2023) observou que a adição de reforço celulósico aumenta a densidade e reduz a absorção de água, melhorando o desempenho do biocompósito.

## 1.2 Técnicas de incorporação de fibras em matrizes poliméricas

O desenvolvimento de compósitos poliméricos voltados à sorção seletiva de óleo requer metodologias de processamento precisas, que assegurem a dispersão homogênea das fibras e o controle da arquitetura porosa da matriz. A escolha da técnica de incorporação depende do tipo de polímero, da proporção de reforço e das propriedades finais desejadas. Estratégias complementares incluem o uso de revestimentos superficiais e métodos termomecânicos de moldagem.

O poli(ácido láctico) (PLA), por exemplo, tem sido utilizado como revestimento em aerogéis de nanofibras de celulose (NFC) obtidas de palha de arroz. O processo envolve a liofilização do material e a aplicação do PLA por pulverização, alterando a molhabilidade da superfície e aprimorando a hidrofobicidade (Chhajed et al., 2022). Na valorização de resíduos, a integração de plásticos descartados, como o poli(cloreto de vinila) (PVC) residual, com celulose proveniente de talos de algodão, é realizada por meio de uma técnica de impregnação-revestimento em etapa única. Nessa abordagem, a esponja de celulose é imersa em uma solução de PVC e TPP em DMF, seguida de liofilização. Segundo Lang et al. (2025), essa incorporação aumenta a resistência mecânica e confere super-hidrofobicidade sub-óleo ao compósito.

Outros exemplos incluem a produção de espumas de amido termoplástico (TPS) por termo-prensagem, na qual o amido de mandioca é combinado com reforços naturais, como o pó de folhas de abacaxi (PLP), resultando em materiais leves e biodegradáveis (Nugroho, 2023). Além disso, técnicas de copolimerização por enxerto têm sido exploradas — como a aplicação de monômeros de vinil sobre serragem, visando aumentar a oleofilicidade e a estabilidade estrutural (Tung et al., 2022).

De forma geral, a integração controlada entre fibras agrícolas e polímeros biodegradáveis é determinante para a eficiência dos compósitos desenvolvidos. Essa sinergia aproveita a resistência mecânica das fibras e a durabilidade das matrizes poliméricas, garantindo a seletividade óleo/água e consolidando essas metodologias como rotas promissoras para a obtenção de materiais sorventes sustentáveis e de alto desempenho.

## 1.3 Sustentabilidade e eficiência energética no desenvolvimento de biocompósitos

A sustentabilidade de materiais destinados à remediação ambiental envolve a origem renovável das matérias-primas, a minimização de resíduos e a viabilidade de um descarte seguro. Nesse contexto, o uso crescente de matrizes poliméricas derivadas de biomassa reflete a busca por soluções mais ecológicas e economicamente viáveis (Abdelwahab et al., 2021).

Atualmente, a pesquisa tem se concentrado na valorização de resíduos agrícolas e industriais, transformando passivos ambientais em sorventes de alto desempenho (Chen et al., 2024). Uma das principais vantagens dos sorventes de biomassa é a sua biodegradabilidade, que contrasta com os materiais sintéticos convencionais, não biodegradáveis, como apontam Sinha, Kanagasabapathi e Maity (2020). A transição para esses compósitos busca, assim, equilibrar eficiência de sorção e durabilidade com a redução de impactos ambientais.

Além disso, a crise energética global impulsiona o desenvolvimento de materiais alinhados aos princípios de eficiência energética. Nesse sentido, a valorização de resíduos como matéria-prima (Chhajed et al., 2022) não só reduz o consumo energético associado à produção de sorventes sintéticos, como também representa uma solução tecnológica integrada, capaz de conciliar alto desempenho e sustentabilidade (Li et al., 2021).

Nesse sentido, o presente estudo realiza uma revisão sistemática da literatura, para identificar, analisar e sintetizar pesquisas recentes sobre o desenvolvimento e a aplicação de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais aplicados no tratamento de efluentes oleosos.

