

Viabilidad de la Determinación del Grado de Mojabilidad de un Sólido Granular por Reometría

Juliet Daniela Blanco Mayorga (1), Xilena Villegas Arcos (2)

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingenierías Químicas

Ronald Alfonso Mercado Ojeda

Doctor en Procesos y Productos

Codirector

Arlex Chaves Guerrero

Ph.D en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios, por su guía y sabiduría. Su luz ha iluminado mi camino y me ha brindado la perseverancia necesaria para alcanzar mis metas.

A mis padres, quienes siempre han creído en mí y han sido mi impulso en cada momento de mi vida. Su esfuerzo y sacrificio han hecho posible este logro, que es tanto de ustedes como mío.

A mi familia, por su apoyo incondicional. A mis abuelos Chindo, Elcida, Candido y Brigida, por su amor y sus palabras de aliento; a mis tíos, en especial a mi tía Lili y Luz; a primos y mi hermana Karina, que siempre están a mi lado. ¡Tenemos una ingeniería en la familia!

En memoria de mi tía Josefina, quien no pudo estar presente en todo mi proceso, pero sé que desde el cielo siempre me acompaña.

A mi compañero fiel, Terry, gracias por acompañarme en tantas traspasadas y madrugadas.

A todos mis amigos que, a lo largo de los años, me acompañaron en esta etapa universitaria, que rieron y lloraron conmigo, y que hicieron de esta experiencia algo único. Gracias por cada momento; siempre quedará en mi corazón. En especial a Sareth, Lau, Nico, Marcos y Xilena; gracias por escucharme y estar siempre presentes.

A Ronaldo, por estar a mi lado desde el primer día que ingresé a esta maravillosa universidad y por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba. Lo logramos.

Finalmente, a la Dani del primer semestre que no creía de su capacidad para afrontar esta carrera. Hoy, finalizamos uno de los logros más importantes de nuestra vida.

Daniela Blanco

Dedicatoria

A Dios, por su amor incondicional y proveerme la fuerza y sabiduría necesaria para realizar este sueño.

A la memoria de mi abuela, Yolanda de la Cruz, quien estando en vida me enseñó que la educación siempre es el camino y me inspiró con su gran ejemplo. Sin duda alguna espero algún día ser como tú lo fuiste, nonita.

A mi madre, Elizabeth Arcos, por ser tan estricta y enseñarme que siempre puedo dar más de lo que las circunstancias me exigen. Sin tu confianza en mí no me hubiese sentido tan valiente para superar tantas adversidades en este camino.

A mis tíos, Yamile Villegas y Edinson Villegas, por llamarme en cualquier momento a darme sus palabras de aliento y animarme, sé el gran amor que me tienen y también me siento muy orgullosa de ustedes como ustedes de mí.

A Dulce y Violeta, mis compañeras fieles, cada día me contagian de felicidad y me recuerdan que las cosas nunca son tan malas como parecen.

A mis amigos que estuvieron siempre ahí y sin su ayuda no lo hubiese logrado: Jonás, Soreidys, Kimberly, Paula, Stephany, Nathalia R, Natalia A, Karen, Daniela, Sebastián, Kevin y Tania; cada uno apartó un granito fundamental para hacer posible este sueño.

Xilena Villegas

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestras familias por su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años. Gracias por creer en nosotras y darnos el aliento necesario para culminar uno de nuestros sueños más anhelados.

A nuestra alma mater, la Universidad Industrial de Santander, donde hemos tenido el privilegio de formarnos. Agradecemos la educación de calidad que la caracteriza y las herramientas necesarias para nuestro crecimiento profesional.

A la Escuela de Ingeniería Química y sus profesores, quienes nos han guiado con dedicación, impartiendo conocimientos que sin duda marcarán nuestra trayectoria futura.

Un agradecimiento especial al profesor Ronald Alfonso Mercado Ojeda por abrirnos las puertas y motivarnos a desarrollar este proyecto de investigación. Su orientación y conocimientos han sido esenciales a lo largo de este proceso. Apreciamos su paciencia, comprensión, dedicación y la pasión que ha demostrado en nuestra formación académica. Su apoyo ha sido fundamental para nuestro crecimiento personal y profesional.

Al grupo de investigación FIRST y a sus laboratorios por proporcionar los recursos y la infraestructura necesaria para llevar a cabo esta investigación. Agradecemos igualmente al profesor Arlex Chaves por sus conocimientos y respaldo en el desarrollo de este proyecto.

Al grupo GRM, en particular a Andrés, Valeria y Andrey, por el valioso tiempo que nos brindaron, explicándonos y ayudándonos a desarrollar satisfactoriamente este proyecto.

Por último, queremos expresar nuestra gratitud a todas las personas que han contribuido a la culminación de este trabajo de grado.

Daniela y Xilena

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Conceptual	14
2.1 Reología	14
2.2 Surfactantes	16
2.2.1 Clasificación de los surfactantes	17
2.2.1.1 Surfactantes aniónicos.	17
2.2.1.2 Surfactantes no iónicos.	17
2.2.1.3 Surfactantes catiónicos.....	17
2.3 Concentración micelar crítica	18
2.4 Isotherma de adsorción	19
2.5 Mojabilidad y ángulo de contacto.....	20
2.5.1.1 Ascenso Capilar.	22
2.5.1.2 Gota sénil.....	22
3. Estado del arte.....	23
4. Metodología	25
4.1.1 Surfactante	25
4.1.2 Sustrato	26
4.1.3 Aceite	27

4.2.1 Fase I. Evaluación de la relación sólido / líquido	27
4.2.1.1 Caracterización reológica.....	28
4.2.2 Fase II.....	29
4.2.1.1 Cuantificación de la concentración del surfactante en un medio acuoso.....	29
4.2.1.2 Determinación de la CMC.	29
4.2.1.3 Determinación de la isoterma de adsorción.	30
4.2.1.4 Determinación de las curvas de viscosidad.	30
4.2.3 Fase III. Determinación del ángulo de contacto.	31
5. Resultados	31
5.1 Determinación de concentración de sólidos de la suspensión	31
5.1.1 Curva de viscosidad en función de la tasa de cizallamiento.....	31
5.1.2 Evaluación del comportamiento viscoelástico.....	33
5.2 Estudio del efecto del grado de hidrofobación de la bentonita en el comportamiento reológico de las suspensiones	36
5.2.1 Cálculo de la CMC.....	36
5.2.2 Cálculo de la isoterma de adsorción	37
5.2.3 Influencia del grado de recubrimiento en el comportamiento reológico	40
6. Conclusiones	44
7. Recomendaciones	45
Referencias Bibliográficas	46

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Grado de recubrimiento y concentración al equilibrio del surfactante para la construcción de las isotermas de adsorción.</i>	39
Tabla 2. <i>Ángulo de contacto para diferentes tipos de recubrimiento.</i>	44
Tabla 3. <i>Resultados de adsorción por cada punto de concentración de DBBSS inicial</i>	51
Tabla 4. <i>Resultados del cálculo del área por molécula en la interfase aire/agua</i>	53

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Curvas de viscosidad vs esfuerzo de corte sobre diferentes tipos de fluidos.</i>	14
Figura 2. <i>Comportamiento reológico de los fluidos tixotrópicos.</i>	16
Figura 3. <i>Estructura bifuncional del surfactante.</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4. <i>Determinación de la CMC midiendo varias propiedades.</i>	18
Figura 5. <i>Gotas de líquido en una superficie sólida.</i>	20
Figura 6. <i>Estructura molecular del Dodecil Benceno Sulfonato de Sodio.</i>	26
Figura 7. <i>Infrarrojo de la Parafina</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura 8. <i>Curva de calibración</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura 9. <i>Viscosidad de las suspensiones en función de la tasa de corte a) Suspensiones fase acuosa y b) suspensiones fase oleosa.</i>	31
Figura 10. <i>Barrido de amplitud a frecuencia angular constante para suspensiones en fase acuosa y fase oleosa</i>	34
Figura 11. <i>Barridos de tixotropía para suspensiones en a) fase acuosa y b) fase oleosa.</i>	36
Figura 12. <i>Concentración Micelar Crítica</i>	37
Figura 13. <i>Isoterma de adsorción de DBSS en dos modelos, a) modelos de los dos pasos y b) modelo de las cuatro regiones.</i>	38
Figura 14. <i>Viscosidad de las suspensiones en función de la tasa de corte a) Suspensiones fase acuosa y b) suspensiones fase oleosa</i>	40
Figura 15. <i>Barrido de amplitud a frecuencia angular constante para suspensiones en fase acuosa</i>	41

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Infrarrojo de la Parafina	50
Apéndice B. Cálculo de la isoterma de adsorción.....	50
Apéndice C. Ángulo de contacto con diferentes grados de recubrimiento 1. 0%p/v, 2. 0,002%p/v, 3. 0,02% p/v, 4. 0,2% p/v, 5. 2% p/v.	55

Resumen

Título: Viabilidad de la determinación del grado de mojabilidad de un sólido granular por reometría *

Autor: Juliet Daniela Blanco Mayorga (1), Xilena Villegas Arcos (2)**

Palabras Clave: Mojabilidad, reología, ángulo de contacto, DBSS, hidrofobación.

Descripción:

El ángulo de contacto es un indicador directo de la mojabilidad, pero su medición en sólidos granulares presenta desafíos significativos, ya que existen discrepancias entre el ángulo medido y el valor real de hidrofobicidad. Por consiguiente, este trabajo evalúa la viabilidad de determinar el grado de mojabilidad de un sólido granular mediante técnicas reológicas, utilizando bentonita dispersa en una fase continua. Para ello, se prepararon suspensiones acuosas y oleosas con bentonita, seleccionando diversos grados de hidrofobación mediante la adsorción del surfactante DBSS. Los resultados indican que el grado de hidrofobación del sólido impacta significativamente tanto la curva de viscosidad como la elasticidad de las suspensiones, verificando la viabilidad técnica de usar la reometría como método para distinguir la mojabilidad del sistema particulado escogido. Finalmente, para contrastar estos resultados se midió el ángulo de contacto para evaluar el grado de hidrofobación del sólido, utilizando un tensiómetro de gota colgante. Se encontró que, a mayor grado de recubrimiento, mayor es el ángulo de contacto de una gota de agua, lo que indica que la adsorción del surfactante transforma la superficie de la bentonita de hidrofílica a hidrofóbica, validando los resultados reológicos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Ingeniería Química. Director: Ronald Alfonso Mercado Ojeda. Ph.D. en Procesos y Productos. Codirector: Arlex Chaves Guerrero. Ph. D. en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Feasibility of Determining the Wettability Degree of a Granular Solid by Rheometry*

Author(s): Juliet Daniela Blanco Mayorga (1), Xilena Villegas Arcos (2)**

Key Words: Wettability, Rheology, Contact Angle, DBSS, Hydrophobization.

Description: The contact angle is a direct indicator of wettability, but its measurement in granular solids presents significant challenges, as there are discrepancies between the measured angle and the actual hydrophobicity value. Therefore, this work evaluates the feasibility of determining the wettability degree of a granular solid using rheological techniques, with bentonite dispersed in a continuous phase. For this purpose, aqueous and oily suspensions with bentonite were prepared, selecting various degrees of hydrophobization through the adsorption of the DBSS surfactant. The results indicate that the hydrophobization degree of the solid significantly impacts both the viscosity curve and the elasticity of the suspensions, confirming the technical feasibility of using rheometry as a method to distinguish the wettability of the selected particulate system. Finally, to contrast these results, the contact angle was measured to evaluate the solid's hydrophobization degree, using a pendant drop tensiometer. It was found that, with a higher degree of coating, the contact angle of a water droplet increases, indicating that surfactant adsorption transforms the bentonite surface from hydrophilic to hydrophobic, thus validating the rheological results.

** Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering School. Ronald Alfonso Mercado Ojeda. Ph. D. Process and Products Co-director. Arlex Guerrero Chaves. Ph. D Chemical Engineering.

Introducción

El grado de hidrofobación de un sólido es una propiedad de gran relevancia debido a su amplia gama de aplicaciones en diversos campos. La modificación de la mojabilidad de superficies sólidas tiene implicaciones significativas en áreas que van, desde la industria petrolera, donde se busca la recuperación mejorada del crudo, pasando por la industria del textil, así como en la protección de tecnologías como los paneles solares y satélites, y en recubrimientos para la industria de materiales (Santos, & Goncalves, 2016; Torres, et al., 2022; Becerra, 2006).

