



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

---

FACULTAD DE INGENIERÍA  
**COLEGIO DE INGENIERÍA TEXTIL**

FUNCIONALIZACIÓN DE TEXTILES SUPERHIDROFOBICOS PARA LA  
SEPARACIÓN DE AGUA/ACEITE EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES

**TESINA**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERA TEXTIL**

PRESENTA:  
**SANDY MÉNDEZ BAUTISTA**

ASESOR:  
**MTRO. JOSÉ ÁNGEL JUÁREZ TORRES**

PUEBLA, PUE.

JUNIO 2025

## ÍNDICE

RESUMEN .....	3
INTRODUCCIÓN .....	4
CAPÍTULO I PROTOCOLO Y MARCO TEÓRICO .....	6
JUSTIFICACIÓN .....	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	8
HIPOTESIS .....	9
OBJETIVO GENERAL .....	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	9
1.1 CONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES POR ACEITES (ANTECEDENTES).....	10
1.2 LISTA DE CATÁSTROFES MEDIOAMBIENTALES PRODUCTO DE LA ACTIVIDAD HUMANA.....	12
1.3 SEPARACIÓN DE AGUA Y ACEITE EN AGUAS RESIDUALES. ....	15
1.4 SUPERFICIES SUPERHIDROFOBICAS.....	16
1.5 TIPOS DE SUPERFICIE SEGÚN SU MOJABILIDAD.....	18
1.6 MODELOS DE SUPERFICIES. ....	20
1.7 METODOS UTILIZADOS PARA LA SINTESIS DE SUPERFICIES SUPERHIDROFOBICAS.....	24
CAPÍTULO II DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	27
2.1 MATERIALES Y METODOS UTILIZADOS .....	28
CAPÍTULO III DISCUSION DE RESULTADOS .....	39
CAPÍTULO IV CONCLUSIONES .....	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

## **RESUMEN**

En este trabajo se analizaron diversos estudios relacionados con los textiles superhidrófobos. Se examinaron conceptos como el ángulo de contacto con el agua, la energía de la superficie y los modelos de superficies superhidrofóbicas. El objetivo fue comprender los fundamentos teóricos y los avances en el campo de los textiles superhidrófobos, con el fin de aplicar este conocimiento en la separación de agua y aceite en aguas residuales contaminadas, especialmente en derrames de petróleo.

A través de esta revisión bibliográfica, se describe la síntesis y caracterización de los materiales superhidrófobos, la evaluación de su eficiencia de separación, y se discuten las posibles aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación de aguas residuales es un desafío ambiental global que requiere soluciones efectivas y sostenibles. Entre los diversos contaminantes presentes en las aguas residuales, los derrames de petróleo representan una preocupación significativa debido a sus graves consecuencias para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Estos derrames pueden ocurrir en diferentes etapas de la industria del petróleo y sus derivados, liberando grandes cantidades de petróleo al medio ambiente y generando una contaminación considerable.

La separación de agua y aceite en aguas residuales contaminadas por derrames de petróleo es un desafío técnico complejo. Los métodos tradicionales de separación, como la centrifugación y la filtración, pueden ser ineficientes y costosos, lo que requiere el desarrollo de enfoques innovadores y eficaces.

En este contexto, los textiles superhidrófobos han surgido como una posible solución para la separación de agua y aceite en aguas residuales contaminadas. Estos textiles presentan propiedades únicas de repelencia al agua y afinidad con el aceite, lo que les permite actuar como una barrera selectiva para separar estos dos líquidos.

El objetivo de esta tesina es investigar y evaluar el potencial de los textiles superhidrófobos en la separación de agua y aceite en el tratamiento de aguas residuales contaminadas por derrames de petróleo. Se llevó a cabo una revisión detallada de la literatura científica disponible sobre el tema, analizando los conceptos fundamentales de las superficies superhidrofóbicas, los métodos de fabricación de textiles superhidrófobos y su eficiencia en la separación de agua y aceite.

Además, se plantea como hipótesis que los textiles superhidrófobos presentan una alta capacidad de repeler el agua y recolectar el aceite en aguas

residuales contaminadas, lo que los convierte en una opción prometedora para el tratamiento de derrames de petróleo.

La relevancia de esta investigación radica en su potencial para proporcionar una solución innovadora y sostenible en el tratamiento de aguas residuales contaminadas por derrames de petróleo. La aplicación de textiles superhidrófobos en la separación de agua y aceite puede contribuir a disminuir los impactos ambientales y proteger la salud pública.

En el capítulo I, se muestra el marco teórico que sienta las bases conceptuales y teóricas para comprender los textiles superhidrófobos y su aplicabilidad en la separación de agua y aceite en aguas residuales contaminadas por derrames de petróleo.

En el capítulo II, se describen los materiales empleados en la investigación, así como los procedimientos para la preparación de las muestras. Asimismo, se exponen los fundamentos teóricos de las metodologías experimentales que se emplearon.

La comprensión de estos fundamentos será esencial para el análisis de los resultados obtenidos en los cuatro métodos experimentales del capítulo III. Se presenta la metodología para llevar a cabo la preparación de los tejidos, pruebas de absorción, medición y obtención de resultados.

En el capítulo IV se obtiene la formulación de las conclusiones, en donde se presenta a los textiles superhidrófobos como una solución efectiva y prometedora para la separación de agua y aceite.

CAPÍTULO I  
PROTOCOLO Y  
MARCO TEÓRICO

## JUSTIFICACIÓN

En respuesta a la necesidad actual de las industrias de adaptar tecnologías que permitan la separación adecuada de descargas de aguas residuales oleosas, hoy en día se utilizan una serie de estrategias que involucran productos como telas, membranas y espumas para abordar este problema. Entre ellos, las telas representan un método de bajo costo, duradero y liviano.

Los textiles superhidrófobicos, por otro lado, tienen propiedades únicas que les permiten separar de manera selectiva el agua del aceite y se consideran una alternativa prometedora para la separación de agua y aceite en aguas residuales. Además, al ser reutilizables y fáciles de mantener, los textiles superhidrófobicos podrían ofrecer una alternativa más sostenible y amigable con el medio ambiente en comparación con los métodos convencionales de separación de agua y aceite.

Los problemas de contaminación por petróleo, como los derrames accidentales de petróleo crudo en ambientes acuáticos y la descarga de aguas residuales oleosas debido a las actividades industriales, pueden tener efectos ambientales catastróficos. La separación de agua y aceite en aguas residuales es una etapa crucial en el proceso de tratamiento de estas aguas contaminadas, ya que la presencia de aceite puede dificultar la eliminación de otros contaminantes y afectar la calidad del agua. La respuesta a este problema permitirá conocer las posibilidades que ofrece la tecnología de textiles superhidrófobicos para el tratamiento de aguas residuales, lo que podría llevar a soluciones más sostenibles para la protección del medio ambiente y la salud humana.

El impacto que causa de forma inmediata es que crea una película sobre la superficie marina que impide la entrada de la luz en el agua. Dentro del ecosistema marino hay diferentes especies, como es el caso de las algas, que necesitan la llegada de la luz para poder realizar la fotosíntesis. Si esto no ocurre, muchas de ellas pueden morir.

Después, tiene lugar una contaminación aguda, que puede llevar incluso a la muerte de muchos organismos, porque los contaminantes de los compuestos del crudo son tremendamente tóxicos.

A más largo plazo, el derrame provoca años en el sistema reproductivo y de alimentación de todos los organismos del ecosistema marino.

Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo evaluar la eficiencia de textiles superhidrófobos y su relevancia reside en la posibilidad de ofrecer una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas residuales contaminadas oleosas.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los derrames de petróleo representan una de las formas más graves de contaminación ambiental, afectando negativamente la calidad del agua, la fauna y flora marina, así como la salud humana y el turismo. Además, la separación de agua y aceite en las aguas residuales es un proceso muy complejo debido a la emulsión que se forma entre ambos líquidos, lo que dificulta el tratamiento convencional de aguas residuales.

Aunque existen varios métodos convencionales para la separación de agua y aceite, estos presentan limitaciones importantes como la ineficiencia en la separación de emulsiones, altos costos de implementación y mantenimiento, y la generación de residuos contaminantes. Por lo tanto, es necesario buscar soluciones alternativas y eficientes que permitan la separación de agua y aceite en aguas residuales.

En este contexto, se plantea el siguiente problema de investigación: ¿Cómo se puede utilizar la tecnología de textiles superhidrófobos para la separación de agua y aceite en aguas residuales, y cuál es su eficiencia en comparación con los métodos convencionales de separación de agua y aceite?

## **HIPOTESIS**

La síntesis de textiles superhidrófobos a partir de materiales específicos y su aplicación en la separación de agua y aceite en aguas residuales por derrames de petróleo, puede ser una alternativa eficiente y sostenible en comparación con los métodos de separación convencionales, debido a su alta selectividad, capacidad de reutilización y fácil mantenimiento.

## **OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio sobre los textiles superhidrófobos para separar la mezcla de aceite/agua en el tratamiento de aguas residuales.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Examinar la evolución de los textiles superhidrófobos a través de los años.
- Analizar los distintos tipos de textiles superhidrófobos para la separación de aceite/agua.
- Determinar la composición de los textiles superhidrófobos.
- Identificar los métodos de elaboración de los textiles superhidrófobos.
- Conocer el impacto medioambiental asociados con el derrame de aguas residuales.

## **1.1 CONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES POR ACEITES (ANTECEDENTES)**

La contaminación del agua por aceite es un caso típico de las aguas residuales procedentes de procesos industriales. La descarga del agua contaminada con aceite contribuye a la polución del medio ambiente. Consecuentemente, las normas sobre los niveles de contaminación son cada vez más estrictas. En muchos procesos industriales se utilizan detergentes y productos de limpieza a presión que generan mezclas de aceite y agua.

La liberación de aceites y grasas al medio acuático, como sustancias hidrófobas de menor densidad, además de provocar un impacto estético, aportan otros contaminantes como la elevada DQO (Demanda Química de Oxígeno) que en gran medida afectan al intercambio gaseoso. Así, estas sustancias una vez entran al medio acuático, se difunden a la superficie reduciendo la oxigenación a través de la interfase aire-agua y la actividad fotosintética, ya que absorbe la radiación solar, disminuyendo así, además, la producción interna de oxígeno disuelto.

El derrame de aceites usados en los ríos y lagos afecta notablemente la calidad del agua, al ocasionar una capa superficial que impide la oxigenación de las aguas y produce la muerte de los organismos que las habitan. El contenido de aceites y grasas en el agua se determina en el laboratorio mediante la extracción de todo el material soluble en un solvente orgánico tal como el hexano.

Los resultados se reportan como mg/L de MEH (material extraíble en hexano). Los aceites no se disuelven en el agua, no son biodegradables, forman películas impermeables que impiden el paso del oxígeno y afectan al ecosistema tanto en el agua como en tierra, esparcen productos tóxicos que pueden ser ingeridos por los seres humanos de forma directa o indirecta.

Los hidrocarburos saturados que contienen no son biodegradables (en el mar el tiempo de eliminación de un hidrocarburo puede ser de 10 a 15 años). Se dice que

5 litros de aceite usado, capacidad corriente del cárter de un automóvil, vertidos sobre un lago cubriría una superficie de 5.000 m<sup>2</sup> con una capa oleosa que afectaría gravemente el desarrollo de la vida acuática.

A estas dificultades debemos añadir los riesgos que implican las sustancias tóxicas contenidas en los aceites usados, vertidos en el agua que pueden ser consumidas por el hombre o los animales. (Bravo Herrera, Salgado Bervis , & Osorno Sánchez, 2016)

En cambio, la contaminación de aguas residuales por derrames de petróleo es un problema ambiental significativo que puede tener efectos perjudiciales en la biosfera marina y la salud humana. Los derrames de petróleo pueden ocurrir en cualquier momento ya sea en su transportación, almacenamiento o durante la producción y extracción del petróleo.

Cuando se produce un derrame de petróleo, el petróleo puede liberarse al medio ambiente en forma de una capa de petróleo en la superficie acuática, por lo cual contamina el agua y gravemente afecta a los organismos acuáticos. Además, el petróleo es altamente tóxico y puede contener contaminantes peligrosos, como metales pesados y productos químicos orgánicos, que pueden ser peligrosos para la salud humana. La contaminación de aguas residuales por derrames de petróleo puede tener consecuencias negativas en la calidad del agua, la biodiversidad acuática y la economía local.

### **1.1.1 Aceites y grasas**

Las grasas y aceites de origen vegetal o animal son triglicéridos o también llamados ésteres de la glicerina, con ácidos grasos de larga cadena de hidrocarburos que generalmente varían en longitud. De forma general, cuando un triglicérido es sólido a temperatura ambiente se le conoce como grasa, y si se presenta como líquido se dice que es un aceite.

### **1.1.2**

### **Solubilidad**

Los aceites se caracterizan principalmente por su virtual inmiscibilidad en el agua, sin embargo, son miscibles en muchos solventes orgánicos no polares. La solubilidad es dependiente de las propiedades termodinámicas del soluto y disolvente, y de las fuerzas de atracción entre las moléculas.

### **1.1.3 Densidad**

Los valores de densidad para aceites están generalmente en el intervalo entre 0.920 y 0.964 g/L. La densidad se incrementa cuando decrece el peso molecular e incrementa con la instauración. La densidad se incrementa aproximadamente en forma lineal con el incremento de la temperatura. (Bravo Herrera, Salgado Bervis , & Osorno Sánchez, 2016)

## **1.2 LISTA DE CATÁSTROFES MEDIOAMBIENTALES PRODUCTO DE LA ACTIVIDAD HUMANA**

Desde el siglo XX el petróleo es una materia prima fundamental para la economía global, por lo que su extracción y transporte constituye una actividad vital. Y es justamente en esos procesos cuando a menudo se producen accidentes o malas prácticas de consecuencias devastadoras por el alto poder contaminante de esta mezcla de hidrocarburos. En los últimos 50 años se han producido al menos 130 derrames graves de crudo desde barcos petroleros y plataformas de extracción que, en algunos casos, ha provocado alteraciones en los ecosistemas marinos y costeros que tardan décadas en recuperarse. Frente a accidentes de esta naturaleza es fundamental una actuación rápida y en la dirección adecuada, ya que puede haber soluciones alternativas en función del tipo de fuga, el lugar, las condiciones climáticas, etc.

