

Uso de nanopartículas de sílice para la estabilización de finos en lechos empacados de arena Ottawa

Silica nanoparticles for fines stabilization in Ottawa sand packed beds

Recibido: 07-03-2013 Aceptado: 22-04-2013

CÉSAR MORA MERA¹

CAMILO ANDRÉS FRANCO ARIZA²

FARID BERNARDO CORTÉS³

Resumen

Las partículas finas débilmente cementadas a la matriz porosa pueden ser liberadas y movilizadas, causando reducciones en la porosidad y permeabilidad de un yacimiento y disminuyendo el recobro de petróleo. Con el fin de determinar el daño de formación por migración de finos y dar una posible solución a este problema, se desarrolló un sistema de adsorción en lechos empacados en los cuales se simuló experimentalmente la estabilización de los finos mediante el uso de nanopartículas. Los lechos adsorbentes usados fueron preparados con arena Ottawa y esferas de vidrio (radio promedio de 0,53 mm). Se usaron tres lechos de arena: uno sometido a un proceso de lavado (lecho humectable al agua), otro sometido a un proceso de daño usando un crudo colombiano extrapesado (lecho humectable al aceite) y un último compuesto de arena tratada con nanopartículas de sílice (5-15 nm). Con las esferas de vidrio se prepararon dos lechos: uno con las esferas lavadas y otro con las esferas impregnadas con nanopartículas. La suspensión de finos se preparó con nanopartículas de alúmina (50 nm) y agua destilada. Se observó que los lechos tratados con nanopartículas seguían los patrones idealizados de las curvas de ruptura, indicando que las nanopartículas de sílice inhiben la migración de finos debido a su alta capacidad adsorptiva.

Palabras clave: Daño; arcillas; nanopartículas; nanocompuestos; mecánica de fluidos; adsorción; sílice ; humectabilidad.

Abstract

To determine the problem of fines migration on packed beds and offer a possible solution for this issue, an adsorptive system of packed beds was developed for experimental simulation of fines migration and stabilization by using silica nanoparticles. The adsorbent beds were prepared with Ottawa sand and glass spheres (average radius of 0.53 mm). Three different sand beds were used in the investigation: clean sand (water- wet system), sand submitted to a damage process using an extra-heavy Colombian crude oil (oil-wet system) and sand treated with silica nanoparticles (5-15 nm). Fines suspension was prepared with alumina nanoparticles (50 nm) and distilled water. Results show that beds treated with silica nanoparticles present idealized patterns for the rupture curve, indicating that silica nanoparticles capture and retain fines, decreasing fines migration due to their adsorption capacity.

1 Estudiante de Maestría en Ingeniería Química Grupo de investigación en Yacimientos de Hidrocarburo, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. csar.mora.mera@gmail.com

2 Estudiante de doctorado Grupo de investigación en Yacimientos de Hidrocarburo, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. caafrancoar@unal.edu.co

3 Ph.D. Director Grupo de investigación en Yacimientos de Hidrocarburo, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. fbcortes@unal.edu.co

Keywords: Damage, Fines Migration, nanoparticles, adsorption, silica, wettability; nano-composites; fluid mechanics.

Introducción

El daño de formación es un problema operacional y económico, que puede ocurrir durante varias fases de recuperación de gas y crudo en el yacimiento como la perforación, producción, fracturamiento hidráulico y operaciones de reacondicionamiento (Jahediesfanjani *et al.*, 2005). El daño por migración de finos puede ser causado por una gran variedad de minerales presentes en el medio poroso tales como arcillas, sílice amorfa, cuarzo, feldspatos, micas y carbonatos. Las partículas finas se consideran de baja densidad (menos de 1400 kg/m^3), de un diámetro inferior a 37 micras (Civan, 2007).

La migración de finos se produce cuando las fuerzas viscosas e interfaciales promueven el movimiento de partículas débilmente adheridas a los poros. Estas partículas finas débilmente cementadas a la matriz pueden ser liberadas y movilizadas por procedimientos de estimulación ácida que destruyen el material cementante (Jahediesfanjani, 2005). Estos finos pueden ser los causantes de la reducción de la permeabilidad en un yacimiento y ocurre cuando bloquean gargantas de poro con tamaños inferiores al tamaño individual de la partícula, o cuando varias partículas finas muy pequeñas llegan simultáneamente a una garganta de poro grande, compitiendo por pasar a través de la garganta, lo que resulta en puenteo y sedimentación. Generalmente la migración de finos se da cuando la fase humectante del yacimiento está en movimiento (Bennion *et al.*, 2002; Olafuyi *et al.*, 2012; Hibbeler *et al.*, 2003).