A pesar de los numerosos estudios realizados sobre los fenómenos que afectan la mojabilidad, ha sido complicado establecer reglas inequívocas que la relacionen con diferentes variables, tales como la temperatura, el tipo de sólido, la composición química y la presencia de agentes tensioactivos (Blass, 2003). Un indicador directo de la mojabilidad es el ángulo de contacto, que evalúa la interacción entre un líquido y una superficie sólida, proporcionando información sobre energías de superficie, rugosidad y heterogeneidad. En un sistema bien definido, este ángulo se establece entre dos fases en una superficie sólida no rugosa, plana y homogénea (Ramé, 1997). Sin embargo, esta definición representa un desafío al medir sólidos granulares, ya que, la heterogeneidad y porosidad de estas superficies pueden generar discrepancias significativas entre el ángulo medido y el valor real de hidrofobicidad. Además, existe una complejidad inherente al ángulo de contacto y a los fenómenos fisicoquímicos involucrados, lo que hace que su comprensión esté lejos de ser total (Marmur, 1993).

La literatura describe varios métodos para evaluar el ángulo de contacto, entre los que se incluyen el del método de ascenso capilar y el método de la gota sécil, entre otros (Alghunaim, et al., 2016; Chau, 2009). Sin embargo, diversas investigaciones han señalado errores potenciales en

las técnicas de medición, así como la influencia de las condiciones experimentales y las propiedades de los materiales en los resultados obtenidos.

La determinación del grado de mojabilidad en sólidos particulados y superficies no ideales, como las que se encuentran en los yacimientos de petróleo, es especialmente relevante debido a la rugosidad y heterogeneidad de los minerales como arcilla, sílice y caliza. Esta variabilidad dificulta la obtención de un ángulo de contacto preciso, lo que a su vez dificulta la estimación confiable de la hidrofobicidad del sólido.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es proponer un método para determinar el grado de mojabilidad de un sólido granular, utilizando arcilla suspendida en una fase continua (ya sea oleosa o acuosa) para formar una suspensión. Además, se prepararán sistemas sólidos con diferentes grados de hidrofobación mediante la adsorción de un surfactante (Dodecil Benceno Sulfonato de Sodio), con el fin de evaluar el comportamiento reológico en función del grado de hidrofobación de la arcilla. Este enfoque busca contribuir a una mejor comprensión y medición de la hidrofobicidad en sólidos granulares, con aplicaciones potenciales en diversas industrias.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad de la determinación del grado de mojabilidad de un sólido granular por reología.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer condiciones físicas para que las suspensiones respondan reológicamente a cambios en el grado de hidrofobación.
- Estudiar el efecto del grado de hidrofobación de un sólido en el comportamiento reológico de las suspensiones.

- Comparar el grado de hidrofobación obtenido por reología con el obtenido por el método del ángulo de contacto.

2. Marco Conceptual

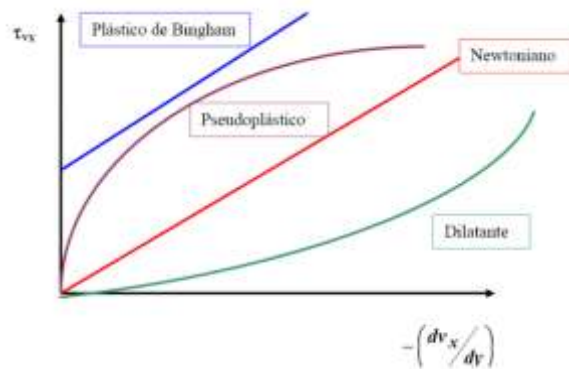
2.1 Reología

La reología analiza las propiedades mecánicas de un campo amplio de fluidos, esto permite describir y entender propiedades como la consistencia, viscosidad y elasticidad de los fluidos y cómo estos factores pueden cambiar según el esfuerzo al que es sometido el sistema, el cual puede corresponder a una compresión, tensión o fuerza de cizallamiento.

La reología clasifica y subclasifica los fluidos basados en cómo estos se comportan en respuesta a las fuerzas tangenciales, estos fluidos pueden ser Newtonianos o no Newtonianos, por su parte, los fluidos Newtonianos se caracterizan por que su comportamiento reológico, no cambia con la velocidad de cizalla. Esto implica que, independientemente de la fuerza aplicada o la velocidad a la que se deforman, la relación entre la tensión de corte y la tasa de deformación es lineal, como se ilustra en la Figura 1. En cuanto a los fluidos no Newtonianos, estos pueden exhibir diferentes tipos de respuestas a la deformación, dependiendo de la tasa de cizalla.

Figura 1.

Curvas de viscosidad vs esfuerzo de corte sobre diferentes tipos de fluidos.



Nota. Tomado de Del Fresno, J. S. (2016, 27 septiembre). *DIFERENCIAS MUY FLUIDAS*. Ciencia En Común.

Dada la variabilidad en el comportamiento reológico de diferentes materiales y sustancias, la reometría desempeña un papel fundamental al permitir la identificación de metodologías de análisis y tipos de estudios más adecuados. Para ello, se emplean diversos sistemas de medición y métodos que facilitan el entendimiento de estos comportamientos. En este contexto, se distinguen dos tipos fundamentales de pruebas para estudiar parámetros reológicos: las pruebas rotacionales y las pruebas oscilatorias. El primero permite la determinación de las curvas de flujo, curvas de viscosidad y curvas de tixotropía, mientras que las pruebas oscilatorias permiten estudiar las variables asociadas a la viscoelasticidad (Ramos,2020).

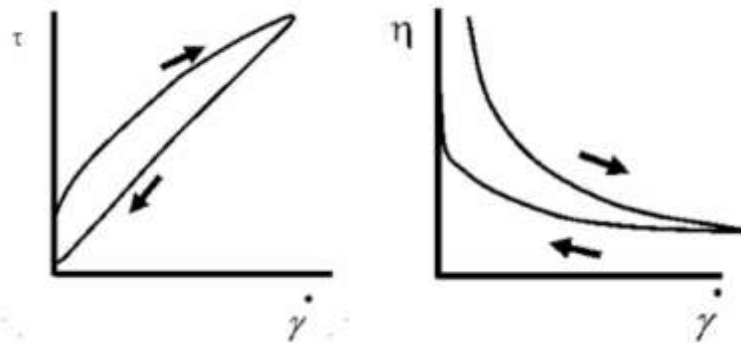
Para analizar el comportamiento de materiales bajo diferentes condiciones de esfuerzo y deformación en las pruebas oscilatorias, se usan barridos de amplitud, básicamente estas permiten comprender cómo los materiales viscoelásticos se comportan bajo diferentes niveles de deformación, punto de fluencia y bajo diferentes niveles de esfuerzo. Una de las pruebas de amplitud más comunes son las pruebas de barrido de deformación, esto se logra a través de la aplicación de una deformación oscilatoria y se registran las respuestas en términos de esfuerzo, a su vez, se incrementan la amplitud de deformación, permitiendo observar cómo el material se comporta a diferentes niveles de deformación. (Arias,2020).

Además, algunos de estos fluidos no dependen solo de la magnitud de esfuerzo que sufren, sino, del tiempo de aplicación, tales como fluidos de naturaleza tixotrópica y reopéctica, este tipo de propiedades son ampliamente usadas en la industria química e hidrocarburos (Torres, 2022).

Para Ishara (2024), la tixotropía se refiere al fenómeno en el cual la viscosidad de un material disminuye al aplicarle un esfuerzo de cizalla, y su estructura se recupera gradualmente una vez que se elimina dicho esfuerzo. En una sustancia tixotrópica, al analizar su flujo y viscosidad, se observa que, al incrementar la velocidad de cizalla, la viscosidad disminuye (curva ascendente). Sin embargo, cuando la velocidad de cizalla se reduce, el esfuerzo medido es menor que el registrado en la curva ascendente para la misma velocidad de cizalla (ver figura 2).

Figura 2.

Comportamiento reológico de los fluidos tixotrópicos.



Nota. Tomado de Torres, M. (2022). ESTUDIO REOLÓGICO E IMPLEMENTACIÓN AUTOMÁTICA DE MIELES EN EMPRESA. [Tesis postgrado, Universidad europea de Madrid].

2.2 Surfactantes

Los surfactantes son compuestos químicos que presentan una estructura bifuncional, compuesta por una parte polar, conocida como hidrofílica, y una parte no polar, denominada hidrofóbica (ver Figura 3). Esta dualidad les permite actuar como agentes tensioactivos, lo que significa que tienen la capacidad de alterar las propiedades interfaciales de los sistemas bifásicos.

Al interactuar con interfaces líquidas o sólidas, los surfactantes se absorben en estas superficies, lo que resulta en una disminución de la tensión superficial o aumento del exceso superficial.

Figura 3.

Estructura bifuncional del surfactante.



2.2.1 Clasificación de los surfactantes

2.2.1.1 Surfactantes aniónicos. Los tensioactivos aniónicos son compuestos anfifílicos que contienen un grupo aniónico, el cual está unido, ya sea directamente o a través de intermediarios, a una larga cadena de hidrocarburos (Möbius et al., 2001). Cuando estos tensioactivos se disuelven en agua, se disocian y producen aniones y cationes hidratados.

2.2.1.2 Surfactantes no iónicos. Los tensioactivos no iónicos son compuestos anfifílicos que, a diferencia de otros tipos, no se disocian en iones lo que significa que no presentan carga eléctrica. Su característica principal es que no se ionizan en agua, evitando así la formación de sales con iones metálicos. Por lo tanto, se pueden definir como tensioactivos que carecen de carga en el rango de pH en el que suelen utilizarse (Möbius et al., 2001).

2.2.1.3 Surfactantes catiónicos. Los tensioactivos se distinguen se caracterizan por poseer cargas eléctricas positivas en su parte hidrofílica (Angarita & Hincapié, 2023). Se clasifican como tales cuando su estructura molecular puede disociarse en solución, generando un catión tensioactivo y un anión normal.

Por lo general, estos surfactantes no se combinan con tensioactivos aniónicos en formulaciones, debido a su incompatibilidad, lo que resulta en una reducción de su eficacia limpiadora.

2.3 Concentración micelar crítica

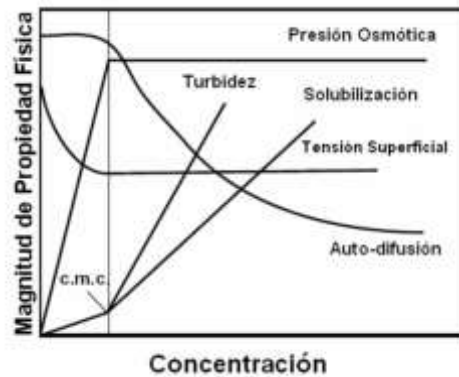
Para comprender este concepto, es fundamental analizar el comportamiento de los agentes tensioactivos. Estos compuestos orgánicos poseen una estructura compleja que les confiere características oleofílicas e hidrofílicas, conocida como estructura anfifílica o anfipática. Este comportamiento está estrechamente relacionado con la polaridad de sus moléculas, que contienen tanto partes polares (hidrofílicas) como no polares (hidrofóbicas), esto les permite alterar el comportamiento de sistemas que presentan nula miscibilidad.

La formación de complejos moleculares llamados micelas, es una de las propiedades más destacadas de los tensioactivos, con aplicaciones químicas ampliamente utilizadas en diversas industrias. En este contexto, la concentración micelar crítica (CMC) se define como el punto de saturación mínima en el que se forman micelas termodinámicamente estables (Lara et al., 2020).

Para llevar a cabo el cálculo de la CMC se cuentan con diferentes tipos de metodologías, tales como la voltametría cíclica, espectroscopia, simulación por dinámica molecular (DM) y se puede observar en una gráfica que muestre cualquier propiedad de la solución en relación con su concentración, como un cambio notable en la pendiente (ver Figura 4), como la tensión superficial.

Figura 4.

Determinación de la CMC midiendo varias propiedades.



Nota. Tomado de Covarrubias Morales, L. 2006. Estudio del efecto de dureza por CaCO_3 en la concentración micelar crítica de surfactantes aniónicos en agua (dodecil benceno sulfonato de sodio y lauril sulfato), así como en la formación de espuma en procesos de detergencia.

