

NANOTECNOLOGÍA APLICADA A LOS FLUIDOS DE CEMENTACIÓN: ANTECEDENTES Y NUEVAS TENDENCIAS DE FLUIDOS EN POZOS VERTICALES

Juan Nicolás Gómez Socaguy¹, Wilder Manuel Quiroga Vega¹, Daniel Montes^{2,3}, Camilo Andrés Guerrero Martín^{1,2}, Stefania Betancur^{1,2}

¹Departamento de Energías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia

²Grupo de Investigación en Planeamiento Energético Galileo, Universidad Industrial de Santander

³Department of Chemical and Biomolecular Engineering, University of Notre Dame, South Bend-IN, USA

RESUMEN

En los últimos años, la industria petrolera ha buscado soluciones para minimizar los problemas relacionados con los fluidos de cementación, como deficiencias en las propiedades fisicoquímicas del cemento (estabilidad química y oxidación), mala floculación, presencia de fracturas, entre otros. Una de las soluciones más prometedoras para mitigar los problemas relacionados con los fluidos de cementación, es el uso de nanomateriales. Las investigaciones basadas en la aplicación de nanomateriales para mejorar los fluidos de cementación incluyen diversos tipos de nanofluidos, preparados a diferentes concentraciones, condiciones de trabajo y tamaños de partículas, por lo cual es necesario determinar qué tipo de nanomaterial es el más adecuado para mejorar las diferentes propiedades de éstos fluidos. Por consiguiente, el presente estudio tiene como objetivo organizar y determinar los efectos de la aplicación de diferentes nanomateriales en las propiedades reológicas, hidráulicas y mecánicas de los fluidos de cementación para pozos de petróleo y gas. Asimismo, este trabajo pretende identificar los principales mecanismos fisicoquímicos mediante un estado del arte que involucra el uso de nanomateriales aplicados a los fluidos de cementación. La revisión bibliográfica mostró que las nanopartículas de sílice con un tamaño de partícula de 60 nm son las más eficientes para mitigar la migración de fluidos con una reducción de la migración del 93,42 %. Similarmente, las nanopartículas de zeolita de 70 nm mostraron una eficiencia del 54,64 % para resistir la compresión a 7 días y, las nanopartículas de óxido de hierro de 50 nm demostraron una eficiencia del 69,28 % de resistencia a la compresión a los 28 días. Otros parámetros del fluido de cementación como el tiempo de fraguado, la durabilidad, la flexibilidad y las propiedades reológicas, etc presentaron mejorías con respecto a un fluido de cementación base (sin nanopartículas), las cuales fueron atribuidas a las diferentes propiedades de los nanomateriales evaluados.

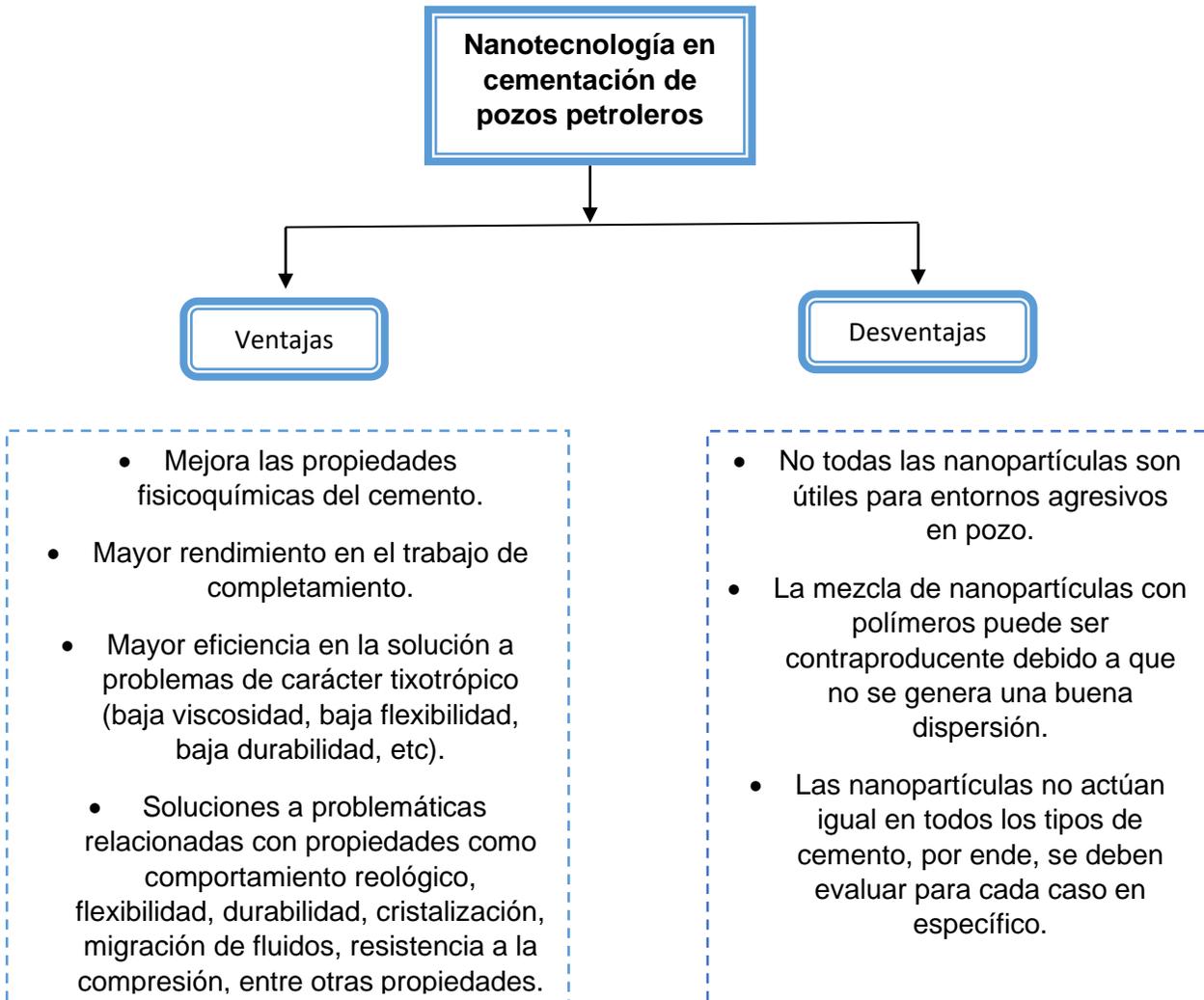
Palabras Clave:

Fluidos de cementación, nanomateriales, comportamiento reológico, propiedades del cemento, pozos de petróleo y gas.

INTRODUCCIÓN

Históricamente, el aumento de la población y las mejoras en la calidad de vida han estado detrás del crecimiento de la demanda de energía, la cual ha crecido significativamente en los últimos 50 años [1]. A pesar de la creación de más leyes y reformas a la industria de los combustibles fósiles y a la fluctuación de los precios de los hidrocarburos, la industria del petróleo y del gas sigue en búsqueda de tecnologías que optimicen sus procesos para suplir la demanda de energía [2,3].

Ventajas y desventajas de la nanotecnología en cementación de pozos de petróleo.



La cementación es una de las operaciones fundamentales de la perforación [3]. Consiste en la inyección de un fluido de cementación por el espacio anular entre el casing (tubería de revestimiento) y el hoyo (pared de la formación perforada) [4] para evitar o reducir la migración de fluidos entre capas de formación [5]. El proceso de preparación de un cemento utilizado para pozos de petróleo y gas consiste en mezclar cemento seco y ciertos aditivos con agua fresca, para formar un fluido de cementación que es bombeado al pozo a través de la sarta de revestimiento [6].

En un pozo, la pérdida de un buen aislamiento entre la tubería de revestimiento y el hoyo puede provocar varias problemáticas en el proceso de completamiento o terminación. Estas problemáticas pueden ser causadas por las propiedades de la roca y presiones y temperaturas muy elevadas. Entre éstas se destacan la pérdida de circulación, la intrusión de fluidos no deseados a la formación, las alteraciones en las presiones y temperaturas dentro del pozo, entre otras. Así mismo, una mala preparación del fluido de cementación puede causar microfisuras en el cemento [3], lo cual aumenta el riesgo de la migración de fluidos hacia la formación [7]. La pérdida de circulación a través de

fracturas es uno de los problemas más desafiantes durante la cementación de pozos de petróleo [8]. La pérdida de circulación genera la deshidratación de los fluidos de cementación antes de su tiempo normal de fraguado, lo cual genera que el fluido bombeado no alcance su posición final. Para evitar problemas de pérdida de circulación, se debe afianzar la calidad y resistencia de los fluidos de cementación, la cual depende de parámetros como las condiciones de exposición, el diseño del fluido, el uso de aditivos, las condiciones de curado, entre otros [10,11,12].

Las estrategias convencionales para mejorar el rendimiento de los fluidos de cementación incluyen la utilización de diversas clases de cemento según las condiciones in-situ [9] a diferentes concentraciones [10], así como el uso de aditivos. Sin embargo, estas estrategias pueden presentar dificultades como baja eficiencia, costos elevados o poca accesibilidad a ciertos materiales [11]. Esta situación ha generado un mayor interés de la industria petrolera en el desarrollo de nanomateriales aplicados en diferentes tópicos como los fluidos de perforación [16,17,18,19], recuperación mejorada del petróleo (EOR) [20,21,22], etc. Similarmente, varias investigaciones han demostrado que el uso de nanomateriales en la cementación de pozos puede ser una solución viable, adecuada y efectiva [12]. Los nanomateriales han logrado modificar diferentes propiedades de los fluidos de cementación como las propiedades mecánicas [13], las térmicas [25,26], la resistividad eléctrica, las propiedades magnéticas y químicas [14]. Se han reportado trabajos enfocados en el uso de nanopartículas de hidróxido de hierro para mejorar la durabilidad del fluido de cementación [15], nanotubos de carbono para mejorar las condiciones reológicas [16], nanopartículas de óxido de silicio, óxido de titanio y alúmina para mejorar las condiciones de filtrado [17], nanopartículas de sílice, alúmina y de dióxido de titanio para mejorar la resistencia del fluido de cementación [18], entre otros.

Uno de los desafíos claves para cementar el revestimiento de un pozo es mejorar la resistividad y durabilidad del cemento, las cuales, pueden ser afectadas por altas presiones y temperaturas [19]. Para mejorar las características mecánicas y de durabilidad de los fluidos de cementación, se han generado varias soluciones como diferentes concentraciones del fluido de cementación en la preparación, utilización de polímeros, utilización de químicos [20], y la implementación de nanopartículas en las matrices del cemento [21]. Por ejemplo, se ha reportado que la incorporación de nanoplaquetas de grafito ayuda a la disminución del filtrado por sus estructuras geométricas [22], los nanotubos de halloysita refuerzan los compuestos de cemento generando mayores ventajas en diversas propiedades como el aumento a la resistencia a la compresión, aumento a la resistencia a la flexibilidad, entre otras [23]. Estas aplicaciones siguen siendo objeto de investigación y cada vez se generan nanomateriales más diversos y eficientes para obtener fluidos de cementación con menores defectos [37,30].

En Colombia, el uso de la nanotecnología se ha enfocado en campos como la física, la química y la biología [24]. En la industria del petróleo y del gas, se ha empleado la nanotecnología para aplicaciones como el mejoramiento de la movilidad de crudos pesados y extra-pesados, en recobro mejorado de petróleo, en el mejoramiento de fluidos de perforación [25], en la mitigación de diferentes tipos de daño de formación, migración de fluidos y de finos, entre otras aplicaciones [26].