Diferentes fuerzas son responsables de la separación de los finos; las fuerzas de atracción Van der Waals, fuerzas repulsivas de Born, fenómeno de doble capa y fuerzas hidrodinámicas dominan el desprendimiento de partículas de medios porosos. Cuando la energía de interacción total entre la partícula y la superficie porosa se vuelve positiva, las fuerzas repulsivas son más grandes que las fuerzas atractivas, y se desprenden los finos (Ahmadi *et al.*, 2011; Thomas and Crowe, 1981).

Factores como la salinidad, la velocidad de flujo, pH, saturación residual de aceite, temperatura, mojabilidad, polaridad del aceite y el flujo fraccional del agua y el aceite se han estudiado, dado que éstos influyen en la producción de finos en la formación (Gruesbeck *et al.*, 1982, Sakar *et al.*, 1990). Varios métodos han sido propuestos y aplicados para solucionar este problema como la utilización de arcillas como agentes de control, el recubrimiento de la roca yacimiento con polímeros especiales evitando la migración de finos, entre otros (Ezeukwu *et al.*, 1998).

El uso de la nanotecnología en la industria del petróleo es una herramienta atractiva para el ingeniero. Las nanopartículas, con pequeños tamaños (menores a 100 nm) y su alta capacidad adsorptiva, presentan una buena opción para inhibir la migración de finos dentro del yacimiento y la estabilización de las fuerzas de interacción para remediar el daño causado por esta migración (Olafuyi and Onyekonwu, 2012). Adicionalmente, debido a su tamaño, los nanofluidos son aptos para la inyección, debido a que no existe riesgo de obstrucción en las gargantas de poro del yacimiento.

Huang *et al.* (2010), han estudiado la aplicación de nanopartículas en tratamientos de fracturamiento. Argumentan que las nanopartículas poseen la habilidad de prevenir la migración de finos debido a que tienen fuerzas de superficie significativamente altas, incluyendo fuerzas de van der Waals y fuerzas electrostáticas que hacen que se adhieran a la superficie del propanante durante el bombeo.

Otros investigadores como Belcher *et al.* (2010), llevaron a cabo un estudio para investigar cómo los fluidos nano-propantes pueden controlar la migración de finos en un campo offshore en el golfo de México. Los resultados de ambas investigaciones indican que las nanopartículas fijan los finos migrantes al propanante y mejoran la productividad del pozo, previniendo el daño de formación y otros problemas asociados.

Huang *et al.* (2008), realizaron una simulación de un tratamiento de fracturamiento hidráulico en condiciones de laboratorio mezclando simultáneamente nanopartículas y propanante en agua con base en gel fracturante. La relación de partículas agregadas fue de 1 libra de nanopartículas por 1000 libras de propanante. Agregaron la mezcla en un tubo de acrílico de una pulgada de diámetro con una longitud de 12 pulgadas y en la parte inferior una malla de 100 (partículas inferiores a 150 micras). Luego inyectaron una solución de cloruro de potasio en agua de-ionizada y en salmuera para eliminar el fluido de fracturamiento de la columna antes de agregar la solución de finos. Los investigadores concluyeron que las fuerzas de superficie atribuidas a las nanopartículas demostraron la habilidad de atrapar los finos al contacto con la mezcla.

Habib *et al.* (2011) utilizaron lechos empacados para estudiar el uso de diferentes tipos de nanomateriales y determinaron la eficiencia de nanopartículas de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido de magnesio (MgO) para controlar la migración de finos en la formación.

Se llevaron a cabo dos tipos de pruebas para evaluar el rendimiento de estos nanomateriales:

- En la primera serie de experimentos, se utilizó un medio poroso sintético, con diferentes tipos de nanopartículas, para estudiar el efecto de inmersión en la fijación de

finos. Se realizó una suspensión de finos (partículas finas + agua destilada) la cual fue inyectada desde la parte superior de la columna y pasada a través de ella por medio de las fuerzas gravitacionales. El efluente fue recogido y pasado a través de un papel filtro para medir la eficiencia de adsorción de los nanomateriales.

- En la segunda parte de las pruebas se usó un proceso de inundación utilizando un núcleo lleno de granos sintéticos y finos de formación. Las pruebas mostraron que el óxido de magnesio nanoparticulado es el agente más eficaz entre los tres tipos de nanopartículas utilizadas para controlar la migración de finos con eficiencias de adsorción de 12.8% para óxido de magnesio, 4.3% para la alúmina y 9.27% para la sílice, respectivamente. Se realizaron pruebas para las nanopartículas de óxido de magnesio (MgO) para encontrar la concentración ideal y las fuerzas hidrodinámicas requeridas para liberar los finos atrapados mecánicamente. A una concentración del 0.2 % w/w de óxido de magnesio, las fuerzas de atracción entre la superficie del poro y los finos fueron suficientemente altas como para mantener los finos en su lugar, incluso a velocidades de flujo muy altas.