2.4 Isoterma de adsorción

La isoterma de adsorción describe el proceso mediante el cual un fluido, ya sea líquido o gas (denominado adsorbato), se adhiere a la superficie de otra sustancia (conocida como absorbente) bajo condiciones de temperatura constante. Estas isotermas representan la cantidad de material que puede unirse a la superficie en función de la concentración del adsorbato en la fase gas o en la disolución. El estudio de esta propiedad es fundamental para comprender las interacciones entre superficies y fluidos, y es crucial para evaluar la capacidad de adsorción bajo diferentes condiciones de equilibrio.

Las isotermas de adsorción son herramientas fundamentales en la investigación experimental, permitiendo modelar el comportamiento de la adsorción en diversas aplicaciones. Existen varias formas de calcular estas isotermas, cada una basada en supuestos específicos sobre el sistema estudiado.

Por ejemplo, la isoterma de Langmuir postula una superficie homogénea y considera que no hay interacción entre las moléculas adsorbidas. En contraste, la isoterma de Freundlich es un modelo empírico que se aplica a superficies heterogéneas, permitiendo la adsorción en múltiples capas. Por su parte, la isoterma de BET modifica el enfoque de Langmuir para adaptarse a situaciones donde se presentan varias capas de adsorción.

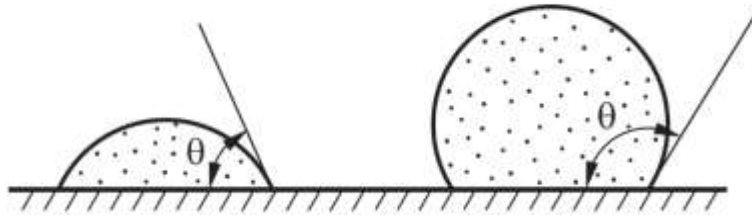
2.5 Mojabilidad y ángulo de contacto

La mojabilidad es la tendencia de un fluido a extenderse o adherirse a una superficie sólida en presencia de otro fluido inmisible. Las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido promueven que el líquido se extienda sobre la superficie, mientras que las cohesivas dentro del líquido tienden a hacer que se abulte y evite el contacto con la superficie. Un indicador directo de la mojabilidad es el ángulo de contacto ya que, esta medida evalúa la interacción entre un líquido y una superficie sólida, indicando si la superficie es hidrofílica (atrae líquidos) o hidrofóbica (repela líquidos).

El ángulo de contacto se refiere al ángulo formado por una gota de líquido que descansa sobre una superficie sólida cuando está en equilibrio, este concepto está relacionado íntimamente con la naturaleza del fluido y la naturaleza de la superficie, dependiendo también de las propiedades termodinámicas del sistema, ver Figura 5. Este ángulo es una medida de la humectabilidad de una superficie por un líquido (Valentín,2020) y además es fundamental para determinar propiedades y comportamientos reológicos de un fluido y su interacción con la superficie.

Figura 5.

Gotas de líquido en una superficie sólida.



Nota. Tomado de Popov, V. L. (2020). *Principios y aplicaciones de la mecánica de contacto en tribología, fricción y adherencia.*

El ángulo de contacto puede variar entre 0 y 90°, este es un valor de gran interés ya que está relacionado con la mojabilidad y la humectabilidad fluido-superficie, por ejemplo, una gota en una superficie mojada por aceite u otra sustancia hidrofóbica, dará como resultado, ángulos de contacto mucho más grandes, debido a la polaridad del fluido y la no polaridad de la superficie (Ortiz et al.,2022). De la suma de las fuerzas de interacción, se deduce la ecuación de Young, esta permite cuantificar las energías superficiales de las interfaces.

$$\gamma_{LV} \cos \theta_{SL} = \gamma_{SV} - \gamma_{SL}$$

Donde:

γ_{LV} : Tensión superficial del agua

γ_{SL} : Tensión interfacial entre sólido y líquido

γ_{SV} : Tensión interfacial entre sólido y vapor

La ecuación de Young es fundamental en el diseño de materiales que requieren propiedades humectantes específicas, cómo superficies hidrófobas (que repelen el agua) o hidrófilas (que absorben agua). El cálculo del ángulo de contacto proporciona información valiosa sobre las fuerzas de cohesión, adhesión y las tensiones superficial e interfacial. Cuando el ángulo de contacto se encuentra entre 0 y 90°, la gota moja la superficie; en cambio, si se sitúa por encima de 90°, la superficie se considera no mojada. Estos factores son de gran importancia para diversas

aplicaciones en la industria y la mecánica de fluidos, ya que influyen directamente en la mojabilidad, hidrofobicidad e hidrofobicidad. Por ello, existen varias condiciones en las que se estudia este ángulo y existen técnicas aplicadas para su cálculo (Ortiz et al,2022).

2.5.1.1 Ascenso Capilar. Este método se basa en medir la altura a la que un líquido asciende dentro del tubo capilar vertical de diámetro pequeño. Este fenómeno ocurre hasta que la presión hidrostática generada por la columna de líquido alcanza un equilibrio con la tensión superficial del líquido.

El método de ascenso capilar es relativamente sencillo de implementar y no requiere equipos complejos, lo que lo hace accesible y económico. Además, ofrece una precisión en la determinación de la tensión superficial y el ángulo de contacto, proporcionando resultados confiables cuando se realiza de manera correcta. Sin embargo, existen ciertas limitaciones. El uso de tubos capilares de diámetro pequeño puede restringir su aplicabilidad a líquidos que ascienden en tales tubos. Asimismo, la precisión del método puede verse afectada si el líquido no adhiere correctamente a las paredes del tubo o si el tubo no está limpio, lo que podría afectar en la exactitud de las mediciones.

2.5.1.2 Gota sésil. El método de gota sésil es una técnica ampliamente reconocida para medir tensiones superficiales y evaluar la humectabilidad de diversos materiales. Según Pérez y colaboradores (2009), este procedimiento consiste en colocar una pequeña gota de líquido sobre una superficie sólida y observar el comportamiento del líquido al interactuar con el sólido. Al depositar la gota, se establece un equilibrio entre las fuerzas de cohesión dentro del líquido y las fuerzas de adhesión entre el líquido y la superficie, lo que se refleja en el ángulo de contacto.

Este método se caracteriza por su versatilidad y economía, siendo especialmente útil en contextos donde otros métodos son difíciles de aplicar. Además, es uno de los procedimientos más

sencillos de ejecutar y no requiere de equipos costosos. Sin embargo, es importante destacar que su precisión depende de gran medida de la destreza del experimentador y de la atención en la preparación de las muestras, ya que impurezas o irregularidades pueden afectar los resultados obtenidos.

3. Estado del arte

Diversos estudios han abordado la medición y análisis de ángulos de contacto, ya que, son propiedades fundamentales en la interacción entre líquidos y sólidos, y su medición ha sido objeto de diversos estudios a lo largo del tiempo. En 2009, Chau realizó una revisión crítica de las técnicas disponibles para medir ángulos de contacto (Chau, T. T., 2009), enfocándose en su aplicabilidad a superficies minerales. Chau clasificó las técnicas en dos grupos: las que son aptas para superficies planas y lisas, y aquellas diseñadas para superficies no ideales o sólidos particulados. En su análisis, destacó las limitaciones de las técnicas orientadas a superficies planas, subrayando la complejidad de obtener condiciones óptimas para la medición. Para intentar superar estas limitaciones, Chau experimentó con la modificación de la superficie mineral, pero los resultados no fueron satisfactorios, mostrando un ángulo de contacto que distaba de la realidad. En contraste, identificó el método de penetración capilar para partículas como el más adecuado para medir ángulos de contacto en superficies minerales reales, resaltando su eficacia y simplicidad.

González (2014), se enfoca en el estudio de la mojabilidad de diferentes superficies a través de la medición del ángulo de contacto, utilizando el método de la gota cautiva. El objetivo principal de esta investigación es determinar el ángulo de contacto en diversas superficies para caracterizar su comportamiento hidrofóbico o hidrofílico. Para lograr esto, se emplea el método de la gota cautiva, que permite obtener mediciones precisas de la interacción entre líquidos y sólidos. Los resultados obtenidos son analizados en relación con las isothermas de adsorción,

proporcionando una comprensión más profunda de cómo las propiedades superficiales influyen en la mojabilidad. Además, se discuten las implicaciones de estos hallazgos en aplicaciones prácticas, especialmente en sectores como la industria petroquímica y en el desarrollo de recubrimientos.

En 2016, Alghunaim y colaboradores llevaron esta discusión un paso más allá al realizar una revisión sobre los métodos para determinar el grado de mojabilidad de los polvos (Alghunaim, et al., 2016), haciendo énfasis en el ángulo de contacto formado al mojar el polvo. Examinaron técnicas como la gota sésil y la penetración capilar, discutiendo las ventajas y desventajas de cada método. A pesar de que encontraron diferencias entre el ángulo de contacto medido y el real, manifestaron una clara preferencia por el método de ascenso capilar, dada su efectividad y aplicabilidad.

En el mismo camino, en 2017, Marina Monserrat Amat realizó un estudio experimental en su tesis de maestría, analizando el efecto de recubrimientos hidrófobos en gravas y su impacto en la rotura de partículas (Monserrat Amat, M., 2017). Su investigación, que involucró el uso de Dimethyldiclorosilano (DMDCS) para recubrir gravas del río Pancrudo, buscó entender la deformabilidad y la propagación de fisuras que pueden comprometer estructuras compuestas por partículas tratadas. Amat logró medir el ángulo de contacto y evidenció un cambio notable en la mojabilidad, pasando de un estado completamente húmedo a uno hidrófobo. Este hallazgo resalta cómo la modificación superficial influye en las propiedades de los materiales y su comportamiento en aplicaciones prácticas.

Finalmente, en 2022, Ortiz, Escudero y Rao llevaron a cabo un estudio comparativo que examinó los ángulos de contacto medidos mediante la técnica de burbuja cautiva y aquellos calculados utilizando la ecuación de Young (Ortiz et al., 2022). Su análisis abarcó la cuantificación de las energías superficiales de las interfaces en un sistema aire-agua-aceite. Los resultados

mostraron una buena concordancia entre los ángulos de contacto medidos y calculados, subrayando la relevancia de los valores de tensión superficial para determinar la concentración micelar crítica (CMC) en el medio acuoso. Esto refuerza la validez de los métodos empleados en su investigación y destaca el papel crucial de los surfactantes en la modificación de las propiedades interfaciales.

En conjunto, estos estudios no solo demuestran la diversidad de enfoques en la medición de ángulos de contacto, sino que también su importancia en la comprensión de las interacciones interfaciales en diversos materiales y sistemas. La variabilidad en los métodos utilizados, que van desde la técnica de burbuja cautiva hasta la penetración capilar, refleja la complejidad de las técnicas utilizadas y los posibles errores asociados a cada una de ellas. Además, las condiciones experimentales y las propiedades específicas de los materiales influyen significativamente en los resultados obtenidos.

4. Metodología

A continuación, se presenta la metodología experimental desarrollada para la determinación del grado de mojabilidad.

4.1 Materiales

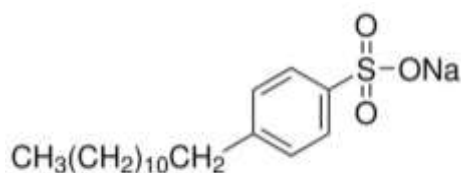
4.1.1 Surfactante

Se utiliza el dodecibenceno Sulfonato de Sodio (DBSS), el cual presenta un grupo cromóforo constituido de anillos bencénicos con un sistema de dobles enlaces conjugados (ver Figura 6). Este sistema permite que el DBSS absorba la luz ultravioleta (UV), con una longitud de máxima absorbancia en agua de aproximadamente 224nm. Esta propiedad es útil para cuantificar la concentración del DBSS en una solución mediante espectroscopia UV-Vis. Además, el DBSS

presenta una pureza del 99.9% y su fórmula química es $C_{18}H_{29}NaO_3S$, con un peso molecular (PM) de 348.48 g/mol, siendo fabricado por la empresa ALDRICH.

Figura 6.

Estructura molecular del Dodecil Benceno Sulfonato de Sodio.



