

Estudio *in situ* de la evolución del comportamiento reológico de una espuma modelo para la estimulación hidráulica de yacimientos

Germania Guadalupe Mancheno-Padilla, Esteban Francisco Medina-Bañuelos, Benjamín Marcos Marín-Santibáñez

Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional, Av. Instituto Politécnico Nacional, Lindavista, Gustavo A. Madero, 07700 Ciudad de México, CDMX
bmarin@ipn.mx

Resumen

Las espumas son sistemas multifásicos compuestos de una fase gaseosa (entre 55 y 95 %) dispersa en dominios discretos (burbujas) a través de una fase continua acuosa. Estos sistemas aparecen tanto en la vida cotidiana como en procesos industriales. Nos encontramos con espumas al lavar nuestros trastes y ropas, cuando nos duchamos y también aparecen como fijadores para el cabello o productos de afeitar. También se usan en la extinción de incendios. Recientemente, las espumas se están utilizando como fluidos de estimulación hidráulica de yacimientos, debido principalmente a dos atractivas ventajas: son amigables con el medio ambiente, ya que reducen enormemente el consumo de agua durante el proceso de recuperación de hidrocarburos, y poseen un comportamiento reológico favorable, es decir que tienen esfuerzo de cedencia, conocido en la industria como

“*yield point*”, y viscosidades relativamente altas. Estas características reológicas resultan en el transporte óptimo del apuntalante que permite mantener abierta la fractura o red de fracturas creada a través de la formación productora, el apuntalante impide el colapso de las fracturas, favoreciendo la recuperación de los hidrocarburos. Sin embargo, el comportamiento reológico de las espumas (gas-líquido), incluidas las de fractura, es complejo y evoluciona en el tiempo debido a la coalescencia de las burbujas inducida por el drenado de la fase líquida. Esto dificulta su caracterización reológica y el entendimiento de su comportamiento durante el flujo. Por lo anterior, en este trabajo se estudió el comportamiento reológico de una espuma modelo como fluido de estimulación hidráulica y se presenta una metodología confiable para investigar su comportamiento reológico *in situ* como función del tiempo.

Palabras clave

Reometría, espumas de estimulación hidráulica, fluidos viscoplásticos, geometrías de flujo fractales

Introducción

El fracturamiento hidráulico, conocido también como estimulación hidráulica, es un proceso que involucra la inyección presurizada de un fluido con el fin de crear una red de fracturas entre el pozo y la formación productora, a través de la cual se movilizan los fluidos de la formación (crudo y/o gas) al pozo, para de esta manera aumentar o mantener su índice de productividad. Desde 1949, aproximadamente 2.5 millones de yacimientos de hidrocarburos con porosidad y permeabilidad baja, es decir, yacimientos no convencionales, se han fracturado hidráulicamente a nivel mundial para la recuperación de gas y crudo. En el 2011, la empresa Petróleos Mexicanos comenzó esta labor fracturando el yacimiento Eagle Ford en la frontera México-Estados Unidos [1-4], específicamente al sur del estado de Texas. El Eagle Ford es un yacimiento no convencional activo considerado uno de los más productivos del mundo, el cual coloca a México entre los 10 países a nivel mundial con reservas que pueden ser recuperadas [1]. Hasta el año 2020, en México se registraron 27 perforaciones por fracturamiento hidráulico para la producción de crudo y gas presentes en yacimientos no convencionales [1].

Dadas las necesidades energéticas y los diferentes tipos de yacimientos existentes, se han desarrollado diferentes fluidos fracturantes para la extracción o producción de hidrocarburos. Los fluidos que se han formulado se clasifican en sistemas base agua, base ácida y base alcohol, así

