

Precipitación de asfaltenos como mecanismo de obtención de una superficie hidrófoba en aluminio

Asphaltenes precipitation as a mechanism to obtain a hydrophobic surface in aluminum

Laura Álvarez-Gil^{1a}, Patricia Fernández-Morales², Juan Ramírez-Patiño^{1b}

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
Orcid: ^a 0000-0001-8219-6366, ^b 0000-0002-3713-1712. Correos electrónicos: ^a lcalvarezg@unal.edu.co,
^b jframirp@unal.edu.co

²Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.
Orcid: 0000-0003-2344-1418. Correo electrónico: patricia.fernandez@upb.edu.co

Recibido: 4 abril 2018. Aceptado: 7 abril, 2019. Versión final: 22 julio, 2019.

Resumen

Este trabajo se enfocó en el desarrollo de un protocolo de alteración superficial para láminas de aluminio basada en la precipitación de asfaltenos, con miras al desarrollo futuro de aluminio celular tratado superficialmente para el tratamiento de agua contaminada con aceite. Se desarrollaron pruebas de rugosidad para garantizar homogeneidad de las muestras consideradas, se midieron ángulos de contacto al agua y al aceite pre- y postratamiento para evaluar variaciones en la afinidad superficial de las probetas, y se obtuvo que, si bien hay variaciones consistentes con el aumento de la hidrofobicidad de la superficie, estas no son significativas a la luz del diseño de experimentos planteado dentro de la metodología.

Palabras clave: espumas de aluminio; asfaltenos; energía libre superficial; polaridad; ángulo de contacto.

Abstract

This study was focused on the development of a surface alteration protocol for aluminum discs based on the asphaltene precipitation, to the future development of cellular aluminum treated superficially for the treatment of contaminated water with oil. Roughness tests were developed to guarantee homogeneity of the samples considered. Water and oil contact angles were measured before and after treatment to evaluate variations in the surface affinity of the specimens and it was found that, although there are variations consistent with the increase of the surface hydrophobicity, this is not significant inside the design of experiments proposed within the methodology.

Keywords: aluminum foam; asphaltene; surface free energy; polarity; contact angle.

1. Introducción

Los derrames de petróleo y sus derivados constituyen una de las principales causas de contaminación de fuentes hídricas. Para 2018, los derrames de hidrocarburos documentados alrededor del mundo fueron de 116.000 toneladas aproximadamente [1]. Dentro de las consecuencias del vertimiento no controlado de

hidrocarburos en cuerpos de agua, el American Petroleum Institute (API) ha establecido como representativos la reducción de la actividad fotosintética de las plantas, las alteraciones en los hábitos migratorios de las aves, la contaminación de la cadena alimentaria por ingestión y finalmente el compromiso de la apariencia del sitio de vertimiento [2].

Dentro de las herramientas consideradas como esenciales en la atención de este tipo de eventualidades están los *skimmer*, debido a su versatilidad [3]. La poca selectividad de fluidos hace necesario un proceso de separación secundario, lo que aumenta el tiempo requerido para la remoción de las manchas de aceite de la superficie del agua [4]. Otra forma es mediante el uso de fibras con afinidad preferente por el aceite [5]; sin embargo, las restricciones de capacidad debidas a la imposibilidad de reutilización plantean a su vez un desafío. Se hace necesario entonces plantear estrategias de mejora tanto desde los aspectos técnicos como logísticos. En ese sentido, los metales celulares se presentan como una gran oportunidad de desarrollar un elemento durable y selectivo, en la medida que genere afinidad preferente por el agente a remover.

El aluminio constituye uno de los materiales sobre los cuales se ha presentado un mayor desarrollo en la fabricación de espumas metálicas, debido a que es comparativamente más económico respecto a los demás metales de uso comercial y tecnológico [6]. Además, cuenta con un bajo punto de fusión (660 °C), lo que facilita su uso en procesos de infiltración de moldes solubles para la manufactura de espumas, obteniendo de este modo materiales celulares de bajo costo y alta homogeneidad [7].