### **1.2.1 Las víctimas**

Los principales damnificados de los derrames de petróleo son la fauna y la flora del lugar. Los peces se envenenan al consumir presas con crudo y toda la cadena

trófica queda afectada pudiendo afectar, incluso, al ser humano. Además, los hidrocarburos destruyen los huevos o producen crías con malformaciones. Los moluscos bivalvos, en especial los que viven aferrados a las rocas, mueren por sofocación debido a la capa de petróleo. Estas manchas, además, obstruyen el paso de la luz por lo que no permiten la fotosíntesis de las algas, alterando de forma importante el ecosistema submarino. Las aves y mamíferos marinos se impregnan de petróleo y acaban muriendo, bien intoxicados o bien por hipotermia al quedar dañada la capa que les protege del frío. El vertido de crudo también produce daños notables en el paisaje costero, pero su carácter biodegradable permite que buena parte pueda ser retirado.

### 1.2.2 Derrames de petróleo más importantes de la historia:

- **Marea negra en el Golfo Pérsico**



*Ilustración 1. Derrame de petróleo en la guerra del Golfo. (Aqua, 2022)*

Durante la Guerra del Golfo, en 1991, se produjo el mayor derrame de petróleo de la historia. Durante su retirada de Kuwait, las tropas iraquíes arrasaron cientos de pozos y barcos petroleros provocando el vertido de cerca de 1.800.000 toneladas de crudo. La inmensa marea negra de más de 4.000 km<sup>2</sup> que se generó causó un profundo impacto en la vida marina y costera de los países de la zona. El hecho de que el Golfo Pérsico sea una masa de agua no muy extensa, semicerrada y poco profunda potenció el efecto contaminante.

- **Hundimiento de la plataforma Deepwater Horizon**



*Ilustración 2. Explosión de la plataforma petrolífera.  
(Aquae, 2022)*

En abril de 2010, una explosión en la plataforma petrolífera semisumergible Deepwater Horizon, propiedad de Transocean, pero a cargo de BP (British Petroleum), causó un brutal derrame de más de 750.000 toneladas de crudo en el Golfo de México, además del fallecimiento de once trabajadores. Durante tres meses el pozo estuvo vertiendo petróleo hasta que se logró cerrar. La marea negra afectó a más de 1.500 km de costa del sur de Estados Unidos, perjudicando a unas 8.000 especies, entre aves, peces, tortugas, moluscos, crustáceos y mamíferos marinos.

- **Ixtoc I: desastre petrolero en México**



*Ilustración 3. Derrame de petróleo en México. (Aquae,  
2022)*

En 1979, el Golfo de México sufrió otro dramático derrame de crudo, aunque esta vez fue la costa mexicana la más afectada. En especial, el litoral de Campeche, Tabasco, Veracruz y Tamaulipas, aunque también la costa de Texas resultó contaminada. El 3 de junio, una explosión de alta presión y el posterior reventón en el pozo exploratorio Ixtoc I de la empresa Pemex provocó el vertido de 530.000 toneladas de petróleo durante casi diez meses. Según datos de la propia compañía, la mitad de ese crudo se quemó y otro 16% se evaporó. (Aqua, 2022)

### **1.3 SEPARACIÓN DE AGUA Y ACEITE EN AGUAS RESIDUALES.**

Consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes presentes en el agua efluente del uso humano.

#### **1.3.1 Tratamiento físico**

Son los que no generan sustancias nuevas, solo concentran los contaminantes, ya sea al evaporar el agua o filtrar los sólidos de tamaño considerable. Los tratamientos físicos más comunes son:

- Cribado
- Filtración
- Adsorción
- Flotación
- Floculación
- Sedimentación
- Centrifugación

#### **1.3.2 Tratamiento químico**

Dan como resultado la formación de nuevas sustancias, los más comunes son:

- Neutralización
- Coagulación
- Desinfección
- Ablandamiento

- Intercambio iónico
- Oxidación

### **1.3.3 Tratamiento biológico**

Utilizan organismos vivos para provocar cambios químicos, este tipo de tratamientos pueden ser vistos como una modalidad del tratamiento químico entre los que se puede mencionar:

- Digestión aerobia y anaerobia
- Lodos activados
- Nitrificación
- Composteo

Estos procesos se dividen en:

- Tratamiento primario: se elimina un gran porcentaje de sólidos en suspensión y materia inorgánica.
- Tratamiento secundario: se trata de reducir el contenido de materia orgánica acelerando los procesos biológicos naturales.
- Tratamiento terciario: es necesario cuando el agua va a ser reutilizada; se elimina un 99% de los sólidos y además se emplean varios procesos químicos para garantizar que el agua este tan libre de impurezas como sea posible. (Cid, 2022)

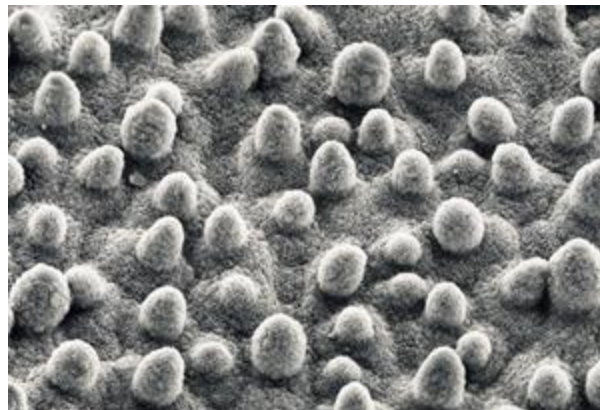
## **1.4 SUPERFICIES SUPERHIDROFÓBICAS.**

Existen diversos antecedentes sobre las superficies superhidrofóbicas, tanto en la naturaleza como en la investigación científica. Uno de los ejemplos más conocidos de superficies superhidrofóbicas en la naturaleza es la hoja de loto. La flor de loto (*Nelumbo nucifera*) es una planta acuática de origen asiático. Tiene un significado religioso que representa la pureza espiritual y el renacimiento, asociado a la característica hidrofóbica de sus hojas, es decir no se mojan.

Como consecuencia de ello, el agua de lluvia adopta la forma de gotas esféricas al entrar en contacto con la superficie de sus hojas, lo cual le permite deslizarse libremente llevándose consigo toda suciedad y manteniendo la hoja limpia y seca, como así también libre de colonias bacterianas, a pesar de vivir en aguas contaminadas. Este efecto de “autolimpieza”, denominado efecto Loto, se encuentra también en otras especies de plantas como el Taro y el Irupé, aves e insectos. (Taborda, 2013)

Para explicar el comportamiento superhidrofóbico de las hojas de Loto, los biólogos tuvieron que estudiar la composición química y la topografía de estas. Básicamente, encontraron que las hojas tenían dos niveles de estructuras que explicaban este comportamiento: un nivel microestructurado (del tamaño de micras o milésimas de milímetro) consistente en bultos superficiales y un nivel nanoestructurado (del orden de la millonésima de milímetro) formado por pequeños pelos. (Taborda, 2013)

Ambos sistemas, tienen pequeñas estructuras cerosas en su superficie, estas características permiten que la superficie de una hoja de Loto se deslice sin mojar la hoja, lo que ha inspirado el desarrollo de materiales sintéticos superhidrofóbicos.



*Ilustración 4. Imagen SEM de la superficie de la hoja de Flor de Loto donde se aprecian protuberancias cónicas. (Taborda, 2013)*

En la investigación científica, los primeros trabajos sobre superficies superhidrofóbicas se remontan a la década de 1990, cuando los científicos comenzaron a estudiar la relación entre la estructura de las superficies y su capacidad para repeler el agua. Dado a esto, se han desarrollado una variedad de métodos para fabricar materiales superhidrofóbicos, incluyendo la deposición de películas finas, el autoensamblaje molecular, la microfabricación y la electrohilatura.

## **1.5 TIPOS DE SUPERFICIE SEGÚN SU MOJABILIDAD.**

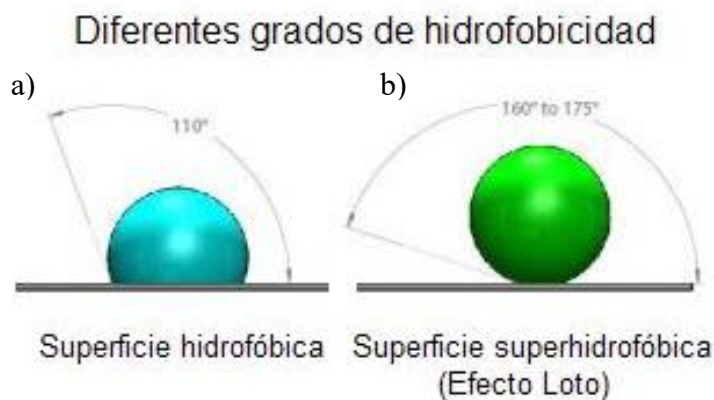
En general, las superficies se clasifican según su mojabilidad en hidrofílicas (afinidad por el agua) e hidrofóbicas (repelencia al agua). En el caso de los textiles superhidrofóbicos, se busca obtener una superficie altamente repelente al agua, lo que se logra mediante la creación de una estructura microscópica que atrapa aire y minimiza el contacto entre el agua y la superficie.

Otra clasificación importante de las superficies superhidrofóbicas es según su durabilidad y estabilidad. Muchos materiales superhidrofóbico pueden ser dañados o perder su efectividad con el tiempo, debido a factores como la exposición a la luz solar, la abrasión, el contacto con otros líquidos, entre otros. Por lo tanto, se requiere un cuidadoso diseño de materiales y procesos de fabricación para lograr superficies superhidrofóbicas duraderas y estables.

### **1.5.1 Angulo de contacto estático con agua**

De manera general, se define el ángulo de contacto como el ángulo que forma la superficie de un líquido al entrar en contacto con una superficie sólida. El valor del ángulo de contacto depende principalmente de la relación existente entre las fuerzas adhesivas del líquido y del sólido y las fuerzas cohesivas del propio líquido. Cuando una fase líquida y una fase sólida entran en contacto, forman una interfase común. La mojabilidad es la capacidad de los sólidos para formar interfases con los líquidos.

A diferencia de la hidrofobicidad (repulsión al agua), la cual es una propiedad química, la superhidrofobicidad es una propiedad fundamentalmente física. La diferencia entre ambas propiedades depende fuertemente del ángulo de contacto entre la superficie y el agua, de modo que, si el ángulo de contacto está entre 90 y 150 grados, obtenemos propiedades hidrofóbicas. “En cambio, con un ángulo de contacto superior a 150 grados, se amplifica este efecto y se convierte en una superficie imposible de mojar, obteniendo así características superhidrofóbicas”. (Taborda, 2013)



*Ilustración 5. Diferentes grados de hidrofobicidad: a) el ángulo de contacto oscila entre 90 y 150 grados, se obtiene propiedades hidrofóbicas. En cambio, con b) el ángulo de contacto es superior a 150 grados se obtiene así características superhidrofóbicas. (Taborda, 2013)*

### 1.5.2 Ángulo de inclinación

El ángulo de inclinación es el ángulo que se forma entre la superficie de un material y una superficie plana. En el contexto de los textiles superhidrofóbicos, el ángulo de inclinación se refiere al ángulo que se forma entre la superficie del tejido y una gota de agua que se coloca sobre ella.

El ángulo de inclinación se utiliza para medir la hidrofobicidad de un material. En una superficie hidrofóbica, el ángulo de inclinación será alto, lo que significa que la gota de agua se mantendrá en la parte superior de la superficie y no se extenderá por ella. En una superficie hidrofílica, el ángulo de inclinación será bajo y la gota de agua se extenderá por la superficie.

En el caso de los textiles superhidrófobos, un ángulo de inclinación alto indica que el tejido es muy repelente al agua, lo que lo hace útil para aplicaciones de separación de agua y aceite. Además, un alto ángulo de inclinación también indica una baja energía de superficie, lo que significa que la superficie tiene una baja afinidad por los líquidos y es muy resistente a la humedad. Por lo tanto, el ángulo de inclinación es una medida importante para caracterizar la hidrofobicidad de los textiles superhidrófobos y su capacidad para repeler líquidos.

## **1.6 MODELOS DE SUPERFICIES.**

Esta sección se presenta las teorías y los fundamentos básicos de las superficies superhidrofóbicas, así como las ecuaciones que rigen el ángulo de contacto de un líquido.

### **1.6.1 Energía de la superficie**

La energía de la superficie es una medida de la afinidad de una superficie con un líquido determinado. Se define como la energía necesaria para crear una unidad de área de la interfaz entre la superficie y el líquido.

La energía de la superficie es importante para entender la mojabilidad de una superficie, incluyendo textiles superhidrófobos. Si la energía de la superficie es menor que la energía superficial del líquido, la superficie será hidrofóbica. Si la energía de la superficie es mayor que la energía superficial del líquido, la superficie será hidrofílica.

En el caso de textiles superhidrófobos, la energía de la superficie de la superficie es muy baja, lo que significa que la superficie es muy repelente al agua. Esto se logra mediante la creación de una superficie con una geometría especial y una química superficial adecuada que reduce la energía de dispersión de la superficie. La baja energía de la superficie de los textiles superhidrófobos es lo que les permite repeler eficazmente el agua y otros líquidos, lo que los hace útiles

para aplicaciones de separación de agua y aceite en el tratamiento de aguas residuales.

### 1.6.2 Rugosidad

La rugosidad de la superficie se define al observar la diferencia entre la superficie real (incluye la morfología de la superficie) y la plana o el área geométrica. El área geométrica es el área de contacto que hace la gota de agua con la superficie, tomando en cuenta una superficie totalmente lisa, mientras que la superficie real tiene una morfología definida. (Miranda, 2013)

Ambas superficies se utilizan para calcular el factor de rugosidad denotado en la ecuación 1.

$$r = \text{factor de rugosidad} = \frac{\text{superficie real}}{\text{zona plana}} \quad (1)$$

Donde  $r$ , el factor de rugosidad, se define como el cociente entre el área de la superficie real y la de una superficie lisa con la misma forma geométrica y dimensiones.