Como se mencionó anteriormente, las investigaciones y las nuevas adaptaciones tecnológicas enfocadas en aplicaciones en la industria del petróleo y del gas han tenido un incremento significativo [19,38,39]. Particularmente, resulta de interés el estudio de nuevos aditivos o nanomateriales que logren mejorar las propiedades fisicoquímicas de los fluidos diseñados para operaciones petroleras

como los fluidos de cementación. Si bien, aún no se ha explorado el uso de nanomateriales en fluidos de cementación en campo, las investigaciones realizadas hasta el momento revelan que la nanotecnología es una tecnología promisoría que puede adaptarse a este tipo de operaciones de alta exigencia técnica [27]. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es realizar un compendio de las aplicaciones de los nanomateriales enfocadas en el mejoramiento de las propiedades reológicas, hidráulicas y mecánicas de los fluidos de cementación para pozos petróleo y gas. La identificación de los diferentes tipos de nanomateriales, sus características y las propiedades que pueden mejorar en los fluidos de cementación, constituyen un paso clave para el diseño acertado de nanomateriales de alto rendimiento.

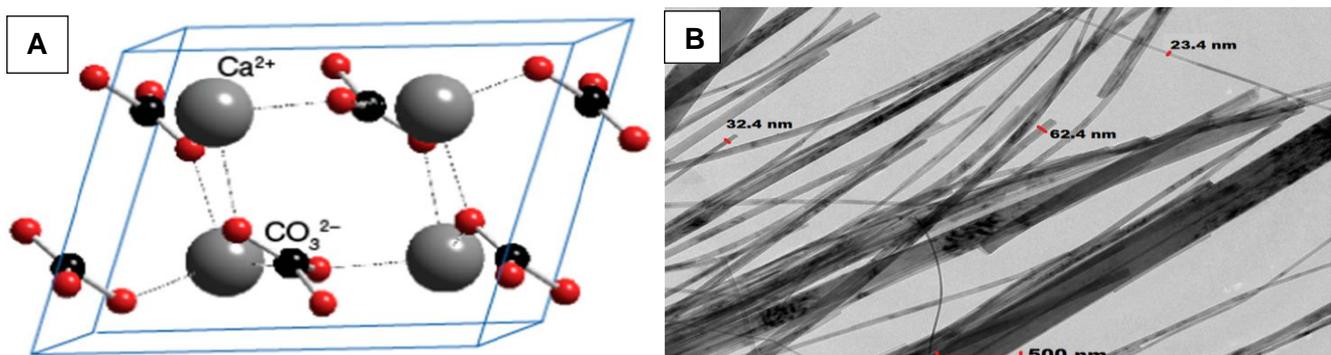
Por lo tanto, este trabajo es una recopilación bibliográfica y guía comparativa entre los diversos nanomateriales usados para el mejoramiento de los fluidos de cementación y abre el panorama al diseño de nuevos nanomateriales con características mejoradas. A continuación, se presentan las diferentes propiedades de los fluidos de cementación que han sido optimizadas con el uso de nanomateriales. Incluye concentraciones de nanomateriales, las condiciones de preparación y los diferentes mecanismos físico-químicos que los diferentes autores describen como responsables del efecto de los diferentes nanomateriales en los fluidos de cementación.

1. CRISTALIZACIÓN

En un proceso de cementación de pozos, la cristalización rige en el tiempo de fraguado, el cual permite el desarrollo de la resistencia a la compresión y evita la formación de grietas que cause la salida de fluidos a la formación. Así, si no se tiene un tiempo adecuado de fraguado pueden generarse daños en las bombas y equipos de circulación, debido a que el cemento no alcanza a llegar a su zona prevista. La cristalización es un proceso fisicoquímico, que se ve reflejado en el cambio estructural de las moléculas del cemento, las cuales generan una red cristalina [28].

Figura 1.

Estructuras cristalinas de nanofibras de titanato y nanotubos de carbono.



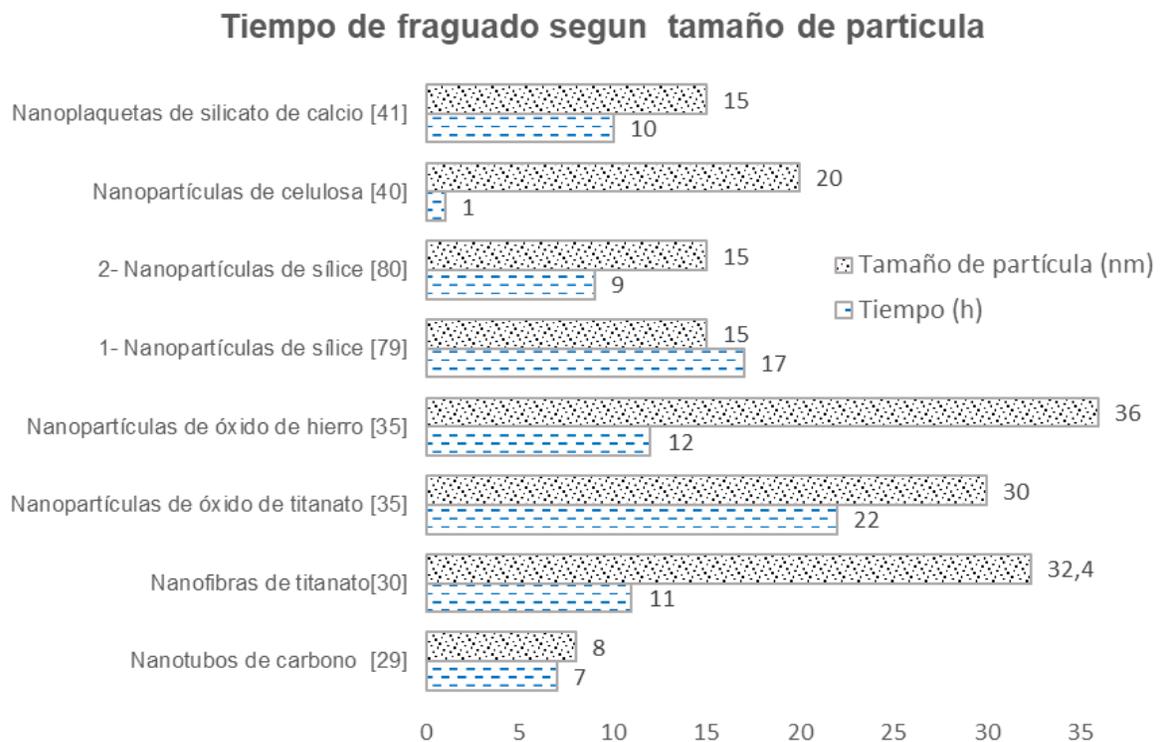
Nota. a) Estructuras cristalinas de las polimorfos de carbonato cálcico generados en los nanotubos de carbono [29]; (b) Micrografía obtenida a través de microscopía electrónica de transmisión (TEM) de las nanofibras de titanato [30].

Los nanotubos de carbono (CTN) son reconocidos en la industria de hidrocarburos porque pueden formar configuraciones rómbicas o elipsoidales [31]. Nanofibras de celulosa [29], desarrollaron CTN y demostraron que el grupo carboxilo ($-\text{COOH}$) controla la complejión de la matriz del fluido de cementación por medio de la generación de un apoyo fibroso que mejora el tiempo óptimo de cristalización [32]. Como se evidencia en la Figura 1-a, los nanotubos de carbono causan reacciones de carbonatación con hidróxidos (agua), controlando la morfología del cristal de carbonato, dichos cristales formados sirven como refuerzos fibrosos para reforzar la pasta de cemento. Similarmente, en la Figura 1-b se observa que las nanofibras de titanato presentan una contextura fibrosa, por medio de sus fibras aumentan las reacciones de hidratación [33], logrando reducir el tiempo de fraguado [30]. En comparación, los nanotubos de carbono (CTN) presentan un tiempo de transición más lento, puesto que sus estructuras cristalinas no aumentan la hidratación, sino que aguardan a posteriores reacciones.

En la Figura 2, se presenta la eficiencia de los nanomateriales aplicados al tiempo de fraguado respecto a la proporción de tamaño de las nanopartículas. Se observa que las nanopartículas de titanato presentaron un mayor tiempo de fraguado en comparación con las nanopartículas de celulosa con una diferencia de 21 horas, se observó que el tamaño de las nanopartículas puede afectar directamente la actividad de las zonas cristalinas dentro de la matriz del cemento [34]. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de hierro con un tamaño de 36 nm presentan un mayor tiempo de fraguado en comparación con los CNT de 8 nm y las nanoplaquetas de silicato de calcio de 15 nm [35].

Figura 2.

Tiempo de fraguado según el tamaño de partícula.



Nota. Comparación de los nanomateriales implementados para mejorar la cristalización del fluido de cementación, respecto a su tiempo de fraguado en horas y tamaño de partícula (nm).

Se ha reportado que la implementación de nanopartículas de óxidos metálicos en los fluidos de cementación genera una aceleración en las reacciones químicas de hidratación, logrando el reforzamiento de la cristalización de las estructuras. Cerro-Prada et al. [36], desarrollaron nanopartículas de óxido de titanio y óxido de hierro para determinar propiedades microestructurales de estos materiales y tiempo de fraguado. Los autores indicaron que las nanopartículas de óxido de titanio y óxido de hierro tienen una forma esférica no homogénea que generó inestabilidad y disminuyó el rendimiento del fluido de cementación. Por otro lado, se observó que las nanopartículas de óxido de titanio se vieron muy afectadas por los cambios drásticos de temperatura, por lo que son poco útiles para ser aplicadas a condiciones de yacimiento. Además, los autores indicaron que la cristalización no fue tan evidente. En contraste, las nanopartículas de óxido de hierro, demostraron una mayor cristalización dentro de rangos de temperaturas más elevadas, y menor tendencia a aglomerarse por la generación de estructuras más sueltas [37].

Otros autores como H. Li et al. [38], mezclaron nanopartículas de sílice con un 2 % en peso y un 0.5 % en peso de CNT, para determinar las estructuras cristalinas y establecer qué tipos de configuraciones se formaron en presencia de las nanopartículas. Para esto usaron técnicas de caracterización de materiales como difracción de rayos X (XRD) y TEM. Los resultados indicaron que la mezcla de los dos nanomateriales no generó zonas de nanocristalización, puesto que cada nanomaterial formó una estructura diferente de C-H-S. Por otro lado, las nanopartículas de sílice formaron una configuración amorfa y presentaron reactividad puzolánica [39], lo cual impidió la cristalización de C-S-H. Por otra parte, los CNT formaron cadenas más largas conectando los tetraedros en su estructura. Por otro lado, T. Meng et al. [40] evaluaron el uso de nanopartículas de sílice para determinar la configuración estructural dentro de la matriz del cemento. Las nanopartículas de sílice demostraron que pueden mejorar y acortar el tiempo de fraguado del cemento, por causa de la hidratación rápida en la etapa de nucleación y el aumento de los cristales. La adición de las nanopartículas de sílice redujo el agua libre, lo cual generó un rápido fraguado, en comparación con los resultados obtenidos por H. Li et al. [38], quienes usaron una mezcla de nanopartículas de sílice con un 2 % en peso y un 0.5 % de CNT. T. Meng et al. [40], lograron una diferencia en "tiempo de fraguado" de 8 horas tan solo usando 0,3 % de concentración de nanopartículas de sílice. Además los autores reportaron que el uso de 0,01 % de nanopartículas de sílice disminuyó los costos operacionales, lo cual generó una mejor rentabilidad y eficiencia [41].