En general, se puede afirmar que el grado de interacción que se presenta en la interfaz sólido-líquido está dominado por la energía libre superficial del sólido. Para el caso de los materiales metálicos, las propiedades superficiales influyen de manera directa en las tasas de corrosión y en la compatibilidad material/fluido [8].

La reducción de la energía libre superficial en sólidos puede darse por el pulido de la superficie, el uso de recubrimientos y pinturas, la aplicación de películas electrostáticas aislantes, entre otras; las cuales tienen restricciones asociadas a las dimensiones del área a tratar, a variaciones en el calibre del material y a la durabilidad efectiva del tratamiento [9]. Tales condicionantes han impulsado la investigación y desarrollo de nuevas técnicas que amplíen los rangos de aplicación y que a su vez minimicen los costos.

Por otra parte, los asfaltenos son hidrocarburos de alto peso molecular presentes en solución en el petróleo crudo y que se retienen durante su procesamiento, pasando a ser parte de los residuos del proceso de refinación. En su estructura, tal como se muestra en la figura 1, se encuentran sustituciones de átomos de carbono por heteroátomos, tales como oxígeno, nitrógeno, azufre y metales pesados, en los cuales la electronegatividad diferencial determina la existencia de enlaces polares

dispersos en el interior de la molécula [10]. Los focos de polaridad se adhieren a la superficie de los sólidos neutros por medio de interacciones atómicas débiles, y forman así una película, mientras que dejan expuestas sus terminales neutras disponibles para interactuar con el medio [11].

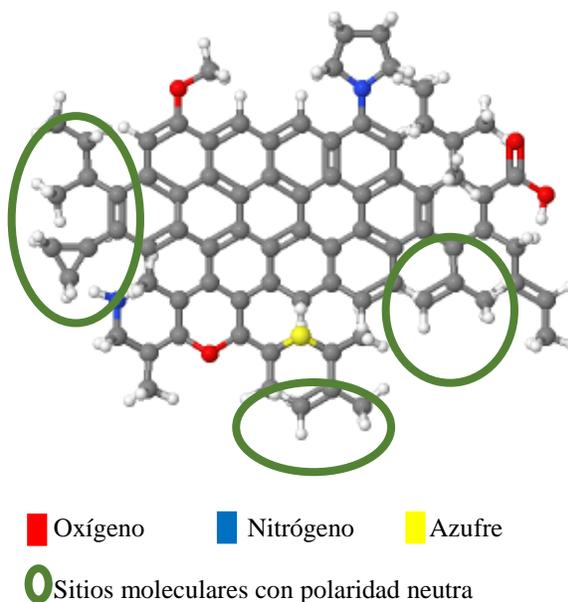


Figura 1. Molécula de asfalto. Fuente: JSME : a free molecule editor in JavaScript [12].

Las propiedades enunciadas anteriormente hacen de los asfaltenos una posible opción a la hora de generar recubrimientos que disminuyan la energía superficial en materiales sólidos [13], traducido a una menor interacción con el agua y la mejora de la mojabilidad al aceite de dicha superficie [9].

La variación de ángulo de contacto en superficies lisas proporciona un buen indicador de los cambios en energía libre superficial [9]. Es así que este trabajo plantea evaluar la efectividad de una modificación superficial con base en la aplicación de asfaltenos a discos planos de aluminio; esto, como un primer acercamiento a la definición de las condiciones requeridas para aplicar el tratamiento a espumas de aluminio con potencial uso en la contención de derrames de crudo.

2. Materiales y metodología

Se realizó un diseño de experimentos de un solo factor, para verificar el efecto de la concentración de residuo de destilación al vacío sobre el cambio total y la contracción del ángulo de contacto en las parejas de ensayos conformadas por discos de aluminio y agua; antes y

después de generar condiciones de precipitación de asfaltenos en la superficie de las probetas analizadas utilizando el método de medición de la gota sécil.