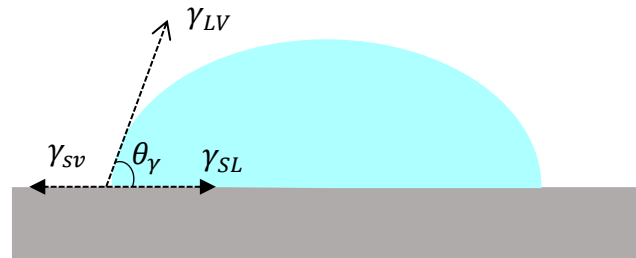
### 1.6.3 Ecuación de Young

La superficie de la gota depende de la acción de las fuerzas que intervienen en la línea de contacto sobre la superficie del sólido, en la que se encuentran las tres fases; sólido-líquido, líquido-gas y sólido-gas. (Cañete, 2013)

Las fuerzas que actúan en este punto son tensiones superficiales que se relacionan (ver Ilustración 6) según la ecuación de Young.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (2)$$

En donde ( $\gamma_{sv}$ ) es la tensión superficial de las fases Sólido-Vapor, ( $\gamma_{sl}$ ) es la tensión superficial de las fases Sólido-Líquido, ( $\gamma_{lv}$ ) es la tensión superficial en las fases Líquido-Vapor y ( $\theta$ ) el ángulo de contacto que se forma en el punto triple.



*Ilustración 6. Esquema donde se indica el ángulo de contacto y las tensiones superficiales.  
(Mahadeshwara, 2022)*

Al termino  $\cos \theta_\gamma$  de la ecuación 2 se le denomina mojabilidad  $\mu$ :

$$\mu = \frac{\gamma_{SF} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LF}} \quad (3)$$

Y con este parámetro, la ecuación de Young quedaría:

$$\mu = \cos \theta_\gamma \quad (4)$$

- Cuando la mojabilidad  $\mu$  es positiva se dice que el líquido moja y la superficie es hidrófila.
- Cuando la mojabilidad  $\mu$  es negativa se dice que no moja, la superficie es Hidrófoba.

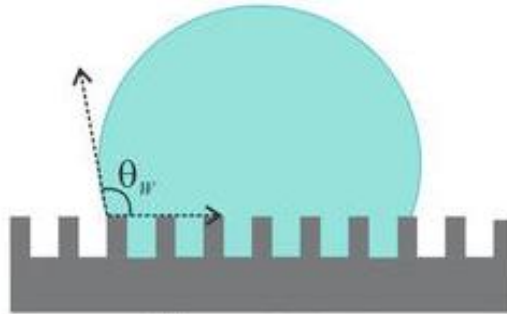
La ecuación de Young indica cómo se extiende un líquido sobre una superficie, es invariante en presencia de gravedad y sólo es válida para superficies ideales (lisas, homogéneas, no porosas, rígidas y químicamente inertes). (Cañete, 2013)

#### 1.6.4 Ecuación de Wenzel

Wenzel, propuso un modelo que describe el ángulo de contacto  $\theta$  en una superficie rugosa, modificando la ecuación de Young de la siguiente manera:

$$\cos \theta_w = r \frac{\gamma_{SA} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LA}} = r \cos \theta_0 \quad (5)$$

Donde  $\theta_w$  es el ángulo de contacto con la superficie rugosa,  $\theta_0$  es el ángulo de contacto en equilibrio de una superficie plana y  $r$  es el factor de rugosidad, de este modo, como  $r$  siempre es mayor que la unidad, la rugosidad de la superficie aumenta tanto la hidrofilia en superficies hidrófilas como la hidrofobia en las hidrófobas. En esta ecuación, se toma en cuenta que el líquido moja toda la superficie. A continuación, en la Ilustración 7, una representación de la interacción de una gota de agua con una superficie rugosa tal como lo propuso Wenzel.



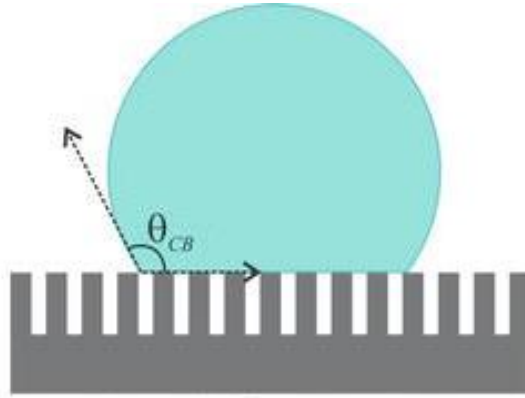
*Ilustración 7. Representación de la interacción de una gota de agua con la superficie rugosa. (Mahadeshwara, 2022)*

#### 1.5.5 Ecuación de Cassie-Baxter

El modelo de Cassie-Baxter, describe que la gota de agua se encuentra sobre las protuberancias de la superficie y el aire queda atrapado debajo de la gota de agua entre estas protuberancias (Miranda, 2013), tal como se muestra en la Ilustración 8. En este estado es descrito por primera vez por Cassie y Baxter (1994). En este caso, la interfaz solido-liquido es en realidad una interfaz que consta de dos fases, una interfaz solido-líquido y una interfaz liquido-aire. Y el ángulo de contacto

aparente es la suma de todas las contribuciones de las diferentes fases como se describe a continuación:

$$\cos \theta_{CB} = f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2 \quad (6)$$



*Ilustración 8. Representación de la interacción de una gota de agua con la superficie rugosa. (Mahadeshwara, 2022)*

Donde  $\theta_{CB}$  es el ángulo de contacto aparente,  $f_1$  y  $f_2$  son las fracciones superficiales de la fase 1 y fase 2, respectivamente, con  $f_1 + f_2 = 1$ .  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos de contacto en la fase 1 y la fase 2, respectivamente. Esta ecuación es la forma general, que también se aplica cuando no hay rugosidad.

Para el caso de una interfaz compuesta, mostrada en la Ilustración 8, la primera fracción corresponde a la interfaz sólido-líquido ( $f_1 = f_{SL}; \theta_1 = \theta_W$ ) y la segunda fracción a la interfase líquido-aire ( $f_2 = f_{LA} = 1 - f_{SL}; \theta_2 = 180^\circ$  (ángulo de contacto con el aire)).

## **1.7 METODOS UTILIZADOS PARA LA SINTESIS DE SUPERFICIES SUPERHIDROFOBICAS**

A la fecha existe una gran diversidad de métodos para la fabricación de superficies súper-hidrófobas. A continuación, se describen los métodos más utilizados, por diferentes técnicas y sustratos.

### **1.7.1 Técnica de plasma**

De acuerdo con, (Miranda, 2013) el tratamiento con plasma es un método adecuado para el control de la humectación en superficies ya que la modificación ocurre en tiempos más cortos, en polímeros la caracterización se basa principalmente en la medición del ángulo de contacto.

La técnica mas empleada es el plasma atmosférico, la cual se encarga de modificar la superficie textil eliminando la contaminación superficial, modificar la característica hidrofílica o hidrófoba del material, mejorar las propiedades mecánicas en función de las condiciones del proceso e introducir grupos funcionales que muestren afinidad o sean capaces de formar enlaces químicos con el polímero de esta forma su adhesión superficial. (Garcia, 2022)

### **1.7.2 Electrospinning**

El electrospinning es un método simple pero versátil para producir fibras continuas con diámetros que van desde el nanómetro hasta la escala submicronicas. De acuerdo con, (Garcia, 2022) el principio básico del electrohilado se basa en la interacción entre la tensión superficial y las fuerzas electroestáticas que propician el cambio de forma de una solución viscoelástica en multitud de chorros que conforman las nanofibras cuando se solidifican. Las membranas electrohiladas tienen la cualidad de simular filtros en ambientes húmedos, filtrar partículas del aire, absorber sustancias toxicas de gases y aguas residuales, así como son capaces de separar el agua del aceite.

### **1.7.3 Proceso sol-gel**

El método sol-gel es un procedimiento eficiente, de bajo costo, baja temperatura/presión y puede producir superficies rugosas en una variedad de óxidos. La transición de un sol a un gel se lleva a cabo mediante una reacción de hidrolisis, condensación y una posterior polimerización. El material se solidifica al

evaporarse los líquidos residuales, dejando un material poroso típico del proceso sol-gel. (Rubio, s/f)

El método sol-gel es un proceso firmemente establecido para la producción de recubrimientos superhidrofóbicos. Las características hidrofóbicas de un material son atribuidas a la presencia de numerosas estructuras nano-porosas, materiales como  $\text{SiO}_2$  y el  $\text{TiO}_2$  han sido utilizados frecuentemente en el desarrollo de superficies superhidrofóbicas a través del método sol-gel. (Perez, 2024)

CAPÍTULO II  
DESARROLLO  
EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen los materiales utilizados en la investigación, así como los métodos para preparar las muestras. Además, se explican los fundamentos teóricos de las técnicas experimentales que se emplearon.

## **2.1 MATERIALES Y METODOS UTILIZADOS**

### **2.1.1 Fabricación sencilla y ecológica de tejido superhidrofóbico para la separación de aceite/agua.**

- **Materiales**

El algodón fue adquirido en un mercado ubicado en Yinchuan, China. Los productos químicos, como el tolueno, n-hexano, cloroformo, gasolina, queroseno y Diesel, fueron suministrados por Ningxia Yaoyi Chemical Reagent Co. Ltd., una empresa china. El dodeciltrimetoxisilano (DTMS), en su forma químicamente pura, fue proporcionado por Nanjin.

- **Preparación de tejido de algodón superhidrofóbico**

Durante el procedimiento convencional, se logró la completa disolución de 4 gramos de PVA en 200 mililitros de agua destilada mediante agitación a una temperatura de 90°C durante un período de 2 horas. Después de eso, el tejido de algodón fue sumergido en la solución acuosa de PVA durante 15 minutos, y posteriormente se trasladó a una solución de DTMS en etanol (con un peso del 1,5% con relación al total) para llevar a cabo la modificación a temperatura ambiente durante 2 horas. Por último, las muestras se enjuagaron tres veces con etanol y se secaron en una estufa a una temperatura de 80°C.

- **Prueba de separación de aceite/agua**

El material textil preparado se utilizó para evaluar la capacidad de separación entre el aceite y el agua. La eficiencia de separación del aceite se determinó mediante mediciones de volumen. En un vaso de precipitados, se agregó una cantidad específica de aceite (m) a agua destilada y se agitó enérgicamente durante 10 minutos. Luego, se colocó el material textil preparado sobre el vaso de precipitados

y la mezcla de aceite/agua se vertió sobre la superficie del material textil. A través de los poros del material textil, el aceite penetró en el vaso de precipitados. Se midió el volumen de aceite capturado (1m). Después de la separación entre el aceite y el agua, el textil se lavó con etanol y se secó en una estufa a 80°C. El textil resultante se utilizó para realizar pruebas adicionales de separación de manera reciclada.

- **Caracterizaciones**

Las muestras fueron examinadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Antes de la observación con SEM, todas las muestras fueron fijadas en soportes de aluminio y recubiertas con una capa de oro. Para evaluar la humectabilidad superficial del agua en la superficie del tejido de algodón, se utilizó una cámara SLR digital para observar el comportamiento del agua cuando se dejaba caer sobre la superficie del tejido desde una jeringa (1 ml). Para medir el ángulo de contacto, se utilizó un dispositivo Krüss DSA 100 a temperatura ambiente, y se aplicaron volúmenes de líquido de sondeo de aproximadamente 5  $\mu\text{L}$  en las mediciones. (Jintao & Guihong , 2015)

### **2.1.2 Textil no tejido de nylon 6,6 separa los contaminantes de aceite de las emulsiones de aceite en agua.**

- **Materiales y métodos**

Se midieron los ángulos de contacto del agua y del aceite lubricante para engranajes en un tejido hilado de nylon de 4,0 osy. El aceite lubricante para engranajes de mayor viscosidad fue adquirido de ExxonMobil, con una viscosidad cinemática de 320  $\text{mm}^2/\text{s}$ . Se añadieron aproximadamente 10  $\mu\text{L}$  de agua o aceite en forma de gotas sobre el tejido de nylon, usando un método de goteo. Se capturaron imágenes de las gotas utilizando un microscopio Dino Lite Premier con un aumento de 250x. Los ángulos de contacto se midieron utilizando un software de goniometría digital integrado en el mismo software de captura de imágenes.

- **Absorción de aceite en tejido de nylon**

Se obtuvieron muestras de tela no tejida de nylon 6,6 de Cerex Advanced Fabrics, Inc. Este producto, disponible comercialmente, tiene una densidad de masa lineal de cuatro deniers por filamento y un tamaño medio de poro de  $68 \pm 33 \mu\text{m}$ . Las muestras de petróleo crudo fueron obtenidas de un pozo privado en Luisiana, Estados Unidos. La variedad de crudo adquirida se conoce como "crudo Light Louisiana Sweet" (LLS) y tiene una viscosidad cinemática de  $3,8 \text{ mm}^2/\text{s}$ . El aceite de mayor viscosidad utilizado fue el "Mobil Spartan1 EP320 Gear Lube Oil". Después, se cortó muestras de nylon con diferentes densidades de masa por área en cuadrados de  $25 \text{ mm}^2$  (un total de 22 muestras de nylon por cada muestra de aceite) y se confirmaron las densidades de masa por área informadas comercialmente mediante pesaje de cada muestra de  $25 \text{ mm}^2$ .

El espesor de cada muestra se midió utilizando un medidor de espesor digital AMES. La capacidad de absorción de los aceites por parte de las muestras de nylon se determinó sumergiendo cada muestra de nylon en aceite crudo LLS o aceite lubricante para engranajes EP320 hasta lograr la saturación. Luego, se retiraron las muestras de nylon del aceite, se permitió que el exceso de aceite gotee de la muestra y se pesó la muestra saturada para determinar la masa del aceite absorbido. La masa de aceite absorbido se calculó como un porcentaje de la masa de la muestra de nylon. Se generó un modelo de regresión de potencia para describir la relación entre la masa de aceite absorbido y la densidad de masa del área de la tela para cada tipo de aceite.