Nota. Tomado de <https://www.sigmaaldrich.com/US/en/product/aldrich/289957>

4.1.2 Sustrato

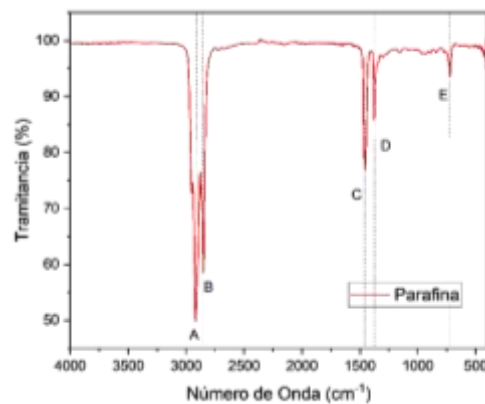
La bentonita es una arcilla del tipo montmorillonita con propiedades hidrofílicas. Sin embargo, al ser tratada con sales de amonio cuaternario se convierte en organofílica, lo que le permite exhibir fenómenos tixotrópicos con aplicaciones en diversas áreas de la industria como pinturas, detergentes, insecticidas. Además, esta arcilla tiene la capacidad de retener compuestos aniónicos, debido a su estructura, posee una gran capacidad de adsorción. La bentonita utilizada en el estudio, proveniente de Acofarma S.A., con una composición química de $As_2O_3 - 4SiO_2 - H_2O$, posee un área superficial de 65.259 m²/g (Londoño,2023).

4.1.3 Aceite

El aceite utilizado es un solvente parafínico con un rango de densidad de 0.8 a 0.9 g/cm³ a temperatura ambiente y una viscosidad que se sitúa entre 20 y 100 cP a 20 (Lynch, D. 2001). En el análisis espectral infrarrojo (ver Figura 7), se identifican varias bandas de absorción, cada una asociada a vibraciones particulares de los grupos funcionales, de los cuales destacan los picos C y D, explicados con detalle en el (Apéndice A).

Figura 7.

Infrarrojo de la Parafina



4.2 Procedimiento Experimental

4.2.1 Fase I. Evaluación de la relación sólido / líquido

Para desarrollar este proyecto de investigación, se establecieron dos tipos de suspensiones a utilizar: acuosas y oleosas. Esto permitió determinar la relación sólido/líquido más conveniente mediante pruebas reológicas realizadas con un reómetro Anton Paar MCR-302, con el fin de obtener suspensiones que cumplieran con desviaciones importantes a la Ley de Newton (Celis et al., 2014). Las fases acuosa y oleosa se prepararon de forma consecutiva.

Se elaboraron soluciones de agua destilada con bentonita y aceite con bentonita en diferentes concentraciones peso-volumen (10%, 8%, 6% y 4%). Cada cantidad de sustrato se vertió

en un balón aforado de 50 ml, debidamente etiquetado, y se añadió agua destilada o aceite según correspondiera para preparar la suspensión.

Posteriormente, las suspensiones se agitaron con un agitador centrífugo Faithful Magnetic Stirrer a 20 rpm durante 45 minutos, con el fin de asegurar una distribución uniforme en las muestras. Tras este proceso, las muestras se sometieron a análisis en el reómetro.

4.2.1.1 Caracterización reológica. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un reómetro Anton Paar MCR-302. Para el análisis, se utilizó el software RheoCompass de Anton Paar, configurando una celda cilíndrica coaxial con un diámetro de 28,934 mm y un gap (distancia entre platos) de 1,138 mm, además de una geometría Stirrer de Anton Paar con un diámetro de 24 mm. Las mediciones se realizaron a una temperatura constante de 26 °C, la cual se mantuvo regulada mediante un baño criostato - termostato Julabo F32.

4.2.1.1.1 Curva de viscosidad. En primer lugar, se dejó reposar la muestra durante dos minutos para asegurar que su temperatura se estabilizara. Posteriormente se llevó a cabo un barrido de tasa de corte que varió entre 100 y 0,1 s⁻¹ mediante una rampa logarítmica.

4.2.1.1.2 Barrido de amplitud. Se permitió un tiempo inicial para estabilizar la temperatura de la muestra. Luego, se realizó un barrido logarítmico en un rango de 0,01 % a 100% de deformación, manteniendo una frecuencia angular constante de 10 rad/s.

4.2.1.1.3 Curvas de tixotropía. Para evaluar las curvas de tixotropía, se llevó a cabo una prueba Oscilatoria – Rotacional – Oscilatoria (ORO). En primer lugar, se permitió que la muestra reposara antes de iniciar la medición. Se seleccionó la medición ORO que se dividió en tres partes: la primera parte consistió en medidas oscilatorias a deformación constante de 4% y frecuencia angular constante de 10 rad/s. La segunda parte fue rotacional, manteniendo la velocidad de cizalla

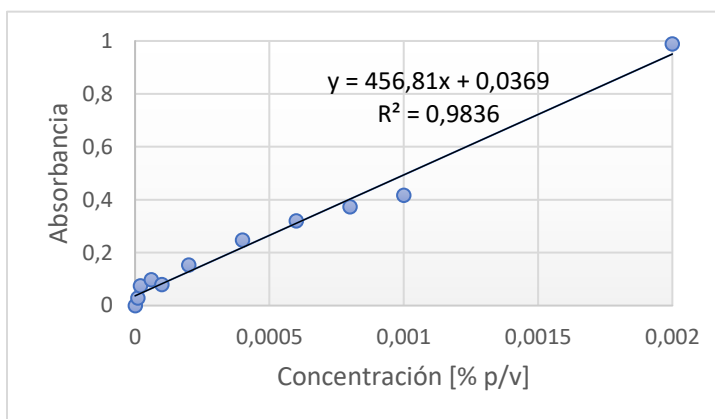
constante a 1000 s^{-1} . La tercera parte se mantuvieron las condiciones de la primera etapa oscilatoria (deformación y frecuencias constantes de 4% y 10 rad/s respectivamente).

4.2.2 Fase II.

4.2.1.1 Cuantificación de la concentración del surfactante en un medio acuoso. Se realizó un barrido de longitud de onda con espectrofotómetro UV- Vis MAPADA modelo 5, para determinar el máximo de absorbancia, cuya longitud de onda fue 224nm. Posteriormente, se llevaron a cabo mediciones de absorbancia para cada solución utilizando un espectrofotómetro UV-Vis, lo que permitió elaborar una curva de calibración (ver Figura 8).

Figura 8.

Curva de calibración



4.2.1.2 Determinación de la CMC. En esta fase, se midió la concentración micelar crítica (CMC), mediante el análisis de la tensión superficial. Se prepararon 15 muestras con diferentes concentraciones de surfactante, barriendo varios órdenes de magnitud. Estas muestras se analizaron utilizando un tensiómetro de gota colgante de Dataphysics modelo OCA 15EC.

Se registraron los valores de tensión superficial para cada concentración, lo que permitió graficar la tensión en función de la concentración del surfactante. A partir de esta gráfica, se determinó la CMC del surfactante utilizado.

4.2.1.3 Determinación de la isoterma de adsorción. En esta fase del estudio, se llevó a cabo la determinación de la isoterma de adsorción mediante la cuantificación de la cantidad de surfactante absorbido por el sólido, variando la concentración inicial del surfactante a temperatura constante de 25 °C. Para ello, se utilizó un tubo Falcón para preparar un sistema que combinaba la solución de surfactante y bentonita.

Se prepararon diferentes concentraciones de surfactante a partir de la concentración máxima, y estas soluciones se colocaron cuidadosamente en el tubo Falcón, junto con la bentonita. Las suspensiones se homogeneizaron en un roller (Bottle/Tube Roller Thermo Scientific, modelo 88881003) durante 16 horas.

Posteriormente, todas las suspensiones se centrifugaron en una centrifugadora de mesa Daihan Scientific, modelo Cef-50.6, a una velocidad de 3000 rpm durante una hora para separar el sólido de la solución. Finalmente, se extrajo el líquido sobrenadante para medir la concentración utilizando un espectrofotómetro UV/Vis.

4.2.1.4 Determinación de las curvas de viscosidad. Esta fase del proyecto se enfocó en medir las curvas de viscosidad y amplitud para evaluar los diferentes grados de hidrofobación del sólido. Para ello, se llevó a cabo un tratamiento a la bentonita mediante la preparación de cuatro sistemas, cada sistema acuoso se preparó usando la concentración de equilibrio calculada a partir de la isoterma de adsorción para cada recubrimiento del sólido.

Los sistemas fueron colocados en un Roller (Bottle/Tube Roller Thermo Scientific, modelo 88881003) y se dejaron reposar durante 16 horas para alcanzar el equilibrio. Posteriormente, se distribuyó el volumen total de la mezcla en tubos Falcon para centrifugarlos en una centrifugadora de mesa Daihan Scientific, modelo Cef-50.6, con el objetivo de separar la mayor cantidad de

líquido y obtener una cantidad óptima de bentonita sólida con distintos grados de recubrimiento. Cada sistema fue secado en un horno a 65 °C durante 40 horas.

Una vez completado el secado, se trituro la bentonita con un mortero hasta obtener un polvo fino. A continuación, se prepararon suspensiones acuosas con cada sólido preparado. Para garantizar que el sólido no cambie su recubrimiento. Además, se elaboraron suspensiones oleosas utilizando parafina como solvente. Los sistemas se caracterizaron mediante reometría, utilizando curvas de viscosidad y barridos de amplitud, de acuerdo con los parámetros descritos en la fase I del estudio.

4.2.3 Fase III. Determinación del ángulo de contacto.

En esta fase se llevó a cabo la determinación del ángulo de contacto en función del grado de hidrofobación del sólido. Se midió el ángulo de contacto utilizando un tensiómetro de gota colgante mediante la técnica de gota sénil. La fase continúa utilizada fue la parafina a 25°C. Para realizar la medición, se depositó una gota de agua sobre la superficie de la bentonita con diferentes grados de recubrimiento.

5. Resultados

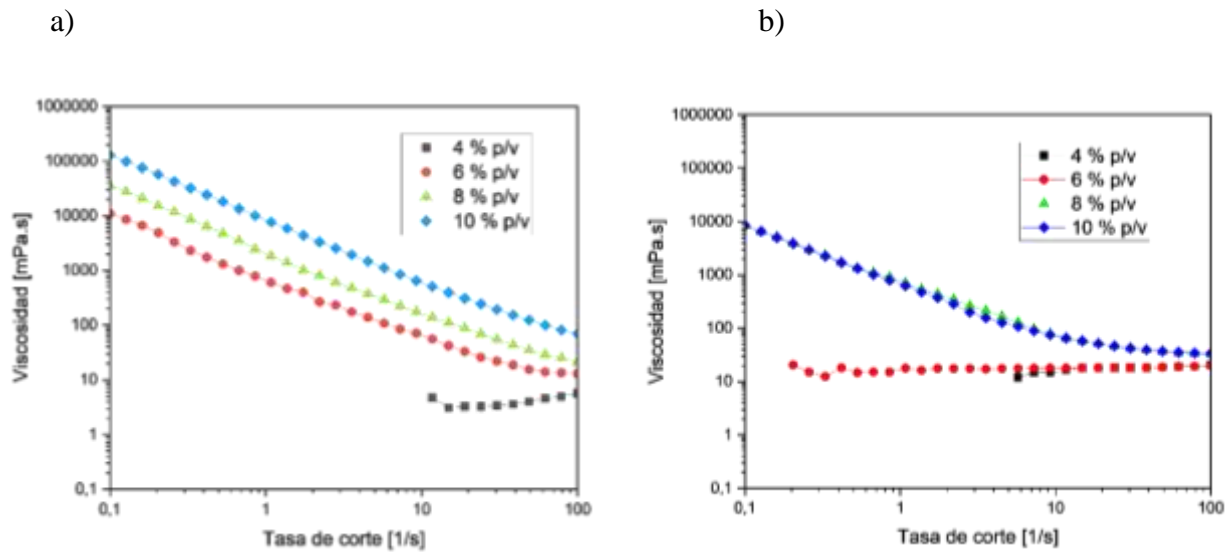
5.1 Determinación de concentración de sólidos de la suspensión

5.1.1 Curva de viscosidad en función de la tasa de cizallamiento

Se evaluaron cuatro dispersiones acuosas y cuatro dispersiones oleosas, cada una con diferentes concentraciones de sólido (bentonita): 4%, 6%, 8% y 10% p/v. Las curvas de viscosidad pueden observarse en la Figura 9.

