REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

# FIBRAS CAPILARES HUMANAS COMO BIOSSORVENTES PARA REMEDIAÇÃO DE DERRAMAMENTOS DE PETRÓLEO: INFLUÊNCIA DA MORFOLOGIA NA FLUTUABILIDADE E NA CAPACIDADE DE SORÇÃO

# HUMAN HAIR FIBERS AS BIOSORBENTS FOR OIL SPILL REMEDIATION: INFLUENCE OF MORPHOLOGY ON BUOYANCY AND SORPTION CAPACITY

# FIBRAS CAPILARES HUMANAS COMO BIOSORBENTES PARA LA REMEDIACIÓN DE DERRAMES DE PETRÓLEO: INFLUENCIA DE LA MORFOLOGÍA EN LA FLOTABILIDAD Y LA CAPACIDAD DE SORCIÓN

**Célia Karina Maia Cardoso**
Doutorado em Engenharia Química, Professora Colaboradora do Programa de Pós-Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente da Universidade Federal da Bahia, Brasil. E-mail: celiamaia.eng@gmail.com

**Rebeca da Paixão Gomes Cardoso**
Doutoranda em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente, Universidade Federal da Bahia, Brasil. E-mail: cardosorpg@gmail.com

**Janaína Figueiredo Santos**
Mestrado em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente, Universidade Federal da Bahia, Brasil. E-mail: jaanainafigueiredo@gmail.com

**Ícaro Thiago Andrade Moreira**
Doutorado em Geologia Ambiental, Hidrogeoquímica e Recursos Hídricos, Professor do Departamento de Oceanografia da Universidade Federal da Bahia, Brasil. E-mail: icarotam@ufba.br

## Resumo

Os derramamentos de petróleo representam uma das principais ameaças aos ecossistemas marinhos, tornando necessária a busca por materiais sorventes sustentáveis, eficientes e de baixo custo. Neste estudo, avaliou-se o potencial de diferentes tipos de fibra capilar humana (Tipo A – liso, Tipo B – ondulado e Tipo C – crespo) como biossorventes para petróleo bruto sob condições simuladas de ambiente marinho. As fibras foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), submetidas a ensaios de flutuabilidade em condições estáticas e dinâmicas e avaliadas quanto à capacidade de sorção utilizando petróleos das bacias de Campos (21,7° API) e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

Sergipe (39,2° API). As imagens de MEV evidenciaram diferenças morfológicas entre os tipos de cabelo, com o Tipo C apresentando maior rugosidade superficial e topografia mais heterogênea. Em condição estática, todas as fibras mantiveram 100% de flutuabilidade; entretanto, sob agitação, apenas o Tipo C preservou essa condição, enquanto os Tipos B e A apresentaram flutuabilidade de 68,7% e 14,0%, respectivamente. A sorção ocorreu rapidamente, com os maiores valores geralmente observados nos primeiros cinco minutos de contato, seguida por oscilações associadas ao equilíbrio entre adsorção e dessorção durante a agitação. O Tipo C apresentou a maior capacidade de sorção para o petróleo de Sergipe (3,66 ± 1,23 $g.g^{-1}$), enquanto os Tipos B e C apresentaram os melhores desempenhos para o petróleo de Campos, alcançando 5,72 ± 0,23 e 4,57 ± 0,42 $g.g^{-1}$, respectivamente. Os resultados demonstram que a eficiência de sorção depende tanto da morfologia da fibra quanto das propriedades físico-químicas do petróleo, destacando a fibra capilar humana, especialmente o cabelo crespo, como um biossorvente promissor para aplicações em resposta a derramamentos de petróleo.

**Palavras-chave:** Biomateriais; Hidrocarbonetos; Remediação marinha; Bioeconomia circular; Sorventes naturais.

## Abstract

Oil spills represent one of the major threats to marine ecosystems, highlighting the need for sustainable, efficient, and low-cost sorbent materials. This study evaluated the potential of different human hair types (Type A – straight, Type B – wavy, and Type C – curly) as biosorbents for crude oil under simulated marine conditions. The fibers were characterized by scanning electron microscopy (SEM), subjected to buoyancy tests under static and dynamic conditions, and evaluated for oil sorption capacity using crude oils from the Campos (21.7° API) and Sergipe (39.2° API) basins. SEM images revealed morphological differences among hair types, with Type C exhibiting greater surface roughness and a more heterogeneous surface topography. Under static conditions, all fibers maintained 100% buoyancy; however, under dynamic conditions, only Type C retained complete buoyancy, whereas Types B and A exhibited buoyancies of 68.7% and 14.0%, respectively. Oil sorption occurred rapidly, with the highest values generally observed within the first 5 min of contact, followed by fluctuations associated with adsorption–desorption equilibrium during hydrodynamic agitation. Type C exhibited the highest sorption capacity for Sergipe crude oil (3.66 ± 1.23 $g.g^{-1}$), whereas Types B and C achieved the best performances for Campos crude oil, reaching 5.72 ± 0.23 and 4.57 ± 0.42 $g.g^{-1}$, respectively. The results demonstrate that sorption efficiency depends on both fiber morphology and the physicochemical properties of crude oil, highlighting human hair, particularly curly hair, as a promising biosorbent for oil spill response applications.

**Keywords:** Biomaterials; Hydrocarbons; Marine remediation; Circular bioeconomy; Natural sorbents.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

## Resumen

Los derrames de petróleo representan una de las principales amenazas para los ecosistemas marinos, lo que pone de manifiesto la necesidad de desarrollar materiales sorbentes sostenibles, eficientes y de bajo costo. En este estudio se evaluó el potencial de diferentes tipos de fibra capilar humana (Tipo A – liso, Tipo B – ondulado y Tipo C – rizado) como biosorbentes para petróleo crudo en condiciones simuladas de ambiente marino. Las fibras fueron caracterizadas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), sometidas a ensayos de flotabilidad en condiciones estáticas y dinámicas y evaluadas en cuanto a su capacidad de sorción utilizando petróleos de las cuencas de Campos (21,7° API) y Sergipe (39,2° API). Las imágenes de MEB evidenciaron diferencias morfológicas entre los tipos de cabello, siendo el Tipo C el que presentó mayor rugosidad superficial y una topografía más heterogénea. En condiciones estáticas, todas las fibras mantuvieron un 100% de flotabilidad; sin embargo, en condiciones dinámicas, únicamente el Tipo C conservó esta característica, mientras que los Tipos B y A presentaron flotabilidades del 68,7% y 14,0%, respectivamente. La sorción de petróleo ocurrió rápidamente, observándose los valores más elevados generalmente durante los primeros cinco minutos de contacto, seguida de fluctuaciones asociadas al equilibrio entre adsorción y desorción durante la agitación hidrodinámica. El Tipo C presentó la mayor capacidad de sorción para el petróleo de Sergipe (3,66 ± 1,23 $g.g^{-1}$), mientras que los Tipos B y C alcanzaron los mejores desempeños para el petróleo de Campos, con valores de 5,72 ± 0,23 y 4,57 ± 0,42 $g.g^{-1}$, respectivamente. Los resultados demuestran que la eficiencia de sorción depende tanto de la morfología de la fibra como de las propiedades fisicoquímicas del petróleo, destacando la fibra capilar humana, especialmente el cabello rizado, como un biosorbente prometedor para aplicaciones de respuesta a derrames de petróleo.

**Palabras clave:** Biomateriales; Hidrocarburos; Remediación marina; Bioeconomía circular; Sorbentes naturales.

## 1. Introdução

Derramamentos de petróleo continuam sendo uma das ameaças ambientais mais significativas associadas à exploração, ao transporte e ao armazenamento de petróleo. Apesar dos avanços nos sistemas de prevenção e resposta a emergências, vazamentos acidentais continuam ocorrendo em todo o mundo, causando graves impactos ecológicos, econômicos e sociais nos ecossistemas marinhos e costeiros (ITOPF, 2011). Uma vez liberado em ambientes aquáticos, o petróleo bruto espalha-se rapidamente pela superfície da água e sofre processos complexos de intemperismo, incluindo evaporação, dissolução, emulsificação, oxidação, dispersão e biodegradação, que alteram

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

progressivamente suas propriedades físico-químicas e influenciam a eficiência das estratégias de remediação (LIU *et al*., 2025; SANTOS *et al*., 2026). Consequentemente, a contenção e a recuperação rápidas durante os estágios iniciais de um vazamento são essenciais para minimizar danos ambientais e melhorar a eficiência da limpeza (MIRANDA *et al*., 2016; MOREIRA, 2014).