- **Separación de aceite de una emulsión de aceite en agua**

Se prepararon emulsiones de aceite en agua con un contenido de aceite del 4,5% (vol/vol) agitando agua de mar del Golfo de México con aceite lubricante para engranajes de viscosidad  $320 \text{ mm}^2$  hasta obtener una mezcla homogénea. Se construyó una plataforma de filtración alimentada por gravedad utilizando una tubería de PVC de 1,5 pulgadas de diámetro interno (aproximadamente 38 mm). En el flujo horizontal de la emulsión de aceite en agua, se colocaron bolsas fabricadas

con tejido Oil Shark1 Tipo SK y bolsas fabricadas con tejido Oil Shark1 Tipo 60. Las bolsas cilíndricas tenían un diámetro de aproximadamente 95 mm y una longitud de aproximadamente 130 mm. Cada bolsa de nylon se aseguró en el dispositivo insertando la boca de la bolsa en las roscas del conector de PVC y apretando el conector alrededor de la bolsa. El tejido Oil Shark1 Tipo 60 se diferencia del Tipo SK en que tiene una densidad de masa lineal más baja, de dos deniers por filamento. Se permitió que fluyeran 500 ml de la emulsión de aceite en agua a través de las bolsas de filtración. Se tomaron muestras de la emulsión de aceite en agua antes y después de la filtración a través de las bolsas de nylon. Las muestras se enviaron a TestAmerica, una empresa de pruebas ambientales ubicada en Pensacola, FL, donde se realizó el método analítico 1664A de la Ley de Agua Limpia (aceite y grasa HEM) para determinar la concentración de aceite lubricante para engranajes en cada muestra (en ppm).

### **2.1.3 Fabricación de un tejido superhidrofóbico basado en un marco biológico metal-orgánico para una separación eficiente de aceite/agua.**

- **Materiales**

Los productos químicos, incluyendo el ácido esteárico, ácido aspártico, rojo de metilo, aceite de silicona (viscosidad 500 cSt a 20 °C), éter de petróleo, n-hexano, ácido sulfúrico (99%), Tween 80 e hidróxido de sodio, fueron adquiridos de SIGMA ALDRICH. La tela textil pura y una lámina de metal de cobre fueron compradas en una tienda local.

- **La fabricación de Cu-Asp MOF.**

Se llevó a cabo el proceso de pulido de una lámina de cobre con dimensiones de 50 mm x 20 mm x 1,0 mm utilizando papel de lija de grano 300 y 800 para eliminar la capa de óxido presente en la superficie del cobre. Posteriormente, se enjuagó la lámina con agua destilada y etanol para limpiarla adecuadamente.

Para el baño electroquímico, se preparó una solución de 100 ml de ácido aspártico con una concentración de 4,5 g/L. Se utilizó una corriente continua para

iniciar el proceso de síntesis electroquímica, utilizando dos láminas de cobre pulido como ánodo y cátodo. La densidad de corriente se ajustó a  $0,05 \text{ A/cm}^2$  y se mantuvo constante durante una hora a una temperatura de  $55 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Durante este proceso, se observó la formación de un precipitado azul en el ánodo. Posteriormente, se enjuagó el precipitado obtenido con etanol y se dejó secar a temperatura ambiente. Luego, se sometió a un proceso de rayado para obtener las características deseadas. El MOF resultante se secó en una estufa a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  durante dos horas. Este MOF obtenido a partir del ácido aspártico y el cobre se designó como MOF de Cu-Asp.

- **Fabricación de telas textiles superhidrofóbicas.**

Se preparó una solución etanólica mezclando 250 ml de Cu-Asp MOF (con una concentración de  $0,8 \text{ g/L}$ ) y ácido esteárico (con una concentración de  $8,0 \text{ g/L}$ ). Esta solución se agitó durante una hora y posteriormente se sometió a un proceso de sonicación durante media hora. Como resultado, se obtuvo una solución de Cu-Asp MOF@SA.

Luego, se procedió a rociar un tejido textil circular con un diámetro de  $10,5 \text{ mm}$  con la solución de Cu-Asp MOF@SA. Este tejido textil modificado, denominado TF@Cu-Asp MOF@SA, fue posteriormente enjuagado con etanol y se dejó secar durante dos horas a una temperatura de  $60^\circ\text{C}$ . De esta manera, se logró la modificación del tejido textil con Cu-Asp MOF@SA, proporcionando nuevas propiedades y características al material.

- **Caracterización**

El proceso de caracterización del tejido textil modificado incluyó varios métodos y técnicas analíticas para evaluar su morfología, composición, estructura cristalina, estabilidad térmica, hidrofobicidad y estabilidad química. A continuación, se describe cada una de estas técnicas y los parámetros evaluados:

1. Microscopio Electrónico de Barrido (SEM): Se utilizó para examinar la morfología del tejido textil antes y después de la modificación. El SEM permite obtener imágenes de alta resolución de la superficie del material y observar cualquier cambio en la estructura del tejido.
2. Espectrómetro de Rayos X de Dispersión de Energía: Se empleó para determinar la composición elemental de los materiales y superficies preparados. Este instrumento permite analizar los elementos químicos presentes en la muestra mediante la detección de los rayos X emitidos por la interacción de la muestra con un haz de electrones.
3. Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR): Se utilizó para investigar la composición química de la superficie del tejido. La técnica FTIR permite identificar los grupos funcionales presentes en la muestra mediante el análisis de las vibraciones moleculares en el rango de frecuencia infrarroja.
4. Difractómetro de Rayos X: Se empleó para distinguir la fase cristalina y la cristalinidad del tejido textil. El difractómetro de rayos X permite analizar los patrones de difracción de la muestra y determinar su estructura cristalina.
5. Análisis Termogravimétrico: Se utilizó para determinar la estabilidad térmica del Cu-Asp MOF. Esta técnica consiste en someter la muestra a diferentes temperaturas y medir su pérdida de peso, lo que proporciona información sobre su estabilidad frente a la temperatura.
6. Goniómetro de Ángulo de Contacto Óptico: Se empleó para medir el ángulo de contacto con el agua (WCA) y el ángulo de deslizamiento (WSA) del tejido textil modificado. Estos parámetros indican la hidrofobicidad y capacidad de repeler el agua de la superficie del material.

7. Prueba de Abrasión: Se realizó para evaluar la estabilidad mecánica del tejido textil superhidrofóbico preparado. En esta prueba, el tejido se sometió a la fricción con papel de lija y se evaluó su resistencia al desgaste.
8. Estabilidad Química: Se investigó examinando el impacto de los tiempos de inmersión de las muestras superhidrofóbicas en soluciones de pH que oscilan entre 1 y 13. Se midió el ángulo de contacto del agua en diferentes momentos y se registraron los cambios en la estabilidad química a lo largo del tiempo.

Los resultados presentados para la estabilidad química son el promedio de las tres pruebas realizadas. Estas pruebas permitieron evaluar la respuesta del tejido superhidrofóbico a diferentes condiciones químicas y determinar su estabilidad en entornos ácidos y alcalinos.

- **Medidas de capacidad de absorción.**

La capacidad de absorción del tejido superhidrofóbico preparado se determinó sumergiendo un trozo de tejido en aceite de silicona, éter de petróleo o n-hexano durante un minuto, escurriendo durante unos segundos y limpiando con papel filtro para eliminar el exceso de disolventes orgánicos. Utilizando pesas medidas a temperatura ambiente, se determinó la capacidad de absorción ( $k$ ) de aceite de silicona, éter de petróleo y n-hexano mediante la siguiente ecuación.

$$k = \frac{M_1}{M_0} \quad (7)$$

$M_0$  representa el peso de la muestra de tejido textil superhidrofóbico modificado, mientras que  $M_1$  representa el peso de la muestra después de la absorción del disolvente orgánico.

- **Mediciones del rendimiento de la separación de aceite/agua.**

El agua residual aceitosa se hizo con una mezcla de 50 ml de aceite/agua con una relación de volumen de 1:1. Se empleó rojo de metilo para colorear el agua destilada. Las fases oleosas se eligieron entre varios disolventes orgánicos, como aceite de silicona, éter de petróleo y n-hexano. La emulsión de aceite en agua (O/W) se formó mezclando agua, n-hexano y Tween 80 en una proporción de masa de 40:9,9:0,1 y luego sometiendo a ultrasonidos a 25 °C durante 1,5 h. Durante la separación de aceite/agua, el tejido textil superhidrofóbico preparado se usó como membrana de filtro. Cuando las aguas residuales aceitosas se colocaron en el sistema de separación, el aceite penetró en la tela modificada y cayó en el recipiente inferior de recepción, dejando agua en el recipiente superior. La siguiente ecuación se utilizó para calcular la eficiencia de separación (W):

$$W = (M_2/M_3) \times 100\% \quad (8)$$

$M_3$  y  $M_2$  son los pesos de aceite inicial y recolectado, respectivamente. El carbono orgánico total (COT) de la fase acuosa después del proceso de separación se midió utilizando un analizador de carbono orgánico total (HACH DR 2700) para confirmar la eficiencia de la separación. Se usó la siguiente ecuación para estimar el flujo de la tela textil modificada.

$$Flujo = V/(S \times t) \quad (9)$$

Donde V es el volumen de líquido permeable, S es el área efectiva de la película y t es el tiempo que tarda el líquido en pasar a través de la película.

#### **2.1.4 Fabricación de tejido de algodón a base de polibenzoxazina superhidrofóbico y superoleofílico para la separación de agua y aceite.**

- **Materiales**

Las telas de algodón no tejidas se compraron a Texhong Textile Co., Ltd., China. El bisfenol A (BPA) y el poliformaldehído se adquirieron de Shanghai Aladdin Reagent

Co., Ltd., China. La anilina, el hidróxido de sodio y la sílice pirogénica hidrofóbica ( $\text{SiO}_2$ ) con 7–40 nm se obtuvieron de Shanghai Macklin Chemical Co., Ltd., China. Todos los productos químicos eran de grado analítico y se usaron tal como se recibieron sin purificación adicional.

- **Tratamiento de sustrato.**

Las telas de algodón no tejidas fueron lavadas con agua destilada para eliminar cualquier impureza física adherida. Luego, se llevó a cabo una extracción soxhlet utilizando una mezcla de etanol y ciclohexano (1:1 v/v) durante 6 horas para eliminar ceras y grasas. Posteriormente, se agitaron las fibras en agua destilada a 25 °C durante 6 horas para eliminar los contaminantes solubles en agua. Para la activación de la superficie y eliminación de cualquier material graso, las telas de algodón no tejidas se colocaron en una solución de NaOH al 5% (peso) durante 6 horas a temperatura ambiente. Se logró un pH neutro en las telas de algodón no tejidas mediante la neutralización con una solución de ácido acético al 1% durante 15 a 20 minutos, seguido de un lavado con agua destilada. Seguidamente, las telas se secaron a temperatura ambiente durante 24 horas y luego se sometieron a un secado al vacío a 60 °C durante 12 horas.

- **Síntesis de monómero de benzoxazina.**

Se sintetizó el monómero BA-benzoxazina mediante la reacción de Mannich utilizando cantidades estequiométricas (2:4:1) de BPA, paraformaldehído y anilina. Los reactivos se mezclaron en cloroformo como solvente y se sometieron a reflujo a 62 °C durante 16 horas, con una concentración de 5 ml de solvente por gramo de reactivos. Después de enfriar a temperatura ambiente, el producto de la solución de monómero crudo se lavó tres veces con una solución de NaOH 1 N y luego se enjuagó con agua desionizada hasta que alcanzó la neutralidad. Los productos lavados se secaron utilizando sulfato de sodio anhidro durante la noche y se filtraron. Finalmente, el cloroformo se eliminó mediante evaporación rotatoria y se refrigeró el monómero BZ obtenido hasta su uso.

- **Preparación de PBZSC**

Los recubrimientos híbridos de PBZ/SiO<sub>2</sub> se prepararon siguiendo los siguientes pasos: en primer lugar, se preparó una solución de BZ/SiO<sub>2</sub> disolviendo SiO<sub>2</sub> en cloroformo mediante ultrasonidos. A continuación, se agregó el monómero BZ a la solución y se mezcló durante 30 minutos mediante agitación mecánica y ultrasonidos. Posteriormente, las telas de algodón no tejidas se recubrieron sumergiéndolas en la solución de BZ/SiO<sub>2</sub> en tres ocasiones consecutivas, con una velocidad de retirada de 10 mm/min y un tiempo de inmersión de 5 minutos en cada ocasión. Finalmente, el solvente de cloroformo se evaporó en un horno a 60 °C durante 1 h, y los PBZSC se obtuvieron mediante el curado por etapas de las telas de algodón recubiertas a 120°C 1h, 140°C 1h, 160°C 1h, respectivamente (la relación en peso de SiO<sub>2</sub> a PBZ es 0 % en peso, 5 % en peso, 10 % en peso, 15 % en peso, 20 % en peso, 25 % en peso, 30 % en peso y 40 % en peso, correspondientes a PBZ, PBZSC5, PBZSC10 , PBZSC15, PBZSC20, PBZSC25, PBZSC30 y PBZSC40, respectivamente).

- **Caracterización**

La morfología de la superficie de los PBZSC se observó mediante microscopía electrónica de barrido a un voltaje operativo de 20 kV.

Los espectros de RMN 1H se registraron en un Bruker Avance 400 (frecuencia de resonancia de 400 MHz), se usó dimetilsulfóxido-d<sub>6</sub> como disolvente. La masa molecular relativa del monómero BZ (0,010 mg) se analizó mediante un espectro de masas de alta resolución en un rango de masas de banda ancha de 53,8–1000,0 Da y un fuente de iones de ionización por aspersion de electrones (ESI), acoplada a una sonda de inserción directa. Como disolvente se utilizó N,N-dimetilformamida (DMF).

Las mediciones de espectroscopía de fotoelectrones de rayos X de PBZSC se realizaron utilizando radiación Al-Ka (1486,6 eV) como fuente de radiación, operando a 510 W con una contrapresión de  $2.9 \cdot 10^{-9}$  mbar para examinar la composición química superficial del PBZSC. Cabe señalar que la limpieza de la

superficie se realizó mediante pulverización catódica de Ar durante 20s para eliminar los contaminantes de la superficie antes del análisis XPS.

El análisis termogravimétrico (TGA) se realizó en un analizador termogravimétrico de aparato TGA Q500 bajo nitrógeno a una velocidad de calentamiento de 10 C/min.

La humectabilidad de la superficie del algodón original y PBZSC se evaluó utilizando un sistema de ángulo de contacto Dataphysics OCA 30 a 25 °C. Después de colocar una gota de agua de 5 µL sobre el algodón durante 60 s, se registraron los ángulos de contacto con el agua (WCA) en al menos cinco posiciones diferentes utilizando el software de análisis del instrumento.