como emulsiones y espumas. Los fluidos de fractura base agua, específicamente geles poliméricos, son de los más utilizados. No obstante, la aplicación de este tipo de fluidos conduce al hinchamiento de las arcillas y al entrapamiento de agua causado por las fuerzas capilares, lo cual afecta o incluso llega a impedir la producción. Además, la estimulación hidráulica realizada con fluidos base agua requiere de grandes cantidades de agua y de procesos de tratamiento costosos del agua recuperada [5]. En este sentido, las espumas de estimulación hidráulica ofrecen algunas ventajas sobre los fluidos base agua, son amigables con el medio ambiente, debido a que el consumo de agua se reduce hasta en un 80 % en comparación con los fluidos base agua y poseen un comportamiento reológico apropiado, es decir, tienen un esfuerzo de cedencia o *yield point* y viscosidades relativamente altas [6], lo cual es deseable para el transporte efectivo del apuntalante dentro de la red de fracturas. Más aún, el uso de las espumas de fractura puede resultar en una rápida limpieza del pozo y en un mejor control de goteo. Por estas razones, las espumas de fractura son consideradas como fluidos potenciales para la extracción de recursos localizados en yacimientos no convencionales. Por lo tanto, el estudio del comportamiento reológico de las espumas para fracturamiento es relevante para el diseño del proceso de estimulación hidráulica, puesto que variables de proceso como caídas de presión en tuberías, presión de bombeo y cantidad de apuntalante transportado efectivamente son influidas por su viscosidad. No obstante, el comportamiento reológico de las espumas es complejo y cambia con el tiempo [7], debido a la coalescencia de las burbujas causada por el drenado constante de la fase líquida, dificultando su caracterización reo-

lógica y el entendimiento de su comportamiento durante el flujo. Aunado a lo anterior, se ha reportado que en flujo cortante, este tipo de fluidos exhiben deslizamiento [8-10], lo cual también influye en la determinación del esfuerzo de cedencia y su viscosidad. Así, en este trabajo se estudia el comportamiento en flujo de una espuma modelo como fluido de estimulación hidráulica y se describe una metodología confiable para estimar sus propiedades reológicas en el tiempo mediante mediciones reológicas *in situ*, usando una geometría de propela de sección transversal fractal recientemente propuesta por Owens *et al.* [11] y validada por Medina-Bañuelos *et al.* [10] para el estudio de fluidos cuya estructura es sensible a la inserción de geometrías de flujo estándar, como las geometrías de flujo de cilindros concéntricos o de Couette.

Metodología

En este trabajo se generó una espuma modelo al 80 % de calidad usando aire comprimido seco y limpio (filtro de 0.01 μm , BEKO Technologies) como la fase gaseosa y agua desionizada grado reactivo (MEYER) como la fase acuosa. El tensoactivo aniónico alfa olefina sulfonato de sodio, AOS (HJB Química Internacional S.A. de C.V.) se utilizó

como agente espumante, mientras que la oleil (OL-30) betaína (Lubrizol) se usó como agente estabilizante. Se prepararon 200 ml de una solución acuosa de AOS con OL-30 betaína, ambos al 2 % p/p. La generación de la espuma al 80 % de calidad, etiquetada como AOS-OL30b, se llevó a cabo en una columna de vidrio de borosilicato con altura de 61 cm y un diámetro interno de 34 mm, dispuesta con un plato difusor de vidrio de porosidad media (10-20 μm) en la base (ver figura 1a). Se colocaron 63 ml de la solución en la columna y se inyectó aire con un gasto de 0.05 l/min a una presión de 1 bar. El gasto volumétrico y la presión se controlaron usando un medidor de flujo y un manómetro (ver figura 1a). El análisis de estabilidad de la espuma, es decir, el monitoreo de la altura de la espuma y del líquido de drenado en el tiempo, se realizó mediante la captura de imágenes usando una cámara CMOS de 10 megapíxeles (Net GmbH) y su posterior análisis con un algoritmo de MatLab. Por otro lado, el estudio de la reología de la espuma modelo se llevó a cabo empleando un reómetro rotacional (MCR302, Anton-Paar), al cual se acoplaron una geometría de propela fractal y una copa ranurada (ver figura 1b), ambas impresas en 3D mediante estereolitografía láser en el