J. Ramasamy et al. [42], reportaron que las nanopartículas de celulosa poseen buenas propiedades tanto fisicoquímicas como térmicas, debido a su estructura cristalina bien ordenada. En la digestión ácida de la celulosa se elimina la forma amorfa y se retiene la parte cristalina de tamaño nanométrico de la misma, mejorando los enlaces de cristalización con el cemento. Otros autores como Jens Rieger et al. [43], estudiaron el efecto de las nanoplaquetas de silicato de calcio hidratadas en las propiedades del cemento. El uso de las nanoplaquetas de calcio hidratadas eliminó las zonas deformadas de la matriz del cemento, lo cual generó un buen desempeño del material en el proceso de cristalización [43].

Como lo demuestra la Figura 2, las nanopartículas de celulosa tienen menor tiempo de fraguado (1 hora), lo que puede causar inconvenientes en la operación bombeo, puesto que se pueden presentar cristalizaciones tempranas. Similarmente, las nanopartículas de óxido de titanato presentaron un tiempo de fraguado de 22 horas, seguido por las nanopartículas de óxido de hierro con un tiempo de

12 horas [44]. Según Sudong Hua et al. [45], el tiempo óptimo de fraguado puede variar conforme las condiciones de trabajo, diseños de cementación, concentraciones y tamaños de nanomateriales. En este caso, un tiempo adecuado de fraguado podría ser el obtenido con las nanopartículas de óxido de hierro (12 horas) debido a que las nanopartículas de celulosa con un tiempo de fraguado 1 hora, podrían presentar problemas de cristalizaciones tempranas. Por otro lado, las nanopartículas de óxido de titanato con un tiempo de fraguado de 22 horas, podrían causar pérdidas económicas, debido a que la maquinaria dura mucho tiempo esperando a que el cemento fragüe (stand by) y así aumentar los costos operativos.

La Tabla 1 presenta la comparación de los cuatro compuestos principales presentes en un cemento tipo Portland para la formación de cristales según su tamaño y concentración en los nanotubos de carbono. Así, el CH es el enlace carbono hidrógeno, C_3S es el silicato tricálcico (alita), C_2S hace referencia al silicato dicálcico (belita) y el C_4AF al enlace tetracálcico. En presencia de agua, dichos compuestos se hidratan y se combinan químicamente formando nuevas especies, formando la estructura de la pasta de cemento endurecida [46].

S. Sharma et al.[47], examinaron la evolución de diferentes fases de la cristalinidad usando XRD, para mejorar el comportamiento mecánico a través de las microestructuras. Así mismo, hicieron un análisis térmico de las nanopartículas de carbono (CNC) y nanotubos de carbono (CNT) recubiertos por oro, evidenciando que CNC poseen una morfología esférica y no tienen dimensiones en las que puedan mostrar simetría, en contraste con CNT que tiene una estructura en forma de lámina, rejilla o tubo. Por lo tanto, se descubrió que la técnica de síntesis generaba nanotubos bien estructurados a bajo costo en grandes cantidades y fácil de suministrar. Las CNC al tener una morfología “esférica” no generaron una buena hidratación en la matriz del cemento (CH, C_3S , C_2S y C_4AF). En contraste, los CNT con sus “láminas de tubos”, generaron geometrías “regulares”, lo cual aumentó la interacción con los compuestos del cemento. Para determinar la cristalización de cada grupo hidroxilo se hicieron pruebas que demostraron ser responsables de la resistencia final del fluido de cementación, como la vista del microscopio electrónico de transmisión (TEM), donde se observó las paredes de la matriz con CNT producidos; los estudios de XRD determinaron la calidad y la naturaleza cristalina de los nanotubos demostrando dimensiones de cristales de 0,346 nm.

Como se observa en la **Tabla 1**, el grupo CH genera más reacciones de hidratación y se ve afectado por el tamaño de la partícula para el caso de las CNC y del diámetro en el caso de los CNT (a mayor tamaño de partícula menores reacciones de hidratación), en cambio los grupos de C_3S , C_2S y C_4AF se ven más afectados por la concentración de nanopartículas que se le añade al cemento (a menores concentraciones menores reacciones de hidratación). Cada uno de estos grupos tienden a generar una estructura cristalina, no obstante, al tener una menor concentración de las nanopartículas, se generan unos vacíos que ocasionan que los cristales no se orienten en una sola dirección, sino al azar, ocasionando mayor fragilidad en el cemento [95].

Tabla 1.

Comparación entre porcentajes de fase cristalina (%).

Comparación entre porcentajes de fase cristalina (%)							
Nanomaterial	Concentración (%)	Diámetro/tamaño de partícula (nm)	Mezcla de referencia	CH (%)	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₄ AF (%)
CNT	0,13	8	0.125 CNT - CNC	66,5	11,4	10,4	5,3
CNC	0.33	10	0.125 CNT - CNC	52,4	32,2	22,6	9,6
CNT	0,50	20	0.125 CNT-CNC	38,3	40,2	24,3	10,7
CNC	0,25	100	0.125 CNT-CNC	42,3	14,4	9,5	9,2

Nota. Comparación de los compuestos CH, C₃S, C₂S y C₄AF para la formación de cristales según el tamaño y concentración de las nanopartículas y los nanotubos de carbono [45,46]. Elaboración propia,2021.

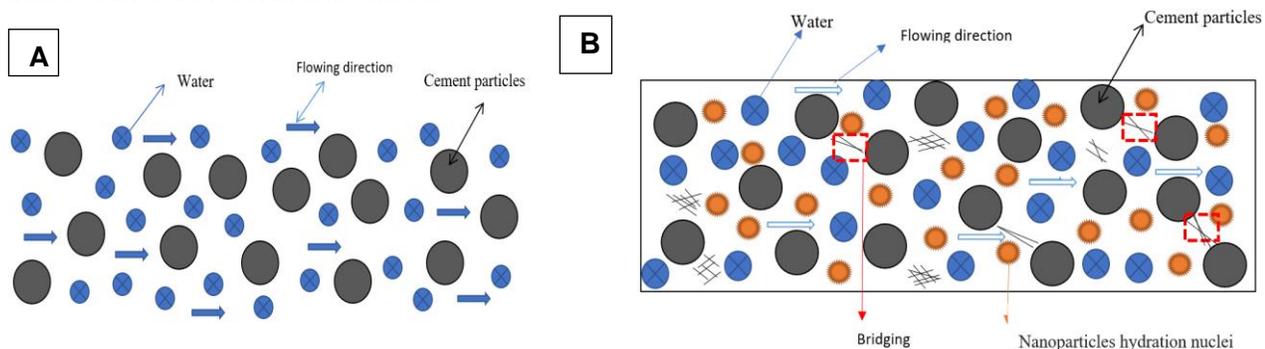
2. MIGRACIÓN DE FLUIDOS

Una de las funciones principales de los fluidos de cementación es separar la formación del casing para reducir la migración de fluidos a través del cemento [50], el cual sucede a través de las micro fisuras que se encuentran en la matriz del cemento [51], el adiconamiento de un agente de filtrado es clave para evitar que se pierda agua del fluido de cementación que afecte propiedades como la viscosidad y el tiempo de espesamiento [52]. La migración de los fluidos hacia la formación es uno de los mayores problemas en las operaciones de perforación de la industria petrolera [53], por lo cual, se ha hecho necesaria su mitigación con nuevas y mejores tecnologías [54]. Una de estas tecnologías es el uso de nanomateriales [55], los cuales pueden formar núcleos de hidratación para integrarse en el cemento y rellenar las fracturas que pueden causar las filtraciones hacia la formación (Figura 3) [50].

La Tabla 2, presenta los diferentes nanomateriales que han sido evaluados para el control de la migración de los fluidos de cementación, según su concentración de nanopartículas, tamaño de partícula, porcentaje de eficiencia de filtrado, ventajas y limitaciones.

Figura 3.

Interacciones de los nanomateriales.



Nota. (a) Fluido de cementación típico en ausencia de nanopartículas, **(b)** nanopartículas formando núcleos de hidratación para integrarse en el cemento y rellenar las fracturas y agentes de puenteo de fibras CNT. Elaboración propia, 2021.

Tabla 2.*Nanomateriales implementados para la migración de fluidos.*

Referencia	Nanomaterial	Concentración (%)	Tamaño (nm)	Eficiencia del filtrado (%)	Ventajas	Limitaciones
Yaohu Z et al.[54]	Nanotubos de carbono	0,1	50	50,00	Las fibras favorecen el aumento de la resistencia a la compresión	Disminuye la resistividad eléctrica
M. Bayanak et al.[56]	Nanopartículas de sílice	0,33	x	60,53	Mejora a la mitigación de fugas de fluidos y resistividad del cemento.	Solo se aplicó a migración de gas
PYao-HuiLiu et al. [52]	Nanopartículas de carbonato de calcio	0,02	80	14,29	Mejora la fluidez y la resistencia	Se requiere abundante cantidad de cenizas volcánicas 40%
A. Bayanak et al. [51]	Nanopartículas de sílice 99,9% de pureza	0,03	60	71,43	Al aumentar el peso del cemento, el porcentaje óptimo de nanopartículas se redujo del 0,3% al 0,1%.	No se estudió el comportamiento de la viscosidad
M. T. Maagi et al. [17]	Nanopartículas de óxido de titanio 99,9% de pureza	0,03	20	37,86	Mejora la retención de fluidos	No se estudió el comportamiento de la viscosidad
G. G. A. Balza et al. [57]	Nanopartículas de alúmina 99,9% de pureza	0,03	7	46,43	Presencia de cristales definidos	No se estudió el comportamiento de la viscosidad
H. Lu et al. [58]	Nanopartículas de sílice	0,04	60	93,42	Mejoramiento de la tixotropía	Aumento de los costos con la síntesis de las nanopartículas de sílice
J. Němeček et al. [59]	Nanopartículas de alúmina	0,05	60	38,46	Tiende a formar aglomerados	El tamaño de partícula afecta su desempeño
I. Mohammed et al. [60]	Nanoplaquetas de grafeno (GNP)	0,3	3	68,42	Conductividades térmicas y eléctricas elevadas	No se estudió el comportamiento de la viscosidad
A. H. Hassan et al. [61]	Nanopartículas de alúmina	0,05	40	2,10	x	Necesita de un polímero viscosificante para aumentar su viscosidad

Nota. Nanomateriales implementados para la migración de fluidos según su concentración y eficiencia.

El rendimiento de los nanomateriales varía con el tipo y la concentración de nanopartículas en el fluido de cementación. Por ejemplo, Marconde et al. [62], demostraron que la adición de nanotubos de carbono (CTN) a una concentración menor al 0.1 % genera una aceleración en el proceso de hidratación del fluido de cementación para pozos petrolíferos. La adición de los CTN reduce la migración de fluidos como se observa en la **Tabla 2**, en la cual se alcanza un valor de 50 %[55]. Los autores indicaron esta situación se generó por el puenteo de las fibras de nanotubos de carbono. Por otro lado, Yaohui Liu et al. [54], argumentaron que una concentración mayor al a 0.1 % de CTN generó aglomeraciones del nanomaterial entre las moléculas, lo cual redujo la eficiencia y la viscosidad del fluido de cementación. Así, los autores indicaron la importancia de incorporar un aditivo que favorezca

la dispersión adecuada de las nanopartículas en el fluido. Mendoza Reales et al. [63], mostraron también que los CTN tienden a reducir las pérdidas de filtrado y mejora la durabilidad del cemento en el tiempo [64].