Figura 9.

Viscosidad de las suspensiones en función de la tasa de corte a) Suspensiones fase acuosa y b) suspensiones fase oleosa.



Al estudiar la viscosidad en función de la tasa de corte (Figura 9), utilizando suspensiones con diferentes concentraciones de sólidos, se evidencia que, en fase acuosa, a medida que aumenta el contenido del sólido, la viscosidad incrementa (Figura 9^a). Además, se observa que la viscosidad de las suspensiones en esta fase disminuye al aumentar la velocidad de cizallamiento, lo que indica un comportamiento refluidizante. Este comportamiento es caracterizado por la reducción de la viscosidad conforme aumenta el cizallamiento. Desde un punto de vista físico, esto significa que la resistencia al flujo disminuye a medida que incrementa la velocidad de deformación, debido a la orientación de las heterogeneidades presentes en fluidos complejos, como dispersiones y emulsiones (Moreno Botella, 2005).

Por otro lado, en la fase oleosa, las curvas correspondientes a concentraciones de 4% p/v y 6% p/v exhiben un comportamiento netamente Newtoniano (Figura 9^b), ya que la viscosidad permanece constante independientemente de la tasa de corte aplicada. Sin embargo, nuevamente se presenta un comportamiento refluidizante para concentraciones de 8% y 10%, cuyas viscosidades presentan una diferencia despreciable.

5.1.2 Evaluación del comportamiento viscoelástico

En cuanto al barrido de amplitud, se puede observar en la Figura 10a, que a bajas deformaciones G' es mayor que G'' en las suspensiones acuosas con contenido de sólidos de 6% en adelante. Esto indica que el sistema es predominantemente elástico y puede almacenar energía. Conforme aumenta la deformación, el colapso de la red provoca una mayor disipación de energía (aumento de G''). El material ya no puede almacenar energía y se comporta de manera viscosa (Moreno Botella, 2005).

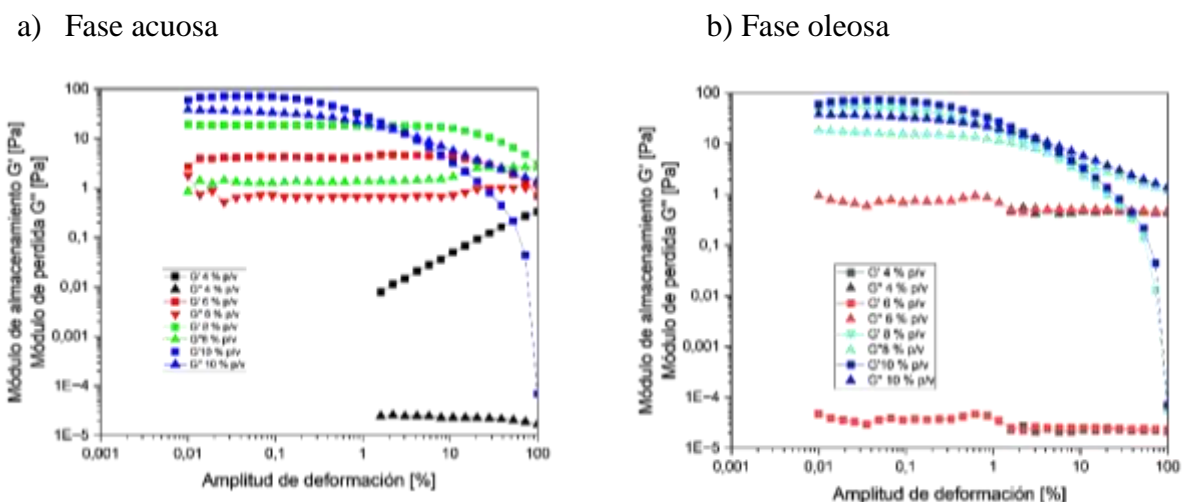
Para la fase acuosa (Figura 10a), se observa que, en la suspensión al 10% p/v, el módulo elástico es mayor que el módulo viscoso hasta alcanzar el 1% de deformación, momento en el que hay una disminución del componente elástico, asociado a la formación de microgrietas en la estructura de la suspensión. En las suspensiones acuosas, a partir de 6% de sólidos, a medida que la deformación aumenta, ambos módulos disminuyen a cierto valor de amplitud, generándose en cada sistema un valor de cruce entre ellos, en el cual el fluido empieza a comportarse de manera más viscosa que elástica. En la curva correspondiente al 4% p/v, el carácter elástico sigue predominando sobre el viscoso, este sistema es el que posee menos viscoelasticidad, pues los valores de los módulos son muy pequeños en comparación con los que tienen mayor contenido de sólidos. Esto coincide con la curva de viscosidad donde el comportamiento se observa que es Newtoniano (ver Figura 10a).

Respecto a la fase oleosa (Figura 10b), se presenta una similitud en la viscoelasticidad de 10 y 8 %p/v, donde el módulo elástico está por encima del módulo viscoso hasta llegar a una ruptura donde los módulos decaen y el carácter viscoso es mayor que el elástico. Para 6% y 4% el módulo de viscosidad es mayor que el módulo de elasticidad, obedeciendo a unas suspensiones menos estructuradas, debido a la menor concentración de partículas de bentonita estas están más

separadas, y las interacciones entre ellas (como las fuerzas cohesivas o las atracciones electrostáticas) son menores. Esto da como resultado que el sistema tenga menos capacidad para formar una red sólida, y el comportamiento viscoso predomina sobre el elástico. Con base a las curvas de viscosidad, a 4% no hay mayores desviaciones al comportamiento Newtoniano. Por esta razón se descarta la suspensión 4%.

Figura 10.

Barrido de amplitud a frecuencia angular constante para suspensiones en fase acuosa y fase



5.1.3 Evaluación del comportamiento Tixotrópico

La tixotropía describe la disminución gradual de la viscosidad de un fluido cuando se somete a una fuerza de cizallamiento constante durante un período determinado. Tras cesar la aplicación de dicha fuerza, el fluido recupera de manera parcial o total su estructura inicial. Para cuantificar el comportamiento reológico del sistema, se emplean pruebas que se dividen de tres intervalos. En primer lugar, se realiza un intervalo de reposo, durante el cual se evalúa la estructura inicial del fluido en condiciones de reposo, aplicando una fuerza de cizallamiento muy baja.

A continuación, se pasa al intervalo de carga, donde se aplica una fuerza de cizallamiento elevada y constante al fluido. Este proceso provoca la ruptura de la estructura interna del material y una disminución de viscosidad.

Por último, se lleva a cabo el intervalo de recuperación, en el que se elimina la fuerza de cizallamiento y se monitorea la recuperación gradual de la estructura del fluido a lo largo del tiempo, bajo las mismas condiciones iniciales del intervalo de reposo. (Anton Paar Wiki, s. f).

De esta manera las pruebas ORO (Osc-Rot-Osc) permiten determinar la rapidez con la que un fluido recupera su estructura original y caracterizar su comportamiento reológico. Los resultados se pueden observar en la Figura 11. Las suspensiones al 8% y 10% p/v exhiben un comportamiento reológico similar, tanto en la fase acuosa (Figura 11a) como en la oleosa (Figura 11b). Se observa una rápida recuperación de los módulos elástico y viscoso en ambos sistemas luego de interrumpir el cizallamiento rotacional. A modo de cuantificación, luego de los 300 s de recuperación, las suspensiones al 10% p/v muestran una recuperación aproximada del 46% en ambas fases, mientras que las suspensiones al 8% p/v presentan una recuperación del 29.35% en la fase acuosa y del 47.9% en la fase oleosa.

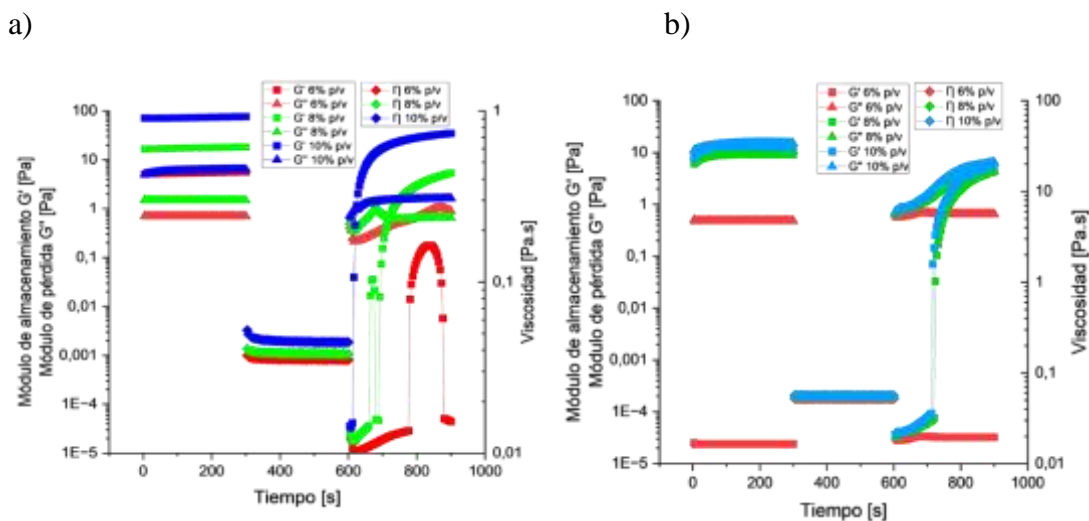
Finalmente, observando la suspensión de 6% que después de ser sometida a un esfuerzo de cizalla durante un tiempo prolongado, en fase acuosa no se logra recuperar, mientras que en fase oleosa sus módulos permanecen prácticamente igual, incluso en ambos intervalos a pesar del esfuerzo aplicado.

Considerando estos resultados, se optó por emplear la suspensión al 8% p/v para la preparación de las muestras de la fase 3. Esta elección se basa en la necesidad de una viscosidad adecuada sin llegar a valores excesivamente altos, como ocurre con la suspensión al 10% p/v.

Además, la suspensión al 8% resulta más fácil de preparar, manipular y requiere una menor cantidad de sólido.

Figura 11.

Barridos de tixotropía para suspensiones en a) fase acuosa y b) fase oleosa.

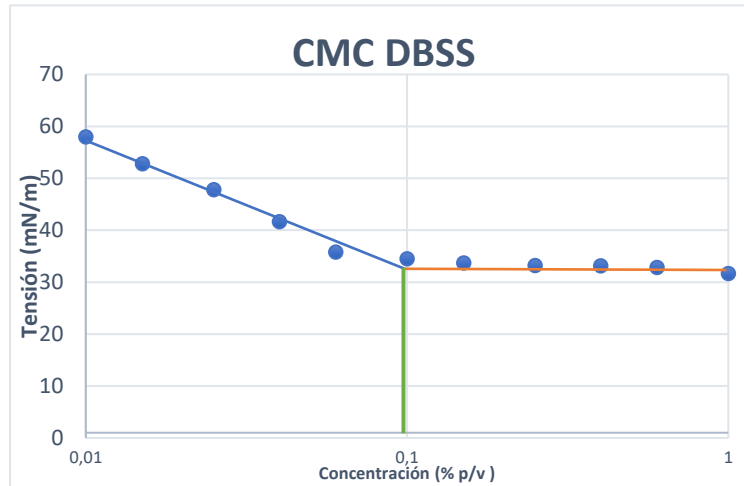


5.2 Estudio del efecto del grado de hidrofobación de la bentonita en el comportamiento reológico de las suspensiones

En primer lugar, se mide la concentración micelar crítica (CMC), ya que esta proporciona información de la concentración a partir de la cual los surfactantes forman micelas, lo cual influye en la forma como el surfactante se adsorbe en el sólido (ver Figura 12).

5.2.1 Cálculo de la CMC

La Figura 12, evidencia que el DodecilBenceno Sulfonato de Sodio (DBSS) alcanza su concentración micelar crítica (CMC) a 0,1% p/v. A partir de este punto, las moléculas de DBSS, en lugar de permanecer dispersas individualmente, se agrupan formando micelas. En estas estructuras, las colas hidrofóbicas se orientan hacia el interior, mientras que las cabezas hidrofílicas interactúan con el agua.