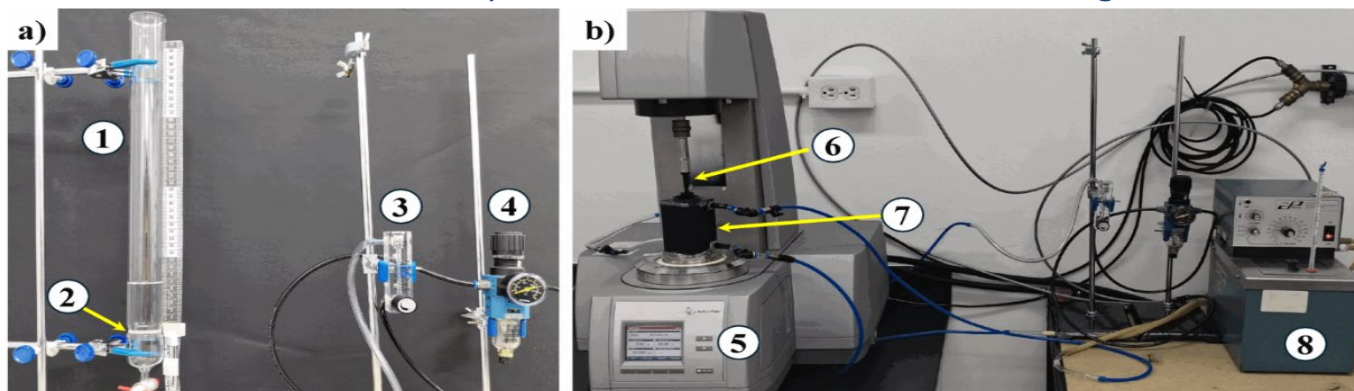


Figura 1. 1. a) Sistema de espumado y b) su acoplamiento a una copa ranurada y al reómetro para caracterización reológica *in situ* de espumas. 1- columna de vidrio, 2- plato difusor de porosidad media, 3- medidor de flujo, 4- manómetro, 5- reómetro rotacional de esfuerzo y rapidez de corte controlados, 6- geometría de propela fractal, 7- copa ranurada y 8- recirculador para control de temperatura.

Laboratorio de Reología de la ESIQIE-IPN. La generación de la espuma en la copa ranurada se llevó a cabo a las mismas condiciones que el espumado en la columna de vidrio, con la geometría fractal ya localizada en la posición de medición para realizar pruebas reológicas *in situ* (figura 1b). Así, se construyeron siete curvas de flujo controlando la rapidez de corte de 0.1 a 50 s⁻¹ para cada muestra. Una vez terminada la primera curva de flujo, la muestra se dejaba en reposo por 1 min dentro de la copa sin retirar la geometría fractal, enseguida se iniciaba la rampa de rapidez de corte para obtener una segunda curva de flujo, y así sucesivamente hasta completar las siete curvas para estudiar el comportamiento reológico de la espuma con el tiempo. Todos los experimentos se realizaron con muestras frescas a una temperatura de 25±1 °C, la cual se controló utilizando un recirculador de agua (ver figura 1b).

Teoría del flujo de geometrías fractales en copa

Owens *et al.* [11] propusieron una ecuación para el cálculo del esfuerzo de corte alrededor de una propela fractal, σ_w , con base en estudios previos de Sheerwood y Meeten [12] y de Atkinson y Sherwood [13], quienes a su vez analizaron la influencia del número de brazos N en la precisión del cálculo de σ_w , a partir de la torca M , mediante análisis teóricos en 2D y simulaciones en 3D. Las ecuaciones propuestas por Sherwood y Meeten [12] y Atkinson y Sherwood [13] fueron combinadas y optimizadas por Owens *et al.* [11] usando datos reométricos obtenidos con siliconas oleosas y un fluido con esfuerzo de cedencia simple, para construir la siguiente expresión y convertir datos de torca a esfuerzo de corte en la pared:

$$\sigma_w = \frac{M}{2\pi R_v^2 L \left[\left(1 - \frac{1.113}{N} \right) + \frac{R_v}{4L} \left(2.75 - \frac{3}{\sqrt{N}} \right) \right]}$$

Para el cálculo de la rapidez de corte, $\dot{\gamma}$, de la espuma en el borde de la propela fractal, se usó la expresión desarrollada por Nguyen y Boger [14], la cual está dada por la siguiente expresión:

$$\dot{\gamma} = \frac{2\Omega}{(d \log M / d \log \Omega)}$$

En la ecuación anterior, Ω representa la velocidad angular de la propela fractal.