Por otro lado, esta revisión ha demostrado que la cantidad de investigaciones enfocadas en el uso de las nanopartículas para el mejoramiento de los fluidos de cementación es mayor en comparación a las relacionadas con otros nanomateriales. Esto se debe al alto rendimiento que han presentado este tipo de nanomateriales para diferentes aplicaciones. Asimismo, las nanopartículas de sílice pueden ser preparadas a partir de residuos agrícolas como la cascarilla de arroz [69,70]. Las nanopartículas de sílice pueden reestructurar y reorganizar las moléculas dentro del fluido de cementación y así se reduce la filtración de fluidos a medianas concentraciones de 0.33 % [56]. También se han usado nanopartículas de sílice para minimizar los problemas asociados con la migración [65], por medio de la reducción de la permeabilidad del fluido de cementación.

Otros trabajos reportan que el uso de las nanopartículas de sílice de 50 nm en la pasta del cemento, previenen considerablemente la migración de fluidos [52]. Las nanopartículas recubren las fracturas del cemento, lo cual reduce la migración de componentes del cemento hacia la formación. Similarmente, el uso de nanopartículas de carbonato de calcio fomenta hidratos fibrosos, que recubren las zonas con rupturas dentro del matriz del cemento. Como se observa en la Tabla 2, las nanopartículas de carbonato de calcio a una concentración de 0.2 % presentaron una eficiencia en la reducción de la migración del fluido de cementación del 14.29 % respecto al filtrado base sin nanopartículas. En contraste, las nanopartículas de sílice presentan una mayor eficiencia con un valor de 93,42 %, lo cual podría deberse a su menor tamaño de partícula (50 nm).

Según Y. Yang et al. [66], la adición de “agua” en la matriz del cemento tiende a generar una sección de “barrido” que arrastra las nanopartículas, generando aglomeraciones mientras se disuelven, lo cual a su vez causa pérdidas por filtrado, puesto que las nanopartículas se aglomeran y no se dispersan bien dentro de la matriz, por lo cual se genera una recomendación de adicionar primero el fluido hidratante “agua” y posteriormente los “aditivos” o en este caso los nanomateriales, para así disminuir las causalidades de aglomeraciones de las nanopartículas.[67].

Las nanopartículas de carbonato de calcio y las nanopartículas de alúmina han presentado una alta capacidad para disminuir el filtrado de agua, puesto que pueden formar unas estructuras de cemento compactas y densas [17] mediante los enlaces de C-H y C₃A (alita) silicato tricálcico. Estas nanopartículas aceleran el proceso de formación de geles, unifican las moléculas de cemento y forman una estructura más cristalina. Como se observa en la Tabla 2, las nanopartículas de alúmina tienen una eficiencia del 46.43 % en comparación con las nanopartículas de carbonato de calcio con un 14.29 %. Se observa que, aunque cumplen la misma función de recubrir los espacios existentes de la matriz del cemento, presentan una diferencia de eficiencia de un 32.14 %. Esto podría deberse a la diferencia en el tamaño de las nanopartículas, debido a que las nanopartículas de carbonato de calcio son 73 nm mayores a las de nanopartículas de alúmina [68].

Lu et al. [58], prepararon nanopartículas de sílice con material tixotrópico de alto peso molecular [69], lo mezclaron con un material inorgánico nanométrico, para mejorar la calidad de la cementación y el

aislamiento a largo plazo. Según la investigación, el uso de las nanopartículas de sílice logró que el cemento soportara mayores esfuerzos de “cizallamiento” y así evitar la migración de fluidos. Como se muestra en la Tabla 2, la eficiencia obtenida fue del 93.42 % a una concentración del 0.04 % en comparación con los otros tipos de nanopartículas.

Las nanoplaquetas de grafeno (GNP) [60] aunque no se diseñaron para mitigar directamente la filtración de fluidos, pueden mejorar las fisuras del cemento, lo cual a su vez reduce las posibles pérdidas de filtrado del fluido de cementación. Las GNP pueden actuar como un agente de puenteo entre las partículas de cemento, rellenando los espacios porosos. Estos nanomateriales presentaron una eficiencia del 68.42 %, la segunda clase de nanomaterial más eficiente para reducir la migración de fluidos después de las nanopartículas de sílice. Sin embargo, cuando se genera una reducción de la presión hidrostática pueden formarse canales a través del cemento, lo cual genera la formación de fracturas en la matriz del cemento, por donde puede migrar el fluido.

Adicionalmente, Hassan et al. [61], usaron nanopartículas de sílice y alúmina para mejorar las propiedades de un fluido de cementación preparado con un cemento clase G. Estos autores reportaron que tanto las nanopartículas de sílice como de alúmina se comportaron como aceleradores de espesamiento cuando se agregaron al cemento. El tiempo de espesamiento usando las nanopartículas de alúmina y sílice fue menor que el obtenido con los aceleradores convencionales como cloruro de sodio y el cloruro de calcio.

Otro autores como Němeček et al. [59], emplearon una técnica de inyección electrocinética [70] para reparar la alta porosidad inicial de un cemento [71] y evitar las fugas. Para el estudio usaron nanopartículas de sílice, alúmina y micropartículas de sílice. Se encontró que las nanopartículas lograron disminuir la porosidad de la muestra en aproximadamente 4 - 7 %, en comparación a la porosidad inicial de las muestras sin nanopartículas, esta reducción de la porosidad de las muestras se confirmó a través de análisis BET (Brunauer, Emmett, Teller) del área superficial. Las nanopartículas de sílice de 7 nm fueron las que mostraron una mayor tendencia, a la aglomeración y así mismo, mostraron la mejor capacidad para sellar muestras agrietadas y una mejor movilidad [72].

3. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia a la compresión indica el tiempo que se debe esperar para continuar con las operaciones de cementación [73]. La resistencia a la compresión cumple un papel fundamental dado que el cemento debe ser suficientemente resistente para poder resistir la tubería de revestimiento, soportar las colisiones ocasionadas por las diferentes operaciones, resistir la presión hidráulica y minimizar las fisuras en la matriz del cemento [78,79].

La resistencia a la compresión debe evitar la migración de fluidos, por lo cual la prueba de resistencia a la compresión sirve para determinar la capacidad de resistencia de presión que puede resistir el cemento, durante su fraguado a condiciones de yacimiento [74]. La disminución de la resistencia a la compresión se da por la deshidratación del cemento a causa del aumento en la temperatura, lo cual

genera que el fraguado sea más lento [75,76]. Para mejorar las características de resistencia a la compresión, se han empleado diferentes aditivos nanométricos que pueden ingresar a las áreas reducidas mejorando las microestructuras [77]. Estos tamaños nanométricos permite rellenar las fisuras dentro de las matrices de la cementación [78]. En este sentido, la Tabla 3 recopila los trabajos enfocados en el uso de nanomateriales para reducir la migración de fluidos, donde se presenta el tipo de nanopartículas usado, la concentración, el tamaño de partícula o de diámetro para el caso de los nanotubos y las condiciones de laboratorio a las cuales se expusieron los materiales.

Como se observa en la Tabla 3, el aumento o la disminución de la concentración de las nanopartículas, puede influir en las eficiencias de éstas para aumentar la resistencia a la compresión. Por ejemplo, M. Kamali et al. [9], usaron nanopartículas de sílice a una concentración de 11 %, lo cual generó aglomeraciones por la poca dispersión del material, causando una disminución en la resistencia a la compresión y, por consiguiente, fallas a largo plazo del cemento.

Tabla 3.

Clasificación de los nanomateriales en la resistencia a la compresión.

Referencia	Nanomaterial	Concentración (%)	Tamaño de partícula (nm)	Temperatura (°C)	Presión (Mpa)
H. Biricik et al. [79]	1- Nanopartículas de sílice	0,1	15	28	31,9
F. T. Isfahani et al. [80]	2- Nanopartículas de sílice	0,015	20	18,25	60
S. Kawa et al. [81]	3- Nanopartículas de sílice	0,01	15	70	33
A. S. Mohammed [82]	4- Nanopartículas de sílice	0,01	30	25	NA
S.Chithra, S. R.et al. [83]	5- Nanopartículas de sílice	0,01	40	27	9
M. Kamali et al. [9]	6- Nanopartículas de sílice	0,11	25	90	0,1
C. Wang et al. [84]	7- Nanopartículas de sílice	0,02	60	150	65
S. Ridha et al. [85]	8- Nanopartículas de sílice	0,03	20	70	10,34
S. El-Gamal et al. [86]	9- Nanopartículas de sílice	0,0025	240	90	16
H. Liu et al. [23]	Nanotubo de halloysita (HNT)	0,02	18	90	20
M. A. A. Alvi et al. [87]	Nanotubos de carbón	0,18	30	70	14
R. Kaur et al. [88]	Nanotubos de carbón	0,0002	10	100	NA
M. Rahimirad et al. [89]	Nano-metacaolín (NMK)	0,3	75	70	14
P. D. McElroy et al. [90]	Nanofibras de óxido de aluminio (ANF)	0,1	98	76,7	24,13
S. Ridha et al. [85]	Nanopartículas de sulfato de calcio	0,0075	<50	25	10,34
S. Ridha et al. [85]	Nanopartículas de carbonato de calcio	0,0055	<50	25	10,34

Tabla 3. (Continuación).

S. Ridha et al. [85]	Nanopartículas de hidróxido de hierro	0,0066	<50	25	10,34
S. Ahmed et al. [91]	Nanopartículas de carbón	0,005	NA	NA	3,45
R. Kaur et al. [92]	Nanotubos de carbón	0,0004	10	100	80
Santra et al. [93]	Nanotubos de carbón (MWNT)	0,005	50	88	13,78
C. Vipulanandan et al. [94]	Nanopartículas de alúmina	0,01	50	32	8,7
Baig, M et al. [11]	Nanopartículas de zeolita.	0,01	70	228	55,15
M. Murtaza et al. [95]	Nanopartículas de arcilla	0,01	1	104	3,45
X. Sun et al. [96]	Nanofibras de celulosa	0,0004	20	140	1,02
L. L. Cha Ma et al. [77]	Nanopartículas de arcilla y nanopartículas de sílice	0,18	40	20	20

Nota. Clasificación de los nanomateriales implementados en los estudios de resistencia a la compresión de los fluidos de cementación respecto a su concentración, tamaño de partícula o diámetro y condiciones en las pruebas de laboratorio.

Uno de los nanomateriales más estudiados para el mejoramiento de la compresión de los fluidos de cementación, son las nanopartículas de sílice, por tal razón se realizó un compendio de las investigaciones más recientes como se observa en la Figura 4. Biricik et al. [79], estudiaron el efecto de las nanopartículas de sílice de 15 nm en el mejoramiento a la compresión a altas concentraciones (5 y 10 %), obteniendo una eficiencia del 33.85 %. En contraste, S. Kawa et al. [81], también usaron nanopartículas de sílice de 15 nm, pero en este caso obtuvieron una eficiencia del 23.29 %. El buen rendimiento de las nanopartículas de sílice, fue atribuido a que las nanopartículas están bien dispersas y actuaron como agentes nucleantes, formando geles C-S-H. Adicionalmente, las nanopartículas también formaron diferentes enlaces Si-O y Si-, dando lugar al incremento de la formación de enlaces con el hidróxido de calcio libre [97].