Entre as tecnologias de resposta disponíveis, os materiais sorventes são amplamente reconhecidos como uma das alternativas mais eficazes para a recuperação de petróleo em superfícies aquáticas, pois são de aplicação relativamente simples, exigem infraestrutura mínima e permitem a recuperação física do petróleo derramado (GOTE; DHILA; MULEY, 2023). Sorventes sintéticos comerciais, particularmente materiais à base de polipropileno, apresentam alta capacidade de sorção de petróleo e excelente hidrofobicidade. No entanto, seus elevados custos de produção, natureza não biodegradável e exigências de descarte têm estimulado um interesse crescente em alternativas renováveis e ecologicamente corretas, capazes de reduzir tanto os custos operacionais quanto os impactos ambientais secundários (MEIRELLES *et al*., 2022; MOREIRA *et al*., 2021; MOREIRA *et al*., 2016; MOREIRA *et al*., 2013a; OLIVEIRA *et al*., 2021).

Nesse contexto, biossorventes lignocelulósicos e à base de proteínas surgiram como materiais sustentáveis promissores para a remediação de derramamentos de petróleo. Resíduos agrícolas e fibras naturais, como sumaúma (kapok), coco, algodão, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, serragem, lã, penas e outros materiais derivados de biomassa demonstraram capacidade considerável de sorção de petróleo, oferecendo vantagens como biodegradabilidade, baixa densidade, renovabilidade, abundância e baixo custo comercial (CARDOSO *et al*., 2025a). Estudos recentes demonstraram, ainda, que o desempenho de sorção das fibras naturais é fortemente influenciado por suas características físico-químicas intrínsecas, incluindo rugosidade superficial, porosidade, composição química, molhabilidade, flutuabilidade e as interações entre petróleo e água (CARDOSO *et al*., 2025a; GEORGIN *et al*., 2025). Consequentemente, compreender os mecanismos que regem a sorção de petróleo é fundamental para a seleção racional e o desenvolvimento de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

biossorventes eficientes para aplicações ambientais.

O cabelo humano tem despertado crescente interesse como biossorvente alternativo devido à sua disponibilidade global como resíduo pós-consumo, gerado continuamente por residências e salões de beleza (GUPTA, 2014). Composto principalmente por proteínas de queratina (aproximadamente 65–95% em massa), o cabelo humano apresenta uma estrutura fibrosa hierárquica constituída pela medula, pelo córtex e por uma cutícula externa recoberta por uma camada rica em lipídios contendo ácido 18-metileicosanoico (18-MEA), o que contribui para sua hidrofobicidade intrínseca e afinidade por compostos apolares (FERNANDES *et al*., 2023). Além disso, a abundância de grupos funcionais amino, carbonila, hidroxila, contendo enxofre e peptídicos, combinada à sua morfologia fibrosa, confere características favoráveis a interações com hidrocarbonetos de petróleo. Essas características estruturais motivaram pesquisas sobre o reaproveitamento do cabelo humano na remediação ambiental, representando uma estratégia atraente dentro dos princípios de valorização de resíduos e economia circular.

Diversos estudos demonstraram o potencial do cabelo humano para a limpeza de derramamentos de óleo. Ifelebuegu e colaboradores (2015) relataram capacidades de sorção entre aproximadamente 3 e 9 vezes o peso do sorvente para diferentes tipos de óleo e observaram que a morfologia do cabelo influenciava o desempenho de adsorção entre os diferentes tipos de cabelo. Estudos subsequentes ampliaram a aplicação de resíduos de cabelo humano ao incorporar as fibras em mantas absorventes e barreiras de contenção, comparando seu desempenho com o de absorventes convencionais e reciclados, e desenvolvendo fibras quimicamente modificadas com hidrofobicidade aprimorada e maior eficiência na separação óleo-água (CHENXI *et al*., 2022; ERPINAR *et al*., 2024; FERREIRA *et* al., 2011; GUPTA, 2014; MURRAY *et al*., 2020). Esses estudos demonstraram consistentemente que o cabelo humano pode recuperar óleo de forma eficaz em ambientes contaminados, reforçando seu potencial como um sorvente sustentável e de baixo custo.

Apesar desses avanços, permanecem lacunas importantes de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

conhecimento sobre os mecanismos que controlam a sorção de óleo pelas fibras de cabelo humano. A maioria dos estudos anteriores concentrou-se principalmente na determinação da capacidade de sorção ou na avaliação de materiais quimicamente modificados, enquanto as relações entre a morfologia da fibra, a interação com a água, a flutuabilidade e a sorção de óleo sob diferentes condições operacionais permanecem pouco compreendidas. Da mesma forma, embora tenham sido relatadas diferenças morfológicas entre os tipos de cabelo, sua influência na flutuabilidade e na eficiência de sorção de óleo, tanto em condições estáticas quanto hidrodinâmicas, não foi investigada de forma sistemática. Tais informações são essenciais, pois a interação com a água influencia diretamente a flutuabilidade da fibra, que, por sua vez, afeta sua capacidade de permanecer na interface óleo-água e interagir com o óleo flutuante durante operações de resposta a derramamentos.

Portanto, este estudo investiga o comportamento de sorção de óleo de três tipos de fibras de cabelo humano, integrando a caracterização morfológica por microscopia eletrônica de varredura com experimentos de flutuabilidade em condições estáticas e hidrodinâmicas e sorção de petróleo bruto. Além disso, o desempenho das fibras de cabelo humano é comparado com o de fibras lignocelulósicas amplamente investigados para remediação de derramamentos de óleo, proporcionando uma compreensão mais abrangente dos fatores estruturais e físico-químicos que regem o desempenho de sorventes naturais para aplicações ambientais.

## 2. Metodologia

### 2.1. Coleta e preparo das amostras capilares

As fibras capilares utilizadas neste estudo foram obtidas como resíduos provenientes de salões de beleza localizados em Salvador, Bahia, Brasil. Após a coleta, as fibras foram segregadas manualmente por um único pesquisador, com base em sua morfologia macroscópica predominante, sendo classificadas como Tipo A (liso), Tipo B (ondulado) e Tipo C (crespo). A classificação foi realizada por inspeção visual, considerando o padrão predominante de curvatura da fibra, de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

forma consistente com a classificação morfológica amplamente empregada em estudos comparativos envolvendo fibras capilares humanas, conforme ilustrado na Figura 1. Como o objetivo do presente trabalho foi comparar grupos morfológicos representativos quanto ao seu desempenho como biossorventes, e não caracterizar propriedades antropométricas individuais das fibras, não foram realizadas medições quantitativas de curvatura, diâmetro ou densidade linear. As fibras foram padronizadas com comprimento de 10 cm e massa de 0,5 g, visando garantir condições experimentais uniformes.

As fibras utilizadas em cada categoria morfológica foram provenientes de um único lote de coleta e correspondentes a um único doador representativo de cada grupo (Tipo A, Tipo B e Tipo C). Para cada categoria, as triplicatas experimentais foram constituídas por subamostras independentes retiradas do mesmo lote homogêneo previamente preparado. Assim, as réplicas utilizadas neste estudo representam réplicas experimentais, destinadas à avaliação da reprodutibilidade dos ensaios, e não réplicas biológicas provenientes de diferentes indivíduos.

Como as fibras foram obtidas como resíduos pós-consumo provenientes de salão de beleza, não foi possível determinar o histórico individual de tratamentos cosméticos previamente realizados pelos doadores, como coloração, descoloração, alisamento ou outros procedimentos químicos. Entretanto, antes da realização dos ensaios, as amostras foram submetidas a um pré-tratamento constituído por sucessivas lavagens com detergente laboratorial Extran® e água destilada para remoção de impurezas e resíduos superficiais. Em seguida, as fibras foram secas em liofilizador e armazenadas em recipientes limpos e secos até a realização dos experimentos.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

Figura 1 - Aspecto físico das fibras capilares utilizadas neste estudo: Tipo A (cabelo liso), Tipo B (cabelo ondulado) e Tipo C (cabelo crespo), da esquerda para a direita.