## 2 Metodologia

Este estudo foi conduzido integrando uma pesquisa bibliográfica realizada nas bases de dados Scopus, *Web of Science* e Portal de Periódicos CAPES para selecionar trabalhos de relevância nas áreas de Engenharia, Tecnologia e Gestão tendo como combinação relacionados à pesquisa, utilizando operadores booleanos.

No banco de dados investigado, a principal *string* de busca empregada foi um conjunto de palavras-chave que delimitasse o tema de pesquisa, conforme demonstrado a seguir:

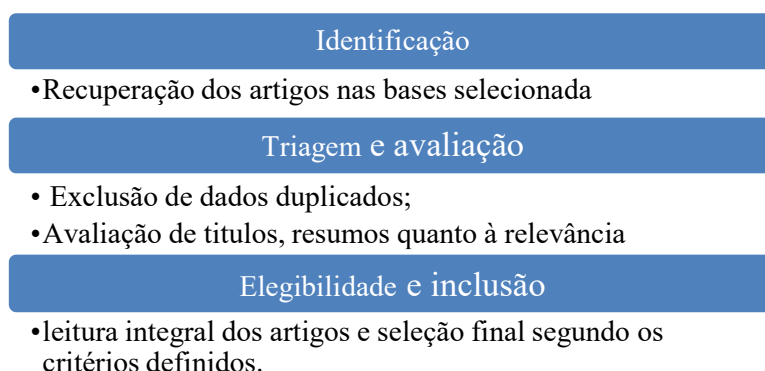
("natural fiber\*" OR "vegetable fiber\*" OR "lignocellulosic fiber\*" OR "cellulosic fiber\*" OR "agro-waste" OR "agricultural waste" OR sisal OR coir OR jute OR cotton OR bamboo) AND ("oil spill" OR

"oily water" OR "oily wastewater" OR "oil emulsion" OR "oil contamination" OR "produced water" OR "hydrocarbon pollution" OR "petroleum effluent"). Nessa pesquisa foram selecionados artigos experimentais, publicados na língua inglesa, que relacionassem o uso de biocompósitos reforçados com fibras naturais para a remoção ou separação de óleo em meio aquoso. Após implementar o uso da *string*, obteve-se como resultado 666 registros, sendo 393 da base Scopus e 273 da base *web of Science* (WoS). Como resultado geral, foram obtidos dois arquivos *bibtex* referente a cada base pesquisada.

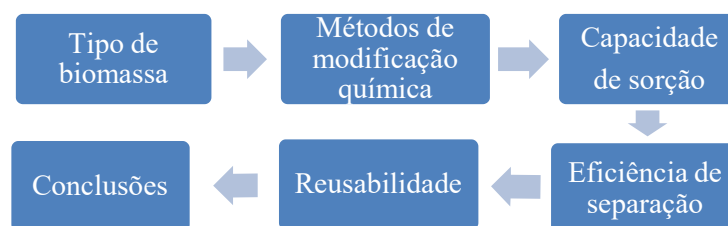
## 2.1 Triagem e seleção

Os resultados das buscas foram exportados das suas bases em formato *bibtex*. Como é possível obter a duplicidade de informações quando se utiliza mais de uma base de pesquisa, assim foi necessário identificar e extrair artigos em duplicidade.

Nesse sentido, o software Zotero foi utilizado como ferramenta para gerenciar e identificar essas possíveis duplicidades. Dessa forma, após a exclusão automática de registros repetidos, obteve-se como resultado 279 artigos. Entretanto, este conjunto passou por uma triagem que foi conduzida segundo as diretrizes PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), que compreende um conjunto de três etapas principais:



Após a triagem inicial por títulos e resumos, 72 artigos foram considerados potencialmente relevantes, dos quais 42 foram selecionados para análise integral. Na etapa de leitura completa, 13 artigos foram excluídos por não atenderem aos critérios de inclusão, a saber: a) estudos focados exclusivamente em sorventes poliméricos sem a presença de fibras naturais; b) pesquisas voltadas a contaminantes distintos de óleos e hidrocarbonetos; ou c) indisponibilidade de acesso ao texto completo. Este processo resultou em um portfólio de 29 artigos. Adicionalmente, este conjunto foi suplementado por publicações relevantes identificadas por meio de busca manual nas referências dos estudos selecionados, visando ampliar a cobertura temática. Dos artigos selecionados, foram extraídas as seguinte informações:



Os dados foram sistematizados em planilha e analisados qualitativa e descritivamente, visando identificar tendências, lacunas e perspectivas futuras no campo dos biocompósitos sustentáveis para remediação de poluentes oleosos.

## 3 Resultados e discussões

A avaliação da aplicabilidade de sorventes sustentáveis, com foco em biocompósitos derivados de biomassa, exige uma análise detalhada de parâmetros de desempenho cruciais. Esta seção sintetiza os resultados reportados na literatura, cujos dados principais estão consolidados nas Tabelas 1 e 2, abrangendo

o material do compósito, capacidade de sorção, reusabilidade e estabilidade química e mecânica. A Tabela 1 apresenta os resultados relativos aos aerogéis biocompósitos, enquanto a Tabela 2 reúne os dados referentes a outros tipos de biocompósitos sorventes, como espumas, membranas e tecidos modificados. A análise sublinha a sinergia entre o esqueleto de biomassa e a matriz polimérica funcionalizante na criação de materiais de alto desempenho para remediação ambiental.

Tabela 1. Síntese de resultados de aerogéis biocompósitos.

| Material do biocompósito  | Capacidade de Sorção   | Reusabilidade     | Estabilidade Química / Mecânica  | Autores             |
|---|--|-------------------|--|---------------------|
| H@BGA (Aerogel de Fibra de Bambu, GO e HDTMS)                           | 55-123 g/g (vários óleos e solventes).                                   | 8 ciclos          | Excelentes propriedades mecânicas; o revestimento de HDTMS aumenta a tensão de compressão. | Liu et al. (2023)   |
| MCA (Aerogel de Celulose Modificada de Palha de Milho + MTMS)           | 29,5-78,2 g/g (óleos e solventes).                                       | 10 ciclos         | Estrutura de rede 3D estável devido ao ligante PVA.  | Chen et al. (2024)  |
| CCA5-Ver (Aerogel de Carbono Anisotrópico de Fibra de Folha de Abacaxi) | Máx. aprox. 131 g/g (óleo de bomba).<br>Faixa de 90-137 g/g.             | 7 ciclos          | Flexível e com boa elasticidade. Carbonização remove grupos hidrofílicos.                  | Pham et al. (2023)  |
| SDS-A (Aerogel de Celulose Sililada de Resíduos de Ervas + MTMS)        | Capacidade de (25-105 g/g).<br>Adsorção rápida (5 s).<br>4,06-12,31 g/g. | Não quantificada. | Durabilidade química em NaCl, NaOH, HCl. Resistência ao desgaste mecânico.                 | Chen et al. (2023)  |
| MACA (Aerogel de Carvão Ativado de Bagaço + PDMS + DE)                  | Máx. 8,38 ± 0,38 g/g (gasolina).   | Não quantificada. | Preparado por ativação KOH.  | Huang et al. (2022) |

A Tabela 1 sintetiza os principais resultados relacionados aos aerogéis biocompósitos, materiais conhecidos por sua alta porosidade, baixa densidade e excelente capacidade de sorção, características que os tornam promissores para a remoção de contaminantes oleosos. Observa-se que a combinação de diferentes matrizes celulósicas e modificações superficiais, proporcionou desempenhos superiores de adsorção e boa estabilidade mecânica e química.