El diseño de experimentos constó de cuatro niveles para el factor considerado, definidos a partir de la revisión bibliográfica [14] asociada a la modificación superficial por precipitación de asfaltenos sobre la alúmina que compone la capa de pasivación de las probetas como se relaciona en la tabla 1.

Tabla 1. Niveles evaluados en el diseño de experimentos

Nivel	1	2	3	4
Concentración de residuo de destilación al vacío en la solución de tratamiento [VR] (%)	0	2	4	6

Fuente: elaboración propia

Para cada nivel fueron realizadas dos réplicas, para un total de 12 probetas analizadas.

Se trabajó con un nivel de significancia del 95 %, teniendo en cuenta la validación de hipótesis planteadas en las ecuaciones 1 y 2 a continuación:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 \quad H_A: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \quad (1)$$

$$H_0: \mu_{pre} = \mu_{post} \quad H_A: \mu_{pre} \neq \mu_{post} \quad (2)$$

Donde:

H_0 : Hipótesis nula

H_A : Hipótesis alterna

μ_1 : Media de resultados obtenidos para el nivel 1

μ_2 : Media de resultados obtenidos para el nivel 2

μ_3 : Media de resultados obtenidos para el nivel 3

μ_4 : Media de resultados obtenidos para el nivel 4

μ_{pre} : Media de resultados obtenidos pretratamiento

μ_{post} : Media de resultados obtenidos post tratamiento

Adicionalmente, fueron analizados otros parámetros tales como la contracción total del ángulo de contacto postratamiento y el cambio en el ángulo de contacto al aceite pre -postratamiento vs. concentración de residuo de destilación al vacío en la solución empleada en el tratamiento.

Sin embargo, se hace necesario un análisis previo que permita eliminar el ruido inducido por efecto de la morfología, a partir de la caracterización de los parámetros estándar de rugosidad.

La figura 2 presenta el diagrama general del proceso de obtención de especímenes, caracterización, aplicación

del tratamiento de alteración superficial y evaluación de la efectividad del tratamiento.

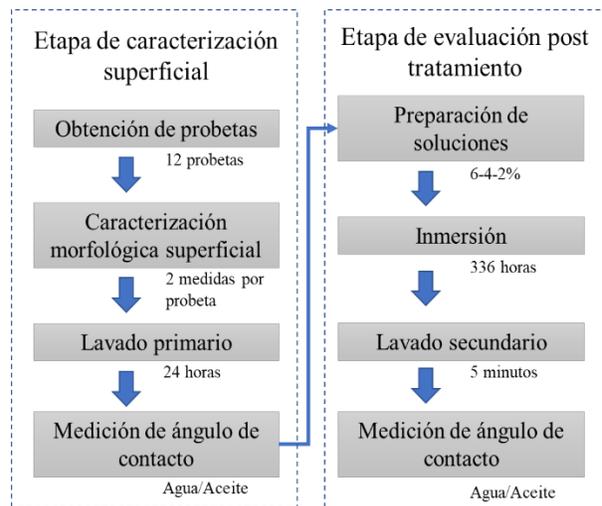


Figura 1. Metodología. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se detallan los pasos de la metodología experimental empleada en el proceso de aplicación y evaluación del tratamiento superficial por precipitación de asfaltenos en superficies de aluminio:

2.1 Obtención de especímenes

A partir de un perfil liso de aluminio se cortaron 12 discos de 40 mm de diámetro.

2.2 Caracterización morfológica de la superficie

Se determinaron los parámetros de desviación media aritmética del perfil (Ra) y el valor medio cuadrático de las desviaciones del perfil (Rq) en el rugosímetro *Mitutoyo Surftest SV-3000*. Se toma como valor estándar a caracterizar Ra por convención y, de manera complementaria, se estima el parámetro Rq , con el fin de priorizar las desviaciones individuales para las cuales es indiferente el parámetro Ra [15]. Para una distancia recorrida de 10 mm a razón de 1 mm/s en la dirección de mayor Ra (perpendicular a los patrones de acabado superficial) en la cara con diámetro menor y con dos lecturas por espécimen y un total de 2000 datos recopilados [16].