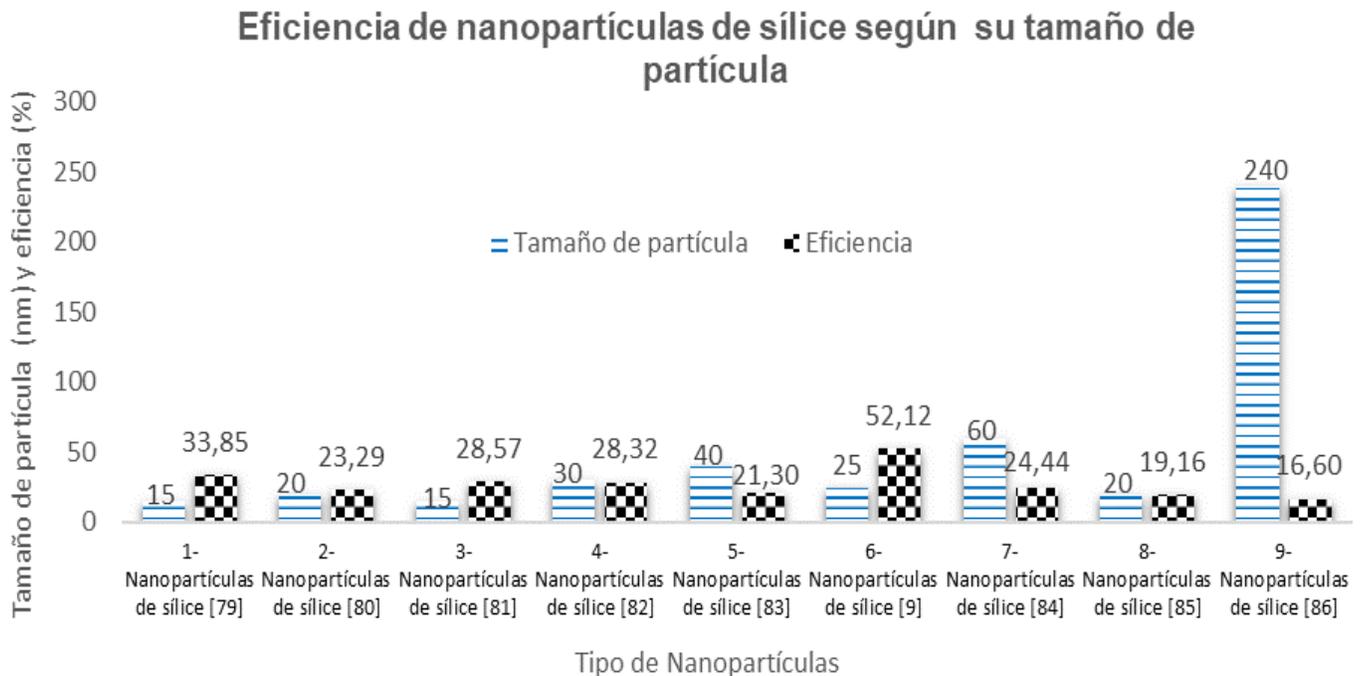
S. El-Gamal et al. [86] evaluaron el efecto de las partículas de sílice de 250 nm en la resistencia a la compresión de un fluido de cementación. Los autores indicaron una eficiencia del 16.60 % (Ver Figura 4), la cual fue la más baja entre los valores de eficiencia obtenidas para las nanopartículas de sílice. Este resultado fue atribuido al tamaño de partícula, el cual como se observa no corresponde al régimen nanométrico. Por otro lado, M. Kamali et al. [9], usaron nanopartículas de sílice con un tamaño de partícula de 25 nm, y obtuvieron una eficiencia del 52.12 %. En este caso, al usarse nanopartículas de menor tamaño, pueden alcanzar zonas más remotas y pequeñas de la matriz del cemento para formar una matriz más compacta. S.Chithra, S. R. et al. [83] y Y. C. Wang et al. [84], utilizaron nanopartículas de sílice con un tamaño de partícula de 40 y 60 nm, respectivamente. Las eficiencias en la resistencia a la compresión fueron de 21.30 % y 24.44 %, respectivamente, valores menores a los obtenidos con las nanopartículas de menor tamaño.

S. El-Gamal et al. [86], usaron una bio-plantilla la síntesis de nanopartículas de sílice. Los autores usaron glutaraldehído para reticular el amonio con nanopartículas de sílice y extrajeron la membrana de la cáscara del huevo. Los resultados mostraron que las nanopartículas de sílice sintetizadas

fortalecieron la matriz del fluido de cementación y aumentaron la resistencia a la compresibilidad, debido a su reacción puzolánica. Como se observa en la Figura 4, si se comparan las nanopartículas de sílice obtenidas a través de la bio-plantilla con nanopartículas de sílice con una pureza del 99.9 % [79], no lograron la misma eficiencia. Esto podría deberse al tamaño de partícula como se evidencia en la Figura 4, las nanopartículas de sílice con mayor tamaño de partícula (240 nm) lograron una eficiencia del 16.6 %, en contraste, con la eficiencia obtenida con las nanopartículas de 15 nm, las cuales lograron una eficiencia del 33.85 %.

Las nanopartículas de sílice también mejoran las propiedades reológicas, las cuales tienen una relación con la resistencia a la compresión “a mayor resistencia de la viscosidad a parámetros de temperatura y presión, mayor será la resistencia a la compresión” [84]. Las nanopartículas de sílice pueden presentar una superficie considerablemente grande para interactuar con el medio, lo cual podría influir en una mayor resistencia a la presión [98]. Así lo demostraron Isfahani et al. [80], quienes adicionaron nanopartículas de sílice al fluido de cementación. Éstas nanopartículas ocuparon los espacios donde había agua y la desplazaron, generando una disminución de la cantidad de “agua libre” en el cemento en un 39.47 %. Otros autores como P. D. McElroy et al. [90], afirmaron que se las nanopartículas pueden aglomerarse y reducir su eficiencia. Asimismo, los autores indicaron la importancia de la textura superficial de las nanopartículas en la eficiencia del material. A mayor rugosidad, mayores las interacciones entre las fibras de las nanopartículas y la matriz del cemento, siendo beneficioso para la resistividad a la compresión.

Figura 4.
Eficiencia de nanopartículas de sílice según su tamaño de partícula.



Nota. Comparación de la eficiencia de las nanopartículas sílice en el mejoramiento de la compresión respecto a su tamaño de partícula.

La Figura 5 presenta la comparación de la resistencia a la compresión expuestos durante 7 días usando diferentes tipos de nanomateriales. Como se evidencia en la Figura 5, las nanopartículas de sílice presentan una de las mejores eficiencias en la compresión con un valor del 52.12 %. Esto podría deberse a que las nanopartículas de sílice generan un aumento en la resistencia mecánica por medio de la hidratación [83]. Valores similares de eficiencia fueron obtenidos en el caso de las nanopartículas de hidróxido de hierro [85] y las nanopartículas de zeolita [91] con unos valores de 54.36 % y 54.64 % respectivamente. No obstante, se debe tener en cuenta que estos resultados no son totalmente precisos, puesto que los resultados se basan en recopilaciones de estudios con informaciones cualitativas, sin considerar otras variables como la interacción de las nanopartículas con el tipo de cemento usado, que puede tener también una influencia considerable en la eficiencia.

Otras investigaciones mostraron que las nanopartículas de sílice ocupan los espacios vacíos del cemento, generando una mejor resistencia a la compresión en la matriz, dichos espacios vacíos del cemento generan la disminución de la densidad del mismo, lo cual a su vez disminuye la resistencia a la compresión [104,105]. Esta situación ha generado que las nanopartículas de sílice presenten una mayor eficiencia que otros aditivos usados en los fluidos de cementación.

P. D. McElroy et al. [90], investigaron el efecto de las nanofibras de óxido de aluminio (ANF) en la estructura del cemento. Los autores indicaron que este material generó un efecto de “puenteo de fibras”. Como se observa en la Figura 5, este material presentó una eficiencia a la compresión de 39.72 % después de 7 días y llegó a un valor de 63.5 % a los 28 días (Figura 6).

Se ha comprobado que los nanotubos de halloysita (HNT), permiten el mejoramiento de la resistividad de la compresión y la resistencia a los esfuerzos de flexibilidad del cemento. Liu et al. [23], demostraron que la resistencia a la compresión y a la flexión del cemento aumentó en un 40.8 % y 49.2 %, respectivamente, usando una concentración de 3 % de nanotubos de halloysita. También, lograron reducir el módulo de elasticidad de la muestra de cemento en un 20 % después de un tiempo de curado de 28 días. Estos resultados fueron atribuidos a que los nanotubos de halloysita permitieron obtener un cemento con una menor permeabilidad, reticulación y una estructura más densa, lo cual contribuyó a una alta resistencia y tenacidad de la muestra de cemento. La estructura de reticulación se le atribuyó a la forma de los nanotubos y a la presencia de grupos hidroxilo, en la superficie de los nanotubos de halloysita. También se observó que los nanotubos de halloysita generaron mayor grado de hidratación del cemento. Como se observa en la Figura 6, los nanotubos de halloysita, presentaron una ventaja sustancial sobre otros nanomateriales como los nanotubos de carbono y algunas nanopartículas de sílice a los 28 días, mostrando una eficiencia de resistencia a la compresión del 29 % [99].