Na sequência, a Tabela 2 apresenta outros tipos de biocompósitos sorventes, incluindo espumas de poliuretano, membranas e tecidos funcionalizados, que, embora possuam estruturas distintas dos aerogéis, também demonstram elevado potencial para separação e recuperação de óleos. Essa comparação permite avaliar a versatilidade dos diferentes sistemas compósitos quanto à eficiência de sorção, reusabilidade e estabilidade estrutural.

Tabela 2. Síntese de resultados biocompósitos sorventes.

| Material do biocompósito   | Capacidade de Sorção   | Reusabilidade   | Estabilidade Química / Mecânica  | Autores                  |
|--|--|---|--|--------------------------|
| PU+20 (Espuma de Poliuretano à base de óleo de rícino + Resíduo de Macadâmia)      | 7,3 g/g (Óleo Cru).<br>Capacidade máxima de adsorção de Langmuir: 5,39 g/g (Óleo Cru). | 30 ciclos (óleos crus, Diesel S10) e 10 ciclos (Diesel S500). | Boa robustez devido ao reforço lignocelulósico (MW).                                   | Maia et al. (2024)       |
| CPxTy (Esponja Compósita de Celulose de Talo de Algodão + PVC/TPP)                 | Alta eficiência de separação de emulsão (>99).   | 5 ciclos.   | Excelente resistência à compressão, estabilidade a ácidos, bases, óleos e temperatura. | Lang et al. (2025)       |
| PVDF/CTA (Membranas de PVDF + Triacetato de Celulose de Kapok)                     | 1,828 m <sup>2</sup> de membrana / 1 kg de óleo cru.                                   | Potencial de reusabilidade (regeneração térmica).             | PVDF confere resistência química. CTA melhora a estabilidade térmica e química.        | Alessandro et al. (2025) |
| Alg. + PFDS-Sílica (Tecido de Algodão Revestido com PFDS-Sílica de Palha de Arroz) | Eficiência de separação 97.3 %   | 40 ciclos.  | Estabilidade ao revestimento devido à baixa energia superficial do PFDS.               | Das e Goud (2023)        |
| Nettle DTMS Treated (Fibra de Urtiga Modificada com DTMS)                          | 41.89 g/g (Óleo Cru); 31.39 g/g (Diesel).  | 6 ciclos  | Quimissorção primária.   | Viju et al. (2023)       |
| Si-PUF (Espuma de PU Reciclada + Sílica de Dendê)                                  | Máx. 28.89 g/g (Diesel).   | Não especificado.   | Estabilidade da espuma de PU reciclada.  | Ibrahim e Hanafi (2024)  |
| SD-g-poly(LMA) (Serragem Enxertada com Metacrilato de Lauril)                      | 22.30 g/g (Óleo Cru).  | Não especificado.   | Quimissorção predominante. A incorporação de poly(LMA) confere caráter mais amorfo.    | Tung et al. (2022)       |

### 3.1 Capacidade de sorção

A capacidade mássica de sorção, indicador primário de eficiência, está intrinsecamente associada à microestrutura e densidade do sorvente. Neste quesito, os aerogéis biocompósitos (Tabela 1) demonstram consistentemente um desempenho superior, atribuído à sua alta porosidade e baixa densidade.

Os aerogéis destacam-se com valores notáveis. O H@BGA, um compósito de bambu, grafeno e silano, exibe uma capacidade de adsorção na faixa de 55 a 123 g/g (Liu et al., 2023), performance atribuída à sua grande área de superfície específica (65.7909 m<sup>2</sup>/g) e porosidade abundante. De forma ainda mais expressiva, o aerogel de carbono CCA5-Ver, derivado de fibra de abacaxi, alcançou uma capacidade de sorção de até 130 g/g, impulsionada por uma porosidade extrema de 99,68% (Pham et al., 2023). Outros aerogéis, como o MCA de palha de milho, também registraram alta capacidade (29,5 a 78,2 g/g) graças à sua estrutura de rede tridimensional (Chen et al., 2024).