2.3 Lavado primario

Debido a la existencia de posibles residuos de lubricación derivados del maquinado o de sustancias oleaginosas derivadas de su manipulación, de manera individual, los especímenes fueron sumergidos en 30 mL de tolueno en

recipientes cerrados de manera hermética. La volatilidad propia del tolueno permite el secado espontáneo de las muestras; este proceso se llevó a cabo en un ambiente libre de humedad. Tanto el lavado como el secado tuvieron una duración de 24 horas y fueron realizados a 25 °C.

2.4 Medición de ángulos de contacto previa al tratamiento

Se utilizó el equipo *Dataphysics* modelo *OCA15EC*, que posee un sistema óptico, una unidad de dosificación automática y un *software* para medir el ángulo de contacto estático y dinámico. Para este experimento se trabajó a una temperatura de 25 °C con dosificación graduada a 0,5 $\mu\text{L/s}$. Previo a la medición de los ángulos de contacto, se rotularon las muestras, como se indica en la figura 3; inicialmente se tomaron los ángulos de contacto al agua destilada para todos los especímenes por la cara cuya rugosidad fue caracterizada y posteriormente al aceite mineral, garantizando la toma de medidas de ángulo de contacto al agua y al aceite en hemisferios opuestos de los discos.

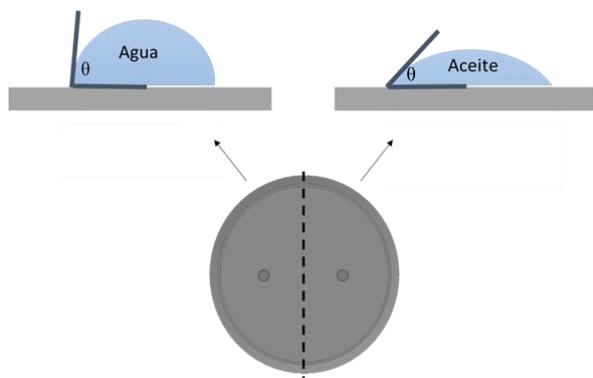


Figura 2. Esquema de medición de ángulo de contacto al agua y al aceite. Fuente: elaboración propia

2.5 Preparación de soluciones

Se definieron como concentraciones peso/peso de interés de residuo de destilación al vacío en tolueno de 0, 2, 4 y 6 % [13] [14]. Además, se consideró dos inmersiones adicionales en tolueno en ausencia de residuo de destilación al vacío como muestras de control.

A continuación, la tabla 2 presenta las cantidades empleadas en el proceso, partiendo de una solución con concentración de 6 % de residuo de destilación al vacío, que por disolución fue llevada a las concentraciones requeridas, para un total de 200 mL de solución por muestra.

Tabla 2. Cantidades empleadas en la preparación de las soluciones

Disolución	Partida	Cantidad soluto (g)	Cantidad solvente (g)
1	Residuo de destilación al vacío	61,23	958,63
2	Solución 6%	509,98	255,07
3	Solución 4%	510,02	255,01

Fuente: elaboración propia

Las cantidades se pesaron con una precisión mínima del $\pm 0,1\%$. Para la preparación de la primera solución (6 %), se pesó la totalidad de residuo de destilación al vacío. Posteriormente, el residuo de destilación al vacío se agregó al tolueno, se selló el recipiente para evitar la evaporación del solvente y se mantuvo agitación a 500 RPM en agitador magnético por 10 minutos, verificando la ausencia de sólidos. Para las soluciones con concentraciones del 2 % y 4 %, se pesó la cantidad de solución y solvente reportada en la tabla 2 y se siguió el procedimiento de mezcla enunciado anteriormente.