Figura 12.*Concentración Micelar Crítica*

Este comportamiento se alinea con el modelo de Gibbs, que relaciona la disminución de la tensión superficial con la adsorción de moléculas en la superficie. Inicialmente, al aumentar la concentración de DBSS, la tensión superficial disminuye debido a la adsorción de moléculas de surfactante en la superficie aire-agua. Sin embargo, al alcanzar la CMC, la formación de micelas consume las moléculas de surfactante disponibles para la adsorción, estabilizando la tensión superficial. Por encima de la CMC, la tensión superficial permanece prácticamente constante, ya que la superficie está saturada de moléculas y la mayoría se encuentran formando micelas.

5.2.2 Cálculo de la isoterma de adsorción

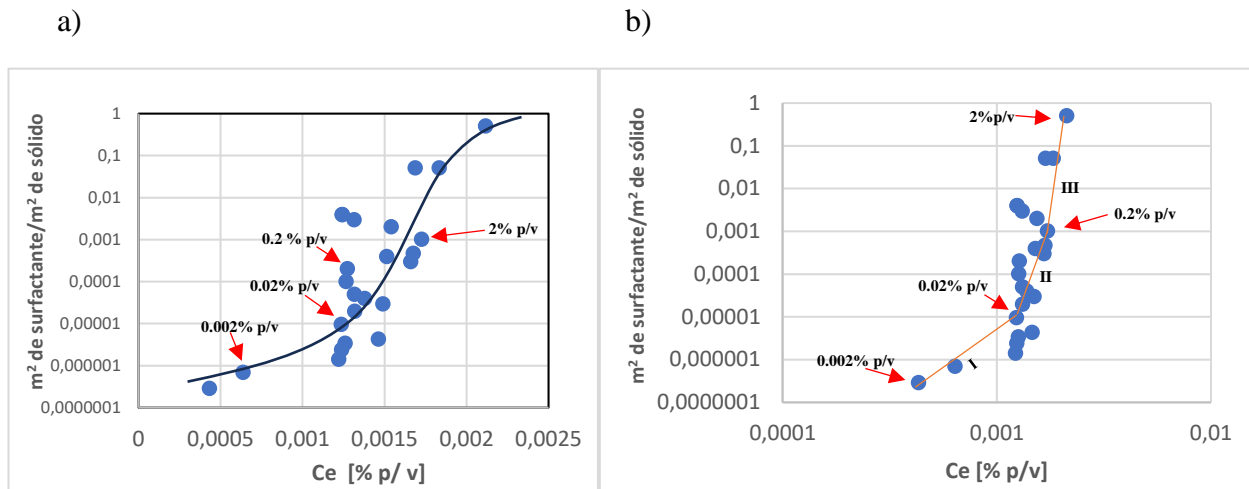
Se realizó la isoterma de adsorción cuantificando la cantidad adsorbida sobre el sólido variando la concentración inicial de surfactante a temperatura constante de 25° C. Esta etapa permite visualizar los diferentes niveles de recubrimiento que presentará el sólido, en función de la concentración usada de surfactante.

En la Figura 13, las isothermas se representan en escalas diferentes con la intención de ajustar al modelo de dos pasos (Figura 13a) o al modelo de las 4 regiones (Figura 13b). Al evaluar ambas figuras, se puede establecer que el comportamiento es más ajustado a un modelo de cuatro regiones. Se puede observar que, en la primera región, solo unas pocas moléculas se adsorben a la superficie de la bentonita. En la segunda, la adsorción aumenta considerablemente debido a la atracción entre las colas del surfactante, lo que provoca la formación de hemimicelas. Este proceso continúa hasta que la superficie del sólido se satura, momento en el cual se observa un cambio en la pendiente correspondiente a la tercera región. Después de esta zona, no se logra apreciar más regiones para esta isoterma, pero se espera que la curva se prolongue hasta la concentración micelar crítica (CMC), que se encuentra muy alejada debido a la gran capacidad de adsorción del sustrato en estudio, el cual posee un área superficial extremadamente grande (Zhang y Somasundaran, 2006). Es decir, con las concentraciones usadas en este estudio, no es posible observar la región 4, pero muy probablemente esta región se encuentre a partir de la CMC, donde es posible más adsorción de las moléculas de surfactante sobre la superficie de la bentonita.

Algunos autores indican que la adsorción de surfactantes en superficies sólidas para sistemas simples o con un solo surfactante pueden ser medidos a través del modelo de 4 regiones (Wesson y Harwell, 2000). Siguiendo la afirmación de estos estudios, es apropiado señalar que, para este análisis, los datos tienen mejor ajuste a la isoterma de adsorción que corresponde a este modelo.

Figura 13.

Isoterma de adsorción de DBSS en dos modelos, a) modelos de los dos pasos y b) modelo de las



Finalmente, se definen los diferentes niveles de recubrimiento que presentará el sólido (0.02, 0.02, 0.2, 2 % p/v) en función de la concentración de surfactante utilizada. Estas concentraciones están marcadas con una flecha roja en cada isoterma y se resumen en la Tabla 1, donde además se reporta el grado de recubrimiento obtenido a cada concentración. Es importante destacar, que no se pudieron seleccionar grados de recubrimientos mayores, por la imposibilidad de obtener la cantidad necesaria de sólido para las pruebas correspondientes. Esto se debe a la alta capacidad de adsorción de la bentonita.

Tabla 1.

Grado de recubrimiento y concentración al equilibrio del surfactante para la construcción de las isotermas de adsorción.

C inicial [%p/v]	Ce	Grado de recubrimiento [m² DBSS/ m² Bentonita]
0,002	0,00637196	6,900E-07

0,02	0,001234824	9,465E-06
0,2	0,001265471	1,006E-04
2	0,001725185	1,012E-03

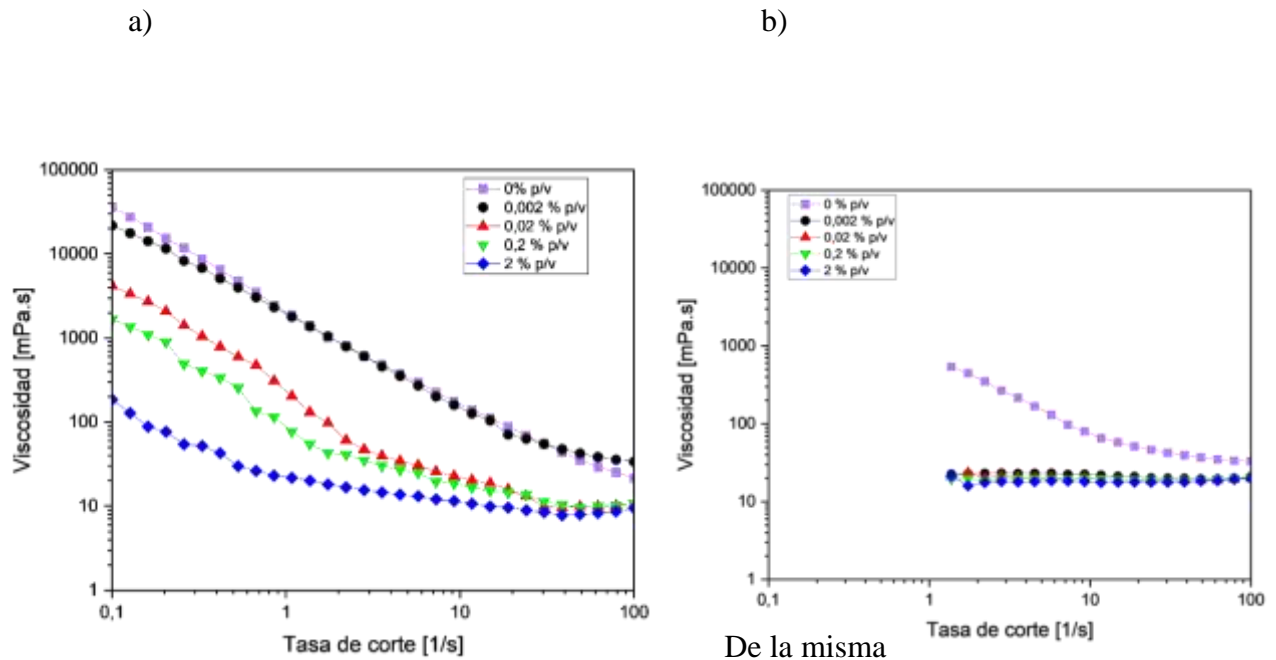
5.2.3 Influencia del grado de recubrimiento en el comportamiento reológico

En la figura 14a se presenta una tendencia muy clara de las suspensiones acuosas, que indica que, a mayor grado de recubrimiento, menor es la viscosidad, de manera que la suspensión con sólidos completamente hidrofílicos (sin DBSS adsorbido), tiene la mayor viscosidad. Sin embargo, es muy similar a la curva que corresponde a la concentración de 0.002% p/v. Este comportamiento se debe a que las partículas de bentonita presentan en la superficie una carga negativa, lo cual genera una fuerte repulsión electrostática entre ellas, aumentando significativamente la viscosidad del sistema. La adición de un surfactante, como el DBSS, inhibe esta repulsión. Al aumentar la concentración de surfactante, se incrementa el grado de recubrimiento y en consecuencia la lubricación interpartículas, debido a que las colas hidrofóbicas del surfactante van ocupando la superficie de las partículas, reduciendo las interacciones directas entre ellas. De este modo, las repulsiones electrostáticas se ven atenuadas, y las fuerzas de atracción entre las colas hidrofóbicas predominan. En consecuencia, se observa una disminución en la viscosidad (Moreno, 2005).

Este comportamiento se evidencia tanto en la fase acuosa como en la fase oleosa, aunque en esta última la diferencia en viscosidad es mucho menos pronunciada (ver Figura 14b).

Figura 14.

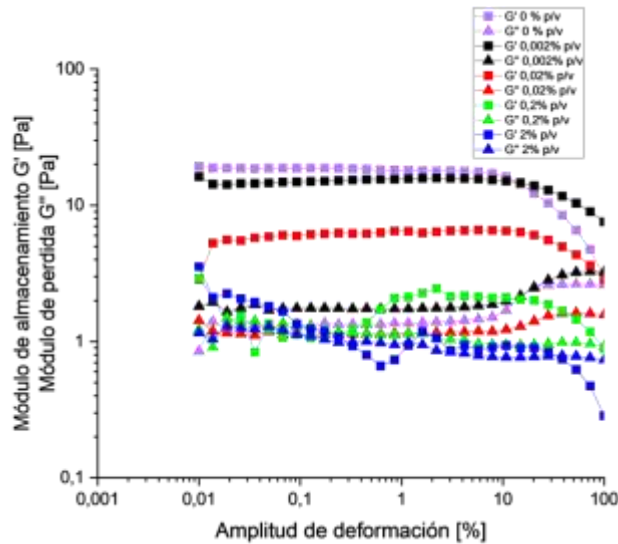
Viscosidad de las suspensiones en función de la tasa de corte a) Suspensiones fase acuosa y b) suspensiones fase oleosa



manera, se realizaron ensayos oscilatorios de barrido de amplitud a frecuencia constante (10 rad/s) a las mismas suspensiones acuosas. La Figura 15 se observa que, a menor grado de recubrimiento, hay un mayor grado de viscoelasticidad, especialmente el módulo elástico adquiere valores por encima de 10 Pa cuando las partículas son completamente hidrofílicas, generando un sistema estructura donde predominan las repulsiones electrostáticas. A medida que se incrementa el grado de recubrimiento, la elasticidad G' disminuye progresivamente, de manera que cuando la concentración es 0.02 y 0.2 %, la magnitud de los módulos viscoso y elástico están en el mismo orden de 1 Pa. Para estos dos sistemas, no solo ha disminuido la viscoelasticidad de las estructuras formadas, sino que el componente elástico ya no es mayor al componente viscoso (Moreno, 2005).

Figura 15.

Barrido de amplitud a frecuencia angular constante para suspensiones en fase acuosa



Con base a la caracterización reológica de las suspensiones, donde la bentonita tiene diferentes grados de recubrimiento, se puede afirmar que tanto la viscosidad como la respuesta elástica de las suspensiones dependen de la hidrofiliicidad del sólido. Mientras se aumenta la hidrofobación de la bentonita, las repulsiones electrostáticas interpartículas van disminuyendo, y esto consecuentemente se refleja en una curva de viscosidad menor, donde se pierde progresivamente el comportamiento reofluidizante. Por su parte, el efecto en la viscoelasticidad también es importante. Se puede afirmar que a medida que la hidrofobación del sólido aumenta, el componente elástico va disminuyendo. Estos resultados, responden a la pregunta de investigación de este trabajo, donde se puede confirmar que se puede determinar el grado de mojabilidad de un sólido particulado mediante ensayos reológicos (reometría). Para tratar de validar estos resultados, se hace un contraste con una metodología tradicional: el ángulo de contacto.