Nos demais biocompósitos sorventes (Tabela 2), a incorporação de biomassa atua como um reforço funcional na matriz polimérica. A espuma PU + 20% MW, embora com valores mais modestos (7,3 g/g), demonstra a viabilidade de resíduos como a casca de macadâmia (Maia et al., 2024). A funcionalização eleva significativamente este desempenho: o revestimento de espuma de PU reciclada com sílica de dendê (Si-PUF) aumentou a capacidade para 28,89 g/g (Ibrahim e Hanafi, 2024), enquanto a serragem enxertada

com metacrilato de lauril (SD-g-poly(LMA)) atingiu 22,30 g/g (Tung et al., 2022), evidenciando que a modificação química é tão crucial quanto a arquitetura física.

A seletividade óleo/água é garantida pela combinação de super-hidrofobicidade e oleofilicidade, quantificada pelo ângulo de contato com a água (WCA). A modificação com organossilanos de baixa energia superficial mostra-se a estratégia mais eficaz, conforme indicado nas tabelas de referência. O aerogel MCA (Chen et al., 2024) e o H@BGA (Liu et al., 2023) alcançaram ângulos de contato de 154,8° e 151,5°, respectivamente, conferindo-lhes propriedades super-hidrofóbicas ideais para a absorção seletiva.

De modo similar, entre os demais biocompósitos, o revestimento de tecido de algodão com sílica e silano fluorado (Alg. + PFDS-Sílica) resultou em um WCA de aproximadamente 160° e um ângulo de contato com óleo quase nulo, caracterizando uma seletividade exemplar (Das e Goud, 2023).

Estudos como o de Albuquerque et al. (2021) destacam a eficiência de fibras naturais, como o kapok (*Chorisia speciosa*), na sorção de diesel em comparação com espumas comerciais de poliuretano, devido à sua estrutura oca e oleofílica, embora a espuma polimérica apresente maior estabilidade temporal. Paralelamente, a engenharia de materiais tem gerado biocompósitos robustos, como as espumas de carbono/poliuretano (Ren et al., 2020), onde o compósito H@BGA (bambu/grafeno) manteve uma capacidade de adsorção de 95,3-98% após 8 ciclos, e modificações de superfície, como o algodão tratado com SH-PDMS Hu e Tan (2025), alcançaram separação contínua de alto fluxo para emulsões estáveis.

Além da hidrofobicidade convencional, foram identificadas propriedades de molhabilidade avançadas. Materiais modificados com polidopamina (PDA) exibiram comportamento de dupla super-repelência — repelindo tanto o óleo sob água quanto a água sob óleo — com ângulos de contato superiores a 150°, uma característica vital para a separação de emulsões. Em outra abordagem, a esponja CPxTy demonstrou super-hidrofobicidade sob óleo (UOWCA superior a 150°), garantindo a repulsão da água mesmo em um ambiente saturado por óleo (Lang et al., 2025).

### 3.2 Reusabilidade

A sustentabilidade econômica e ambiental dos sorventes é diretamente relacionada à sua capacidade de manter o desempenho após múltiplos ciclos de uso. Tanto os aerogéis quanto os demais biocompósitos demonstram excelente potencial de reuso, com variações associadas ao tipo de matriz e ao método de modificação superficial.

Nos materiais têxteis modificados, como o algodão com PFDS-sílica, a eficácia de separação permaneceu em 97,3% após 40 ciclos (Das e Goud, 2023). Os biocompósitos também demonstram grande robustez: a espuma PU + 20% MW (Maia et al., 2024) suportou 30 ciclos para óleos crus, um desempenho notável para uma matriz de espuma. Já entre os aerogéis, a estabilidade também é expressiva — o H@BGA (Liu et al., 2023) manteve mais de 95% de sua capacidade após 8 ciclos, e o F-DA-cane apresentou uma redução de apenas 9,1% após 10 ciclos (Li et al., 2021), o que comprova a estabilidade estrutural dessas redes porosas.