Para los experimentos de separación de agua y aceite, el PBZSC se fijó entre un embudo de vidrio y un matraz cónico con un área de separación efectiva de 14,5 cm<sup>2</sup>. Se vertió una mezcla de 100 ml de diclorometano coloreado con Sudan III y 100 ml de solución de agua en el recipiente de vidrio superior y se pudo lograr la separación de agua y aceite por gravedad. Luego, el aceite y el agua separados se mezclaron para la prueba de rendimiento del ciclo y se midió la eficiencia de separación después de cada ciclo de separación. La eficiencia de separación (c) se calculó con la siguiente fórmula:

$$\gamma = \frac{V_1}{V_0} \times 100 \quad (10)$$

Donde  $V_0$ ,  $V_1$  representan el volumen de aceite antes y después de la separación agua-aceite, respectivamente. El flujo durante la separación agua-petróleo se calculó siguiendo:

$$Flujo = \frac{V}{S_t} \quad (11)$$

Donde  $V$  es el volumen del aceite permeado (L),  $S$  es el área válida (m<sup>2</sup>) de la membrana y  $t$  se refiere al tiempo (h) para la separación.

CAPÍTULO III  
DISCUSION  
DE  
RESULTADOS

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en las distintas etapas experimentales de la investigación.

### **3.1 Fabricación sencilla y ecológica de tejido superhidrofóbico para la separación de aceite/agua.**

#### **3.1.1 Formación de tejidos de algodón superhidrofóbicos y análisis de morfología.**

El proceso de fabricación del textil de algodón superhidrofóbico se describe en la Ilustración 9(a). Inicialmente, se sumerge el textil de algodón limpio en una solución acuosa de PVA. Después, se trata el textil modificado en una solución de DTMS, y como resultado se obtiene el textil revestido con PVA. En la Ilustración 9(b), se muestra que, en la superficie del tejido de algodón sin tratar, una gota de agua se extiende fácilmente y no forma ningún ángulo de contacto con el agua. Sin embargo, en la superficie del textil modificado, una gota de agua adquiere una forma casi esférica y se mantiene sobre la superficie con un ángulo de contacto con el agua de  $151^\circ$ . Esta superhidrofobicidad se atribuye principalmente al recubrimiento rugoso de PVA y la baja energía superficial proporcionada por el DTMS. Esto hace que las gotas de agua estén principalmente en contacto con el aire atrapado en los espacios intermedios del tejido superhidrofóbico.

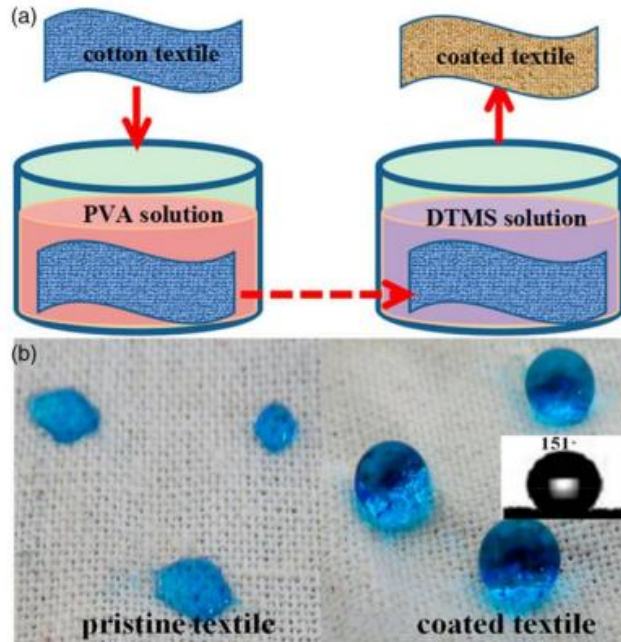
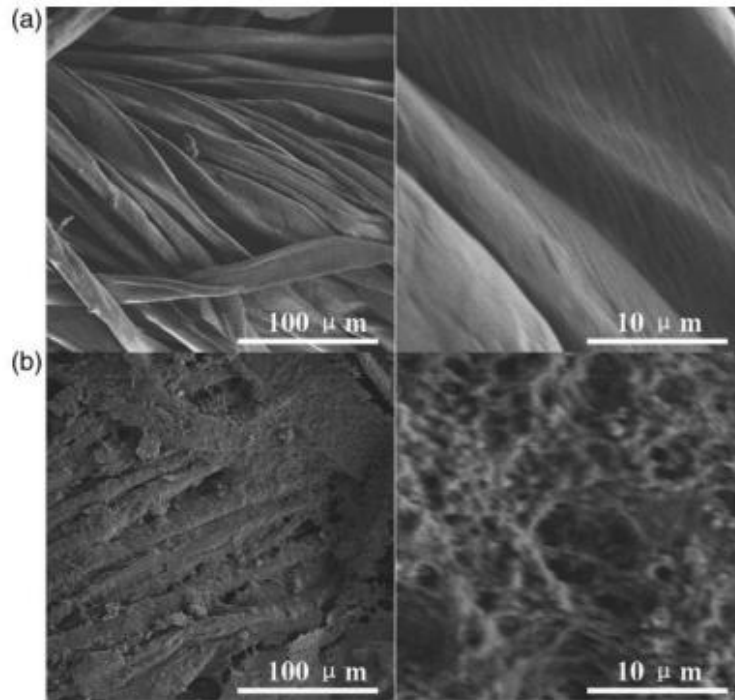


Ilustración 9. (a) Representación esquemática de la fabricación de un textil superhidrofóbico; (b) propiedad hidrofóbica del textil antes y después del revestimiento de PVA. (Jintao & Guihong , 2015)

En la Ilustración 10 se presentan las imágenes SEM del tejido de algodón prístino y superhidrofóbico. En la Ilustración 10(a), se puede observar la estructura tejida del tejido prístino, con algunas fibras que sobresalen. Además, la microrrugosidad inherente del tejido facilita la posterior aplicación del revestimiento de PVA en la superficie. Después del revestimiento, como se muestra en la Ilustración 10(b), la estructura del tejido prístino desaparece y la superficie queda completamente cubierta por un revestimiento de PVA con una estructura rugosa. Esta morfología del PVA crea numerosos espacios intermedios con micro y nanoestructuras, lo que resulta en la superhidrofobicidad del textil.



*Ilustración 10. La morfología de (a) tejido prístino y (b) superhidrofóbico. (Jintao & Guihong , 2015)*

### **3.1.2 Separación de la mezcla de aceite/agua**

El textil superhidrofóbico preparado muestra una excelente capacidad de separación, lo que lo convierte en un material prometedor para la separación de mezclas de aceite/agua. Al verter una mezcla de aceite (como n-hexano, tolueno, cloroformo, gasolina, queroseno y Diesel) y agua sobre la superficie del textil superhidrofóbico, el aceite puede penetrar rápidamente a través de los poros del textil y caer en el recipiente receptor ubicado debajo, mientras que una gran cantidad de agua se mantiene en la superficie del textil (Ilustración 11a). La eficiencia de separación del textil superhidrofóbico para n-hexano/agua, tolueno/agua, cloroformo/agua, gasolina/agua, queroseno/agua y mezcla de diésel/agua es del 94%, 95%, 92%, 91%, 92,4%, y 92,4%, respectivamente (Ilustración 11b).

Por lo tanto, el material textil superhidrofóbico preparado en este estudio ofrece ventajas significativas para la separación de mezclas de aceite/agua. En comparación con otros materiales utilizados para este propósito, el tejido preparado

destaca por su capacidad de separación destacada, bajo costo, proceso de fabricación simple y excelente biodegradabilidad. Aunque existen otros materiales superhidrofóbicos con propiedades de separación superiores para diferentes tipos de aceites en agua, su alto costo y procedimientos de preparación complicados limitan su aplicación generalizada. En este sentido, el tejido textil superhidrofóbico se presenta como una alternativa prometedora y viable para abordar los desafíos de la separación de aceite/agua en diversos entornos y aplicaciones.

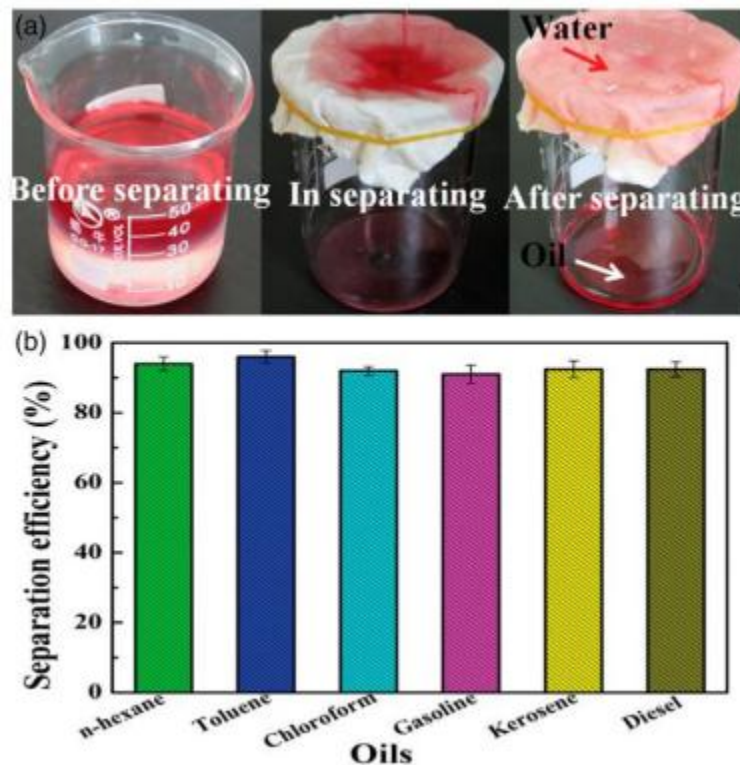
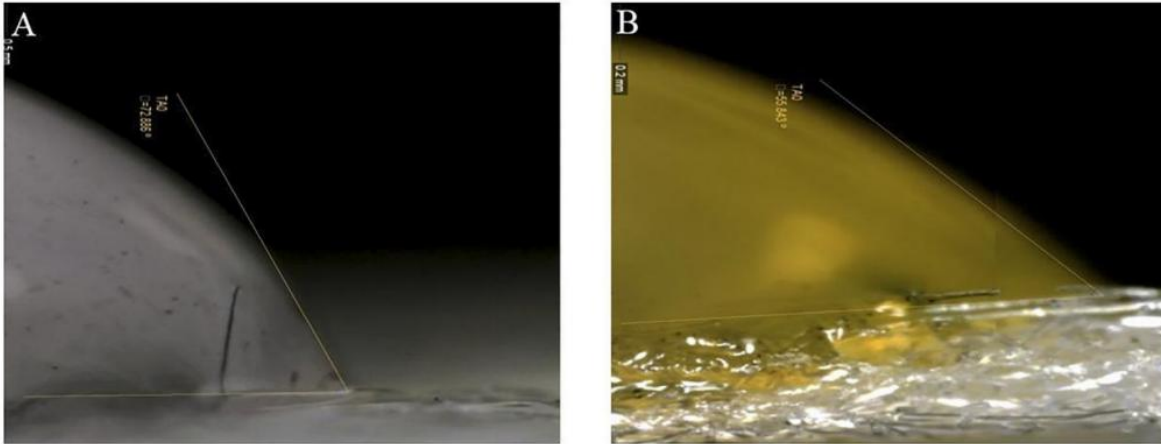


Ilustración 11. (a) Proceso de separación de aceite/agua por textil superhidrofóbico; (b) la eficiencia de separación del textil superhidrofóbico para diferentes aceites. (Jintao & Guihong , 2015)

### 3.2 Textil no tejido de nylon 6,6 separa los contaminantes de aceite de las emulsiones de aceite en agua.

El nylon 6,6 muestra propiedades anfífilas en términos de absorción de aceite. Para confirmar su naturaleza anfífilica, se realizó un estudio del ángulo de contacto utilizando agua y aceite sobre el tejido de nylon. En la Ilustración 12A se muestra el ángulo de contacto formado por el agua en el tejido de nylon con un valor de  $73^\circ$ , lo

que indica que el material es hidrófilo y tiene afinidad por el agua. De manera similar, en la Ilustración 12B se observa el ángulo de contacto formado por el aceite lubricante de alta viscosidad en el mismo tejido de nylon, con un valor de  $56^\circ$ , lo que indica que el material también es oleófilo y tiene afinidad por el aceite. Estos resultados confirman la naturaleza anfífilica del nylon 6,6, lo que significa que puede absorber tanto agua como aceite.



*Ilustración 12. Los ángulos de contacto del agua y el aceite lubricante para engranajes sobre los nylon medidos mediante goniometría digital. (A) El ángulo de contacto del agua con nylon de 4,0 osy se mide en  $73^\circ$ . (B) El ángulo de contacto del aceite lubricante para engranajes y el nylon se mide en  $56^\circ$ . (Ortega, Carter, & Ortega, 2016)*

A densidades más bajas de tela, se observó que el tejido de nylon absorbía aproximadamente 16 veces su peso en petróleo crudo y 26 veces su peso en aceite lubricante de alta viscosidad para engranajes. La capacidad de absorción de aceite de la tela, tanto para el petróleo crudo como para el aceite lubricante, sigue una función potencial de la densidad de masa del área de la tela (peso base, osy), elevada a una potencia de  $-0,638$  para el petróleo crudo y  $-0,62$  para el aceite lubricante para engranajes. Estos exponentes son casi idénticos, lo que indica un comportamiento de absorción similar para el tejido de nylon, mientras que las diferencias en la viscosidad del aceite afectan el coeficiente de la función de potencia ( $12,93$  para el aceite lubricante para engranajes y  $7,09$  para el petróleo crudo). Esto sugiere que las propiedades del material del tejido de nylon, que se mantuvieron constantes en este experimento, controlan el valor del exponente en la

función de potencia. Las telas con un peso base más alto tienen una mayor cantidad de nylon empacado en aproximadamente la misma área que las telas con un peso base más bajo. Aunque las telas de menor peso base contienen menos material en general, presentan más espacios vacíos para retener gotas de aceite y una mayor área de superficie adsorbente debido al menor contacto entre las hebras de nylon menos densas.