**Fonte:** Dados da pesquisa. (2026)

### 2.2. Caracterização morfológica das fibras

A morfologia superficial das fibras capilares foi caracterizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um microscópio eletrônico de varredura JEOL® JSM-6610LV (JEOL Ltd., Tóquio, Japão), operando com tensão de aceleração de 10 kV. Previamente às análises, as amostras foram metalizadas com ouro para aumentar a condutividade elétrica e melhorar a resolução das imagens. As micrografias foram obtidas com ampliações de 350× e 1000×, permitindo a avaliação qualitativa da morfologia superficial das fibras, com ênfase na distribuição, sobreposição e integridade das cutículas.

### 2.3. Avaliação da flutuabilidade das fibras

A flutuabilidade das fibras capilares foi avaliada em sistemas estático e dinâmico, utilizando 100 mL de solução de água salina artificial, com salinidade

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

de 3,5%, preparada para representar a salinidade média da água do mar. Os ensaios foram conduzidos utilizando água do mar sintética comercial (*Instant Ocean®, Aquarium Systems, EUA*), preparada conforme as instruções do fabricante até atingir salinidade de 35‰ (3,5%). A solução apresentou pH 7,0 e condutividade de aproximadamente 56 mS $cm^{-1}$. Todos os experimentos foram realizados sob temperatura controlada de 25 ± 1 °C. Em cada ensaio, uma amostra de 0,5 g de cada tipo de fibra foi cuidadosamente depositada sobre a superfície da solução contida em frascos Erlenmeyer de 250 mL foram posicionados em agitador reciprocante (Marconi), operando a 126 rpm durante cinco minutos.

Nos ensaios estáticos, as amostras permaneceram em repouso por 5 min. Nos ensaios dinâmicos, os frascos foram submetidos à agitação em mesa agitadora reciprocante durante o mesmo período, com o objetivo de simular a hidrodinâmica característica do ambiente marinho.

Ao final de cada ensaio, a massa das fibras que permaneceu na superfície da solução foi recuperada e utilizada para o cálculo da flutuabilidade, conforme a Equação (1) (ANNUNCIADO *et al.*, 2005):

$$F(\%) = \frac{m_f}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

em que *F* corresponde à flutuabilidade (%), $m_f$ é a massa das fibras que permaneceram flutuando ao final do ensaio (g) e $m_0$ representa a massa inicial da amostra (g).

### 2.4. Avaliação da capacidade de sorção de petróleo

Foram utilizados petróleos brutos provenientes das Bacias de Campos e Sergipe, selecionados por apresentarem diferentes características físico-químicas, especialmente quanto ao grau API, densidade, viscosidade e fluidez, propriedades que influenciam diretamente o comportamento do óleo durante o

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

processo de sorção. Ambos os petróleos foram empregados na forma bruta, sem qualquer tratamento prévio ou processo de intemperismo. As principais características dos óleos utilizados estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físico-químicas dos petróleos brutos utilizados nos ensaios de sorção.

| **Propriedade** | **Petróleo da Bacia de Campos** | **Petróleo da Bacia de Sergipe** |
|---|---|---|
| **Condição** | Bruto | Bruto |
| **Grau API (°API)** | 21,7 | 39,2 |
| **Classificação** | Médio | Leve |
| **Fluidez** | Menor | Maior |

Os ensaios de sorção foram realizados em frascos Erlenmeyer de 500 mL, contendo 250 mL de solução salina artificial (salinidade de 3,5%) e aproximadamente 20 mL de petróleo bruto. Em seguida, uma porção de 0,5 g de cada tipo de fibra capilar foi cuidadosamente adicionada ao sistema, que foi submetido à agitação em mesa agitadora reciprocante, visando simular as condições hidrodinâmicas do ambiente marinho.

A cinética de sorção foi determinada nos tempos de 5, 20, 40, 60 e 120 min. Ao final de cada intervalo experimental, as fibras foram recuperadas, submetidas à liofilização e posteriormente pesadas para determinação da capacidade de sorção (CARDOSO *et al*., 2021). Para cada tempo experimental foram preparadas três unidades experimentais independentes. Cada unidade consistiu em um frasco contendo uma subamostra de fibras proveniente do mesmo lote homogêneo correspondente ao respectivo grupo morfológico. Todos os frascos foram preparados simultaneamente e mantidos sob as mesmas condições experimentais. Após o término do tempo correspondente, cada unidade experimental foi retirada do ensaio, submetida ao procedimento de liofilização e pesada, não sendo reutilizada nos tempos subsequentes.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

A capacidade de sorção de petróleo foi calculada conforme a Equação (2):

$$q_t = \frac{m_t - m_0}{m_0} \quad (2)$$

em que $q_t$ representa a capacidade de sorção no tempo $t$ ($g.g^{-1}$), $m_t$ corresponde à massa da fibra após o ensaio de sorção (g) e $m_0$ representa a massa inicial da fibra seca (g).

### 2.5. Análise estatística

Todos os experimentos foram realizados em triplicata, e os resultados foram expressos como média ± desvio padrão. As diferenças entre os tratamentos foram consideradas estatisticamente significativas quando $p < 0,05$.

## 3. Resultados e Discussão

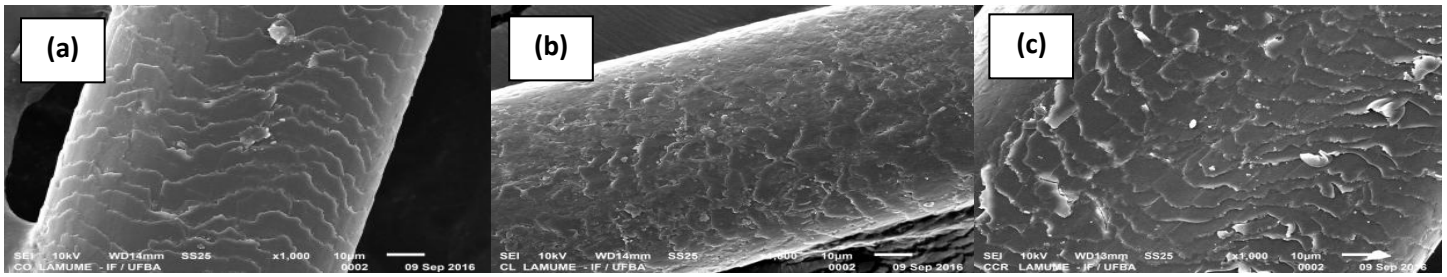
### 3.1. Morfologia superficial das fibras capilares humanas

As micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciaram que todas as fibras capilares preservaram a morfologia característica da haste capilar, constituída por uma camada externa formada por células cuticulares sobrepostas em padrão semelhante a telhas (shingle-like), responsáveis pela proteção do córtex e pela interface de contato entre a fibra e o meio externo (Figura 2). Essa organização estrutural está de acordo com a literatura, que descreve a cutícula como a principal responsável pelas propriedades superficiais das fibras capilares e pelo seu comportamento interfacial (FERNANDES *et al.*, 2023; ROBBINS, 2012).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

Figura 2. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da morfologia superficial das fibras capilares humanas: (a) Tipo A (cabelo liso), (b) Tipo B (cabelo ondulado) e (c) Tipo C (cabelo crespo), evidenciando diferenças na organização das cutículas e na topografia superficial.




**Fonte:** Dados da pesquisa. (2026)

Conforme observado na Figura 2, foram verificadas diferenças qualitativas na morfologia superficial entre os três tipos de fibras avaliados. As fibras do Tipo A apresentaram superfície mais uniforme, com cutículas compactas e fortemente sobrepostas. As fibras do Tipo B exibiram discreto aumento na irregularidade superficial, mantendo, entretanto, uma organização contínua da camada cuticular. Em contraste, as fibras do Tipo C apresentaram superfície mais rugosa, caracterizada por maior exposição das bordas das cutículas e por uma topografia superficial mais heterogênea.

As diferenças observadas neste estudo são consistentes com os resultados de Ifelebuegu e colaboradores (2015), que, ao compararem fibras capilares com diferentes morfologias superficiais por microscopia eletrônica de varredura, verificaram que as fibras que apresentavam maior rugosidade superficial exibiram cutículas mais rugosas, característica associada ao aumento da capacidade de sorção de óleo.