### 3.3 Estabilidade química e resistência mecânica

A durabilidade dos sorventes é um fator crítico, especialmente sua resistência a ambientes quimicamente agressivos. Nos aerogéis biocompósitos, a presença de ligações cruzadas e revestimentos com silanos contribui para a estabilidade em meios ácidos, básicos ou salinos, como observado para o SDS-A (Chen et al., 2023). De forma similar, materiais como o CPxTy (Lang et al., 2025) mostraram notável resiliência, resistindo a ácidos, bases e soluções salinas por longos períodos sem perda da hidrofobicidade. A modificação de fibras naturais, como a acetilação do kapok no compósito PVDF/CTA, também se provou eficaz para aumentar a resistência à degradação química (Alessandro et al., 2025).

No quesito mecânico, a matriz polimérica frequentemente confere uma robustez que a biomassa pura não possui. O compósito CPxTy, por exemplo, suportou compressão de até 873 kPa — um valor muito superior ao de aerogéis de celulose convencionais — graças ao revestimento de PVC-TPP. Da mesma forma, o revestimento de aerogéis de palha de arroz com PLA (RPA-3) elevou seu estresse compressivo de 45 kPa para 326 kPa. Esses resultados demonstram que a sinergia entre o polímero e a biomassa não apenas funcionaliza a superfície, mas também fortalece a estrutura integral do sorvente, habilitando-o para aplicações práticas e cíclicas.

A pesquisa em biocompósitos aponta vantagens significativas, sendo a principal a sustentabilidade pela utilização de resíduos. A eficiência e seletividade são elevadas, com taxas de separação > 99,8% e ângulos de contato com a água (WCA) > 150° (Chen et al., 2024; Mai et al., 2020). Muitos compósitos

oferecem multifuncionalidade, incluindo a conversão fototérmica (em compósitos com revestimento de PDA), que acelera a sorção de óleos viscosos. Apesar desses benefícios, persistem limitações, como o uso de reagentes de superfície avançados (silanos fluorados), que pode ser oneroso e complexo para a produção em larga escala (Chhajed et al., 2022). Além disso, a degradação estrutural pode ocorrer em materiais menos robustos, levando à perda significativa de capacidade de sorção após o primeiro ciclo de compressão manual (Tran et al., 2020).

Em síntese, os resultados comparativos entre os aerogéis biocompósitos (Tabela 1) e os demais biocompósitos sorventes (Tabela 2) demonstram que o desempenho dos sorventes depende da integração equilibrada entre propriedades físico-químicas e estruturais, diretamente influenciadas pela composição da matriz e pela origem da biomassa utilizada. A combinação de alta capacidade de sorção, seletividade oleofílica, estabilidade química e resistência mecânica define o potencial de aplicação desses materiais em sistemas reais de remediação. Assim, a sinergia entre funcionalização, arquitetura porosa e sustentabilidade reafirma os biocompósitos de origem renovável como alternativas promissoras e tecnicamente viáveis para substituição dos sorventes convencionais de base petroquímica.

## 4 Conclusões

A presente análise permite sintetizar os principais avanços alcançados:

- a) Melhorias significativas em eficiência e seletividade - desenvolvimento de aerogéis de biomassa com alta capacidade de sorção (até 130 g/g) e extrema superhidrofobicidade ( $WCA \approx 160^\circ$ ), resultando em eficiências de separação óleo/água superiores a 99,8% (Chen et al., 2024; Pham et al., 2023).
- b) Aumento da resistência mecânica e durabilidade - combinação com matrizes poliméricas que confere elevada resistência à compressão (até 873 kPa) e melhora a estabilidade estrutural do material em aplicações práticas. Além disso, observou-se reusabilidade notável em ciclos prolongados (p.ex. 30 ciclos em Maia et al., 2024; até 40 ciclos em Das & Goud, 2023).
- c) Desafios tecnológicos e econômicos remanescentes - apesar dos avanços, persistem barreiras à transposição tecnológica e à viabilidade econômica em escala industrial; há necessidade de métodos de modificação mais acessíveis e ambientalmente corretos, bem como de estratégias de regeneração que garantam remoção completa de resíduos e manutenção da capacidade de sorção ao longo de muitos ciclos.
- d) Diretrizes e prioridades para pesquisa futura - recomendar investigação de rotas de modificação ecoeficientes, desenvolvimento de mecanismos regenerativos “verdes” e funcionalidades voltadas à degradação biológica assistida; priorizar estudos de escalabilidade e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para assegurar descarte e implantação sustentáveis.