### **3.2.1 Separación de emulsión de aceite en agua con bolsas de nylon**

Tanto las bolsas de nylon de dos deniers por filamento como las de cuatro deniers por filamento demostraron una eficacia de filtración de más del 97% para los contaminantes de aceite presentes en la emulsión de aceite en agua. La tela spunbond de nylon contiene cadenas alifáticas que tienen afinidad por los compuestos oleosos y están unidas por enlaces de poliamida hidrófila. Cuando estas cadenas de nylon entran en contacto con moléculas de agua, los enlaces de poliamida se hidratan, permitiendo que las cadenas alifáticas interactúen con el aceite no polar a través de atracciones de Van der Waals. Debido a la capacidad de la capa de hidratación que se forma alrededor de cada enlace de poliamida para crecer y fusionarse en un entorno acuoso, el aceite inicialmente atraído por las cadenas alifáticas se separa del nylon cuando es repelido por la polaridad de la capa de hidratación relativamente grande.

La coalescencia de las partículas de petróleo se produce debido a la tensión superficial del aceite en un entorno acuoso. Sin embargo, si la fuerza ejercida por el flujo de agua aguas arriba del agregado de aceite coalescido es menor que la fuerza repulsiva generada por los enlaces oleofóbicos de la poliamida hidratada, se evitará que el agregado de aceite atraviese la barrera de nylon hidratado. A medida que las partículas de aceite en el agua aceitosa fusionen, el tamaño del agregado de aceite aumenta. En un sistema acuoso, el agua en el lado opuesto de la tela actúa como una barrera termodinámica significativa para la liberación del aceite del nylon, lo que resulta en la retención del aceite en la tela en lugar de su liberación al agua del otro lado.

Cuando se utiliza un medio de filtración para separar el aceite del agua en una emulsión, la tela tiene un límite máximo de aceite que puede retener. Este límite se conoce como Volumen Crítico de Exposición al Petróleo (COEV) o volumen de saturación. Se ha observado que el COEV disminuye a medida que aumenta el grosor de la tela, ya que los fluidos requieren más tiempo para difundirse a través de telas más gruesas. Aunque la presencia de agua en el otro lado de la tela crea una barrera significativa que dificulta el paso del aceite a través del filtro, ocasionalmente pueden pasar pequeñas gotas de aceite a través de la tela. En estos casos, las gotas que pasan a través de telas más gruesas han tenido más tiempo para fusionarse, lo que resulta en la liberación de gotas de aceite de mayor tamaño desde la tela.

El textil no tejido de nylon también afecta a la estabilidad de la distancia interfacial entre la superficie del tejido y el aceite. Dado que el aceite se emulsiona en agua, se hace la suposición que la hidrofobicidad del textil no tejido de nylon proporciona una fuerza motriz para atraer la emulsión acuosa al tejido aumentando la velocidad inicial a la que el aceite se adhiere al tejido. La energía superficial del nylon en un sistema n-alcano/agua,  $52,9 \text{ mJ/m}^2$ , es más alta que la del poliéster,  $40 \text{ mJ/m}^2$ , o el polietileno,  $23,1 \text{ mJ/m}^2$ , materiales comúnmente utilizados en barreras absorbentes utilizadas para la recuperación de petróleo. Esto sugiere que el nylon es más hidrofílico que el poliéster o el polietileno en un sistema de crudo en agua. El polietileno se comporta de manera similar al polipropileno y tiene una tensión superficial casi idéntica a la del polipropileno. La recuperación de humedad del nylon 6,6 con una humedad relativa del 65% y  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  es del 4,5%, que es más alta que la recuperación de humedad del tereftalato de polietileno (PET) y el polipropileno, con un 0,4% y un 0,05%, respectivamente.

Por lo tanto, el nylon 6,6 muestra afinidad tanto por el agua como por el aceite. En la mayoría de los casos, el flujo de grandes volúmenes de agua, como lagos, ríos y arroyos, no será lo suficientemente rápido como para superar las fuerzas de atracción presentes en el aceite y las fuerzas de repulsión generadas por

la capa de hidratación que rodea los enlaces de poliamida. Por lo tanto, el aceite permanecerá corriente arriba del tejido de nylon. Esto permitirá la ejecución de métodos para eliminar el aceite del medio ambiente.

### 3.3 Fabricación de un tejido superhidrofóbico basado en un marco biológico metal-orgánico para una separación eficiente de aceite/agua.

#### 3.3.1 Resultados termogravimétricos del Cu-Asp MOF preparado.

Los termogramas para el MOF Cu Asp preparado bajo una atmósfera de aire se presentan en la Ilustración 13. Los termogramas se dividen en tres regiones. La primera región está dentro del rango de temperatura entre 30 y 100 °C. En la primera región se notó una reducción de peso debido a la volatilización del agua adsorbida. La segunda región oscila entre 100 y 215 °C. La pérdida de peso observada a 215 °C se atribuye a la rotura del puente entre el grupo metálico y el enlazador orgánico y la descomposición de Cu-Asp MOF. La tercera región oscila entre 215 y 285 °C. La pérdida de peso observada en la tercera región se debe a la descomposición del enlazador, el ácido aspártico. Entonces, se puede concluir que el MOF Cu-Asp preparado es térmicamente estable hasta 215 °C.

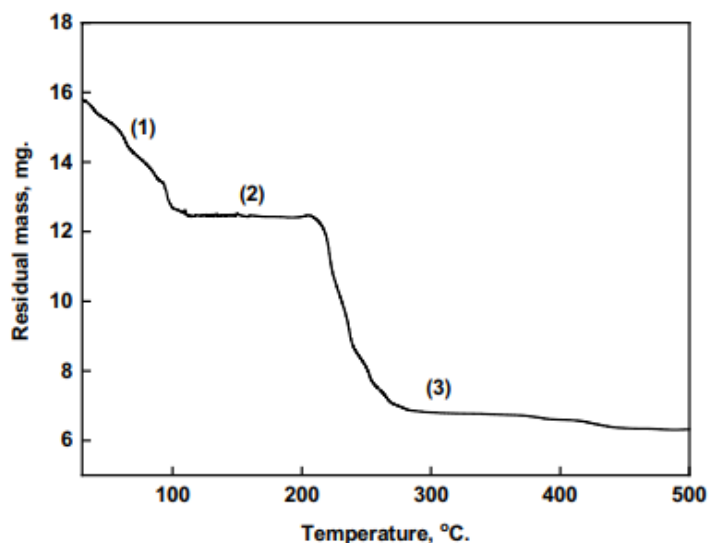


Ilustración 13 Análisis termogravimétrico en atmósfera de aire de Cu-Asp MOF. (2022) (Mohamed & Abd-El-Nabey, 2022)

### 3.3.2 SEM y la humectabilidad de los resultados de la tela textil prístina y modificada.

La propiedad superhidrofóbica de la tela está determinada por la rugosidad de su superficie y su composición química. Se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM) para examinar la topografía de la superficie de las telas prístinas y modificadas. Las imágenes microscópicas SEM de ambas telas se presentan en la Ilustración 14. En la imagen se puede observar que las fibras de las telas prístinas tienen una superficie relativamente lisa. Por otro lado, las fibras de la tela modificada presentan numerosas estructuras micro/nano que cubren su superficie, lo que ha mejorado significativamente la rugosidad de la superficie de las fibras.

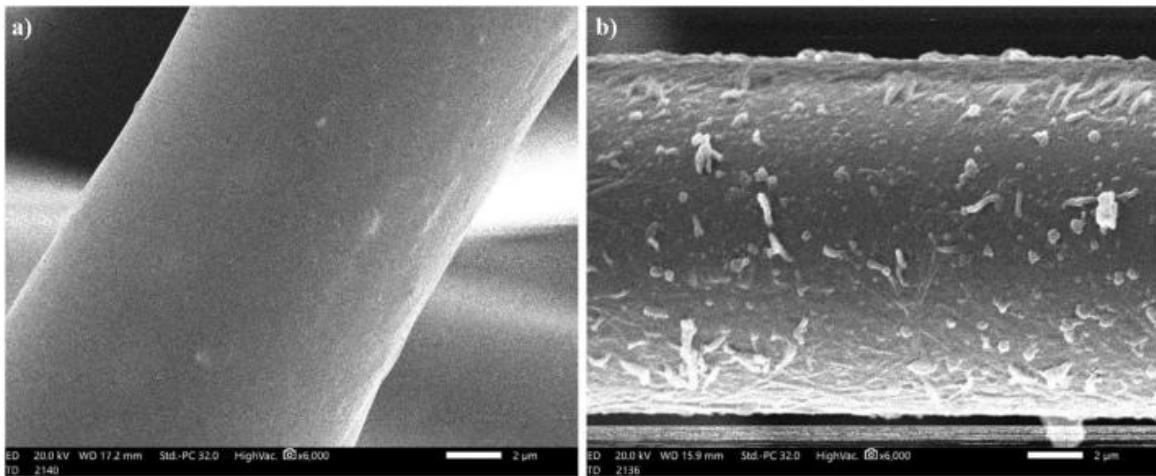


Ilustración 14. Imágenes SEM del tejido textil prístino (a) y modificado (b). (Mohamed & Abd-El-Nabey, 2022)

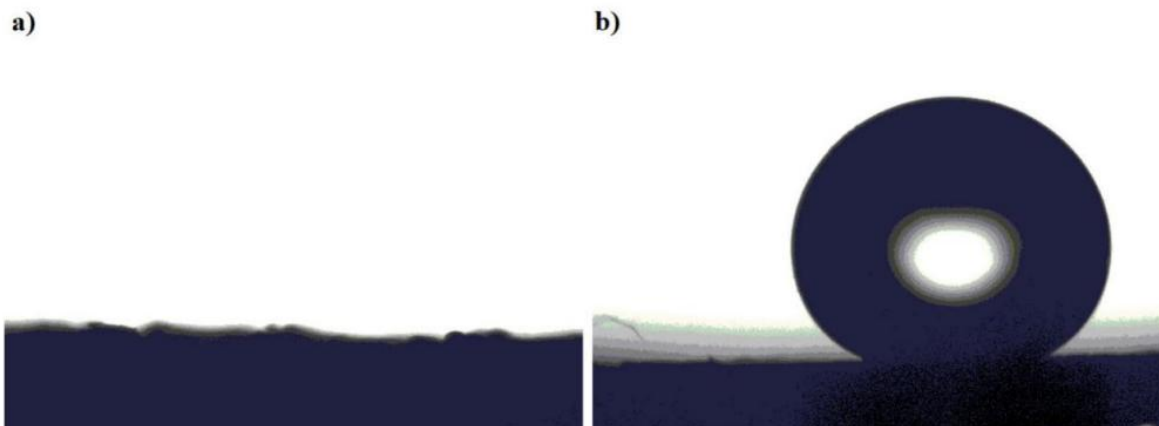


Ilustración 15. Imágenes de gotas de agua en la superficie prístina (a) y tejido textil modificado (b). (Mohamed & Abd-El-Nabey, 2022)

La humectabilidad de la tela textil prístina y modificada se investigó mediante la medición de WCA. Como se muestra en la Ilustración 15, la superficie de la tela textil prístina es hidrofílica, WCA cerca de  $0^\circ$ , y las gotas de agua no se deslizan, incluso si el tejido textil está alterado. El tejido textil modificado tiene un ángulo de contacto con el agua, WCA, de  $158^\circ \pm 1,3^\circ$ , y un ángulo de deslizamiento con el agua, WSA, de  $2^\circ \pm 0,2^\circ$ .

### **3.3.3 Medidas de capacidad de absorción.**

Se evaluó la capacidad de absorción de n-hexano, éter de petróleo y aceite de silicona por parte del tejido textil superhidrofóbico preparado. Mientras que el tejido textil prístino era capaz de absorber tanto agua como aceite, el tejido textil modificado superhidrofóbico desarrollado mostró una selectividad hacia la absorción de aceite solamente. Esto se debe a la alta porosidad, baja densidad, características superhidrofóbicas y la fuerza capilar de la tela textil modificada preparada, que contribuyen a una rápida absorción de solventes orgánicos.

Se realizaron diez repeticiones de la capacidad de absorción de n-hexano, éter de petróleo y aceite de silicona por parte del tejido superhidrofóbico preparado, como se muestra en la Ilustración 16. Después de cada ciclo, se midió la capacidad de absorción de aceite y se llevó a cabo el proceso de desorción de los disolventes orgánicos exprimiendo el tejido textil superhidrofóbico preparado. Se observó que la capacidad de absorción más alta fue para el aceite de silicona, mientras que la capacidad de absorción más baja fue para el n-hexano, como se muestra en la Ilustración 16.

El tejido textil modificado desarrollado tiene capacidades de absorción de 85, 4, 106, 59 y 159, 712 g/g para n-hexano, éter de petróleo y aceite de silicona, respectivamente. En estudios anteriores, se ha observado que a medida que aumenta la densidad y viscosidad del petróleo, también aumenta su capacidad de absorción. Esto se puede explicar debido a que el aceite con mayor densidad y viscosidad requiere más tiempo para liberarse de la membrana superhidrofóbica, lo

que resulta en una retención mayor de aceite en la estructura porosa y un aumento en la capacidad de absorción. En comparación con el aceite ligero, el aceite de mayor densidad ejercerá una mayor presión en el mismo volumen de poro de la membrana superhidrofóbica, lo que conduce a una capacidad de absorción mayor para el aceite de mayor densidad.