Independentemente do tipo de cabelo, a fibra capilar é constituída predominantemente por queratina e apresenta uma superfície naturalmente revestida por uma fina camada lipídica rica em ácido 18-metileicosanoico (18-MEA), responsável por conferir caráter hidrofóbico e elevada afinidade por compostos apolares, como o petróleo (FERNANDES *et al*., 2023; ROBBINS,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

2012). Além dessas características químicas intrínsecas, as diferenças na organização das cutículas e na topografia superficial observadas entre os diferentes tipos de fibras sugerem que esses aspectos morfológicos podem influenciar ainda mais sua interação com o petróleo e, consequentemente, seu desempenho como sorventes.

Embora mecanismos relacionados à hidrofobicidade superficial, à camada lipídica (18-MEA) e às características químicas das fibras sejam frequentemente descritos na literatura, essas propriedades não foram diretamente avaliadas neste estudo. Assim, tais mecanismos devem ser interpretados como hipóteses explicativas consistentes com estudos anteriores, e não como evidências experimentais obtidas no presente trabalho.

### 3.2. Flutuabilidade das fibras em sistemas estático e dinâmico

A flutuabilidade constitui um requisito operacional essencial para sorventes empregados na resposta a derramamentos de petróleo em ambientes aquáticos. Para que o material permaneça em contato com a mancha superficial e possa ser posteriormente recuperado, é necessário que mantenha sua estabilidade na interface água–ar, mesmo sob a influência de ondas, correntes e turbulência. Dessa forma, a elevada flutuabilidade aumenta o tempo de contato entre o sorvente e o petróleo, favorecendo a remoção do contaminante e a recuperação do material após a operação (ITOPF, 2011). Além disso, estudos recentes demonstram que a hidrodinâmica pode reduzir significativamente o desempenho de biossorventes naturais, reforçando que a estabilidade na superfície da água constitui uma característica crítica para aplicações em ambientes marinhos (CARDOSO *et al*., 2025b).

Em condições estáticas, os três tipos de fibras capilares apresentaram 100% de flutuabilidade, permanecendo integralmente na superfície da água marinha durante o período experimental (Tabela 2). Esse resultado demonstra que, na ausência de perturbação hidrodinâmica, as fibras possuem estabilidade suficiente para permanecer na região onde o petróleo derramado tende a se concentrar inicialmente. Entretanto, a exposição ao movimento mecânico revelou

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

diferenças acentuadas entre os tipos de cabelo. A flutuabilidade das fibras Tipo A diminuiu de 100% para 14,00%, correspondendo a uma redução de 86%, enquanto as fibras onduladas apresentaram valor final de 68,67%, com redução de 31,33%. Em contraste, as fibras crespas mantiveram 100% de flutuabilidade, mesmo sob condições dinâmicas.

Tabela 2. Flutuabilidade das fibras capilares humanas em condições estáticas e dinâmicas e variação expressa em pontos percentuais.

| Sorvente | Flutuabilidade estática (%) | Flutuabilidade dinâmica (%) | Variação (%) |
|---|---|---|---|
| **Fibra Tipo A** | 100,00 | 14,00 | −86,00 |
| **Fibra Tipo B** | 100,00 | 68,67 | −31,33 |
| **Fibra Tipo C** | 100,00 | 100,00 | 0,00 |

Os resultados evidenciam que a avaliação exclusivamente estática pode superestimar a aptidão operacional de um sorvente. Embora todas as fibras tenham apresentado comportamento semelhante em repouso, a agitação mecânica diferenciou claramente os materiais, demonstrando que sua permanência na superfície depende do tipo de fibra. Essa distinção é relevante porque ensaios de bancada conduzidos em recipientes estáticos ou com restrição espacial não reproduzem adequadamente o espalhamento do petróleo nem a complexidade hidrodinâmica de ambientes costeiros (CARDOSO *et al.*, 2025ª; MOREIRA *et al*. 2013b; MOREIRA *et al*. 2011). Estudos em mesoescala demonstram que ondas, correntes e turbulência podem modificar a estabilidade da interface óleo–sorvente e reduzir o desempenho observado em condições controladas (CARDOSO *et al.*, 2025b).

A redução da flutuabilidade das fibras lisas e onduladas sugere maior suscetibilidade à molhabilidade e à submersão quando submetidas à movimentação da água. Por outro lado, a manutenção integral das fibras crespas na superfície indica maior estabilidade hidrodinâmica. As características morfológicas observadas por MEV, especialmente a geometria menos linear, a

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

maior heterogeneidade topográfica e a organização espacial das fibras crespas, podem contribuir para sua permanência na superfície.

Em comparação com sorventes lignocelulósicos, a elevada flutuabilidade observada para as fibras capilares crespas mostrou-se particularmente promissora. A literatura demonstra que a manutenção da flutuabilidade representa uma das principais limitações de diversos biossorventes vegetais (HOANG *et al*., 2021; SHIU *et al*., 2018). Annunciado et al. (2005), ao avaliarem diferentes fibras lignocelulósicas para remediação de derramamentos de petróleo, verificaram que materiais como a fibra de sisal apresentaram flutuabilidade praticamente nula em água, sendo considerados inadequados para aplicações em ambientes aquáticos devido à elevada tendência ao afundamento. Esses resultados evidenciam que, embora muitas fibras vegetais apresentem elevada capacidade de sorção, sua aplicação prática pode ser limitada pela baixa estabilidade na interface água–óleo.

Nos últimos anos, diferentes estratégias têm sido propostas para contornar essa limitação. Cardoso et al. (2025b) verificaram que uma barreira constituída por fibras lignocelulósicas permaneceu integralmente flutuante durante 20 min em ambiente marinho real, mesmo sob a ação de correntes naturais, destacando que a manutenção da estabilidade foi indispensável para preservar a função de sorção e permitir a recuperação do material. De forma semelhante, Kovačević et al. (2023) relataram que um sorvente não tecido produzido com fibras de juta carbonizadas manteve elevada flutuabilidade mesmo após 24 h em água. Entretanto, esse desempenho foi obtido após processamento térmico destinado a aumentar a hidrofobicidade e a porosidade do material.

Em contraste, as fibras capilares crespas apresentaram estabilidade completa sob agitação mecânica sem necessidade de carbonização, modificação química ou revestimentos hidrofóbicos. Esse resultado sugere que suas características estruturais intrínsecas conferem elevada estabilidade na interface água–ar, representando uma vantagem em relação a diversos sorventes lignocelulósicos que necessitam de tratamentos adicionais para manter sua flutuabilidade em ambientes aquáticos.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

Dessa forma, o comportamento observado indica que as fibras crespas apresentam a condição mais favorável para uso em sistemas aquáticos dinâmicos, pois permaneceram integralmente disponíveis na superfície durante todo o ensaio. As fibras onduladas conservaram parte expressiva de sua massa emersa, mas apresentaram perda de estabilidade, enquanto as fibras lisas mostraram elevada tendência ao afundamento. Em uma situação real de derramamento de petróleo no mar, essa diferença pode afetar diretamente o tempo de contato com a mancha de petróleo e a recuperação do sorvente após o uso, sobretudo em águas costeiras com presença de contaminantes associados ao material particulado em suspensão (PEREIRA *et al*., 2015; REYES *et al*., 2014; RIOS *et al*., 2017; SILVA *et al*., 2019; SILVA *et al*., 2015).

### 3.3. Cinética de sorção dos petróleos das Bacias de Campos e Sergipe

A capacidade de sorção das fibras capilares humanas variou em função do tipo de petróleo, da morfologia da fibra e do tempo de contato (Tabela 3). Em ambos os petróleos avaliados, observou-se que uma parcela significativa da sorção ocorreu nos primeiros cinco minutos de contato, evidenciando a elevada afinidade inicial entre o petróleo e a superfície das fibras capilares. Esse comportamento indica uma cinética de sorção rápida, característica desejável para materiais empregados na resposta emergencial a derramamentos de petróleo, uma vez que a rápida remoção do contaminante reduz sua dispersão e o tempo de exposição do ecossistema.