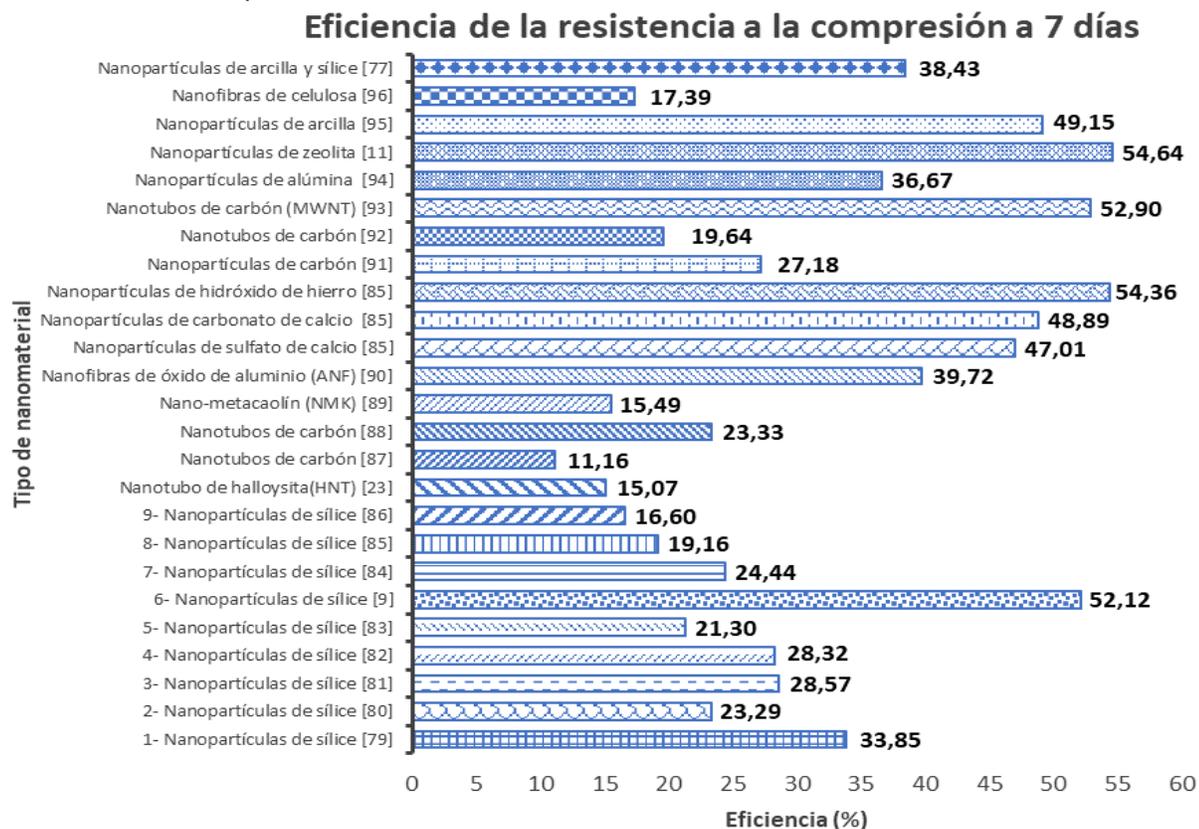
Los nanomateriales también han sido usados para mejorar las propiedades de otros materiales, empleados para resolver problemas en la integridad de los pozos. Alvi et al. [71,92], demostraron que los nanomateriales han mejorado significativamente el tiempo de bombeo de los geopolímeros usados en el cemento, reportando el uso de alúmina y nanotubos de carbono funcionalizados, con grupos hidroxilo (MWCNT-OH). Las partículas de alúmina y los nanotubos de carbono MWCNT-OH aumentaron la resistencia a la compresión de 2945 psi a 4154 psi y 4274 psi, respectivamente, después de 28 días de tiempo curado. Los nanotubos de carbono pueden generar una cementación

homogénea y densa [92] aumentando la compresibilidad del fluido [100]. Sin embargo, se ha evidenciado que los nanotubos de carbono pueden llegar a aumentar la viscosidad a tal grado que se genera un tipo de pasta, ocasionando que el cemento no se pueda manipular de una forma adecuada, por causa de las aglomeraciones y el aumento de su tixotropía, que tienen las partículas dentro de la matriz del cemento [95,90].

Otros autores como Dawood et al. [101], prepararon nanopartículas de metacaolín (NMK) a través de la activación térmica de la roca caolín a diferentes temperaturas (700-800 °C), y un proceso de molienda durante 30-60 horas, obteniendo un tamaño de partícula de 75 nm. Aunque las nanopartículas incluyeron formas desiguales, sus resultados mostraron que mejoran la compresión del cemento. Este efecto fue atribuido a la aceleración de la reacción puzolánica y a la transformación de C_3S y C_2S , en geles C-H-S. Las puzolanas de sílice tienen la facultad de reaccionar con el hidróxido de calcio y el agua (H_2O), lo cual mejoran la hidratación de los fluidos de cementación. Adicionalmente, el nano-metacaolín funciona como relleno y activador [102], aumentando su eficiencia de 15.49 % a los 7 días a 52.25 % a los 28 días como se presenta en las Figuras 5 y 6, respectivamente. Gracias a los cambios físico-químicos, las nanopartículas de metacaolín lograron aumentar la resistencia como material puzolánico, y se obtuvo que a menor tamaño de la partícula mejor es el empaquetamiento dentro del cemento.

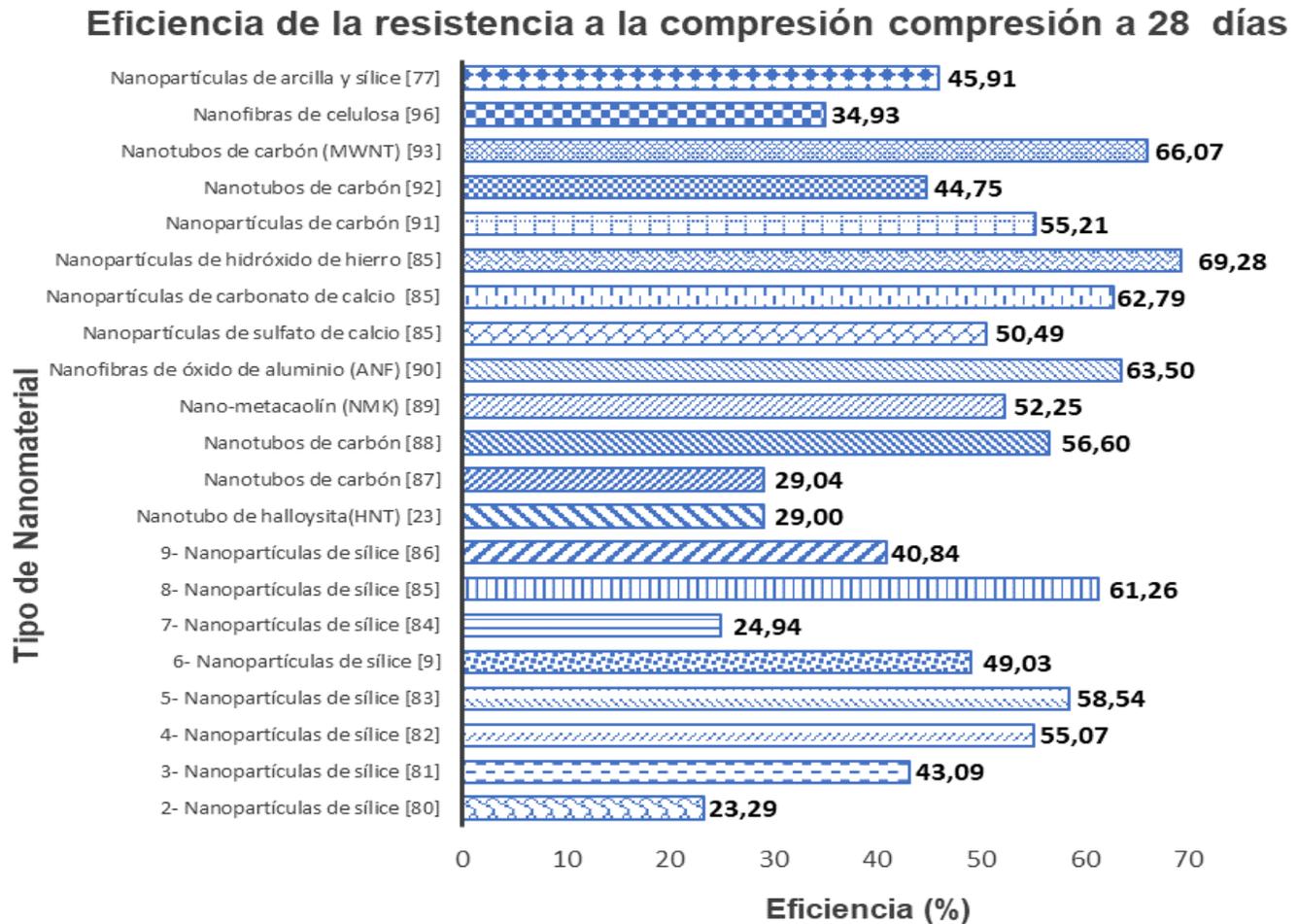
Figura 5.

Resistencia a la compresión a los 7 días.



Nota. Comparación de las eficiencias de los nanomateriales a la compresión expuestos a 7 días.

Figura 6.
Resistencia a la compresión a los 28 días.



Nota. Comparación de las eficiencias de los nanomateriales a la compresión expuestos a 28 días.

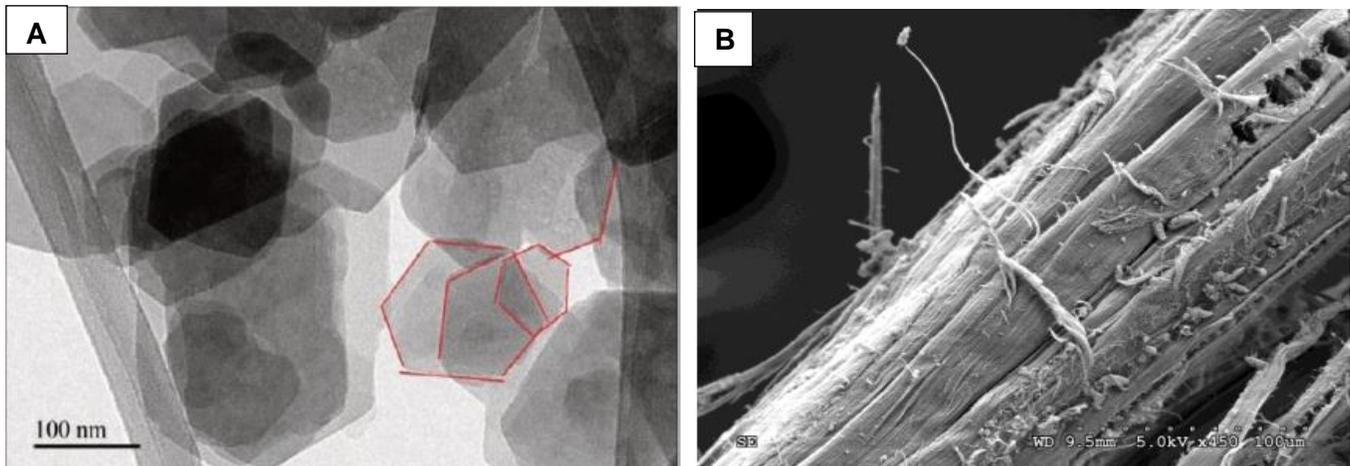
Mehairi et al. [15], sintetizaron nanopartículas de sulfato de calcio, hidróxido de hierro (III) y nanopartículas de carbonato de calcio, para mejorar las propiedades de los fluidos de cementación. Éstas nanopartículas de hidróxido de hierro (III) presentaron un incremento significativo en la resistencia a la compresión y reducción en la porosidad y permeabilidad del cemento. La eficiencia de las nanopartículas de hidróxido de hierro (III) se le atribuyó a la cinética más lenta de agregación de sus partículas, lo cual permitió que las nanopartículas estuvieran suspendidas en el fluido, sin la necesidad de añadir un agente dispersante. Así mismo, las nanopartículas de hidróxido de hierro (III), Nanoplaquetas de grafeno .

Otros nanomateriales como las nanopartículas de aluminio, lograron generar un cemento “inteligente”, más fácil de monitorear, aumentaron la resistividad eléctrica y su resistencia a la compresión, la cual fue determinada a través del modelo de tensión-deformación de C. Vipulanandan et al. [94]. Ahmed et al. [91], usaron nanopartículas de carbón preparadas con agua desionizada, para reducir el grado de incertidumbre en las pruebas de evaluación del cemento. Los autores indicaron que la presencia de

impurezas en el cemento puede impactar en las propiedades de los fluidos de cementación. Como se observa en la Figura 5, si se comparan las nanopartículas de aluminio con las de carbón, las nanopartículas de aluminio tuvieron mejores resultados con una diferencia del 18.75 % de mejoramiento a la resistencia a la compresión y a un menor costo, debido a que la preparación con agua de grifo es mucho más rentable que la elaboración con agua desionizada.