2.6 Inmersión

La precipitación de asfáltenos se debe principalmente a la tendencia de este tipo de sustancias a formar agregados de manera espontánea cuando su concentración supera 0,2 % peso/peso en soluciones con tolueno [10]. Para la adherencia a superficies de alúmina, la literatura reporta tiempos de inmersión de 336 horas [13], por lo que el tratamiento siguió dicho parámetro de aplicación, en recipientes ámbar cerrados y sellados, a condiciones de temperatura de 25 °C.

2.7 Lavado secundario

Se removieron los especímenes de la solución, de manera individual cada uno fue sumergido en tolueno 30 mL por cinco minutos, con el fin de eliminar el material que no presentara adherencia a la superficie, posteriormente se dejaron secar a 25 °C en ausencia de humedad.

2.8 Medición del ángulo de contacto postratamiento

Se siguieron los mismos parámetros establecidos para la evaluación de los ángulos con el pretratamiento.

3. Resultados y análisis

A continuación, se presentan los resultados derivados de las mediciones de rugosidad y de ángulo de contacto pre y postratamiento, conforme a la metodología enunciada en la figura 2.

3.1 Rugosidades

La tabla 3 presenta los resultados obtenidos de Ra y Rq para las muestras analizadas, siguiendo el protocolo de experimentación y análisis de datos detallado en la norma ISO 4287-1997 [16]:

Tabla 3. Registro de Ra y Rq por muestra

Muestra	Ra		Rq	
	1	2	1	2
1	0,886	1,033	1,134	1,361
2	0,945	0,883	1,173	1,125
3	0,837	0,871	1,083	1,092
4	0,936	1,068	1,127	1,364
5	0,848	0,881	1,091	1,118
6	0,932	0,896	1,168	1,122
7	1,046	1,082	1,566	1,530
8	1,007	1,177	1,291	1,563
9	1,218	1,270	1,657	1,680
10	1,187	1,028	1,674	1,289
11	0,851	0,791	1,111	1,014
12	0,839	0,867	1,092	1,209

Fuente: elaboración propia.

La tabla 4 presenta el valor promedio, desviación y varianza asociados a los parámetros superficiales evaluados:

Tabla 4. Análisis estadístico de los parámetros evaluados

Estimación	Ra (μm)	Rq (μm)	Pico (μm)	Valle (μm)
Promedio	0,974	1,276	5,155	7,493
Desviación	0,135	0,217	1,949	1,797
Varianza	0,017	0,045	3,641	3,097

Fuente: elaboración propia.

Los parámetros superficiales promedio, sumados al cálculo de su desviación estándar, permiten que el tratamiento de las muestras analizadas sea general, de tal manera que se considere la morfología superficial como factor de bloqueo en el diseño de experimentos planteado.

3.2 Medición de ángulos de contacto al agua pre y post tratamiento

La tabla 5 muestra para cada uno de los experimentos desarrollados: el número de muestra correspondiente codificado desde el análisis de rugosidad, el tratamiento realizado [%VR], ángulos de contacto al agua iniciales (instante cero de contacto) y finales (después de un periodo de estabilización de un segundo) pre y post tratamiento ($^{\circ}$), teniendo en cuenta un proceso de aleatorización en la ejecución de los experimentos:

Tabla 5. Orden de ejecución de mediciones de ángulos de contacto al agua pre- y postratamiento, inicial/final

Tto [%VR]	Ángulo al agua ($^{\circ}$)			
	Pre		Post	
	Inicial	Final	Inicial	Final
4	105,9	92,4	106,8	94,3
6	94,2	86,1	100,8	91
6	105,8	98,3	101	91,4
0	101,7	93,6	93,4	79,9
4	100,4	90,9	105,1	99,5
4	97,2	83,7	108,8	99,1
2	102,5	91,6	103,9	93,5
0	82,5	65,8	87,8	77,4
6	96,2	87,6	100,5	92,3
2	91,95	78,8	107,8	100
2	95,3	89,2	102,1	93,2
0	101,7	87,1	95,9	69,1