A elevada sorção inicial pode ser atribuída à grande disponibilidade de sítios superficiais livres no início do processo. Nos primeiros instantes de contato, a superfície das fibras apresenta elevada disponibilidade de grupos capazes de interagir com os componentes oleofílicos do petróleo, favorecendo a rápida ocupação das regiões mais acessíveis. À medida que esses sítios passam a ser progressivamente ocupados, a velocidade de sorção diminui, reduzindo o incremento de massa observado nos tempos subsequentes (CARDOSO *et al*., 2025b; TURSI *et al*., 2018).

Embora a sorção inicial tenha sido elevada, os resultados não

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

apresentaram aumento contínuo da capacidade de sorção ao longo do ensaio, sendo observadas oscilações entre os diferentes tempos experimentais. Esse comportamento pode ser explicado pelas condições hidrodinâmicas empregadas neste estudo. O uso do agitador reciprocante promove contato contínuo entre petróleo, água e fibras capilares, favorecendo simultaneamente processos de sorção e dessorção física do óleo previamente retido. Dessa forma, o comportamento observado representa um equilíbrio dinâmico entre adsorção e dessorção, no qual parte do petróleo adsorvido pode ser removida pela agitação e posteriormente voltar a ser retida pela superfície da fibra.

Tabela 3. Capacidade de sorção das fibras capilares humanas para os petróleos das bacias de Sergipe e Campos em diferentes tempos de contato, expressa em g de óleo $g^{-1}$ de fibra.

| **Petróleo** | **Tipo de fibra** | **T5** | **T20** | **T40** | **T60** | **T120** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sergipe | Tipo A | 1,34 ± 0,34 | 0,71 ± 0,90 | 1,20 ± 1,09 | 0,73 ± 0,55 | 0,85 ± 0,54 |
| | Tipo B | 2,50 ± 0,54 | 1,42 ± 0,67 | 1,74 ± 0,72 | 2,08 ± 0,97 | 2,01 ± 0,46 |
| | Tipo C | 3,40 ± 0,72 | 2,61 ± 0,43 | 1,89 ± 0,98 | 1,13 ± 1,34 | 3,66 ± 1,23 |
| Campos | Tipo A | 3,65 ± 0,33 | 2,34 ± 1,34 | 1,73 ± 0,66 | 2,05 ± 1,20 | 2,47 ± 0,65 |
| | Tipo B | 4,05 ± 1,2 | 3,49 ± 1,05 | 2,12 ± 0,45 | 5,72 ± 0,23 | 4,06 ± 0,89 |
| | Tipo C | 2,03 ±0.56 | 2,53 ± 0,55 | 1,45 ± 0,23 | 3,32 ± 0,45 | 4,57 ± 0,42 |

Legenda: T5 = 5 min; T20 = 20 min; T40 = 40 min; T60 = 60 min; T120 = 120 min.

Essa interpretação é consistente com os resultados obtidos por Cardoso et al. (2021), que utilizaram um sistema hidrodinâmico semelhante para avaliar

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

biossorventes de fibra de coco. Os autores verificaram que a maior parte da sorção ocorreu nos primeiros cinco minutos de contato e observaram oscilações na capacidade de sorção ao longo do tempo, atribuídas justamente aos processos simultâneos de sorção e dessorção promovidos pela agitação do sistema. Segundo esses autores, esse comportamento é característico de materiais cuja interação com o petróleo ocorre predominantemente por mecanismos físicos, permitindo que o óleo seja continuamente removido e novamente retido durante a movimentação do fluido.

Para o petróleo da Bacia de Sergipe, a maior capacidade de sorção inicial foi observada para a fibra Tipo C, que adsorveu 3,40 ± 0,72 $g.g^{-1}$ após cinco minutos de contato, seguida pelas fibras Tipo B (2,50 ± 0,54 $g.g^{-1}$) e Tipo A (1,34 ± 0,34 $g.g^{-1}$). Apesar das oscilações observadas ao longo do ensaio, a fibra Tipo C voltou a apresentar a maior capacidade de sorção ao final de 120 minutos (3,66 ± 1,23 $g.g^{-1}$), indicando elevada capacidade de retenção desse petróleo durante todo o período experimental.

Para o petróleo da Bacia de Campos, observou-se comportamento distinto. Nos cinco primeiros minutos, a fibra Tipo B apresentou a maior capacidade de sorção (4,05 ± 1,20 $g.g^{-1}$), seguida pelas fibras Tipo A (3,65 ± 0,33 $g.g^{-1}$) e Tipo C (2,03 ± 0,56 $g.g^{-1}$). Entretanto, após 120 minutos, a fibra Tipo C apresentou o maior valor de sorção (4,57 ± 0,42 $g.g^{-1}$), superando as demais fibras. Esses resultados demonstram que o desempenho das fibras capilares depende não apenas de suas características morfológicas, mas também das propriedades físico-químicas do petróleo.

As diferenças observadas entre os dois petróleos podem ser atribuídas às suas características físico-químicas (Tabela 1). O petróleo da Bacia de Campos apresenta grau API de 21,7°, sendo classificado como médio, enquanto o petróleo da Bacia de Sergipe apresenta 39,2° API, sendo classificado como leve. Essas diferenças influenciam o comportamento do óleo durante o processo de sorção, afetando sua interação com a superfície das fibras capilares e, consequentemente, a capacidade de retenção observada experimentalmente.

Essa influência das propriedades do petróleo evidencia que a eficiência da

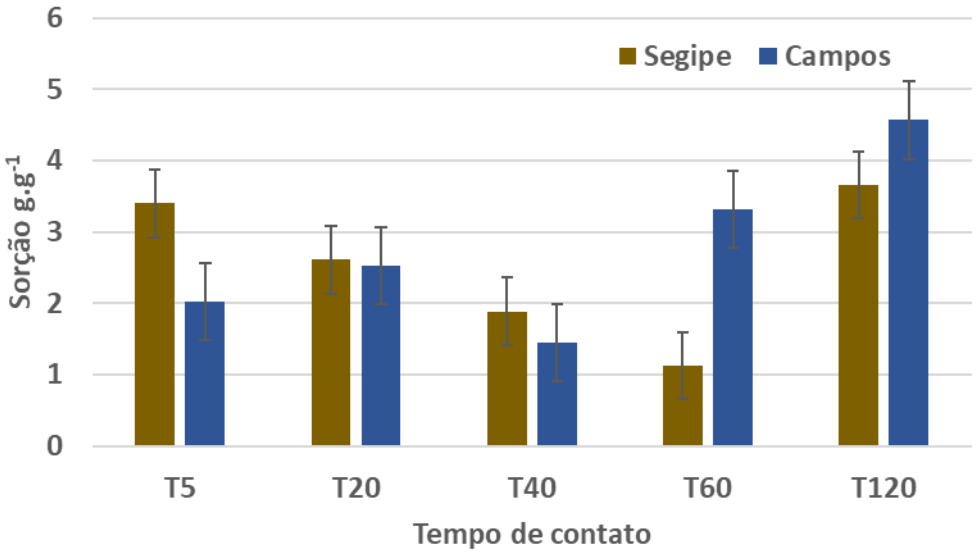
REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

sorção não depende exclusivamente da morfologia da fibra. Conforme demonstrado nas análises de microscopia eletrônica apresentadas anteriormente, a fibra Tipo C apresentou superfície mais rugosa e maior exposição das bordas das cutículas, características que aumentam a área efetiva de contato e favorecem o aprisionamento físico do petróleo entre as escamas da cutícula. Entretanto, como diferentes fibras apresentaram melhor desempenho dependendo do tipo de petróleo e do tempo de contato, os resultados sugerem que a sorção resulta da interação entre a topografia superficial da fibra e as propriedades físico-químicas do óleo, e não apenas de um único fator isolado.

Entre as fibras avaliadas, a fibra capilar Tipo C apresentou os resultados mais promissores, sendo a única a alcançar os maiores valores de sorção para ambos os petróleos ao final do ensaio (Figura 3). Para o petróleo de Sergipe, observou-se elevada sorção já nos primeiros cinco minutos (3,40 ± 0,72 $g.g^{-1}$), indicando rápida interação entre o petróleo e a superfície da fibra. Nos tempos subsequentes ocorreu redução da capacidade de sorção até 60 min, seguida de recuperação em 120 min, quando foi registrado o maior valor (3,66 ± 1,23 $g.g^{-1}$).

Figura 3. Comportamento da cinética de sorção da fibra capilar Tipo C para os petróleos das bacias de Sergipe e Campos.