Resultados

Las alturas normalizadas de la espuma, H_e/H_{0e} , y del líquido de drenado, H_l/H_{0l} , se muestran en las figuras 2a-b como función del tiempo, respectivamente. En la figura 2a se observa que la altura de la espuma AOS-OL30b cae el 40 % de la inicial a los 20 min, en tal período se drena más del 97 % del líquido (ver figura 2b). De acuerdo con lo reportado por Lunkenheimer y Malysa [15] estos resultados indican que la espuma es estable, ya que su altura se mantiene por arriba del 50 % de altura inicial de la espuma, incluso después de que la etapa de drenado severo cesa, aproximadamente a los 20 min de vida de la espuma (ver figura 2b). Por otra parte, a los 30 minutos la altura de dicha espuma disminuye hasta el 60 %, lo cual podría considerarse como el término de la vida útil de la espuma [15]. Lo anterior sugiere que la presencia de la OL-30 betaína resulta en dominios resistentes al proceso de drenado, ralentizando la coalescencia de las burbujas e incrementando su estabilidad. Así, estos resultados indican que la espuma AOS-OL30b se puede usar como un fluido modelo de estimulación hidráulica para estudiar su comportamiento.

to reológico en el tiempo y describir una metodología confiable para tal propósito, lo cual se presenta a continuación.

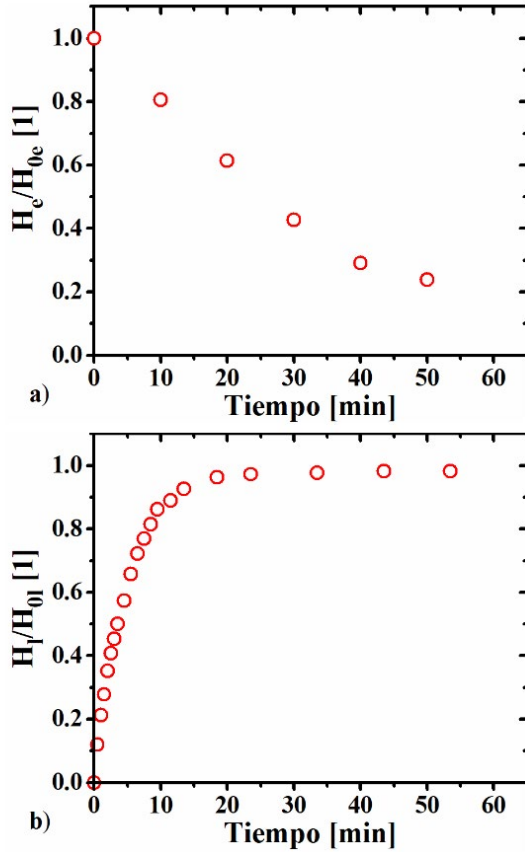


Figura 2. Alturas normalizadas de la espuma, H_e/H_{0e} , y del líquido de drenado, H_l/H_{0l} , como función del tiempo.

Las curvas de torca como función de la velocidad angular de la espuma AOS-OL30b se muestran en la figura 3a construidas a diferentes tiempos. Las barras de error representan la desviación estándar de 5 repeticiones. Es importante mencionar que al tiempo $t=1380$ s la altura de la espuma aún se mantiene por encima de la parte superior de la geometría fractal, de acuerdo con cálculos realizados a partir de los datos de la figura 1a. En general, puede verse que la torca decrece a medida que transcurre el tiempo, lo cual sugiere que las propiedades reológicas de la espuma evolucionan. Nótese que las curvas a los di-

ferentes tiempos tienen la misma forma, en otras palabras, cuando Ω tiende a 0, todas las curvas extrapolan a un valor crítico de la torca, $M_y > 0$, con M_y disminuyendo con el tiempo. Además, la razón de cambio de M con respecto a Ω es aproximadamente igual para cada curva, indicando que el comportamiento reológico de la espuma puede ser descrito por la misma ecuación constitutiva, cuyos parámetros son función del tiempo.