Fuente: elaboración propia

Para cada uno de los experimentos desarrollados se calculó la diferencia entre los ángulos finales pre y postratamiento; además, se consideró dentro del análisis la contracción del ángulo de contacto, calculada como la diferencia entre el ángulo inicial y final para el postratamiento, tal como se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Cálculo de parámetros de evaluación de efectividad de aplicación del tratamiento de alteración superficial

Muestra	Tto [%VR]	Cambio Total (°)	Contracción post tratamiento (°)
1	0	11,6	10,4
2	0	-18,0	26,8
3	0	-13,7	13,5
4	4	1,8	12,5
5	4	15,4	9,7
6	4	8,6	5,6
7	2	4,0	8,9
8	2	1,9	10,4
9	2	21,8	7,2
10	6	-6,9	9,6
11	6	4,7	8,2
12	6	4,9	9,8

Fuente: elaboración propia.

Las mediciones realizadas a la muestra 1 figuran como datos atípicos debido no solo a que están por fuera del intervalo de confianza definido inicialmente, sino al comportamiento contrario al resultado esperado y definido por las otras muestras destinadas a considerarse como control ([VR] 0%). Por esta razón dicho resultado no fue incluido en el análisis realizado.

A partir del cálculo de cambio de ángulos de contacto, se construyeron las curvas de cambio de ángulo de contacto y contracción total vs. concentración de residuo de destilación al vacío en la solución empleada en el tratamiento, mostradas en las figuras 4 y 5, respectivamente:

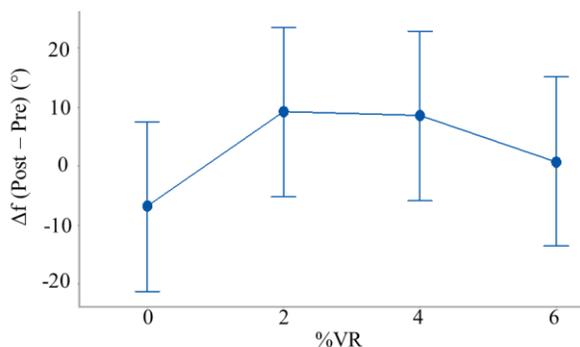


Figura 3. Cambio de ángulo de contacto vs. concentración de residuo de destilación al vacío [%VR]. Fuente: elaboración propia

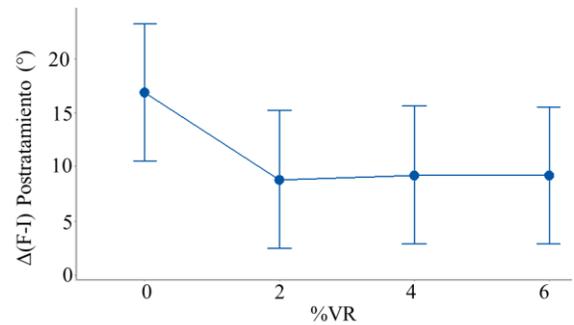


Figura 4. Contracción total del ángulo de contacto postratamiento vs. concentración de residuo de destilación al vacío [VR] en la solución empleada en el tratamiento. Fuente: elaboración propia