Para o petróleo da Bacia de Campos, a sorção inicial foi inferior (2,03 ± 0,56

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

$g.g^{-1}$), porém o comportamento ao longo do ensaio foi distinto. Após oscilações nos tempos intermediários, observou-se aumento expressivo da capacidade de sorção a partir de 60 min, atingindo 4,57 ± 0,42 $g.g^{-1}$ ao final do experimento. Embora ambos os petróleos tenham apresentado oscilações durante o ensaio, o petróleo da Bacia de Campos apresentou maior capacidade de retenção no tempo final, enquanto o petróleo da Bacia de Sergipe apresentou maior afinidade inicial pela fibra.

Esse comportamento evidencia que diferentes petróleos interagem de maneira distinta com a superfície capilar, reforçando que a eficiência da sorção resulta da combinação entre as propriedades físico-químicas do óleo e as características estruturais da fibra. Enquanto o petróleo de Sergipe apresentou elevada sorção logo nos primeiros minutos, característica típica de materiais com rápida interação superficial, o petróleo da Bacia de Campos apresentou maior retenção ao final do ensaio, sugerindo uma interação mais favorecida durante o equilíbrio dinâmico estabelecido no sistema hidrodinâmico.

Os resultados obtidos para a fibra Tipo C corroboram os achados de Ifelebuegu et al. (2015), que avaliaram diferentes tipos de cabelos humanos e observaram que cabelos de origem africana apresentaram capacidades de sorção superiores às de cabelos europeus e asiáticos. Os autores atribuíram esse desempenho à maior rugosidade superficial, maior irregularidade das cutículas, presença de macroporos e maior hidrofobicidade da superfície capilar, características que favorecem o aprisionamento físico do petróleo e aumentam a interação óleo-fibra. Essa interpretação é consistente com as observações obtidas por microscopia eletrônica neste estudo, nas quais a fibra Tipo C apresentou superfície mais heterogênea e maior exposição das bordas das cutículas, características que podem contribuir para seu desempenho superior.

Além da elevada capacidade de sorção, estudos recentes demonstram o crescente interesse na aplicação tecnológica de fibras capilares para remediação de derramamentos de petróleo. Pagnucco e Phillips (2018) verificaram que barreiras confeccionadas com cabelo humano adsorveram maior quantidade de petróleo bruto do que barreiras constituídas por algodão, celulose reciclada e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

outros sorventes naturais, destacando que a eficiência operacional depende simultaneamente da capacidade de sorção, da retenção do óleo e da flutuabilidade do material. Esses resultados são particularmente relevantes para o presente estudo, uma vez que a fibra Tipo C apresentou simultaneamente elevada sorção e excelente flutuabilidade, características desejáveis para aplicação em ambientes aquáticos.

De forma semelhante, Jilagam et al. (2023) demonstraram que fibras capilares humanas apresentam elevada taxa de sorção nos primeiros minutos de contato, comportamento também observado neste estudo. Mais recentemente, Erpınar et al. (2024) verificaram que a incorporação de cabelo humano em mantas de feltro produz materiais adsorventes com desempenho comparável aos sorventes comerciais utilizados em ambientes marinhos, reforçando o potencial desse resíduo como matéria-prima para o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente sustentáveis para contenção de derramamentos de petróleo.

Embora estudos recentes tenham demonstrado o elevado potencial das fibras capilares para remediação de derramamentos de petróleo, a maior parte dos biossorventes investigados na literatura ainda é baseada em materiais lignocelulósicos, devido à sua ampla disponibilidade, baixo custo e elevado teor de celulose e lignina. Dessa forma, comparar o desempenho das fibras capilares com esses materiais é fundamental para posicionar seu potencial como biossorvente frente às alternativas naturais já consolidadas na literatura (Tabela 4).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

Tabela 4. Comparação da capacidade de sorção das fibras capilares humanas obtida neste estudo com biossorventes lignocelulósicos descritos na literatura.

| Sorvente | Pré-tratamento | Sorvato | Sorção ($g.g^{-1}$) | Referência |
|---|---|---|---|---|
| **Fibra de coco natural** | - | Óleo de motor | 0,58 | KHAN *et al*. (2004) |
| **Folhas de palmeira** | - | Óleo cru | 0,65 | SIDIK *et al*. (2012) |
| **Espigas de milho** | - | Óleo cru | 2,08 | NWADIOGBU *et al*. (2016) |
| **Fibra de coco** | Carvão ativado | Petróleo bruto | 4,86 | ABEL; HABOR; OSERIBHO (2020) |
| **Frutos vazios de palma** | Carvão ativado modificado com ácido láurico | Petróleo bruto | 2,71 | UKPONG *et al*. (2024) |
| **Casca de banana** | Biochar (pirólise) | Diesel | 5,34 | URGEL *et al*. (2024) |
| **Fibra capilar Tipo C** | - | Petróleo da Bacia de Sergipe | 3,40 | Este estudo |
| **Fibra capilar Tipo C** | - | Petróleo da Bacia de Campos | 4,57 | Este estudo |

Conforme apresentado na Tabela 4, a capacidade de sorção das fibras capilares humanas mostrou-se comparável à de diversos biossorventes

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

lignocelulósicos empregados na remoção de petróleo. A fibra Tipo C apresentou capacidade de sorção de 3,40 $g.g^{-1}$ para o petróleo da Bacia de Sergipe e 4,57 $g\ g^{-1}$ para o petróleo da Bacia de Campos, valores superiores aos reportados para materiais como fibras de coco natural (0,58 $g.g^{-1}$) (KHAN *et al*., 2004), folhas de palmeira (0,65 $g.g^{-1}$) (SIDIK *et al*., 2012), espigas de milho (2,08 $g.g^{-1}$) (NWADIOGBU *et al*., 2016) e frutos vazios de palma modificados (2,71 $g.g^{-1}$) (UKPONG *et al*., 2024) . Além disso, seu desempenho foi próximo ao observado para fibras de coco modificadas por carvão ativado (4,86 $g.g^{-1}$) (ABEL; HABOR; OSERIBHO, 2020) e casca de banana pirolisada (5,34 $g.g^{-1}$) (URGEL *et al*., 2024), materiais que necessitam de etapas adicionais de processamento para atingir elevadas capacidades de sorção.

Esses resultados são particularmente relevantes porque, diferentemente de muitos biossorventes lignocelulósicos descritos na literatura, as fibras capilares utilizadas neste estudo não foram submetidas a qualquer modificação química ou térmica antes dos ensaios de sorção. Assim, o elevado desempenho obtido, especialmente para a fibra Tipo C, demonstra que esse resíduo urbano possui elevada eficiência intrínseca para adsorção de petróleo, reduzindo a necessidade de etapas adicionais de processamento e ampliando seu potencial para aplicações em resposta rápida a derramamentos de óleo.

Embora o desempenho observado em escala laboratorial seja promissor, a aplicação operacional dessas fibras em cenários reais dependerá do desenvolvimento de dispositivos de contenção e sorção, bem como da avaliação de propriedades mecânicas, recuperação, reutilização, estabilidade e desempenho sob condições hidrodinâmicas de ambientes marinhos costeiros.

## 5. Conclusão

Este estudo demonstrou que as fibras capilares humanas apresentam elevado potencial como biossorventes para remoção de petróleo em ambientes aquáticos, sendo seu desempenho influenciado tanto pela morfologia da fibra quanto pelas propriedades do petróleo. Entre os materiais avaliados, a fibra Tipo C (fibras capilares crespas) apresentou os melhores resultados de sorção e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

manteve 100% de flutuabilidade em condições dinâmicas, características essenciais para aplicações em resposta a derramamentos de óleo. Além disso, a maior parte da sorção ocorreu nos primeiros cinco minutos de contato, evidenciando uma cinética rápida de interação entre o petróleo e a superfície das fibras.

É importante ressaltar que os ensaios dessa pesquisa foram conduzidos utilizando petróleos brutos não intemperizados, permitindo a comparação padronizada entre os diferentes grupos de fibras capilares. Entretanto, reconhece-se que processos de intemperismo, como evaporação, emulsificação e oxidação, modificam as propriedades físico-químicas do petróleo e podem influenciar sua interação com biossorventes. Dessa forma, estudos futuros deverão avaliar o desempenho das fibras frente a diferentes estágios de intemperismo.