## Agradecimentos

Agradecimento. O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Os autores agradecem também ao Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES). Agradecemos também ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

## Referências bibliográficas

Abdelwahab et al. O (2021) ‘Oil Spill Cleanup Using Chemically Modified Natural Fibers: Trial for Practical Application’, *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 25(2):457–464, <https://doi.org/10.21608/ejabf.2021.164619>.

Albuquerque CG, Meili L, Soletti JI, Oliveira LMTDM, Espíndola Filho JM, Lacerda AF and Lourenço RDO (2021) ‘Comparative study of diesel sorption performance between *Chorisia speciosa* fibers and a commercial polyurethane foam’, *Matéria (Rio de Janeiro)*, 26(1):e12919, <https://doi.org/10.1590/s1517-707620210001.1219>.

Alessandro L, Chan EWC, Jaafar J, Beardall J and Soo MOY (2025) ‘Characterization of porous cellulose triacetate derived from kapok fibres (*Ceiba pentandra*) as a tool to enhance crude oil absorption’, *Discover Materials*, 5(1):39, <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00167-6>.



Calabrese L, Piperopoulos E and Fiore V (2020) ‘Arundo Donax Fibers as Green Materials for Oil Spill Recovery’, in A Khan, S Mavinkere Rangappa, S Siengchin, and AM Asiri (eds) *Biofibers and Biopolymers for Biocomposites*, Springer International Publishing, Cham, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-40301-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40301-0_13).

Chen L, Zhang G, Xu B and Guo J (2024) ‘Highly efficient oil–water separation using superhydrophobic cellulose aerogels derived from corn straw’, *Green Processing and Synthesis*, 13(1):20240063, <https://doi.org/10.1515/gps-2024-0063>.

Chen P, Liu H, Qi Y, Wang J, Hou X, Qu J, Lei C, Lv C and Hu Q (2023) ‘Multifunctional absorbents for oily pollution control and mechanistic insights with theoretical simulation’, *Chemical Engineering Journal*, 471:144466, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144466>.

Chhajed M, Verma C, Sathawane M, Singh S and Maji PK (2022) ‘Mechanically durable green aerogel composite based on agricultural lignocellulosic residue for organic liquids/oil sorption’, *Marine Pollution Bulletin*, 180:113790, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113790>.

Das S and Goud VV (2023) ‘Rice husk derived biogenic silica coated cotton as an effective, sustainable oil-water separation platform’, *Biomass and Bioenergy*, 177:106935, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106935>.

Sinha, SK, Kanagasabapathi, P e Maity, S (2020) *Performance of natural fibre nonwoven for oil sorption from sea water*. *Tekstilec*, 63(1), 14–26., <https://doi.org/10.14502/Tekstilec2020.63.14-26>.

Hu X and Tan J (2025) ‘Non-fluorinated superhydrophobic cotton for super high flux continuous separation of oil-water mixtures and surfactant stabilized water-in-oil emulsions’, *Journal of Water Process Engineering*, 72:107643, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107643>.

Huang Y, Wu Y, Tao H and Yuan B (2022) ‘Bio-Based Porous Aerogel with Bionic Structure and Hydrophobic Polymer Coating for Efficient Absorption of Oil/Organic Liquids’, *Polymers*, 14(21):4579, <https://doi.org/10.3390/polym14214579>.