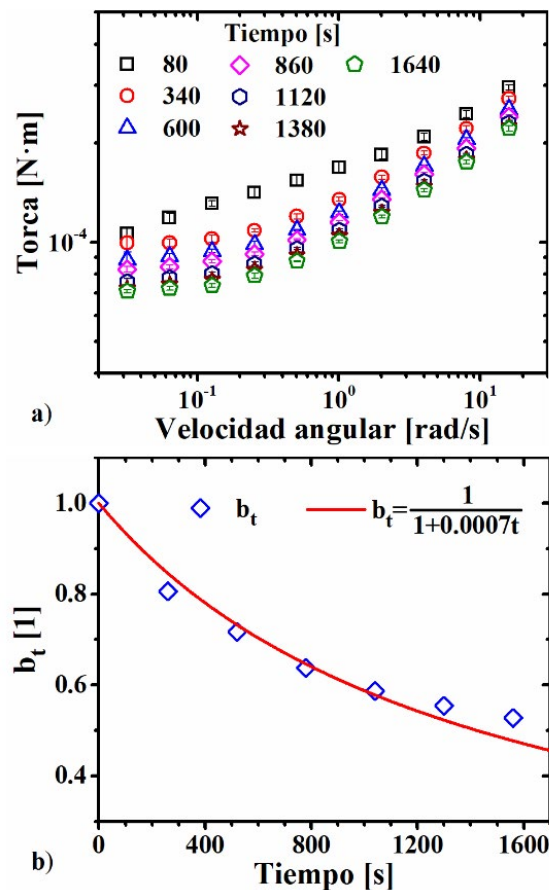


Figura 3. a) Datos de torca vs. velocidad angular como función del tiempo de la espuma AOS-OL30b al 80 % de calidad, y b) evolución del factor de desplazamiento b_t .

Por lo anterior, es posible representar la relación entre el esfuerzo y la rapidez de corte usando un factor de desplazamiento que depende del tiempo, b_t , tal que, al dividir cada variable de las curvas de flujo por dicho factor, las curvas se superpongan en una

sola, la curva maestra. La determinación del factor b_t para cada tiempo se realizó usando regresión no lineal. Para ello, simplemente se compararon los datos experimentales de M vs. Ω obtenidos para cada tiempo con un modelo tipo Herschel-Bulkley de la forma $M = M_y + k\Omega^n$, el cual se ajustó a la curva construida en $t = 80$ s (cuadros vacíos en la Figura 3a), o curva de referencia, el valor de b_t óptimo se encuentra cuando la diferencia entre la curva deseada M/b_t vs. Ω/b_t y el modelo $M = M_y + k\Omega^n$ es mínima. En la figura 3b se encuentran los valores de b_t contra el tiempo, y se observa que b_t disminuye hiperbólicamente con la forma:

$$b_t = \frac{1}{1 + ct}$$

En la ecuación (3) t es el tiempo y c es una constante de ajuste, cuyo valor resultó de 0.0007 s^{-1} para la espuma AOS-OL30b, el valor de c determinado en este trabajo se encuentra dentro del intervalo reportado para espumas semejantes [7]. Una vez determinados los valores de b_t , se utilizaron para construir la curva maestra de variables reducidas, M/b_t vs. Ω/b_t , la cual se presenta en la figura 4a. Rápidamente se observa que los valores de b_t calculados hacen que todas las curvas se superpongan en una sola, lo cual demuestra que el comportamiento reológico de la espuma AOS-OL30b puede ser descrito por una sola ecuación constitutiva con parámetros dependientes del tiempo. Sin embargo, se encontró que el factor b_t al tiempo $t = 1640$ s se desvía de la ecuación (3), para dicho tiempo la altura de la espuma es menor al 50 % de la inicial, indicando el colapso de los dominios de la espuma. Con base en los resultados de la figura 4a, las ecuaciones (1) y (2) se usaron para convertir los datos de M/b_t vs. Ω/b_t en la curva de flujo maestra σ/b_t vs. $\dot{\gamma}/b_t$ de

la espuma, la cual es bien descrita por el modelo de Herschel-Bulkley en términos del esfuerzo de corte y rapidez de corte reducidos (línea continua en la figura 4b).