Os resultados obtidos demonstram que resíduos de cabelo humano constituem uma alternativa promissora, de baixo custo e amplamente disponível para remediação de derramamentos de petróleo. A comparação com biossorventes lignocelulósicos descritos na literatura mostrou que a fibra Tipo C apresentou desempenho comparável ao de diversos materiais naturais, mesmo sem qualquer pré-tratamento. Dessa forma, este estudo amplia o conhecimento sobre o uso de fibras capilares como biossorventes, evidenciando que diferenças morfológicas entre os tipos de cabelo influenciam sua eficiência e fornecendo subsídios para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis voltadas à contenção de derramamentos de petróleo. Os resultados demonstram também que fibras capilares humanas apresentam elevado potencial como matéria-prima para o desenvolvimento de biossorventes destinados à remediação de derramamentos de petróleo. Entretanto, estudos adicionais envolvendo aspectos construtivos, operacionais e de desempenho em condições ambientalmente mais realistas ainda são necessários antes de sua aplicação prática em operações de resposta.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

**Agradecimentos**

Os autores gostariam de agradecer aos laboratórios GBLAB e LEPETRO, e ao Grupo de Pesquisa em Biogeoquímica de Ecossistemas Marinhos Tropicais e Soluções Baseadas na Natureza (Grupo BTS) – Universidade Federal da Bahia (UFBA) – por todo o suporte técnico e recomendações fornecidas. Este trabalho também contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

**Referências**

ABEL, U. A.; HABOR, G. R.; OSERIBHO, O. I. Adsorption studies of oil spill clean-up using coconut coir activated carbon (CCAC). **American Journal of Chemical Engineering**, v. 8, n. 2, p. 27–34, 2020.

ANNUNCIADO, T. R.; SYDENSTRICKER, T. H. D.; AMICO, S. C. Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills. **Marine Pollution Bulletin**, v. 50, n. 11, p. 1340–1346, 2005.

CARDOSO, C. K. M.; MATTEDI, S.; LIMA, A. K. C.; MOREIRA, I. T. A. Remediation of petroleum contaminated saline water using value-added adsorbents derived from waste coconut fibres. **Chemosphere**, v. 279, p. 130562, 2021.

CARDOSO, C. K. M.; MOREIRA, Í. T. A.; QUEIROZ, A. F. de S.; OLIVEIRA, O. M. C. de; LOBATO, A. K. de C. L. Bio-Based Sorbents for Marine Oil Spill Response: Advances in Modification, Circularity, and Waste Valorization. **Resources**, v. 14, 140, 2025a.

CARDOSO, C. K. M.; MOREIRA, Í. T. A.; QUEIROZ, A. F. de S.; OLIVEIRA, O. M. C. de; LOBATO, A. K. de C. L. Multiscale Evaluation of Raw Coconut Fiber as Biosorbent for Marine Oil Spill Remediation: From Laboratory to Field Applications. **Resources**, v. 14, art. 159, 2025b.

CHENXI, Y.; JIAN, W.; HAIOU, Z.; TINGTING, C.; HANG, Z.; JIAWEI, W.; BO, B. Novel fabrication of hydrophobic/oleophilic human hair fiber for efficient oil/water separation through one-pot dip-coating synthesis route. **Scientific Reports**, v. 12, p. 7632, 2022.

ERPINAR, D. E.; TURAN, S. C.; ERTEKIN, I.; NEŞER, G. Baseline marine grade oil adsorption performance of artisanal felt mat made using waste human hair.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

**Marine Pollution Bulletin**, v. 201, p. 116215, 2024.

FERNANDES, C.; MEDRONHO, B.; ALVES, L.; RASTEIRO, M. G. On Hair Care Physicochemistry: From Structure and Degradation to Novel Biobased Conditioning Agents. **Polymers**, v. 15, n. 3, p. 608, 2023.

FERREIRA, S. L. C.; LIMA, D. C.; MOREIRA, Í. T. A.; OLIVEIRA, O. M. C. de. Critical study using experimental design of the determination of lead by high-resolution continuum source hydride generation atomic absorption spectrometry. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, v. 26, n. 10, p. 2039-2044, 2011. DOI: https://doi.org/10.1039/c1ja10092k

GEORGIN, J.; RAMOS, C. G.; OLIVEIRA, J. S.; DEHMANI, Y.; MESSAOUDI, N. E.; MEILI, L.; FRANCO, D. S. P. A critical review of the advances and current status of the application of adsorption in the remediation of micropollutants and dyes through the use of emerging bio-based nanocomposites. **Sustainability**, v. 17, n. 5, p. 2012, 2025.

GOTE, M. G.; DHILA, H. H.; MULEY, S. R. Advanced synthetic and bio-based sorbents for oil spill clean-up: a review of novel trends. **Nature Environment and Pollution Technology**, v. 22, n. 1, p. 39–61, 2023.

GUPTA, V. B. Trichology: Structure, Function, and Biochemistry of Human Hair. **Boca Raton: CRC Press**, 2014.

HOANG, A. T.; NIŽETIĆ, S.; DUONG, X. Q.; ROWINSKI, J.; NGUYEN, X. P.; CHIN, W. C.; TAI, N. H. Advanced porous superhydrophobic polymer-based absorbents for oil-contaminated water treatment. **Chemosphere**, v. 277, art. 130274, 2021. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130274.

IFELEBUEGU, A. O.; NGUYEN, T. V. A.; UKOTIJE-IKWUT, P.; MOMOH, Z. Liquid-phase sorption characteristics of human hair as a natural oil spill sorbent. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 3, n. 2, p. 938–943, 2015.

ITOPF – INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION FEDERATION LIMITED. Fate of marine oil spills. **Technical Information Paper** n. 2. London: ITOPF, 2011. 16 p.

JILAGAM, N. K.; SAU, A.; ADDEPALLI, S. V.; HENS, A.; DUTTA, S. Mitigation of oil spills from synthetic seawater using human hair – Experimentation, modeling and optimization. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 242, p. 104998, 2023.

KHAN, E.; VIROJNAGUD, W.; RATPUKDI, T. Use of biomass sorbents for oil removal from gas station runoff. **Chemosphere**, v. 57, p. 681–689, 2004.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

KOVAČEVIĆ, A.; MARKOVIĆ, D.; RADOIČIĆ, M.; ŠAPONJIĆ, Z.; RADETIĆ, M. Sustainable non-woven sorbents based on jute post-industrial waste for cleaning of oil spills. **Journal of Cleaner Production**, v. 386, p. 135811, 2023.

LIU, R.; DASKIRAN, C.; JI, W.; ABU KHALIL, C.; LI, J. The behavior of weathered and/or photo-oxidized crude oil with/without application of dispersant under breaking wave conditions. **SSRN Electronic Journal**, 2025. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5271753. Acesso em: 16 jul. 2026.

MEIRELLES, A. C. L. E.; CARDOSO, C. K. M.; MOREIRA, Í. T. A.; LOBATO, A. K. C. L. Patent prospecting of biosorbents used for oil and derivatives sorption. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, e29326, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29326

MIRANDA, L. S.; MOREIRA, Í. T. A.; OLIVEIRA, O. M. C.; SANTOS, C. P.; PINHEIRO, S. M. M.; OLIVEIRA, L. M. L.; MARTINS, A. B. O.; CARVALHO FILHO, M. S. Oil-suspended particulate material aggregates as a tool in preventing potential ecotoxicological impacts in the São Paulo River, Todos os Santos Bay, Bahia, Brazil: influence of salinity and suspended particulate material. **Marine Pollution Bulletin**, v. 112, p. 91-97, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.037

MOREIRA, Í. T. A.; CARDOSO, C. K. M.; FRANCO, E. D. S. S.; MARQUES, I. M.; HADLICH, G. M.; QUEIROZ, A. F. S.; LOBATO, A. K. C. L.; OLIVEIRA, O. M. C. Mangrove ecosystem restoration after oil spill: bioremediation, phytoremediation, biofibers and phycoremediation. In: **Mangrove Ecosystem Restoration**. London: IntechOpen, 2021.