Lang D, Liu G, Wu R, Wang W, He S, Wu J, Yang C, Wang L and Fu J (2025) ‘Anisotropic waste PVC/Cotton stalk cellulose composite sponges with under-oil superhydrophobicity for efficient oil-water separation’, *Separation and Purification Technology*, 373:133575, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133575>.

Lei C, Chen P, Zhang Z, Hua F, Hou X, Qu J, Zhao Y and Hu Q (2023) ‘Cellulose cryogels from herbal residues for oily wastewater purification’, *International Journal of Biological Macromolecules*, 252:126417, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126417>.

Li Z, Zhu Y, Xi J, Ye D, Hu W, Song L, Hu Y, Cai W and Gui Z (2021) ‘Scalable production of hydrophobic and photo-thermal conversion bio-based 3D scaffold: Towards oil-water separation and continuous oil collection’, *Journal of Cleaner Production*, 319:128567, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128567>.

Liu T, Li D, Huang K, Tan S and Huang L (2023) ‘Preparation and water/oil separation of superhydrophobic biomass adsorbent based on three-dimensional graphene aerogel’, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 98(3):744–755, <https://doi.org/10.1002/jctb.7279>.

Mai VC, Das P, Zhou J, Lim TT and Duan H (2020) ‘Mussel-Inspired Dual-Superlyophobic Biomass Membranes for Selective Oil/Water Separation’, *Advanced Materials Interfaces*, 7(6):1901756, <https://doi.org/10.1002/admi.201901756>.

Maia LS, Da Silva Neto T, Perluxo JD, Do Carmo FL, Rosa DS and Mulinari DR (2024) ‘Eco-friendly sorbents for petroleum and diesel based on macadamia nutshell waste in castor oil-based polyurethane foam for oil spill’, *Adsorption*, 30(8):2037–2051, <https://doi.org/10.1007/s10450-024-00541-z>.

Pham CKT, Duy TK, Do NHN, Nguyen LT, Mai PT, Le KA and Le PK (2023) ‘A facile route to fabricate anisotropic and flexible carbon aerogels from pineapple leaf for oil spills and solvent removal’, *Journal of Porous Materials*, 30(6):1911–1923, <https://doi.org/10.1007/s10934-023-01474-8>.

Ren L, Qiu Z, Wang Z, Yang D, Zhou D and Zhang T (2020) ‘Preparation of biomass carbon/polyurethane foams for selective oil/water absorption’, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 41(12):1872–1878, <https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1637756>.

Tran DT, Nguyen ST, Do ND, Thai NNT, Thai QB, Huynh HKP, Nguyen VTT and Phan AN (2020) ‘Green aerogels from rice straw for thermal, acoustic insulation and oil spill cleaning applications’, *Materials Chemistry and Physics*, 253:123363, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123363>.

Tung NT, Duc NT, Ha PTT and Son NT (2022) ‘The Graft Copolymerization of Butyl Acrylate and Lauryl Methacrylate onto Sawdust: Potential Materials for Oil Spill Cleanup’, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 46(2):385–394, <https://doi.org/10.1007/s40995-022-01282-w>.

Viju S, Brindha R and Thilagavathi G (2023) ‘Development and characterization of DTMS treated nettle fiber nonwovens for oil spill removal applications’, *The Journal of The Textile Institute*, 114(9):1375–1382, <https://doi.org/10.1080/00405000.2022.2124658>.

Wan Ibrahim WN and Mohamad Hanafi NS (2024) ‘Impact of Recycled Oleophilic Polyurethane Foams Integrated with Activated Carbon and Silica Enriched-Palm Oil Biomass for Separation of Oil’, *ASM Science Journal*, 19:1–8, <https://doi.org/10.32802/asmscj.2023.1492>.

Zhang J, Lei X, Yu X and Fang R (2023) ‘Self-cleaning and friction-resistant superhydrophobic and oleophilic cotton for separation of stable emulsified oil’, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 677:132358, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132358>.