Ogolo *et al.*, (2012) investigaron la capacidad de nueve nanopartículas para controlar la migración de finos en paquetes de arenas. Examinaron el efecto de los hidrocarburos en el rendimiento de estas nanopartículas y las eficiencias de las arenas tratadas con nanopartículas. Los nanomateriales utilizados fueron: óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de zinc (ZnO), óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de níquel (Ni_2O_3), óxido de estaño (SnO_2), óxido de zirconio (ZrO_2), óxido de silicio hidrofóbico ($SiO_2(H)$) y silanol tratado con óxido de silicio ($SiO_2(S)$). Con estas nanopartículas se determinó cuál es la mejor y cuál líquido de dispersión era ideal para realizar el ensayo. Los resultados experimentales muestran la forma de la dispersión de las nanopartículas en las formaciones en el control de la migración de finos, evitando los problemas primarios y secundarios causados por las formaciones consolidadas, optimizando la producción de los hidrocarburos. Los autores concluyen que existe migración de finos a altas tasas de flujo pero que hay buena captura de finos por las nanopartículas en arena. Las nanopartículas que mostraron mayores capacidades para prevenir la migración de finos fueron: óxido de aluminio, óxido de níquel, óxido de zirconio y silanol tratado con óxido de sílice. La salmuera es el mejor fluido dispersante de nanopartículas. La presencia de hidrocarburos en arenas tiene una influencia positiva en el rendimiento de las nanopartículas.

Para la realización de las pruebas se preparó un medio poroso sintético que simuló la migración de finos en un medio poroso. Dentro de nuestro conocimiento, hasta el

momento no hay estudios publicados en revistas especializadas que reporten el efecto de la humectabilidad del lecho adsorbente en la migración de finos. Debido a que la migración de finos puede presentarse en medios porosos con diferentes humectabilidades, el objetivo principal de este trabajo es evaluar el efecto de las nanopartículas de sílice como inhibidoras de la migración de finos en lechos empacados, preparados con arenas de diferentes humectabilidades.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Materiales

La prueba se realizó en tres lechos de arena y en dos de esferas de vidrio con el fin de simular la migración de finos en lechos porosos. Las esferas de vidrio con un radio promedio de 0.53 mm. La limpieza de las esferas se hizo con etanol (99%, MerckKGaG, Alemania). En la preparación de los lechos adsorbentes se usó arena Ottawa (Minercol S.A., Colombia) tamizada por las mallas 30/40 y 10/20. Se emplearon tres lechos de arena:

- Una arena lavada (humectable al agua)
- Una arena dañada por asfaltenos con un crudo extrapesado de 8°API (humectable al aceite), estos asfaltenos se precipitaron con una solución n-heptano (99%, Sigma-Aldrich, Estados Unidos) y
- Otra arena humectable al agua, que se trató con nanopartículas de sílice (diámetro de partícula = 5-15 nm; área superficial = 119,1 m²/g).

La suspensión de finos se preparó con micropartículas de alúmina (diámetro de partícula = 1 μm; área superficial = 223,2 m²/g) y agua destilada. La sílice y la alúmina son productos fabricados por Sigma-Aldrich (Estados Unidos).

Preparación de lechos con esferas de vidrio

Con las esferas de vidrio se prepararon dos lechos:

- Uno usado como blanco. Se lavaron las esferas con un surfactante y agua destilada y se sonicaron en un baño de etanol durante 2 horas a 60°C.
- Otro denominado tratado que incluye nanopartículas en la superficie de las esferas, se preparó un nanofluido a partir de nanopartículas de sílice y agua destilada en relación 2%wt. La solución de sónico a 40°C durante 4 horas. Finalmente las esferas de vidrio se sumergieron en el nanofluido de manera que la solución las cubrió por completo y se secaron a 120°C hasta que se evaporó cualquier remanente del solvente. De esta forma se garantizó la presencia de las nanopartículas en la superficie de las esferas.

Preparación de lechos con arena Ottawa.

En la preparación de los lechos adsorbentes con arena se utilizó arena Ottawa, tamizada con mallas 10/20 y 30/40. Se prepararon tres lechos:

- El lecho humectable al agua (arena Ottawa lavada);
- El lecho humectable al aceite y
- El lecho tratado con nanopartículas de sílica.

Inicialmente la arena se lavó con agua destilada y se filtró hasta que el agua no presentó ningún color. Posteriormente las arenas se secaron a 120°C. La arena, después del proceso de lavado se utilizó como la arena humectable al agua.