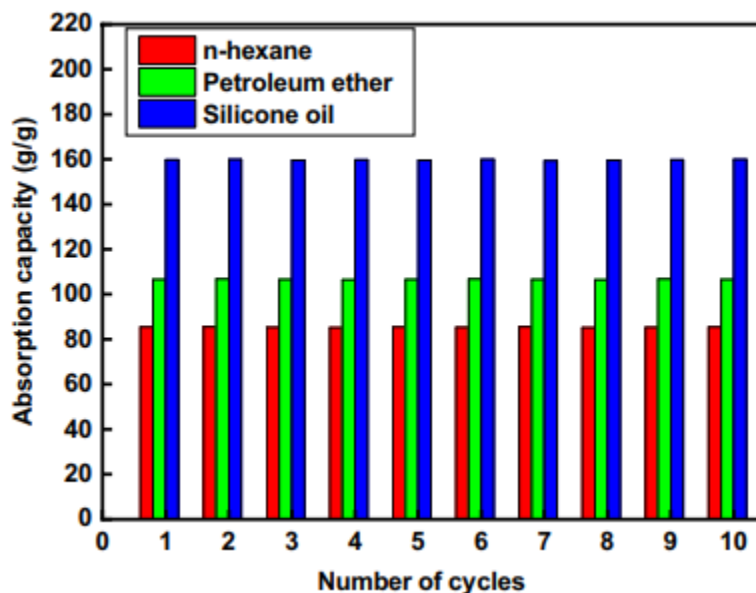


Ilustración 16. Capacidad de absorción de varias combinaciones de aceite/agua en función del número de ciclos. (Mohamed & Abd-El-Nabey, 2022)

### 3.3.4 Estabilidad química y tasa de flujo.

En el estudio, se sumergió el tejido textil superhidrofóbico en soluciones acuosas con diferentes niveles de pH durante diferentes períodos de tiempo (de 1 a 6 horas). Se evaluó el ángulo de contacto con el agua (WCA) cada hora. La Ilustración 17 muestra la relación entre el pH y el WCA del tejido para diferentes tiempos de inmersión. Se observó que en un rango de pH de 5 a 9, los valores de WCA fueron superiores a  $150^\circ$ , lo que indica que el tejido modificado seguía siendo superhidrofóbico. Sin embargo, el tejido superhidrofóbico perdió su propiedad superhidrofóbica antes de las 6 horas de inmersión en entornos extremadamente ácidos o básicos. La naturaleza superhidrofóbica del tejido es esencial para su capacidad efectiva de separar aceite y agua, a pesar de que muchos recubrimientos superhidrofobos informados previamente son químicamente inestables. Además, se

encontró que la estabilidad química del tejido textil producido es superior a la de otros absorbentes reportados, como el tejido modificado con alcohol polivinílico (WCA = 149°). Tejido textil modificado con un fluoropolímero (WCA=140°). Tejido textil injertado con aerogel de sílice y polidimetilsiloxano (WCA=140°).

Debido a su porosidad y las características rugosas de la tela modificada, es fácil formar canales de aceite, que contribuyen al alto flujo de aceite. El flujo de tejido textil modificado se determinó utilizando la ecuación. (9). El tejido textil modificado tenía una alta tasa de flujo de aceite. Los valores de flujo para n-hexano, éter de petróleo, aceite de silicona y n-hexano en emulsión de agua equivalen a 15 700, 15 500, 15 400 y 8040 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, respectivamente. La estabilidad de flujo de la tela textil modificada en el proceso de separación aceite/agua se determinó midiéndola después de 10 ciclos de procesos de separación. El valor de flujo para n-hexano, éter de petróleo, aceite de silicona y n-hexano en emulsión de agua después de 10 ciclos de procesos de separación es igual a 14 900, 14 700, 14 500 y 7650 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, respectivamente. Es evidente que el flujo disminuye ligeramente, lo que refleja la alta estabilidad del flujo del tejido textil modificado.

Las viscosidades de diferentes solventes orgánicos influyen en los niveles de flujo observados. Existe una relación inversamente proporcional entre el flujo y la viscosidad del líquido, lo que significa que, a menor viscosidad, mayor será el flujo. Por lo tanto, el tejido textil modificado puede separar eficaz y rápidamente el aceite y el agua debido a las propiedades superhidrofóbicas y la alta tasa de flujo de los solventes orgánicos evaluados. Además, en comparación con otros absorbentes reportados, como el textil recubierto de tiol-polidopamina (4500 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) y el tejido textil modificado con compuestos de ácido láurico-TiO<sub>2</sub> y nanopartículas de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (7400-11000 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), las tasas de flujo obtenidas en el tejido textil modificado son superiores.

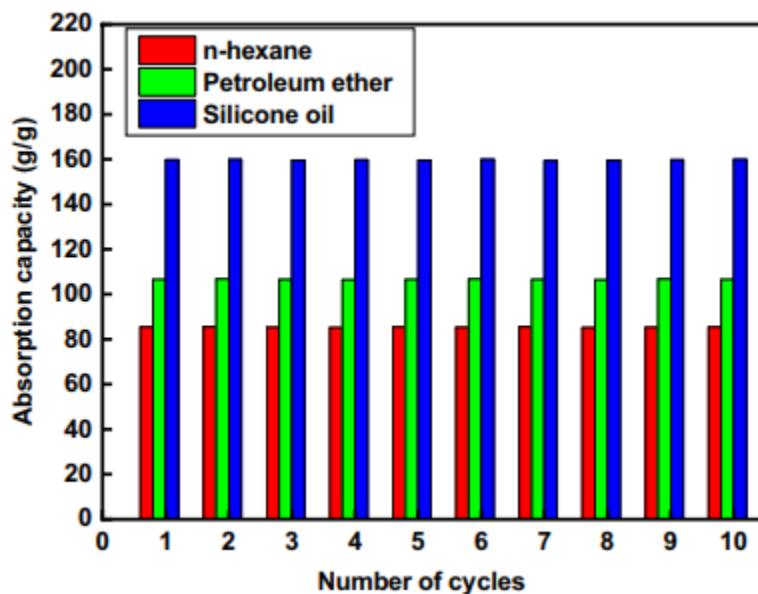
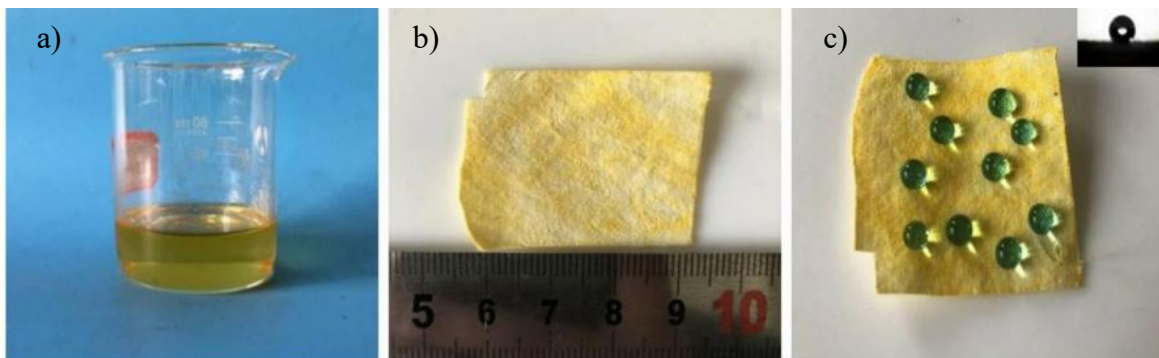


Ilustración 17. Influencia de los valores de pH en el ángulo de contacto con el agua de los tejidos textiles modificados a diferentes tiempos de inmersión. (Mohamed & Abd-El-Nabey, 2022)

### 3.4 Fabricación de tejido de algodón a base de polibenzoxazina superhidrofóbico y superoleofílico para la separación de agua y aceite.

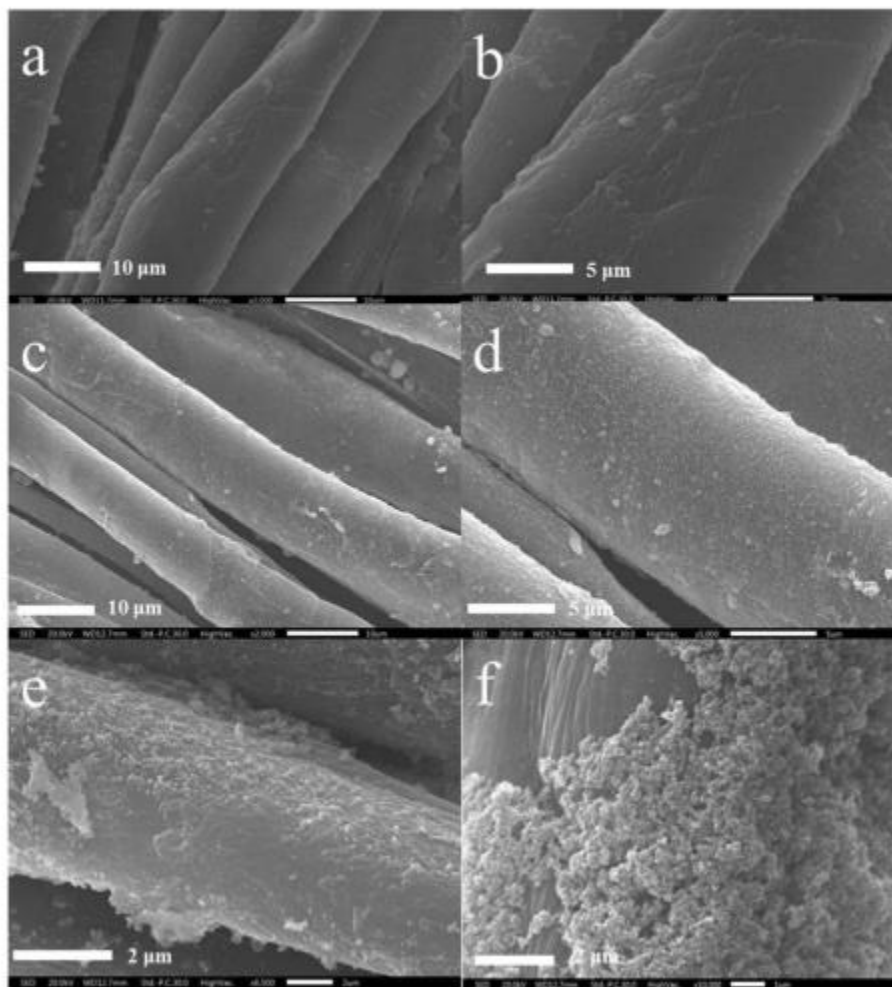
Se observa visiblemente que BZ/SiO<sub>2</sub> se disolvió uniformemente en el solvente cloroformo (Ilustración 18a). La ilustración 18b muestra la fotografía de una pequeña pieza del PBZSC20, se puede ver en la imagen que la superficie del PBZSC20 era amarilla.

Finalmente, las gotas de agua azul se colocaron en posición vertical en el PBZSC20 con un ángulo de contacto (CA) de 154, mostrando la superhidrofobicidad, como se muestra en la Ilustración 18c.



*Ilustración 18. Ilustración esquemática de la preparación de PBZSC. a) Fotografía del BZ/SiO<sub>2</sub> disuelto en cloroformo. c) fotografía del tamaño de PBZSC20 medido con una regla. d) Fotografía de gotas de agua en el PBZSC20. El recuadro es la fotografía óptica para la medición del ángulo de contacto con el agua. (Li, y otros, 2018)*

En la Ilustración 19 se presentan imágenes SEM de telas de algodón puro y recubiertas con PBZSC (polibenzoxazolina modificada con sílice). Se observa claramente que la morfología de la superficie de la tela de algodón recubierta con PBZ puro, sin la adición de nanopartículas de SiO<sub>2</sub>, es relativamente suave y simple (Ilustración 19a, b). Sin embargo, después de aplicar el recubrimiento de PBZ/SiO<sub>2</sub> sobre el tejido de algodón, la morfología de la superficie se vuelve áspera (Ilustración 19c) y se forman escamas con carga del 20% en peso de SiO<sub>2</sub> (Ilustración 19e). Además, se observa que la incorporación de PBZ/SiO<sub>2</sub> apenas afecta la estructura superficial del algodón y mantiene la morfología de las fibras de algodón. Por lo tanto, el uso de PBZ como adhesivo interfacial entre el tejido de algodón y las nanopartículas de SiO<sub>2</sub> mejora la adhesión entre ellos. Es interesante destacar que en la Ilustración 19d se observa claramente la distribución uniforme de grupos de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> en la superficie de las fibras de algodón, lo que resulta en la formación de estructuras micronanoestructuradas compactas. Con un mayor contenido de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> (20% en peso), estos grupos se agrupan aún más, formando una estructura de red porosa continua que contribuye a aumentar la rugosidad de la superficie (Ilustración 19f).



*Ilustración 19. Las imágenes SEM de las PBZSC con diferente concentración de SiO<sub>2</sub> a) 0 % en peso, c) 10 % en peso, e) 20 % en peso y las imágenes correspondientes a mayor aumento se muestran a la derecha b) 0 % en peso, d) 10 % en peso, f) 20 % en peso, respectivamente. (Li, y otros, 2018)*

La superficie superhidrofóbica, con un ángulo de contacto con el agua (WCA) superior a 150° y un ángulo de deslizamiento (SA) inferior a 10°, ha despertado un gran interés. En la Ilustración 20 se muestra el comportamiento del ángulo de contacto con el agua y el ángulo de deslizamiento de las PBZSC con diferentes contenidos de SiO<sub>2</sub>. Se observó claramente que los tejidos de PBZSC sin nanopartículas de SiO<sub>2</sub> presentaban propiedades hidrofóbicas, con un WCA de 130° y un SA de 8°, debido a la baja energía superficial del PBZ en sí mismo. Con un aumento en el contenido relativo de SiO<sub>2</sub>, el WCA de los PBZSC mostró un incremento significativo, alcanzando un valor máximo de 154° con un contenido de

SiO<sub>2</sub> del 20% en peso, lo que indica que el PBZSC20 era superhidrofóbico. Además, el SA de los PBZSC mostró una ligera disminución, alcanzando un valor mínimo de 3° con un contenido de SiO<sub>2</sub> del 20% en peso. Sin embargo, se observó que el WCA de los PBZSC disminuyó drásticamente cuando el contenido de SiO<sub>2</sub> superó el 20% en peso, mientras que el SA aumentó notablemente. Por lo tanto, los PBZSC con un contenido de SiO<sub>2</sub> del 20% en peso se consideraron la fórmula óptima para lograr una excelente superhidrofobicidad, lo cual tiene un impacto positivo en las propiedades fisicoquímicas generales de los PBZSC.