En la figura 4 se evidencia que posterior a la aplicación del tratamiento, en general se obtienen mejoras en la condición de hidrofobicidad para las concentraciones de residuo de destilación al vacío consideradas dentro del diseño de experimento. Específicamente, para el caso del 2 % de concentración de residuo de destilación al vacío en tolueno, se tienen los mejores resultados, tanto desde la evaluación de cambio del ángulo de contacto final pre- y postratamiento, como en la retrogresión del ángulo de contacto posterior al tratamiento. La evaluación de las probetas tratadas con la solución del 4 % de residuo de destilación al vacío proporcionan resultados similares a los obtenidos a concentraciones de 2 %. Sin embargo, para una concentración de 6 % se observan variaciones en el ángulo de contacto son cercanas a cero, lo que muestra que su efectividad para lograr afinidad superficial al agua es baja. El efecto de la concentración en el solvente sobre la estabilidad de los asfaltenos reportado en la literatura [10] [17] sugiere que en el intervalo evaluado se presenta un cambio de comportamiento en la interacción molecular para concentraciones por encima del 3 %, lo cual determinaría que la dinámica de la precipitación es diferente en los niveles evaluados (2 % vs. 4 % y 6 %), esto, teniendo en cuenta que la agregación en flóculos hace que dichas moléculas dejen de constituir un coloide estable. La pobre dispersión de los asfaltenos debida a la sobresaturación del solvente constituye uno de los principales motivos para no obtener una precipitación homogénea en las superficies de aluminio evaluadas, debido a la neutralización de cargas en el interior de los flóculos.

Este efecto de campana de Gauss probablemente se deba a una sobresaturación de la superficie, logrando que los puntos de polaridad inversa se neutralicen entre sí, anulando el efecto de repulsión a las moléculas cargadas.

En la figura 5 se observa que el promedio de la diferencia entre el ángulo medido al primer instante y al segundo uno de presentarse el contacto material/fluido es menor comparativamente para todos los tratamientos aplicados respecto a las muestras de control.

A pesar de los resultados obtenidos, el análisis del diseño de experimentos propuesto basado en la comparación de medias muestra que la diferencia entre los tratamientos aplicados no es estadísticamente significativa al nivel de confianza definido previamente, puesto que su Valor P en el ANOVA es de 0,299 y 0,191 para el cambio de ángulo de contacto y la contracción total del ángulo de contacto postratamiento, respectivamente, lo cual no da cumplimiento a las pruebas de hipótesis planteadas inicialmente (Valor $P < 0,05$).

3.3 Medición de ángulos de contacto al aceite pre- y postratamiento

En la tabla 7 se reporta el ángulo de contacto al aceite pre- y postratamiento para cada una de las muestras:

Tabla 7. Ángulo de contacto al aceite pre- y postratamiento

Muestra	Pre (°)	Post (°)
1	26,65	23,25
2	29,05	24,85
3	24,55	24,05
4	22,85	20,35
5	26,2	19,95
6	25,35	18,1
7	16,6	20,45
8	15,7	20,05
9	17,8	19,25
10	17,7	23,45
11	19,9	19,05
12	18,9	22,65

Fuente: elaboración propia.

Las medias de los ángulos de contacto pre y postratamiento fueron $21,77^\circ$ y $21,28^\circ$, respectivamente; lo cual muestra una disminución de $0,5^\circ$ aproximadamente en dicha media, consistente con los resultados obtenidos en la evaluación del tratamiento aplicado en términos de afinidad de la superficie por el agua. Sin embargo, al comparar las condiciones de afinidad superficial por el aceite pre y postratamiento a

luz de la dispersión de los datos, el Valor-P obtenido (0,743) muestra que el efecto de la aplicación del tratamiento sobre la afinidad superficial al aceite de las probetas evaluadas no tiene significancia estadística al nivel de confianza definido.

4. Conclusiones

A partir de los ángulos de contacto iniciales medidos tanto para el agua como para el aceite, se determinó que para las condiciones superficiales de las probetas analizadas, su afinidad preferente es al aceite, lo cual por sí solo constituye a los medios porosos fabricados en aluminio ser una excelente opción para su aplicación en el filtrado de emulsiones agua/aceite.

Si bien el análisis general de medias muestra que la aplicación del tratamiento mejora las condiciones de hidrofobicidad de las muestras para las concentraciones evaluadas, del análisis de varianza se concluye que dicha condición no tiene significancia estadística debido a la dispersión de los datos para las muestras tratadas.