Para simular el medio poroso humectable al aceite, la arena se sometió a un proceso de daño con un crudo extra pesado de 8°API y contenido de asfáltenos de 16% wt. Para inducir el daño en la arena se preparó una solución n-heptano y crudo en relación 40ml/1g con el fin de favorecer la precipitación de asfáltenos. La arena se sumergió en la solución durante 24 horas a 40°C y se agitó constantemente a 500 rpm. Posteriormente la arena se secó a 120°C, se lavó con n-heptano y se retiraron los residuos del crudo, con agua destilada hasta que no presente color alguno. Finalmente la muestra se secó a 120°C para retirar cualquier remanente de agua y solvente. En la Tabla 1 se presentan las propiedades del crudo, el nanofluido y la suspensión de finos a 25°C.

A partir de la arena humectable al aceite, una fracción de la muestra se separó y se sumergió en el nanofluido, de manera que lo cubrió completamente y se agitó durante 6 horas a 60°C y 500 rpm. Finalmente la arena se secó a 120°C para eliminar el solvente. A manera de ejemplo, en la Figura 1 se presenta una fotografía de la arena 30/40 después de cada preparación.

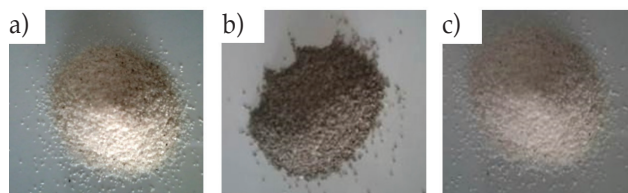


Figura 1. Fotografía de la arena 30/40 (a) humectable al agua, (b) humectable al aceite y (c) después del tratamiento.

Pruebas de adsorción

En las pruebas de adsorción se utilizaron dos lechos preparados con esferas de cristal y tres lechos con una combinación de arena Ottawa en tamaños 10/20 y 30/40. En la Figura 2 se presenta un esquema del montaje experimental de la prueba. En la parte superior se sostiene la suspensión (2) preparada inicialmente y por fuerzas gravitacionales se deja pasar un volumen poroso a la vez por medio del lecho adsorbente (3), de tal forma que a la salida la solución pase por un papel filtro (4) ayudada por una bomba de vacío (Cole – Parmer Instrument Co., Canadá) (6). Finalmente el papel filtro se secó y pesó, para determinar el contenido de finos presente con el fin de construir una curva típica de ruptura. El lecho adsorbente empacado con arena se preparó con 50% de la arena 10/20 y 50% de la arena 30/40 de tal forma que la arena con mayor tamaño de grano se encuentra en la parte inferior.

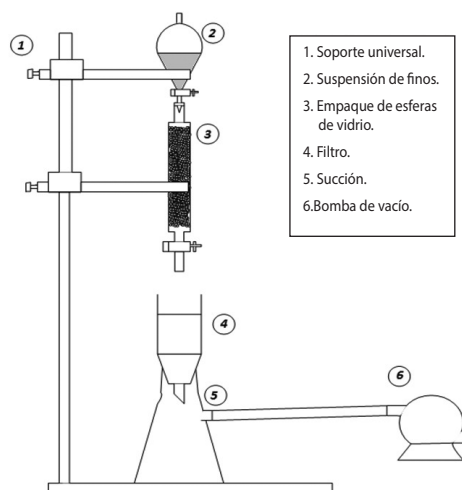


Figura 2. Esquema del montaje para realizar la prueba de adsorción.

Método matemático

Para predecir la longitud del ciclo de adsorción era necesario conocer el porcentaje de aproximación a la saturación en el punto de ruptura o quiebre. Esto a su vez requirió que se predijera el tiempo del punto de ruptura y la forma de la curva. En este caso se aplicó el método simplificado de Michaels (Michaels, 1988). En la Figura 3 se presenta

Tabla 1. Propiedades de los fluidos a 25°C

Lecho	W_B	W_E	W_a	θ_o	θ_E	Z_a	U	f	Z	$G. S.$
Esferas de vidrio	1,0143	4,32x105	7,1							
Arena Tratada	0.0244	0.09760	0.07320	120	160	2.19	0.000061	4.00	9.5	7.7%

la curva de ruptura idealizada, obtenida a partir de un disolvente a través de un lecho adsorbente a un flujo de G_s (masa / tiempo). El disolvente con una concertación inicial de soluto Y_0 (masa soluto / masa disolvente). El efluente libre por entero de soluto en cualquier momento es w (masa / área). Se eligió un valor bajo de Y_s como la concentración en el punto de ruptura y se consideró que el adsorbente está básicamente agotado cuando la concentración del efluente aumenta hasta un valor de $Y_{E'}$ cercano a Y_0 . Lo más importante en este caso es la cantidad de efluente w_E en el punto de ruptura y la forma de la curva entre w_E y $w_{E'}$. El efluente total acumulado durante la aparición de la curva de ruptura es $w_0 = w_{E'} - w_B$. La zona de adsorción, de altura constante Z_a , es la parte del lecho en la que la concentración cambia de Y_B a Y_E en cualquier momento (Treybal, 1988).