Figura 7.

Comparación de estructuras de nanopartículas.



Nota. Comparación de las estructuras de las nanopartículas de zeolita y nanopartículas de arcilla en la matriz del fluido de cementación. (a) Micrografía TEM de las nanopartículas de zeolita [11] y (b) Micrografía SEM del fluido de mezcla base [95].

Las nanopartículas de zeolita [103] también han mostrado buenos resultados para mejorar las propiedades de los fluidos de cementación. Las nanopartículas de zeolita mejoran la microestructura del cemento y reducen su permeabilidad debido a una alta reactividad puzolánica, las cuales son responsables del endurecimiento del cemento. Las moléculas de puzolanas actúan como aglomerantes hidráulicos, los cuales a su vez son responsables de aumentar las reacciones de hidratación y la disminución del tiempo de fraguado. Similarmente, dependiendo de su área de interacción, las nanopartículas de zeolita han logrado aumentar la resistencia a la compresión [104].

Se ha evidenciado que usar nanopartículas de zeolita en concentraciones superiores al 10 % (Tabla 3), mejora las propiedades mecánicas del concreto a cualquier edad. Así mismo, se ha reportado que las nanopartículas de zeolita se diferencian de otras nanopartículas por su estructura, las cuales generalmente forman una figura geométrica similar a un hexágono [11] como se evidencia en la Figura 7-a. Esta estructura es crucial para tomar ventaja de otros nanomateriales, esta geometría forma unas microestructuras más densas en la matriz del cemento, dando como resultado una disminución en el tiempo de transición y aumento en su resistencia a la compresión. Similarmente, otros nanomateriales mostraron ventajas por su morfología como los diseñados por Murtaza et al. [95], quienes desarrollaron nanopartículas de arcilla modificada con montmorillonita, compuesta principalmente por sílice y alúmina (Figura 7-b). Estas nanopartículas formaron un producto de cristal, que se entrelaza y

se une para formar una estructura más fuerte en la matriz del cemento, mejorando su resistencia a la compresión.

Al comparar las nanopartículas de arcilla con las nanopartículas de zeolita se ha encontrado que las nanopartículas de arcilla llenan los poros con mucha más eficiencia, proporcionando un empaque de partículas más denso en comparación con las nanopartículas de zeolita. Así mismo, las nanopartículas de arcilla con una baja concentración (menor al 1 %) soportan mayores condiciones de temperatura y presión [105], en comparación a las nanopartículas de carbón de calcio, que a una misma concentración se degrada con mayor facilidad [83].

Por otro lado, se han destacado las nanofibras de celulosa (CNF) por los efectos físicos que generan dentro de la matriz del fluido [106]. Sun et al. [96], usaron CNF para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los fluidos de cementación. Sin embargo, las CNF generaron efectos contraproducentes, como la disminución en su flexibilidad. Aunque se hayan generado micropuentes dentro de la matriz para disminuir las fisuras y aumentar la resistividad a la compresión, las CNF no lograron la misma eficiencia que otros nanomateriales como las nanopartículas de sílice, donde se presentó diferencia de eficiencia del 30.11 % en su resistividad a la compresión (Figura 5).

Similarmente, las nanofibras de celulosa (CNF), no son tan resistentes como las estructuras fibrilares creadas por los nanotubos de carbono (CTN), que tienen valores de resistencia significativamente mayores. Otros autores como M. Rahimirad et al. [89], demostraron las ventajas de usar CTN para mejorar la cristalización de los fluidos de cementación. Estos investigadores estudiaron las estructuras de los CTN y generaron una distribución uniforme a lo largo de las moléculas del cemento, lo cual generó la cristalización del cemento. La cristalización es la principal causa de la formación de las estructuras fibrilares entre los poros del cemento, lo cual incide en el aumento de la resistividad a la compresión.

4. DURABILIDAD

Otro de los factores más relevantes en el proceso de cementación de un pozo de petróleo y gas es su durabilidad [107], puesto que una baja durabilidad del fluido de cementación podría ocasionar el derrumbe del pozo, invasiones de fluidos no deseados a la formación y lo más importante, se pondría en riesgo la vida de los trabajadores [108].

La durabilidad de un pozo de petróleo y gas es estudiada con respecto al tiempo [109], debido a que el envejecimiento del cemento puede generar fallas en sus propiedades y en su estructura. Otros factores que afectan la durabilidad del fluido de cementación pueden ser la presión, la temperatura, entre otras condiciones de yacimiento [110].

Las nanopartículas tienen como objetivo resolver problemas a través de los cambios fisicoquímicos que pueden generar en el fluido de cementación [5]. Por ejemplo, A. Ghajari et al. [111] adicionaron nanotubos de carbono (CNT) a la matriz de cemento y lograron disminuir la resistividad eléctrica,

aumentar la sensibilidad a la compresión y también mejoraron las propiedades de durabilidad haciendo más duradero el fluido de cementación antes las diversas condiciones del pozo.

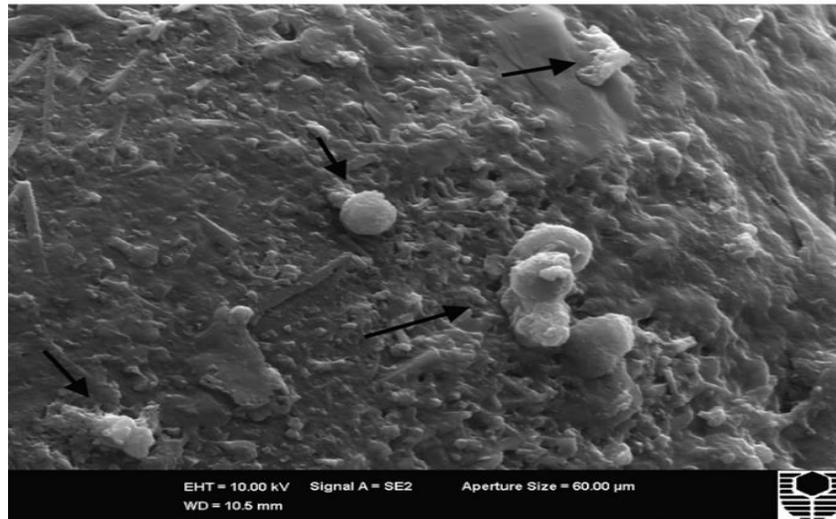
Las nanopartículas de sílice también han logrado mejorar la durabilidad del fluido de cementación [122,123]. Autores como S. Chithra et al. [112], indicaron que las nanopartículas de sílice ayudaron a reforzar la calidad del cemento provocando aumentos en sus uniones macromoleculares [113], haciendo más duradero el fluido y más resistente ante diferentes escenarios hostiles.

A temperaturas de yacimiento, se ha demostrado que las nanopartículas de sílice a diferentes concentraciones, presentan una buena resistencia a los diferentes ambientes presentes en un pozo [114], lo cual repercute directamente en el fluido de cementación [115]. Por otro lado, se ha evidenciado que si las nanopartículas de sílice no se encuentran bien dispersas en el medio no son tan efectivas a presiones y temperaturas elevadas [84]. Este problema podría generar aberturas considerables en los enlaces macroscópicos, los cuales a su vez pueden generar filtraciones, mala resistencia en el fluido de cementación y puede llegar a generar pérdida de estabilidad y durabilidad del cemento [116].

Por otro lado, M. Tabatabaei et al. [113] reportaron que las nanoplaquetas de grafito mezcladas con una mezcla de ácido nítrico y ácido sulfúrico (en primera instancia con un cemento clase G durante 3 horas y en segunda instancia con un cemento clase G durante toda la noche, con una concentración de cemento de 0,13 %), pueden llegar a mejorar las propiedades de tenacidad y durabilidad. Se ha comprobado que estas nanoplaquetas (con tamaños de partículas entre 20 y 40 nm) adicionadas al fluido de cementación en diferentes concentraciones, mejoran hasta en un 42 % la tenacidad y la durabilidad del fluido, haciendo que este fluido de cementación tenga una mayor resistencia a la compresión, una mayor resistencia al cizallamiento y un aumento en su densidad, generando que el fluido sea mucho más duradero con el paso del tiempo.

En otro estudio desarrollado por M. Tabatabaei et al. [102] reportaron el uso de nanoplaquetas de grafito (GNP) modificadas (Figura 8) y de bajo costo, en una concentración de agua/cemento de 0,44 % y 190 °F simulando las condiciones de pozo y el tiempo de curado por un día. Se realizaron 3 diferentes tipos de ensayo utilizando GNP combinadas con una mezcla de ácido y GNP envueltas con polímero, a concentraciones de 0,1, 0,2 y 0,4 % de GNP. Los resultados indicaron un aumento de la resistencia a la compresión de un 42 % de la mezcla GNP/ácido y de un 24 % de la mezcla GNP/polímero. También se reportó un aumento en la propiedad de durabilidad y un mejoramiento en el aislamiento del pozo [117].

Figura 8.
Micrografía TEM de nanopartículas.



Nota. Micrografía TEM de las nanopartículas de arcilla y grafito modificadas [21].

Para un adecuado uso de las nanoplaquetas de grafito en los fluidos de cementación se deben tener en cuenta dos aspectos importantes, M. Tabatabaei et al. [118], recomienda la adecuada dispersión de las nanoplaquetas para no generar problemas en el fluido de cementación como fragilidad y menos durabilidad [119], la segunda forma de modificar las nanoplaquetas de grafito, es generar una consistencia de las dos partes entre las nanoplaquetas y el fluido de cementación. Esto ocasionaría que las dos partes estén en un entorno más estable, ayudando a una mayor interacción entre los compuestos aumentando la compatibilidad de las partes, generando un aumento en la durabilidad del fluido de cementación y una mayor resistencia ante las condiciones de yacimiento [120].

En un estudio desarrollado por M. Tabatabaei et al. [119], se observó que el uso de ácido poliacrílico en las nanoplaquetas de grafito generó un aumento en la flexibilidad y en el efecto del esfuerzo de compresión, dando como resultado un aumento en la propiedad de durabilidad del fluido de cementación aproximadamente de un 24 %. Varios estudios fueron realizados simulando las condiciones de pozo para tener resultados más cercanos a la realidad del yacimiento [121].

También se ha observado que la utilización de nanofibras híbridas han mejorado propiedades como la resistencia a la compactación y la durabilidad de los fluidos de cementación [122], estas nanofibras son utilizadas en condiciones hostiles en los pozos para generar una capa más fuerte al momento de presentarse fisuras, rupturas o canales no deseados de migración de fluidos [123].

5. FLEXIBILIDAD

La flexibilidad es la capacidad que tiene un cuerpo para doblarse o para adaptar la forma dependiendo de las circunstancias que se presentan en un ambiente bajo una fuerza o presión que se le imprime [124]. La falta de flexibilidad de un fluido de cementación podría generar fracturas, micro anillos, fisuras

y quebraduras, las cuales facilitan la invasión de fluidos indeseados a la formación o al espacio anular [125]. Se ha evidenciado que, en muchas ocasiones, la flexibilidad en la cementación de pozos de petróleo y gas es ignorada [6], pero al pasar de los años ha llegado a formar parte del grupo de propiedades que los ingenieros de completamiento deben tener en cuenta para que los fluidos de cementación sean óptimos y eficientes [126].