5.3 Ángulo de contacto

La determinación de la mojabilidad de un sólido por un líquido puede realizarse mediante mediciones del ángulo de contacto. Sin embargo, esta técnica es robusta y fiable si el sólido está

consolidado. Es decir, que se obtienen buenos resultados para mediciones en superficies sólidas sin rugosidad, perfectamente lisas (como una placa de metal, vidrio, etc.). En nuestro estudio, se hace una metodología donde se trata de ajustar esta condición, tal como se describe en el procedimiento (ver sección 4.2.3).

El ángulo de contacto se forma en la intersección entre la superficie de un sólido y la línea tangente a la superficie de un líquido en el punto de contacto. Este ángulo se utiliza tradicionalmente para medir la humectabilidad o capacidad de un líquido para esparcirse sobre una superficie sólida (mojabilidad) (Ortiz et al,2022).

La Tabla 2 revela una correlación directa entre la concentración de DBSS, el grado de recubrimiento de la superficie y el ángulo de contacto. A mayor concentración de surfactante, mayor es el ángulo de contacto. Es decir, que va disminuyendo la mojabilidad del sólido por la gota de agua. Este comportamiento es indicativo de que la adsorción del DBSS sobre la superficie de la bentonita induce un cambio en la naturaleza de la superficie, aumentando el grado de recubrimiento y disminuyendo progresivamente su hidrofiliidad. La formación de una capa de surfactante sobre la superficie sólida dificulta la interacción del líquido con el sólido, lo que se manifiesta en un aumento del ángulo de contacto. Sin embargo, en este estudio, no se logra hidrofobizar completamente la superficie de la bentonita, esto debido a su alta área superficial, lo que infiere a experimentar con una concentración mayor de DBSS para lograr un ángulo mayor a 90° con el objetivo de obtener una hidrofobicidad completa en el sólido. Es importante destacar, que se hicieron intentos usando concentraciones muy altas, pero, aun así, no se logró obtener la hidrofobación total del sólido, tal como se puede observar en la Figura 13b, donde no se observa la región 4 en la isoterma de adsorción.

Finalmente, al hacer una comparación entre los resultados reológicos y los resultados correspondientes al ángulo de contacto, se puede decir que, mientras se aumenta el recubrimiento del sólido por las moléculas de surfactante, la bentonita se va hidrofobando. Esto se puede verificar reológicamente, ya que la menor viscosidad de las suspensiones va disminuyendo igual que su elasticidad. Por otra parte, esto también se verifica mediante, el aumento del ángulo de contacto. Los cambios reológicos, son fácilmente perceptibles ya que nuestros sistemas ofrecen fuertes desviaciones a la ley de Newton, dado que se utilizó un contenido de sólidos de 8% p/v, caracterizado por su comportamiento reofluidizante y alta viscoelasticidad.

Tabla 2.

Ángulo de contacto para diferentes tipos de recubrimiento.

Concentración [%p/v]	Grado de recubrimiento [m ² DBSS/ m ² Bentonita]	Ángulo de contacto
0,002	6,900E-07	26,68
0,02	9,465E-06	38,07
0,2	1,006E-04	47,13
2	1,012E-03	58,63

6. Conclusiones

Las suspensiones con contenido de sólido correspondiente a 8% p/v y 10% p/v cumplen con un comportamiento reológico deseado, ya que exhiben altas desviaciones a la ley de Newton, alta elasticidad y su estructura se recupera rápidamente.

Esta investigación evidencia que el grado de hidrofobización de un sólido, como la bentonita, influye notablemente en el comportamiento reológico de las suspensiones. Al modificar

la superficie de las partículas mediante la adsorción de un surfactante, se observan cambios significativos en la viscosidad y elasticidad. A medida que aumenta la hidrofobicidad, disminuye la viscosidad, lo que se atribuye a la reducción de las repulsiones electrostáticas entre las partículas, favoreciendo la formación de agregados y facilitando el flujo. Por otro lado, el componente elástico de las suspensiones también se ve afectado. Al incrementar la hidrofobicidad, disminuye la elasticidad, debido a la reducción de las interacciones entre partículas y al debilitamiento de la red estructural de la suspensión.

La correlación entre los resultados reológicos y los obtenidos mediante el método del ángulo de contacto es evidente. Esto sugiere que los cambios en las propiedades reológicas de las suspensiones, como la disminución de la viscosidad y la elasticidad, son una consecuencia directa del aumento en la hidrofobicidad de la superficie de las partículas sólidas. La reometría al ofrecer una visión más profunda de las interacciones a nivel molecular y estructural dentro de las suspensiones, puede proporcionar información más detallada sobre el grado de hidrofobización que el simple ángulo de contacto.

7. Recomendaciones

Se recomienda hacer el mismo estudio con otros sólidos y otros surfactantes, para determinar si el método es aplicable a sistemas con características diferentes.

Se recomienda llevar a cabo ensayos con recubrimientos mayores de surfactante en la bentonita.

Referencias Bibliográficas

- Alghunaim, A., Kirdponpattara, S., & Newby, B. M. Z. (2016). Techniques for determining contact angle and wettability of powders. *Powder Technology*, 287, 201-215. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591015300917>
- Angarita, S., & Hincapié, V. (2023). *Evaluación del efecto del pH en la adsorción de un surfactante aniónico en sustratos arenosos en procesos de recobro químico*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/15231>
- Antón Para Wiki. (sf). *Investigación reológica de pinturas y recubrimientos*. <https://wiki.antón-pag.com/co-es/pr-bas-Delaware-reología/invertir-re-Delaware-pag-y-rec>
- Arias, M., Aguilar, M. A., Ramírez, M. E. & Quintana, D. (2020). El papel de la reología en la caracterización de fluidos: Análisis reológico de dispersiones de almidón de distintas fuentes. [Artículo Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional. Vol. 14, N°. 4, 2020, ISSN:1870-9095]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7840899>
- Ayala, W., Zabala, E. & Farel, N. (2021). Estudio de la varación de la tensión superficial de disoluciones de agua destilada con diferentes compuestos en tiempos de pandemia. *Revista boliviana de física* 38, 27-34, 2021 ISSN 1562- 3823. http://www.scielo.org.bo/pdf/rbf/v38n38/v38n38_a05.pdf
- Becerra, J.C (2006). Efecto de la materia orgánica y el manejo sobre la hidrofobicidad de suelos volcánicos. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 6(2). <https://doi.org/10.4067/s0718-27912006000200002>
- Celis, M. T., Forgiarini, A., Levy, P. R., & García-Rubio, L. H. (2014). Efecto de partículas nanométricas sobre las propiedades de suspensiones. *Ciencia e Ingeniería*, 36(1), 19-29. [Redalyc.Efecto de partículas nanométricas sobre las propiedades de suspensiones](https://redalyc.org/articulo.oa?id=1151/115100100001)
- Chau, T. T. (2009). A review of techniques for measurement of contact angles and their applicability on mineral surfaces. *Minerals engineering*, 22(3), 213-219. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687508001878>
- Gamboa, M. & López, A. (2024). Método experimental para la determinación de la mojabilidad en lienzos. [Actas del VIII Congreso de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología](https://doi.org/10.47300/actasidi-unicyt-2023-1), Panamá. <https://doi.org/10.47300/actasidi-unicyt-2023-1>
- Gibson, J., Lasorsa, C., & Hermida, É. B. (2008). *Modificación de la hidrofiliidad del biopolímero PHBV mediante tratamiento superficial con plasma*. *Anales de las Jornadas CONAMET-SAM*. [researchgate.net/profile/Elida-](https://www.researchgate.net/profile/Elida-)

- [Hermida/publication/266492357_MODIFICACION_DE_LA_HIDROFILICIDAD_DEL_BIOPOLIMERO_PHBV_MEDIANTE_TRATAMIENTO_SUPERFICIAL_CON_PLASMA/links/5448174b0cf2d62c3052a05b/MODIFICACION-DE-LA-HIDROFILICIDAD-DEL-BIOPOLIMERO-PHBV-MEDIANTE-TRATAMIENTO-SUPERFICIAL-CON-PLASMA.pdf](https://hermida/publication/266492357_MODIFICACION_DE_LA_HIDROFILICIDAD_DEL_BIOPOLIMERO_PHBV_MEDIANTE_TRATAMIENTO_SUPERFICIAL_CON_PLASMA/links/5448174b0cf2d62c3052a05b/MODIFICACION-DE-LA-HIDROFILICIDAD-DEL-BIOPOLIMERO-PHBV-MEDIANTE-TRATAMIENTO-SUPERFICIAL-CON-PLASMA.pdf)
- González, C. (2014). *Mojabilidad: medición del ángulo de contacto por el método de la gota cautiva*.
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/4017/2/Tesis.pdf>
- Hernández, M., & Robersy, C. (2012). *Evaluación de surfactantes como agente dispersante del Litecem en lechadas de cemento de baja densidad bajo las condiciones operacionales del Campo Tía Juana* (Doctoral dissertation). [tesis documento final Robersy Hernandez.pdf](https://tesis.documento.final.Robersy.Hernandez.pdf) (ucv.ve)
- Ishara, E. (2024). *Modificación de almidón de cañihua (Chenopodium pallidicaule) con anhídrido octenil succínico y evaluación de su función estabilizante de emulsiones*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina].
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/6574?show=full>
- Juárez Torres, J.A, Águila López, J., Ruiz Chávez, N. R, Herrera Pérez, J. L, & Sánchez Ramírez, J. F. (2022). Uso de Nanopartículas de Plata para el Desarrollo de Textiles Funcionales.
<https://rinfi.fi.mdp.edu.ar/handle/123456789/563>
- Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S., & Patil, S. (2021a). Surfactant Adsorption Isotherms: A Review. ACS <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>
- Lara, A.R, Gallardo, N. V., Paramo, U. & Martínez, R. D. Determinación electroquímica de la concentración micelar crítica de agentes tensoactivos con base imidazol EM-O14 A. R.[Artículo de libro, Sociedad Mexicana de Electroquímica].
<https://cathi.uacj.mx/bitstream/handle/20.500.11961/17987/Libro-de-Resumenes-SMEQ-2020-.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=80>
- Lynch, D. (2001). *Industrial Lubricants and Tribology*. CRC Press
- Londoño, K. (2024). *Evaluación experimental del uso de agregados sólidos como desestabilizadores de sistemas surfactante/aceite/agua derivados de procesos de inyección de surfactantes*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/15908>
- Marmur, A. (1992). Contact angle equilibrium: the intrinsic contact angle. *Journal of adhesion science and technology*, 6(6), 689-701. [Contact angle equilibrium: the intrinsic contact angle: Journal of Adhesion Science and Technology: Vol 6, No 6 \(tandfonline.com\)](https://doi.org/10.1080/10447869208839111)
- Möbius, D., Miller, R., & Fainerman, V. B. (2001). *Surfactants: chemistry, interfacial properties, applications*. Elsevier.