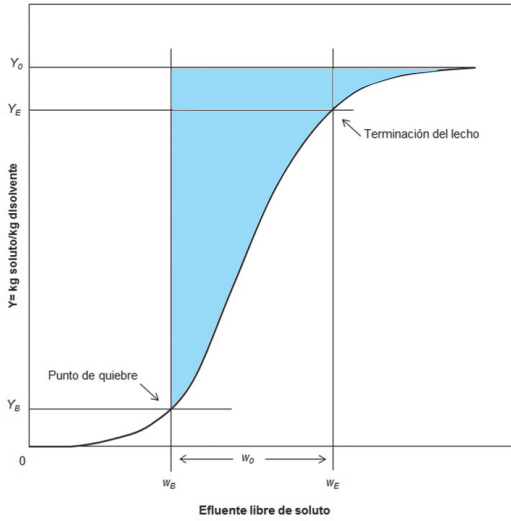


Figura 3. Ejemplo de una curva de ruptura idealizada.

Donde θ_0 es el tiempo requerido por la zona de adsorción para mover su propia altura en forma descendente por la columna, después de que la zona se ha establecido. Entonces,

$$\theta_0 = \frac{w_0}{G_s} \quad (1)$$

θ_E es el tiempo requerido por la zona de adsorción para establecerse y salir del lecho.

$$\theta_E = \frac{w_E}{G_s} \quad (2)$$

Asimismo, si la altura del lecho adsorbente es Z y θ_F es el tiempo requerido para la formación de la zona de adsorción, entonces:

$$Z_a = Z \frac{\theta_0}{\theta_E - \theta_F} \quad (3)$$

La caída de soluto separado del gas en la zona de adsorción desde el punto de ruptura hasta el agotamiento es U (masa soluto / área de la sección transversal del lecho). Dicha cantidad está representada por el área sombreada de la Figura 1 y se presenta en la ecuación 5.

$$U = \int_{w_B}^{w_E} (Y_0 - Y) dw \quad (4)$$

Sin embargo, si todo el adsorbente en la zona estuviese saturado con soluto, contendría $Y_0 w_0$ masa (soluto / área). Por lo tanto, cuando la zona todavía está dentro de la columna, el poder fraccionario del adsorbente en la zona para adsorber todavía es soluto en el punto de ruptura:

$$f = \frac{U}{Y_0 w_0} = \frac{\int_{w_B}^{w_E} (Y_0 - Y) dw}{Y_0 w_0} \quad (5)$$

Si $f = 0$, de forma que el adsorbente en la zona esté saturado, el tiempo de formación de la zona en la parte superior del lecho θ_E será el mismo que el tiempo requerido por la zona para viajar una distancia igual a su propia altura θ_0 . Por otra parte, si $f = 1$, de forma que el sólido en la zona no contenga adsorbato, el tiempo de formación de la zona será muy corto, cercano a cero. Estas condiciones límite están descritas por:

$$\theta_E = (1 - f)\theta_0 \quad (6)$$

Donde,

$$Z_a = Z \frac{\theta_0}{\theta_E - (1 - f)\theta_0} = Z \frac{w_0}{w_E - (1 - f)w_0} \quad (7)$$

La columna con una altura Z y el área de la sección transversal unitaria, contiene una masa Z_{ρ_s} de adsorbente, en donde ρ_s es la densidad empacada aparente del sólido en el lecho. Si toda esta masa de sólido estuviera en equilibrio con el fluido entrante y, por tanto completamente saturado en una concentración de adsorbato X_T (masa adsorbato / masa sólido), la masa del adsorbato sería $Z_{\rho_s} X_T$. En el punto de quiebre, la zona de adsorción de altura Z_{ρ_s} todavía se encuentra en la columna, en el fondo, pero el resto de la columna $Z - Z_a$ está saturada. Por lo tanto, en el punto de quiebre, el soluto adsorbido es $(Z - Z_0)_{\rho_s} X_T + Z_a \rho_s (1 - f) X_T$. La aproximación fraccionada a la saturación de la columna en el punto de ruptura es, por tanto:

$$G.S. = \frac{(Z - Z_0)_{\rho_s} X_T + Z_a \rho_s (1 - f) X_T}{Z_{\rho_s} X_T} = \frac{Z - Z_a f}{Z} \quad (8)$$

Resultados

En la Figura 4 se presentan las curvas de ruptura en el equilibrio del lecho fijo de esferas de vidrio sin impregnar e impregnadas con nanopartículas.