MOREIRA, Í. T. A.; OLIVEIRA, O. M. C.; AZWELL, T.; QUEIROZ, A. F. S.; NANO, R. M. W.; SOUZA, E. S.; ANJOS, J. A. S. A. dos; ASSUNÇÃO, R. V.; GUIMARÃES, L. M. Strategies of bioremediation for the degradation of petroleum hydrocarbons in the presence of metals in mangrove simulated. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 44, n. 6, p. 631-637, 2016. DOI: https://doi.org/10.1002/clen.201300939

MOREIRA, Í. T. A. Investigação de possíveis impactos ecológicos do petróleo sobre comunidades biológicas estuarinas na Baía de Todos os Santos e no sul da Bahia: OSA como uma ferramenta norteadora. 2014. **Tese (Doutorado em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos) - Universidade Federal da Bahia**, Salvador, 2014.

MOREIRA, Í. T. A.; OLIVEIRA, O. M. C.; TRIGÜIS, J. A.; QUEIROZ, A. F. S.; FERREIRA, S. L. C.; MARTINS, C. M. S.; SILVA, A. C. M.; FALCÃO, B. A. Phytoremediation in mangrove sediments impacted by persistent total petroleum hydrocarbons (TPHs) using Avicennia schaueriana. **Marine Pollution Bulletin**, v. 67, p. 130-136, 2013a. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.11.024

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

MOREIRA, Í. T. A.; OLIVEIRA, O. M. C.; TRIGÜIS, J. A.; QUEIROZ, A. F. S.; BARBOSA, R. M.; ANJOS, J. A. S. A.; REYES, C. Y.; SILVA, C. S.; TRINDADE, M. C. L. F.; RIOS, M. C. Evaluation of the effects of metals on biodegradation of total petroleum hydrocarbons. **Microchemical Journal**, v. 110, 215-220, 2013b. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.03.020

MOREIRA, Í. T. A.; OLIVEIRA, O. M. C. de; TRIGÜIS, J. A.; SANTOS, A. M. P. dos; QUEIROZ, A. F. de S.; MARTINS, C. M. S.; SILVA, C. S.; JESUS, R. S. de. Phytoremediation using Rhizophora mangle L. in mangrove sediments contaminated by persistent total petroleum hydrocarbons (TPH's). **Microchemical Journal**, v. 99, n. 2, p. 376-382, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microc.2011.06.011

MURRAY, M. L.; POULSEN, S. M.; MURRAY, B. R. Decontaminating terrestrial oil spills: a comparative assessment of dog fur, human hair, peat moss and polypropylene sorbents. **Environments**, v. 7, n. 7, p. 52, 2020.

NWADIOGBU, J. O.; AJIWE, V. I.; OKOYE, P. A. C. Removal of crude oil from aqueous medium by sorption on hydrophobic corncobs: equilibrium and kinetic studies. **Journal of Taibah University for Science**, v. 10, p. 56–63, 2016.

OLIVEIRA, L. M. T. M.; SALEEM, J.; BAZARGAN, A.; DUARTE, J. L. S.; McKAY, G.; MEILI, L. Sorption as a rapidly response for oil spill accidents: a material and mechanistic approach. **Journal of Hazardous Materials**, v. 407, p. 124842, 2021.

PAGNUCCO, R.; PHILLIPS, M. L. Comparative effectiveness of natural by-products and synthetic sorbents in oil spill booms. **Journal of Environmental Management**, v. 225, p. 10–16, 2018.

PEREIRA, T. S.; MOREIRA, Í. T. A.; OLIVEIRA, O. M. C. de; RIOS, M. C.; SILVA FILHO, W. A. C.; ALMEIDA, M. de; CARVALHO, G. C. Distribution and ecotoxicology of bioavailable metals and As in surface sediments of Paraguaçu estuary, Todos os Santos Bay, Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 99, n. 1-2, p. 166-177, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.031

REYES, C. Y.; MOREIRA, Í. T. A.; OLIVEIRA, D. A. F.; MEDEIROS, N. C.; ALMEIDA, M.; WANDEGA, F.; SOARES, S. H. R.; OLIVEIRA, O. M. C. de. Weathering of Petroleum Biomarkers: Review in Tropical Marine Environment Impacts. **Open Access Library Journal**, 2014. DOI: https://doi.org/10.4236/oalib.1101004

RIOS, M. C.; MOREIRA, Í. T. A.; OLIVEIRA, O. M. C.; PEREIRA, T. S.; ALMEIDA, M. de; TRINDADE, M. C. L. F.; MENEZES, L.; CALDAS, A. S. Capability of Paraguaçu estuary (Todos os Santos Bay, Brazil) to form oil-SPM aggregates (OSA) and their ecotoxicological effects on pelagic and benthic organisms. **Marine**

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

**Pollution Bulletin**, v. 114, n. 1, p. 364-371, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.055

ROBBINS, C. R. Chemical and physical behavior of human hair. 5. ed. New York: Springer, 2012.

SANTOS, J. F.; CARDOSO, C. K. M; CARDOSO FILHO, M. S.; HADLICH, G. M. Fungal Bioaugmentation and Plant-Based Biostimulation for Petroleum Hydrocarbon Degradation in Mangrove Sediments. **REMUNOM**, *[S. l.]*, v. 13, n. 16, p. 1–35, 2026. DOI: 10.66104/hyrct881.

SHIU, R. F.; LEE, C. L.; HSIEH, P. Y.; CHEN, C. S.; KANG, Y. Y.; CHIN, W. C.; TAI, N. H. Superhydrophobic graphene-based sponge as a novel sorbent for crude oil removal under various environmental conditions. **Chemosphere**, v. 207, p. 110–117, 2018. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.05.071.

SIDIK, S. M.; JALIL, A. A.; TRIWAHYONO, S.; ADAM, S. H.; SATAR, M. A. H.; HAMEED, B. H. Modified oil palm leaves adsorbent with enhanced hydrophobicity for crude oil removal. **Chemical Engineering Journal**, v. 203, p. 9–18, 2012.

SILVA, C. S.; OLIVEIRA, O. M. C. de; MOREIRA, Í. T. A.; QUEIROZ, A. F. de S.; ALMEIDA, M. de; SILVA, J. V. L.; SILVA ANDRADE, I. O. da. Potential application of oil-suspended particulate matter aggregates (OSA) on the remediation of reflective beaches impacted by petroleum: a mesocosm simulation. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, 18, 18071-18083, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-015-5234-8

SILVA, M. M.; LEÃO, D. J.; MOREIRA, Í. T. A. et al. Speciation analysis of inorganic antimony in sediment samples from São Paulo Estuary, Bahia State, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v.22, 8386-8391, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-014-3956-7

SIQUEIRA, L. F.; SILVA, M. S. S.; SANTOS, N. C.; COSTA, S. A. M.; RIBEIRO, V. S.; SALES, J. C.; FERREIRA, A. C.; OLIVEIRA, O. M. C.; CHINALIA, F. A.; MOREIRA, Í. T. A. Acclimation of Rhizophora mangle to petroleum: morphological responses and implications for phytoremediation in contaminated mangrove sediments. **Marine Pollution Bulletin**, v. 224, 119168, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.119168

TURSI, A.; BENEDUCI, A.; CHIDICHIMO, F.; DE VIETRO, N.; CHIDICHIMO, G. Remediation of hydrocarbons polluted water by hydrophobic functionalized cellulose. **Chemosphere**, v. 201, p. 530–539, 2018.

UKPONG, A. A.; OTU, G. E.; OBOH, I.; UZONO, R. I.; AKWAYO, I. J.; INYANG, U. I. Enhanced hydrophobicity and oleophilicity for the removal of crude oil from aqueous medium using modified coconut coir activated carbon (CCAC) and empty

REMUNOM
ISSN 2178-6925

**Received:** 20/06/2026 - **Accepted:** 19/07/2026
**Vol**: 13.16
**DOI**: 10.66104/qw8awe82
**Pages:** 1-30

palm fruit bunch activated carbon (EPFBAC). **Open Access Library Journal**, v. 11, n. 7, 2024.

URGEL, J. J. D. T.; BRIONES, J. M. A.; DIAZ JUNIOR, E. B.; DIMACULANGAN, K. M. N.; RANGEL, K. L.; LOPEZ, E. C. R. Removal of diesel oil from water using biochar derived from waste banana peels as adsorbent. **Carbon Research**, v. 3, art. 13, 2024.