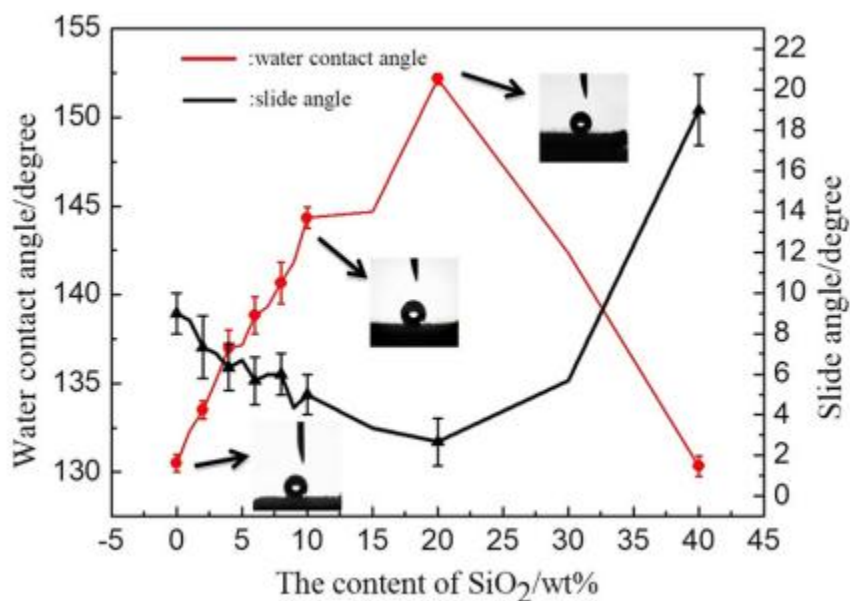


Ilustración 20. El WCA y SA de PBZSCs con diferente contenido de SiO<sub>2</sub>. El recuadro era la fotografía óptica para la medición WCA. (Li, y otros, 2018)

El recubrimiento superhidrofóbico de la superficie de algodón mencionado anteriormente tiene una amplia aplicación práctica en la separación de diversas mezclas de aceite y agua. En general, los PBZSC pueden separar el aceite y el agua de su mezcla mediante la gravedad. En la Ilustración 21a, se muestra el montaje experimental donde se coloca el algodón recubierto superhidrofóbico entre un embudo de vidrio y un matraz cónico. Se vierte una mezcla líquida de 200 ml que contiene 100 ml de agua y 100 ml de diclorometano teñido con azul de metileno y Sudán III, respectivamente, sobre la superficie de PBZSC20.

Se observa sorprendentemente el fenómeno de separación instantánea. Debido a la superoleofilicidad e hidrofobicidad de PBZSC20, el aceite penetra rápidamente a través de la membrana PBZSC20 con una microestructura porosa y cae en el matraz cónico. Mientras tanto, el agua es repelida y retenida sobre el papel debido a la hidrofobicidad y la baja adherencia al agua de PBZSC. Es importante destacar que no se aplica ninguna fuerza externa durante la separación rápida, ya que ocurre únicamente debido a la acción de la gravedad.

Es cierto que los materiales superhidrófobicos que pueden reciclarse en la separación de aceite y agua tienen un impacto positivo en diversas aplicaciones. En el caso de PBZSC20, se pudo lograr la separación de aceite y agua, y posteriormente se procedió a reciclar el material para su reutilización.

Después de la separación inicial de aceite y agua en PBZSC20, la superficie se lavó con etanol y luego con agua desionizada para eliminar la materia orgánica. Posteriormente, se sometió a un proceso de secado en un horno a 120 °C durante 10 minutos. Luego se llevó a cabo un ciclo de separación agua-aceite para evaluar la eficiencia de separación.

La eficiencia de separación se muestra en la Ilustración 21c. Se observó que, con el aumento del número de ciclos, la eficiencia de separación se redujo ligeramente del 96,2% al 92%. Sin embargo, se mantuvo en un nivel alto, por encima del 92%, después de 10 ciclos. Esto indica que la resina PBZ en la superficie de PBZSC es resistente a la solubilidad y conserva su capacidad de separación.

El flujo es otro parámetro importante para medir el rendimiento de separación de aceite y agua de los materiales, como se muestra en la Ilustración 21d. Después de 10 ciclos, el valor de flujo calculado se mantuvo alto, alcanzando los 2688 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, lo que demuestra un excelente rendimiento de reciclaje.

Estos resultados indican que PBZSC20 puede ser reciclado y utilizado repetidamente en la separación de aceite y agua, lo que lo convierte en un material prometedor para diversas aplicaciones.

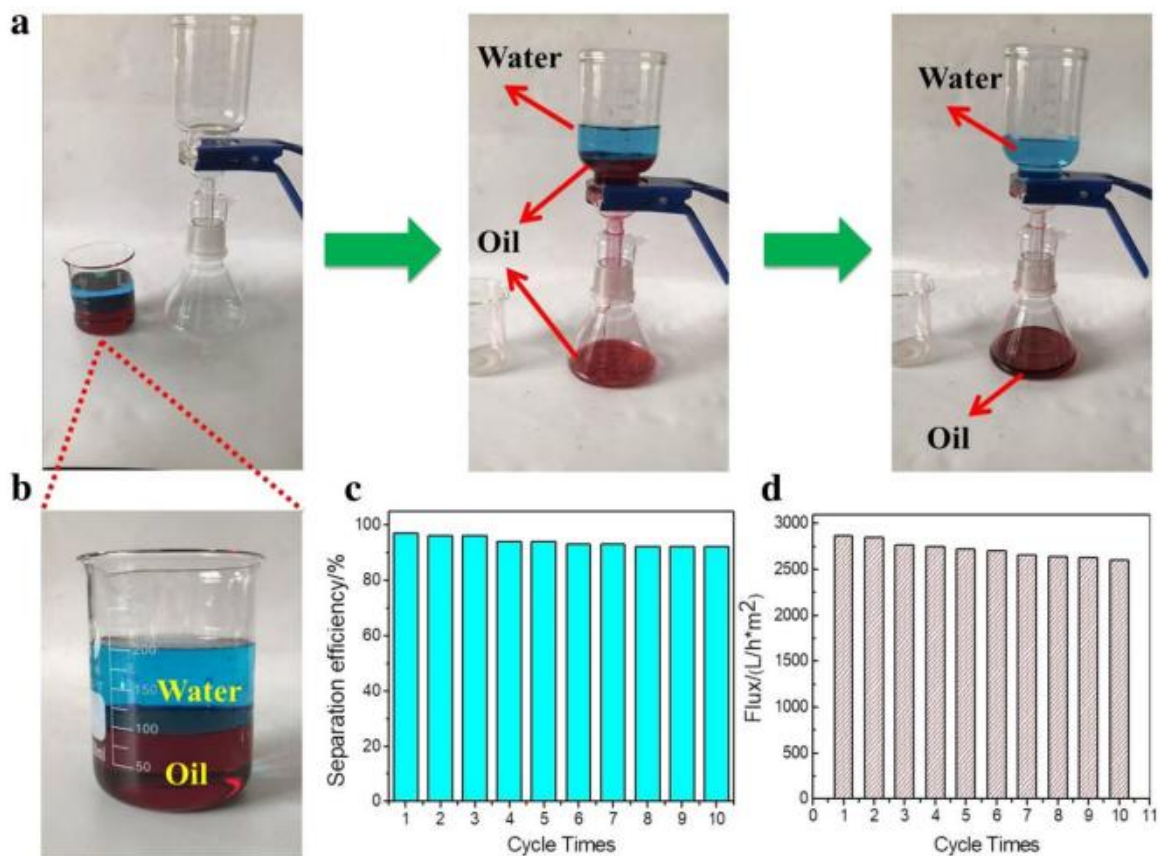


Ilustración 21. a) Proceso de separación del aceite (teñido con Sudan III)/agua (teñida con azul de metilo) utilizando el PBZSC20 como membrana filtrante. b) La imagen de 100 ml de agua y 100 ml de aceite en matraz. La eficiencia (c) y el flujo (d) para la separación de aceite y agua con diferentes ciclos usando PBZSC20. (Li, y otros, 2018)

# CAPÍTULO IV

## CONCLUSIONES

### **3.1 CONCLUSIONES.**

A modo de conclusión, los textiles superhidrófobos se presentan como una solución efectiva y sostenible para la separación de agua y aceite en aguas residuales contaminadas por derrames de petróleo. Los estudios analizados demuestran que estos textiles poseen propiedades únicas de repelencia al agua y afinidad con el aceite, lo que les permite actuar como una barrera selectiva para separar ambos líquidos.

La aplicación de textiles superhidrófobos en el tratamiento de aguas residuales ofrece varias ventajas como procesos de fabricación simples, rentabilidad, reutilizable y cuidado al medio ambiente, lo que los convierte en una opción prometedora para el tratamiento de aguas residuales contaminadas por derrames de petróleo.

Estos textiles son altamente eficientes en la separación de agua y aceite, lo que facilita la recuperación efectiva del petróleo derramado y minimiza los impactos ambientales. Además, son duraderos y estables en condiciones reales, lo que asegura su rendimiento a largo plazo, su resistencia a cambios ambientales y condiciones operativas.

En conjunto, los estudios revisados y la investigación en textiles superhidrófobos demuestran su potencial para la separación eficiente de mezclas de agua y aceite. Sin embargo, se requiere una mayor investigación y desarrollo para optimizar la fabricación de estos textiles, explorar nuevas técnicas de modificación de superficies y evaluar su desempeño en condiciones específicas de separación de agua/aceite en el tratamiento de aguas residuales. Además, se deberán considerar aspectos económicos y ambientales para garantizar la viabilidad y sostenibilidad de su implementación a gran escala. Su aplicación puede contribuir significativamente a la solución de problemas de contaminación y promover prácticas más sostenibles en el tratamiento de aguas residuales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Aquae, F. (21 de Septiembre de 2022). *Vertidos de petróleo: manchas mortales*. Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/wiki/vertidos-de-petroleo-manchas-mortales/>
- Bravo Herrera, C. A., Salgado Bervis , E., & Osorno Sánchez, C. J. (Octubre de 2016). *Propuesta de un tratamiento para aceites y grasas de las aguas residuales de la microempresa “productos verdes” laboratorio de biotecnología, unan.* Obtenido de <https://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/3504/1/61591.pdf>
- Cañete, A. F. (Septiembre de 2013). *Estudio de la Hidrofobicidad y Autolimpieza en Materiales con Nanotratamientos Superficiales.* Obtenido de [https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2013/hdl\\_2072\\_234675/PFC\\_AgustinFernandezCanete.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2013/hdl_2072_234675/PFC_AgustinFernandezCanete.pdf)
- Cid, A. A. (2022). *Cuaderno de apuntes de la materia: Contaminacion en la Industria Textil.* Puebla.
- Garcia, D. M. (Mayo de 2022). *Adhesión de nanofibras a distintos tejidos de calada. Trabajo Fin de Máster.* Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/184145/Minguez%20-%20Adhesion%20de%20nanofibras%20a%20distintos%20tejidos%20de%20calada.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- García-Cebadera, Á. R. (Octubre de 2010). *Estudio del ángulo de contacto y de la mojabilidad a alta temperatura de fases líquidas en la sinterización de metales.* Obtenido de <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/a058d856-fc81-4b42-81d6-81441c9422db/content>
- Jang , J.-y., Park, T.-j., & Lee, D.-w. (Julio de 2018). *Conocer la 'ciencia de la superficie' hace que los cosméticos sean más efectivos.* Obtenido de UNIST: <https://news.unist.ac.kr/kor/newsletter/20180722-1/?frame=0>
- Jintao, W., & Guihong , G. (15 de Diciembre de 2015). *Simple and eco-friendly fabrication of superhydrophobic textile for oil/water separation. Environmental*

- Technology*, 37(13), 1591–1596. Obtenido de <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1122094>
- Lab, A. (Junio de 2025). *Hidrófobo. Enciclopedia*. Obtenido de <https://academia-lab.com/enciclopedia/hidrofobo/>
- Li, Y., Yu, Q., Yin, X., Xu, J., Cai, Y., Han, L., . . . Wang, H. (2018). *Fabrication of superhydrophobic and superoleophilic polybenzoxazine-based cotton fabric for oil–water separation. Cellulose*, 2018, Vol 25, Issue 11, p6691. Obtenido de [https://openurl.ebsco.com/srh%3ASRH.1D1A50CE.703781F6/detailv2?sid=Primo&volume=25&date=20181101&spage=6691&issn=0969-0239&issue=11&genre=article&title=Cellulose.&epage=6704&doi=10.1007%2Fs10570-018-2024-8&link\\_origin=bibliotecabuap.elogim.com](https://openurl.ebsco.com/srh%3ASRH.1D1A50CE.703781F6/detailv2?sid=Primo&volume=25&date=20181101&spage=6691&issn=0969-0239&issue=11&genre=article&title=Cellulose.&epage=6704&doi=10.1007%2Fs10570-018-2024-8&link_origin=bibliotecabuap.elogim.com)
- Mahadeshwara, M. R. (31 de Octubre de 2022). *Wettability*. Obtenido de Tribonet: <https://www.tribonet.org/wiki/wettability/>
- Miranda, C. Y. (Mayo de 2013). *Síntesis de materiales súper-hidrófobos mediante la funcionalización de nanopartículas de sílica en hule silicón empleando polimerización aniónica viviente. CIQA*. Obtenido de <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/12/1/Tesis%20MTP%20Claudia%20Yanet%20Yeverino%20Miranda%20Abr%2025%202014.pdf>
- Mohamed, M. E., & Abd-El-Nabey, B. A. (2022). *Fabrication of a biological metal–organic framework based superhydrophobic textile fabric for efficient oil/water separation. Scientific Reports*, 2022, Vol 12, Issue 1. Obtenido de [https://openurl.ebsco.com/srh%3ASRH.922FA1FD.FE409905/detailv2?sid=Primo&volume=12&date=20220915&spage=1&issn=2045-2322&issue=1&genre=article&epage=14&title=Scientific%20reports.&doi=10.1038%2Fs41598-022-19816-y&link\\_origin=bibliotecabuap.elogim.com](https://openurl.ebsco.com/srh%3ASRH.922FA1FD.FE409905/detailv2?sid=Primo&volume=12&date=20220915&spage=1&issn=2045-2322&issue=1&genre=article&epage=14&title=Scientific%20reports.&doi=10.1038%2Fs41598-022-19816-y&link_origin=bibliotecabuap.elogim.com)
- Ortega, R., Carter, E., & Ortega , A. (13 de Julio de 2016). *Nylon 6,6 Nonwoven Fabric Separates Oil Contaminates from Oil-in-Water Emulsions*. Obtenido de <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0158493>

- Perez, B. D. (Marzo de 2024). *Evaluacion de los materiales compositos SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> para la industria textil* . Obtenido de <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/10336/1/IGLIN-250877%20%28Pdf%20-A%29.pdf>
- Rubio, J. A. (s/f). *Sintesis y caracterizacion de un compuesto SiO<sub>2</sub> - TiO<sub>2</sub> con propiedades hidrofobicas y autolimpiables*. Obtenido de <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/4502/1/RI001903.pdf>
- Taborda, M. A. (14 de Junio de 2013). *El Efecto Loto*. Obtenido de <https://tecnonacional.blogspot.com/2013/06/el-efecto-loto.html>