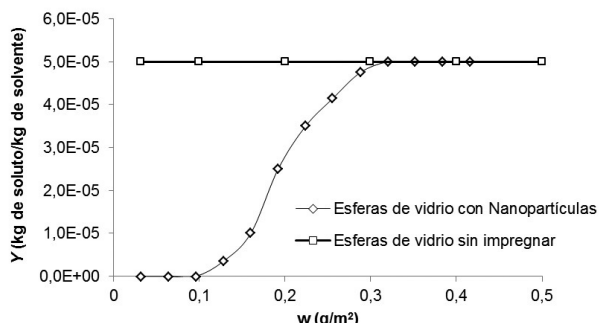


Figura 4. Curvas de ruptura para lechos de esferas de vidrio

En la Figura 4 se observa que al impregnar nanopartículas en la superficie de las esferas de vidrio, se presenta un fenómeno adsorptivo dado que el nanomaterial efectivamente adsorbe cierta cantidad del soluto, es decir los finos en suspensión. Al inicio de la Figura 4 se observa que el efluente está prácticamente libre del soluto hasta después de agregar el cuarto volumen poroso (0,128 g/m²), donde se encuentra el punto de quiebre en w igual a 0,096 g/m² y la saturación del sistema ocurre con w igual a 0,32 g/m².

En el caso de la curva de esferas de vidrio sin impregnar no se observa ninguna retención del soluto, lo que muestra que no se presenta ningún fenómeno adsorptivo.

En la Figura 5 se presentan los resultados de adsorción obtenidos con arena humectable al agua, arena humectable al aceite y arena impregnada con nanopartículas. Se puede observar que el comportamiento de la arena humectable al agua y arena humectable al aceite no presentan la misma tendencia de la curva presentada en la Figura 3, debido a que no se comportan como adsorbentes de lecho fijo. Se observa que el lecho humectable al aceite captura mayor cantidad de finos que el lecho humectable al agua, dado que mantiene un Y constante igual a $9,98 \times 10^{-5}$, mientras que la arena humectable se mantiene en $1,60 \times 10^{-4}$.

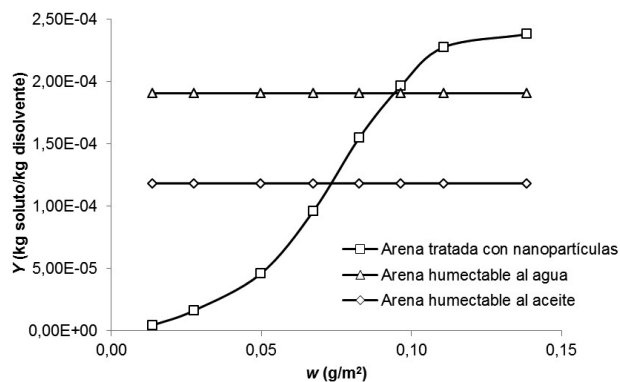


Figura 5. Curvas de ruptura para lechos de arena.

Al contrario de lo sucedido con las esferas de vidrio sin nanopartículas, los lechos humectables al agua y al aceite presentan un fenómeno adsorptivo, que en el caso del lecho humectable al agua se da por los grupos funcionales (hidroxilo -OH) presentes en la arena que interactúan con los finos por medio de fuerzas de Van der Waals y/o repulsión eléctrica doble capa (Ahmadi *et al.*, 2011; Derjaguin and Landau, 1941; Verwey and Overbeek, 1948); el lecho humectable al aceite, además de considerar las fuerzas mencionadas anteriormente, presenta más afinidad con los finos dado que en la superficie de la arena pueden haber asfaltenos depositados debido a que el crudo con que fue dañada tenía un alto contenido de asfaltenos (16%).

La arena tratada con las nanopartículas, donde el lecho comienza a saturarse al agregar el segundo volumen poroso (0,0276 g/cm²) y llegan a una saturación completa al noveno volumen poroso (0,1242 g/cm²), como se presenta en la Figura 5. Se evidencia que aproximadamente a partir de $w = 0,075$ g/cm², el valor de Y_{nanop} toma valores mayores a $Y_{hum.aceite}$ indicando que la saturación de finos en el lecho tratado con nanopartículas es tal que la retención de las partículas finas es mayor en el lecho humectable al aceite; lo mismo suceda en $w = 0,096$ (w cercano a la terminación del lecho), donde los valores de Y_{nanop} exceden los de $Y_{hum.agua}$. A partir de las Figuras 4 y 5 se obtienen los resultados presentados en la Tabla 2:

Tabla 2. Parámetros de transferencia de masa para adsorción de lechos fijos

Muestra	Densidad (g/cm ³)	Viscosidad (cp)	pH
Crudo	1,0143	$4,32 \times 10^5$	7,1
Nanofluido	1,0024	1,39	8,0
Suspensión de finos	0,9956	1,17	9,8

Se desarrolla el diseño de adsorción en un lecho fijo en el cual se establece la forma de la curva de ruptura con el conocimiento de las variables de operación y se predicen los tiempos de ruptura y saturación.