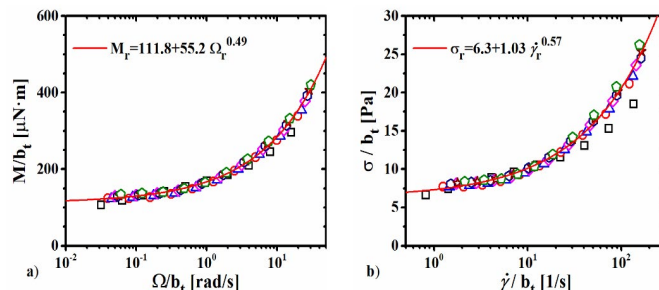


Figura 4. a) Curva maestra construida con las variables reducidas M/b_t vs. Ω/b_t . b) Curva de flujo maestra σ/b_t vs. $\dot{\gamma}/b_t$.

Finalmente, la figura 5 muestra las curvas de flujo de la espuma AOS-OL30b al 80 % de calidad y su evolución. Cabe mencionar que estas curvas de flujo se obtuvieron a partir de la curva de flujo maestra de la figura 4b. Puede verse claramente que el comportamiento reológico de la espuma a los diferentes tiempos es siempre bien descrito por el modelo de Herschel Bulkley (véanse las líneas continuas para algunas de las curvas). Así, los resultados presentes en este trabajo demuestran que la espuma mantiene su comportamiento como el de un fluido con esfuerzo de cedencia, lo cual es relevante para el diseño del proceso de estimulación hidráulica de yacimientos.

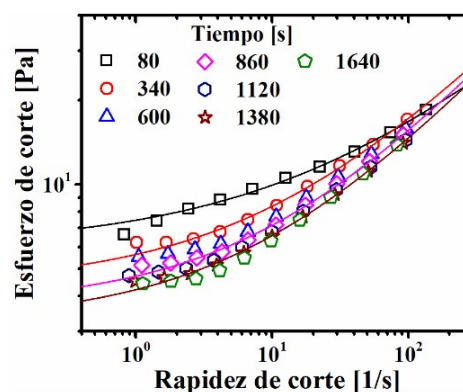


Figura 5. Curvas de flujo de la espuma AOS-OL30b al 80 % de calidad como función del tiempo

Conclusiones

En este trabajo se estudió *in situ* el comportamiento reológico en el tiempo de una espuma modelo como fluido de estimulación hidráulica formulada con el tensioactivo AOS y con la betaína OL-30 como agente estabilizante y se presentó una metodología confiable para tal efecto. Se mostró que la espuma generada con AOS-OL30b es estable con dominios resistentes al proceso de drenado severo, ya que a los 20 minutos la altura de la espuma se mantiene por arriba del 60 % de su altura inicial. Finalmente, en este trabajo se describió una metodología confiable para la caracterización reológica *in situ* de espumas de estimulación hidráulica y se demostró que la espuma modelo formulada con 2 % AOS + 2 % OL-30 betaína al 80 % de calidad exhibe un comportamiento viscoplastico descrito por el modelo de Herschel-Bulkley, donde sus parámetros dependen del tiempo.

Apoyo financiero:

Esta investigación fue apoyada por la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional (20240882).