- https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=delDjh2AITUC&oi=fnd&pg=PP1&q=surfactants+chemistry+interfacial+properties,+applications&ots=_sw_-aO9pW&sig=0yQOHPddCWNfCwnQzex8oQ-BGM
- Monserrat Amat, M. (2017). *Hydro-mechanical behaviour of water-repellent gravels* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). [Hydro-mechanical behaviour of water-repellent gravels \(upc.edu\)](https://upc.edu)
- Moreira, C. (2021). Análise e aperfeiçoamento de viscosímetro rotacional de campo através da reologia de fluidos de perfuração. [Tesis de maestría, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro]. <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/53221/53221.PDF>
- Moreno Botella, R. (2005). *Reología de suspensiones cerámicas: (ed.) Editorial CSIC Consejo superior de Investigaciones Científicas.* <https://elibronet.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/ereader/uis/41577?page=87>
- Moreno, N. (2021). Aplicación de modelos de isotermas de adsorción y cinética de adsorción para la remoción selectiva de nitrógeno y fósforo de aguas residuales agrícolas. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstreams/808f6852-b37c-4181-9ea2-e65588a75584/download>
- Ortiz, L., Escudero, R., Rao, F. (2022). El ángulo de contacto y su relación con las propiedades superficiales en un sistema orgánico-líquido-gas. *Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, 2022, Vol. 79, Num. 595, pp. 224-230. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/397432>
- Popov, V. L. (2020). *Principios y aplicaciones de la mecánica de contacto en tribología, fricción y adherencia.* <https://doi.org/10.14198/pua.2020.meccon>
- Ramé, E. (1997). The interpretation of dynamic contact angles measured by the Wilhelmy plate method. *Journal of colloid and interface science*, 185(1), 245-251 [The Interpretation of Dynamic Contact Angles Measured by the Wilhelmy Plate Method - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002189959700051X)
- Ramos, F. (2020). Estudio del comportamiento reológico de la goma de celulosa, goma xantana y goma guar y sus interacciones en mezclas binarias y ternarias en disoluciones acuosas a diferentes condiciones del medio. [Tesis de maestría, Universidad nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/78486/1032437404.2020.pdf>
- Ramos, L., & Blas, G. (2003). *Estudio de la mojabilidad y ángulo de contacto en sistemas crudo sólido fluido* (Bachelor's thesis). <http://saber.ucv.ve/handle/10872/546>
- Salas, L. A., Castrejón E., Macías, R. & Ramírez, V. Determinación de la concentración micelar crítica mediante cambios en las energías potencial y cinética usando dinámica molecular.

- Revista Avances en ciencias e ingeniería*, 13 (3), 11-21, ISSN: 0718
<https://www.executivebs.org/publishing.cl/aci/2022/Vol13/Nro3/2-ACI-MX-06-full.pdf>
- Salager, J. L. (1993). Surfactantes en Solución Acuosa (#2). Laboratorio FIRP Escuela de INGENIERÍA QUÍMICA, UNIVERSIDAD de Los ANDES Mérida 5101 VENEZUELA.
- Santos, S. N. D., & Goncalves, D. (2016). Cambios en la mojabilidad en superficies de maderas tratadas térmicamente: Ángulo de contacto y energía libre superficial. *Maderas Ciencia y Tecnología, ahead*, 0. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2016005000035>
- Solano Pérez, J. J., Lima Santos, F., Alonso Velazquez, E., Rodríguez Lelis, J. M., & Tejero Andrade, J. M. (2009). *Tensiómetro digital para medir ángulos de contacto líquido-sólido*. En *Memorias del Congreso de la Sociedad Mexicana de Ingenieros Metalurgistas* (p. 42). http://somim.org.mx/memorias/memorias2009/pdfs/A3/A3_42.pdf
- Torres, M. (2022). ESTUDIO REOLÓGICO E IMPLEMENTACIÓN AUTOMÁTICA DE MIELES EN EMPRESA. [Tesis postgrado, Universidad europea de Madrid]. https://titula.universidadeuropea.com/bitstream/handle/20.500.12880/2083/tfg_TorresPriego_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Valentín, P. (2020). Principios y aplicaciones de la mecánica de contacto en tribología, fricción y adherencia. Libro de ciencias, Universitat D'alacant. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/108392>
- Moreno Botella, R. (2005). *Reología de suspensiones cerámicas*: (ed.). Editorial CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas. <https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/ereader/uis/41577?page=87>
- Wsson, L. & Harwell, J. (2000). Surfactant Adsorption in porous media. En L. Schramm, *Surfactants: Fundamental and applications in the Petroleum Industry* (págs. 12-158). Cambridge: Cambridge University Press.
- Zhang, R., & Somasundaran, P. (2006). Advances in adsorption of surfactants and their mixtures at solid/solution interfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 123-126, 213-229.
- Zhu, B.-Y., & Gu, T. (1991). Surfactant adsorption at solid-liquid interfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 37(1), 1-32. [https://doi.org/10.1016/0001-8686\(91\)80037-K](https://doi.org/10.1016/0001-8686(91)80037-K)

Apéndices

Apéndice A. Infrarrojo de la Parafina líquida utilizada

Banda A (~2950 - 2850 cm^{-1}). Corresponde a las vibraciones de estiramiento CH de alcanos, relacionada con grupos metileno ($-\text{CH}_2-$) y metilo ($-\text{CH}_3-$), típicos de hidrocarburos saturados como la parafina.

Banda B (~2900 cm^{-1}). Similar a la banda A, también se asocia con las vibraciones de estiramiento CH en grupos alquilo, generando intensas absorciones en hidrocarburos saturados.

Banda C (~1460 - 1470 cm^{-1}). Asociada a las vibraciones de flexión de los enlaces CH en los grupos metileno ($-\text{CH}_2-$), lo que indica la presencia de largas cadenas de hidrocarburos saturados.

Banda D (~1460 - 1470 cm^{-1}). Correspondiente a la vibración de flexión simétrica del grupo metilo ($-\text{CH}_3-$), lo que aparece en los extremos de las cadenas de parafina.

Banda E (~720 cm^{-1}). Relacionada con las vibraciones de balanceo de los enlaces CH en largas cadenas de hidrocarburos, indicando el comportamiento característico de los alcanos en la parafina.

Apéndice B. Cálculo de la isoterma de adsorción

La isoterma de adsorción fue construida bajo las condiciones experimentales descritas en la sección del procedimiento experimental. En la Tabla 3 se muestran los datos de concentración inicial de surfactante, así como la cantidad en miligramos de surfactante inicial. Así mismo se muestran los valores de concentración final y la cantidad en miligramos de surfactante adsorbido en el sustrato (bentonita). Para el cálculo de la concentración final de DBSS se usó la ecuación de

la recta obtenida en la curva de calibración de la absorbancia en función de la concentración del surfactante para el sistema evaluado, a continuación, se presentan las expresiones matemáticas para dicho cálculo.

$$y = 456,81x + 0,0369 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde y es la absorbancia y x es la concentración final (Cf), por lo tanto, la Ecuación 1 queda

$$Abs = 456.81Cf + 0.0369 \quad \text{Ecuación 2}$$

Despejando Cf de la ecuación 2 queda:

$$cf = \frac{Abs-0,0369}{456,81} \quad \text{Ecuación 3}$$

Tabla 3.

Resultados de adsorción por cada punto de concentración de DBSS inicial

Concentración inicial [%p/v]	Masa DBSS inicial (mg)	Absorbancia	Concentración final [%p/v]	Masa DBSS final (mg)	Masa DBSS Adsorbida (mg)
0,001	0,0001	0,234	0,000431419	4,31E-05	5,69E-05
0,002	0,0002	0,328	0,0006372	6,37E-05	1,36E-04
0,004	0,0004	0,594	0,0012195	1,22E-04	2,78E-04
0,006	0,0006	0,602	0,00123701	1,24E-04	4,76E-04
0,008	0,0008	0,612	0,0012589	1,26E-04	6,74E-04
0,01	0,001	0,705	0,00146249	1,46E-04	8,54E-04
0,02	0,002	0,601	0,00123482	1,24E-04	1,88E-03
0,04	0,004	0,639	0,00131801	1,32E-04	3,87E-03
0,06	0,006	0,717	0,00148876	1,49E-04	5,85E-03

0,08	0,008	0,666	0,00137712	1,38E-04	7,86E-03
0,1	0,01	0,638	0,00131582	1,32E-04	9,87E-03
0,2	0,02	0,615	0,00126547	1,27E-04	1,99E-02
0,4	0,04	0,618	0,00127204	1,27E-04	3,99E-02
0,6	0,06	0,795	0,00165951	1,66E-04	5,98E-02
0,8	0,08	0,728	0,00151284	1,51E-04	7,99E-02
1	0,1	0,802	0,00167484	1,68E-04	9,98E-02
2	0,2	0,825	0,00172519	1,73E-04	2,00E-01
4	0,4	0,74	0,00153911	1,54E-04	4,00E-01
6	0,6	0,637	0,00131363	1,31E-04	6,00E-01
8	0,8	0,604	0,00124139	1,24E-04	8,00E-01
10	1	0,612	0,0012589	1,26E-04	1,00E+00

Adicionalmente fue necesario convertir los miligramos de Surfactante a moles y hallar el exceso de concentración superficial, con el fin de obtener el cálculo del área por molécula en la interfase aire/agua de los surfactantes.

Para el cálculo del área por molécula en la interfase aire/agua se recurre calcular la respectiva gráfica de tensión superficial como una función del logaritmo neperiano de la concentración. Para ello, se calcula por medio de la ecuación de Gibbs, el exceso de concentración superficial, que para los surfactantes en solución es igual a la concentración de surfactante en la interfase.

La ecuación de Gibbs correspondiente es la siguiente:

$$(1) \quad \Gamma_i = \frac{1}{RT} \left[- \frac{\partial T}{\ln C} \right]$$

Donde:

$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \ln C} \right) =$ = Pendiente del gráfico tensión superficial (γ) en función del logaritmo de la

concentración a temperatura constante (antes de la CMC). Estas gráficas se presentan en el Apéndice B.

Γ_i = Exceso de concentración superficial en moles/cm²

R= Constante universal de los gases, 8.31*10⁷ ergs/mol*K

T= Temperatura en K.

Quedando de la siguiente manera:

$$T= 298,15 \text{ K} ; \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \ln C} \right) = -21,499; \Gamma_i = 8,68E-10 \text{ moles/cm}^2$$

Posteriormente, se hace el cociente entre los moles de surfactante adsorbido y el exceso de concentración superficial, para obtener el área por molécula de DBSS, cuyas unidades se convierten a m². El área superficial de la bentonita es 65,259 m²/g.

Tabla 4. Resultados del cálculo del área por molécula en la interfase aire/agua

moles de DBSS Adsorbido	Área por molécula de DBSS m ²	Masa bentonita (gramos)	m ² de bentonita	la m ² de DBSS/ de bentonita
-------------------------------	---	-------------------------------	-----------------------------------	---

1,632E-10	1,881E-05	1,0023	65,4091	2,876E-07
3,912E-10	4,508E-05	1,0012	65,3373	6,900E-07
7,982E-10	9,199E-05	1,0025	65,4221	1,406E-06
1,367E-09	1,576E-04	1,0082	65,7941	2,395E-06
1,935E-09	2,230E-04	1,0093	65,8659	3,386E-06
2,451E-09	2,824E-04	1,008	65,7811	4,294E-06
5,387E-09	6,208E-04	1,005	65,5853	9,465E-06
1,110E-08	1,280E-03	1,001	65,3243	1,959E-05
1,680E-08	1,936E-03	1,0025	65,4221	2,959E-05
2,257E-08	2,601E-03	1,0055	65,6179	3,964E-05
2,833E-08	3,265E-03	1,0045	65,5527	4,980E-05
5,705E-08	6,575E-03	1,0015	65,3569	1,006E-04
1,145E-07	1,319E-02	1,0013	65,3438	2,019E-04
1,718E-07	1,979E-02	1,0174	66,3945	2,981E-04
2,292E-07	2,642E-02	1,0221	66,7012	3,960E-04
2,866E-07	3,303E-02	1,0755	70,1861	4,706E-04
5,737E-07	6,611E-02	1,0009	65,3177	1,012E-03
1,148E-06	1,323E-01	1,0149	66,2314	1,997E-03
1,722E-06	1,985E-01	1,0196	66,5381	2,983E-03
2,296E-06	2,646E-01	1,0275	67,0536	3,946E-03
2,870E-06	3,308E-01	1,0794	70,4406	4,696E-03

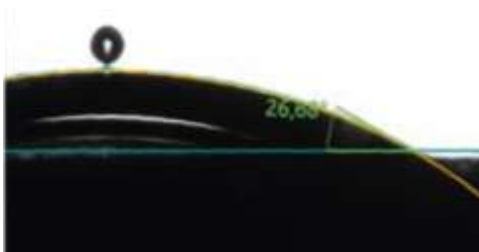
Finalmente se grafica m^2 de DBSS/ m^2 de bentonita en función de la concentración del equilibrio (Concentración final de DBSS), obteniendo así la isoterma de adsorción regida por el modelo de las 4 regiones.

Apéndice C. Ángulo de contacto con diferentes grados de recubrimiento 1. 0% p/v, 2. 0,002% p/v, 3. 0,02% p/v, 4. 0,2% p/v, 5. 2% p/v.

1.



2.



3.



4.



5.