En la Figura 3 se observa que antes del punto de quiebre la transferencia neta de materia tiende a ser nula. Luego del punto de ruptura se produce la transferencia líquido-sólido con una velocidad θ_o y un cierto perfil de concentración Y , al cabo de un tiempo el extremo de la onda alcanza el final del lecho. Cuando se logra la saturación del lecho, éste se vuelve inactivo y es incapaz de continuar adsorbiendo. El trabajo plantea una comprobación experimental con un modelo de adsorción para la curva de ruptura y comprobar el ajuste de los datos experimentales obtenidos con los teóricos.

En la Tabla 2 se presentan los parámetros calculados. El efluente libre de soluto w durante la formación de la curva, el punto de quiebre w_B , el efluente total acumulado w_a y la terminación del lecho w_E . A partir de los efluentes se halla el tiempo θ_o requerido por la zona de adsorción para mover su propia altura en forma descendente por la columna, después de que la zona se ha establecido. También se determina el tiempo θ_E el cual es requerido por la zona de adsorción para establecerse y salir del lecho. Se calcula U que determina la masa de soluto que retuvo el lecho desde el punto de ruptura hasta el agotamiento para poder determinar el coeficiente f , el cual es un parámetro base para hallar la altura de adsorción Z_a y establece si dentro del lecho hay existencia de adsorbato.

En la Tabla 2 se observa que el grado de saturación para el lecho de arena tratada es de 7,7%, un 0,3% menos que para el lecho de esferas de vidrio impregnado con nanopartículas (8%). Esta diferencia se debe a la velocidad real y el mecanismo del proceso de adsorción, la naturaleza del equilibrio de adsorción, la velocidad del fluido, la concentración del soluto en la alimentación y la longitud del lecho del adsorbador. Por otro lado los puntos de ruptura son diferentes para estos dos montajes. Por lo común, el tiempo de ruptura decrece al mermar la altura del lecho, al aumentar el tamaño de partícula del adsorbador, al incrementar el flujo del fluido a través del lecho y al aumentar el contenido inicial de soluto de la alimentación.

Conclusiones

Se desarrolló un montaje experimental que permitió la evaluación de la migración de finos en lechos adsorbentes humectables al agua, al aceite y tratados con nanopartículas. Se observó que para los lechos con esferas de vidrio sin nanopartículas no se presenta ningún fenómeno adsorptivo, mientras que las arenas humectables al agua y al aceite sí lo presentan. El lecho humectable al aceite, debido a los asfaltenos depositados en la arena muestra mayor afinidad con los finos que el lecho humectable al agua. La modificación de los lechos con las nanopartículas de sílice muestran un fenómeno de inhibición y estabilización del daño por migración de finos. Las pruebas estáticas en los lechos empacados muestran la capacidad adsorptiva de las nanopartículas como factor principal de la retención de los finos inyectados, donde las curvas de ruptura determinan hasta qué volumen poroso llega la saturación del lecho y por ende ya no hay retención ni estabilización de los finos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias y a la Universidad Nacional de Colombia el soporte logístico y económico prestado.

Nomenclatura

- $\theta_o (s)$: Tiempo requerido por la zona de adsorción para mover su propia altura en forma descendente por la columna, después de que la zona se ha establecido.
- $\theta_E (s)$: Tiempo requerido por la zona de adsorción para establecerse y salir del lecho.
- $Z_a (m)$: Altura del lecho adsorbente para la formación de la zona de adsorción en el tiempo requerido.
- $U (g)$: Es la caída de soluto separado del gas en la zona de adsorción desde el punto de ruptura hasta el agotamiento.
- f : Habilidad fraccionaria de la zona de adsorción para adsorber soluto.
- $\theta_F (s)$: Tiempo requerido para la formación de la zona de adsorción.
- $G.S.:$ Es la aproximación fraccionada a la saturación de la columna en el punto de ruptura.