Agradecimientos:

G. G. M.-P. es becaria CONAHCYT y E. F. M.-B. es beneficiario de una Beca Posdoctoral del CONAHCYT.

Referencias

1. C. de J. Galicia-Buenrostro, C. Villegas-Capistrán, J. Salgado Valdés, M. Pimentel-Montiel, J. A. García-Estrada, H. E. Gallardo-Ferrera, F. Castellanos Paez, y C. U. Moya-García. "Retos y Oportunidades de la Producción de Petróleo y Gas Natural de Yacimientos No Convencionales en México" Comisión Nacional de Hidrocarburos (2022).
2. P. A. Parra, N. Rubio, C. Ramirez, B. D. Guerra, V. A. Exler, I. R. Campos, M. D. Trejo, J. Olguin, C. H. Vargas, R. Valbuena, D. F. Soler, M. I. Weimann, V. Lujan, P. Bonningue, P. G. Reyes, R. Martinez, R. Muñoz, E. Rodríguez, and M. García. "Unconventional Reservoir Development in Mexico: Lessons Learned from the First Exploratory Wells" Society of Petroleum Engineers, SPE 164545 (2013), pp. 1-14. Presented at the SPE Unconventional Resources Conference-USA held at The Woodlands, Texas, USA.
3. S. H. Steven, and K. D. Moodhe. "Evaluation of Mexico's Shale Oil and Gas Potential" Society of Petroleum Engineers, SPE 177139-MS (2015), pp. 1-15. Presented at the SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference held in Quito, Ecuador.
4. J. C. Granados-Hernandez, R. Muñoz-Cisneros, L. R. Caraveo-Miranda, M. M. Guerrero-Tristán, M. García-Ortega, and R. Padilla-Bastida. "The Emerging Unconventional Upper Jurassic Oil Play in Mexico" Society of Petroleum Engineers, SPE-185024-MS (2017), pp. 1-15. Presented at the SPE Unconventional Resources Conference held in Calgary, Alberta, Canada.
5. C. E. Clark, R. M. Horner, and C. B. Harto. "Life Cycle Water Consumption for Shale Gas and Conventional Natural Gas", Environmental Science and Technology, vol. 47 (2013), pp. 11829-11836.
6. L. L. Schramm. Emulsions, Foams and Suspensions: Fundamentals and Applications, WILEY-VCH (1ra. ed.), Alemania, 2005.
7. I. M. Carraretto, C. E. Owens, and G. H. McKinley. "Time-resolved rheometry of coarsening foams using three dimensionally printed fractal vanes" Physics of Fluids, vol 34 (2022), pp. 113-108.
8. E. F. Medina-Bañuelos, B. M. Marín-Santibáñez, J. Pérez-González, M. Malik, and D. M. Kalyon. "Tangential annular (Couette) flow of a viscoplastic microgel with wall slip" Journal of Rheology, vol 61 (2017), pp. 1007-1022.
9. E. F. Medina-Bañuelos, B. M. Marín-Santibáñez, J. Pérez-González, and D. M. Kalyon. "Rheo-PIV analysis of the vane in cup flow of a viscoplastic microgel" Journal of Rheology, vol 63 (2019), pp. 905-915.
10. E. F. Medina-Bañuelos, B. M. Marín-Santibáñez, E. Chaparian, C. E. Owens, G. H. McKinley, and J. Pérez-González. "Rheo-PIV of yield stress fluids in a 3D-printed fractal vane-in-cup geometry" Journal of Rheology, vol 67 (2023), pp. 891-908.
11. C. E. Owens, A. J. Hart, and G. H. McKinley. "Improved rheometry of yield stress fluids using bespoke fractal 3D printed vanes" Journal of Rheology, vol. 64 (2020), 643-662.
12. J. D. Sherwood, and G. H. Meeten. "The use of the vane to measure the shear modulus of linear elastic solids" Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, vol. 41 (1991), pp. 101-118.
13. C. Atkinson, and J. D. Sherwood. "The torque on a rotating n-bladed vane in a Newtonian fluid or linear elastic medium" Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, vol. 438 (1992), pp. 183-196.
14. Q. D. Nguyen, and D. V. Boger. "Characterization of yield stress fluids with concentric cylinder viscometers," Rheologica Acta, vol. 26 (1987), pp. 508-515.
15. K. Lunkenheimer, and K. Malysa. "Simple and Generally Applicable Method of Determination and Evaluation of Foam Properties" Journal of Surfactants and Detergents, vol. 6 (2003), pp. 69-74.