Aunque se tiene, en general, un aumento en la medida del ángulo de contacto al agua para las probetas tratadas con asfaltenos, la condición alcanzada de hidrofobicidad no es suficiente para considerar el tratamiento como pertinente en la funcionalización de espumas de aluminio para su uso en la contención de derrames de crudo. De ese modo, las medidas de ángulo de contacto al aceite pre y postratamiento permiten validar que se conserva la condición de afinidad preferente por el aceite en los discos de aluminio evaluados.

Referencias

- [1] ITOFP, "Oil Tanker Spill Statistics 2018," London, 2019.
- [2] IPIECA, Energy API, and International Association of Oil & Gas Producers, "Guidelines on implementing spill impact mitigation assessment (SIMA)," 2017.
- [3] ITOFP, "Uso de skimmers en la respuesta a la contaminación por hidrocarburos," *Doc. Inf. técnica*, vol. 5, pp. 1–16, 2011.
- [4] S. Yavari, A. Malakahmad, and N. B. Sapari, "A Review on Phytoremediation of Crude Oil Spills," *Water, Air, Soil Pollut.*, vol. 226, no. 8, p. 279, 2015. doi: 10.1007/s11270-015-2550-z.
- [5] V. Broje and A. A. Keller, "Optimization of Oleophilic Skimmer Recovery Surface: Field Testing at

Ohmsett Facility. Final Report Acknowledgements,” Santa Barbara, 2006.

[6] M. Barrientos and C. Soria, “Índice de precios de metales - Precio Mensual - Índice,” *Index Mundi*, 2019. [Online]. Available: <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=indice-de-precios-de-metales>. [Accessed: 11-Julio-2019].

[7] A. Calle Fernández, “Estudio de Comportamiento Mecánico de las Espumas Pulvimetalurgicas de Aluminio,” Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, 2012.

[8] T. Rezayi, M. H. Entezari, and F. Moosavi, “The variation of surface free energy of Al during superhydrophobicity processing,” *Chem. Eng. J.*, vol. 322, pp. 181–187, 2017. doi: 10.1016/j.cej.2017.04.023.

[9] N. J. Shirtcliffe, G. McHale, S. Atherton, and M. I. Newton, “An introduction to superhydrophobicity,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 161, no. 1, pp. 124–138, 2010. doi: 10.1016/j.cis.2009.11.001.

[10] K. Akbarzadeh Ahmed Hammami Abdel Kharrat Dan Zhang Edmonton *et al.*, “Los asfaltenos: Problemáticos pero ricos en potencial,” 2007.

[11] M. D. Lobato, F. Gámez, S. Lago, and J. M. Pedrosa, “The influence of the polarity of fractionated asphaltenes on their Langmuir-film properties,” *Fuel*, vol. 200, pp. 162–170, 2017. doi: 10.1016/j.fuel.2017.03.059.

[12] B. Bienfait and P. Ertl, “JSME: a free molecule editor in JavaScript,” *J. Cheminform.*, vol. 5, no. 1, p. 24, 2013. doi:10.1186/1758-2946-5-24.

[13] C. A. Franco, N. N. Nassar, and F. B. Cortés, “Removal of oil from oil-in-saltwater emulsions by adsorption onto nano-alumina functionalized with petroleum vacuum residue,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 433, pp. 58–67, 2014. doi: 10.1016/j.jcis.2014.07.011.

[14] C. A. Franco, F. B. Cortés, and N. N. Nassar, “Adsorptive removal of oil spill from oil-in-fresh water emulsions by hydrophobic alumina nanoparticles functionalized with petroleum vacuum residue,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 425, pp. 168–177, 2014. doi: 10.1016/j.jcis.2014.03.051.

[15] M. Moro Piñeiro, *Metrología: introducción, conceptos e instrumentos*. Universidad de Oviedo, 2012.

[16] ISO, “Softgauge Basic Framework ISO 4287-1997,” 1997.

[17] J. G. Delgado, “Cuaderno FIRP S369-A Asfaltenos composición, agregación, precipitación,” Mérida, 2006.