Referencias

- AHMADI, M.; HABIBI, A.; POURAFSHRY, P. and AYATOLLAHI Sh. Zeta Potential Investigation and mathematical modeling of nanoparticles deposited on the rock surface to reduce fine migration. En: SPE MIDDLE EAST OIL AND GAS SHOW AND CONFERENCE. (1:2011: Manama). Manama: SPE 142633. 2011. 14p
- BELCHER, C.; SETH, K.; HOLLIER, R. and PATERUSTRO, B. Maximizing production liffe with the use of nanotechnology to prevent fines migration. En: INTERNATIONAL OIL AND GAS CONFERENCE AND EXHIBITION IN CHINA. (1:2010:Beijing). Beijing: SPE 132152. 2010. 6 p. ISBN 978-1-55563-295-3
- BENNION, D. An Overview of Formation Damage Mechanisms Causing a Reduction in the Productivity and Injectivity of Oil and Gas Producing Formations. En: Journal of Canadian Petroleum Technology. No. 11 (Nov., 2002); p. 1 -8 ISSN 0021-9487
- CIVAN, F. Reservoir Formation Damage – Fundamental, Modeling, Assessment and Migration. Second edición. Gulf Professional Publishing/Elsevier. 2007.
- DERJAGUIN, B. V. and LANDAU, L. Theory of the stability of strongly charged lyophobic sols and of the adhesion of strongly charged particles in solution of electrolytes. En: Acta Physicochim. U.R.S.S. No. 32 (Ago., 1987); p. 633-662. ISSN 0365-1460
- EZEUKWU, T.; THOMAS, R. and GUNNEROED, T. Fines migration control in high water cut nigerian oil wells: Problem and solutions. En: SPE FORMATION DAMAGE CONTROL CONFERENCE. (1:1998:Louisiana). Louisiana: SPE 39482. 1998. p 529-538.
- GRUESBECK, C. and COLLINS, R. Entrainment and deposition of fine particles in porous media. En: SPE Journal. No. 6 (Dic.,1982); p. 847-856 ISSN 1086-055X
- HABIB, A.; AHMADI, M.; POYRAFSHARY, P. and AYATOLLALI, S. Reduction of fines migration by nanoparticles injection, and experimental study. En: SPE EUROPEAN FORMATION DAMAGE CONFERENCE. (1:2011:Noordwijk). Noordwijk: SPE 144196. 2011. 16 p.
- HIBBELER, J. GRACIA T. An Integrated Long-Term Solution for Migratory Fines Damage. SPE LATIN AMERICAN AND CARIBBEAN PETROLEUM ENGINEERING CONFERENCE. (1:2003:Trinidad and Tobago). Trinidad and Tobago: SPE 81017. 2003. 11 p.
- HUANG, T.; CREWS, J.; WILLINGHAM, J. and BAKER HUGHES. Using Nanoparticle Technology to control formation fines migration. En: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION. (1:2008:Colorado). Colorado: SPE 115384. 2008. 9 p.
- HUANG, T.; EVANS, B.; CREWS, J.; BELCHER, C. and BAKER H. Field case study on formation fines control with nanoparticles in offshore wells. En: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION. (1:2010:Florence). Florencia: SPE 135088. 2010. 8 p.
- JAHEDIESFANJANI, H. and CIVAN, F. Damage tolerance of well-completion and stimulation techniques in coalbed methane reservoirs. En: Journal of Energy Resources Technology . No 127 (Sept., 2005); p.1-9 ISSN 0195-0738.
- MICHAELS, S. A. Mass Transfer Operations. Edited by Treybal R. E. 3rd Ed (McGraw Hill International Editions). 1988. p 632. ISBN 968-6046-34-8.
- OGOLO, N.; OLAFUYI, O. and ONYEKONWU, M. Effect of Nanoparticles on Migrating Fines in Formations. SPE 155213. 2012.
- OLAFUYI, O. and ONYEKONWU, M. Effect of Nanoparticles on Migrating Fines in Formations. Petroleum Technology Development fund. En: SPE INTERNATIONAL OILFIELD NANOTECHNOLOGY CONFERENCE. (1:2012:Noordwijk). Noordwijk: SPE 155213. 2012. 9 p.
- PAZ, F.; LÓPEZ, S.; PORTILLO, F.; MARTÍNEZ, M., MAYOL, J.; SÁNCHEZ, M. y ORTEGA, L. WEC Venezuela – Evaluación de Pozos: Mejora de la producción. Venezuela. 1997. Capítulo 7. Pages 1-53.
- SAKAR, A. K. and SHARMA, M. M. Fines migration in two phase flow. Journal of petroleum technology. En: Journal of Petroleum Technology. No. 42 (May., 1990); p.646-652. ISSN 0022-3522.
- THOMAS, R. and CROWE C. Matrix treatment employs new acid system for stimulation and control of fines migration in sandstone formation. En: Journal of Petroleum Technology. No. 33 (Ago., 1981); p. 1491-1500. ISSN 0022-3522.
- TREYBAL, R. Operaciones de transferencia de masa. Segunda edición. Mexico. McGRAW-HILL. 1988. Pages 623 - 713. ISBN 968-6046-34-8.
- VERWEY, E. J. W. and OVERBEEK, J. Th. G. Theory of stability of lyophobic colloids. U.S.A. Elsevier Pub. Co. 1948. ISBN 0-486-40929-5.