Varios estudios han incluido el uso de elastómeros, fibras, nanopartículas, polímeros y compuestos [116,118,119,120,121] que ayudan a disminuir los problemas asociados con las propiedades mecánicas de los fluidos de cementación y a aumentar la flexibilidad del fluido [97].

En ocasiones los elastómeros, las fibras, las nanopartículas, los polímeros y los compuestos son descartados de acuerdo con las condiciones del pozo que se llegan a presentar "in situ", muchos de estos compuestos no son aptos para soportar tan altas presiones o temperaturas. A menudo, esto ocurre porque las estructuras no están diseñadas para soportar altas condiciones de trabajo [127].

En un estudio desarrollado por Y. Li et al. [128], se observó que las nanopartículas de carbón son una buena opción para mejorar propiedades como la durabilidad, las propiedades mecánicas y la resistencia a la compresión en los fluidos de cementación. Las nanopartículas de carbón híbridas brotoideas (BHNCMs) [129] a concentraciones entre 0,5 % y 3 % en peso de cemento, generaron aumento en las propiedades de flexibilidad, comportamiento reológico y durabilidad. Por otro lado, disminuyeron las propiedades de viscosidad, pérdida de filtrado y tiempo de espaciado. Se observó que aproximadamente se mejoró en un 20 % las propiedades de flexibilidad del fluido de cementación y de igual manera la resistencia a la compresión.

Los estudios en laboratorios han llevado a encontrar soluciones óptimas para las problemáticas presentadas en los fluidos de cementación, asociados con la flexibilidad del mismo [15]. Por ejemplo, se reportó un trabajo donde se modificó el cemento API clase G con nanorubber [123], a diferentes concentraciones de nanorubber de entre 2 a 8 %, con la misma concentración de bentonita, 3 % y 1,5 % de dispersante, misma concentración de antiespumante y diferentes volúmenes de agua. Se observó que estas nanopartículas aumentaron la resistencia a la compresión, disminuyeron el tiempo de fraguado del fluido de cementación y aumentaron la tracción. Además, se reportó que los nanorubber presentaron una buena dispersión en el fluido de cementación y buena estabilidad térmica en presencia de condiciones de yacimiento.

Otros autores como M. Rahimirad et al. [89], demostraron que los nanotubos de carbono (CNT) generaron una disminución en la resistencia de la flexibilidad en el fluido de cementación, lo cual evitó la presencia de fisuras o micro anillos ante cualquier sobreesfuerzo aplicado al fluido. También se observó que los CNT mejoran las propiedades mecánicas del fluido de cementación y proporcionan una mayor resistencia de compresión y resistencia eléctrica [130].

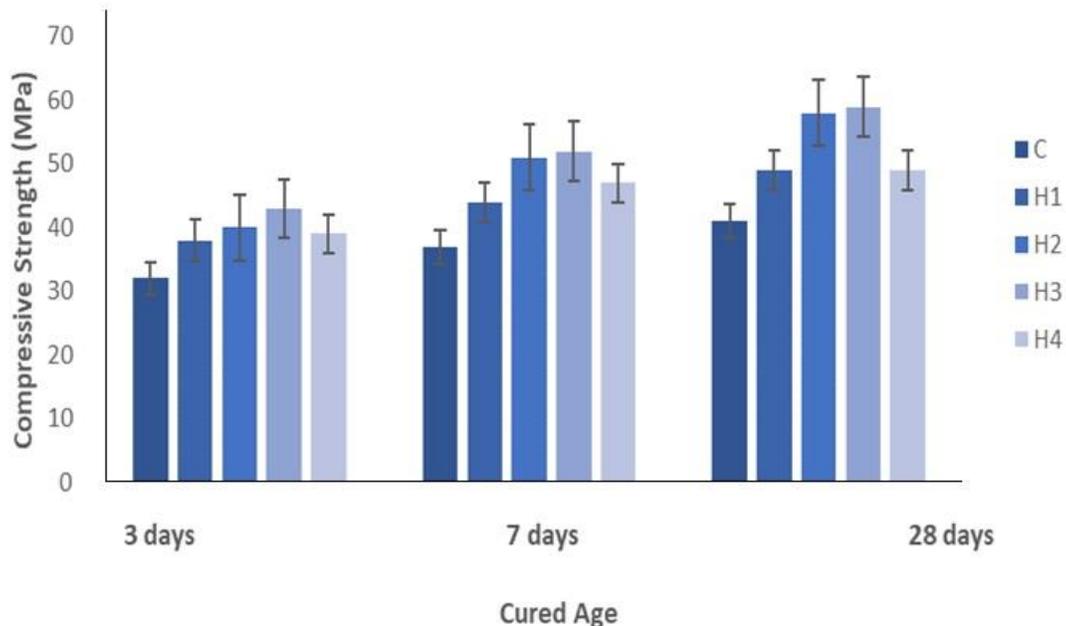
En un estudio efectuado por X. Sun et al. [131], se mezclaron nanopartículas de nanofibras de celulosa (CNF) y nanoplaquetas de grafeno (GNP), las cuales aumentaron la flexibilidad y mejoraron varios parámetros en el comportamiento reológico del fluido. También se observó un incremento en la hidratación del cemento generando una mayor estabilidad en el tiempo de fraguado del fluido de cementación.

Por otro lado, en un estudio desarrollado por H. Liu et al. [26], se usaron nanotubos de halloysita (HNT) y nanopartículas de sílice (Figuras 9 y 10), para evaluar el comportamiento de la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexibilidad en diferentes concentraciones de HNT y cemento en un lapso de 3, 7 y 28 días. En las Figuras 9 y 10 se observa el comportamiento del curado del cemento dentro de tres periodos, 3 días, 7 días y 28 días Vs. la fuerza de compresión (Figura 9) y la fuerza de flexibilidad (Figura 10). Los dos estudios se basaron en 4 diferentes concentraciones de HNT, diferentes concentraciones de cemento y la misma concentración en gramos de nanopartículas de sílice, donde: C hace referencia a la muestra con una concentración en cemento de 788 gr y 0 gr de HNT, H1 hace referencia a la muestra con una concentración en cemento de 780 gr y 8 gr de HNT, H2 hace referencia a la muestra con una concentración en cemento de 772 gr y 16 gr de HNT, H3 hace referencia a la muestra con una concentración en cemento de 764 gr y 24 gr de HNT y, H4 hace referencia a la muestra con una concentración en cemento de 756 gr y 32 gr de HNT. Los resultados indicaron que el uso de HNT y nanopartículas de sílice contribuyeron a una mejora en las propiedades de flexibilidad y esfuerzo de compresión como se observa en la Figura 9 y en la Figura 10 respectivamente.

Por otro lado, se observó que usar una mayor concentración de HNT generó una mejora de entre un 36 % y 40 % en el esfuerzo de compresión y la flexibilidad respectivamente, con un margen de tiempo aproximado de 28 días. En los dos primeros periodos de tiempo (3 días y 7 días), la fuerza de compresión mostró un margen de aumento de entre 10 y 20 % (Figura 9) haciendo que el fluido de cementación sea un poco más débil antes de los 28 días de curado. Por otro lado, se observó que, a los 3 días de curado, el fluido cementación es mucho más flexible en comparación de los 7 y 28 días (Figura 10) haciendo que con el pasar del tiempo el fluido aumente su resistencia a la flexibilidad.

Figura 9.

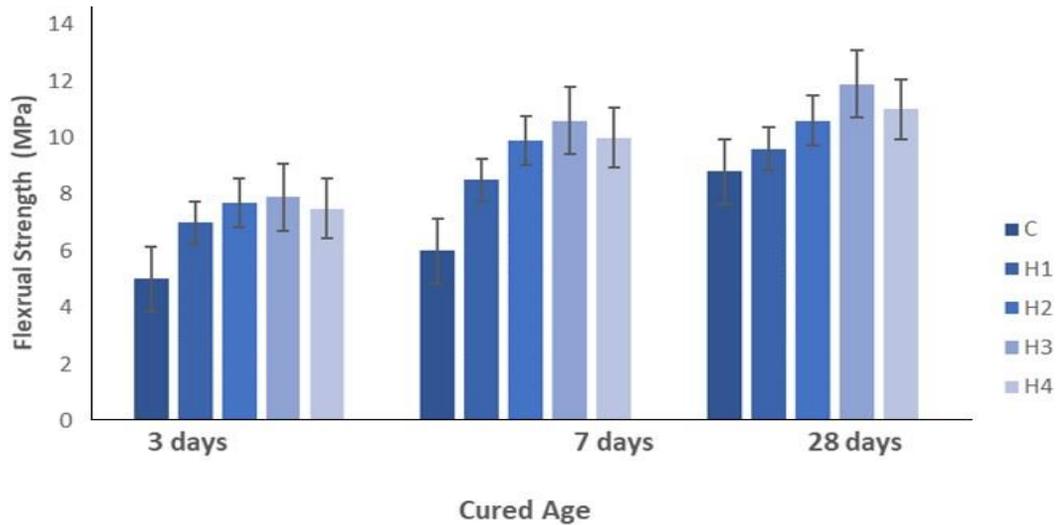
Resistencia a la compresión en 3 días.



Nota. Resistencia a la compresión de cinco fluidos diferentes de cementación, curados a 3, 7 y 28 días [23].

Figura 10.

Resistencia a la flexión en 3 días.



Nota. Resistencia a la flexión de cinco fluidos diferentes de cementación, curados a 3, 7 y 28 días [23].

Se ha demostrado que al momento de utilizar las nanofibras en los fluidos de cementación generan modificaciones en el modelo de Young [132]. Las nanofibras generan un aumento en las propiedades de resistencia a la compresión, resistencia eléctrica, mejoras en las propiedades mecánicas del fluido de cementación y disminuye la resistencia a la flexibilidad. Por otro lado, las ventajas que presentan estas nanofibras son similares a las generadas por los nanotubos de carbono y las nanofibras de carbón. En un estudio desarrollado por N. Jafariesfad et al. [125], se observó que al agregar 0,2 % en concentración de nanoarcilla fibrosa a un fluido de cementación, aumentó la flexibilidad en casi un 20 % aproximadamente, aumentó la resistencia a la compresión y aumentó la resistencia a la tracción.

6. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO

El comportamiento reológico es fundamental en el estudio de los fluidos de cementación [19]. El estudio del comportamiento reológico puede presentar dificultades relacionadas con la incertidumbre o incongruencias de los datos “in situ” por los cambios de presiones y temperaturas y también por el ambiente hostil que se puede llegar a presentar dependiendo de las zonas de interés.

Varios estudios se han enfocado en el mejoramiento del comportamiento reológico de los fluidos de cementación [127,126,128,18,83,9,129,130,75,131,80]. Por ejemplo, V. Ershadi et al. [132], usaron nanopartículas de sílice de 20 nm en un cemento clase G a una concentración del 1 %. Se evidenció que el uso de las nanopartículas de sílice mejoró propiedades como la viscosidad plástica y el punto cedente logrando una mayor resistencia a la compactación [133], reducción en el filtrado y una mayor eficiencia en el tiempo de espesamiento. Se ha reportado que estos resultados se obtuvieron a

concentraciones bajas de nanopartículas, debido a que un porcentaje considerable de nanopartículas de sílice, podría ocasionar falencias en las propiedades reológicas del fluido de cementación [134].

Otro autores usaron nanopartículas de sílice a una concentración de 1 % BWOC, un tamaño de partícula de 30 nm en un cemento clase H [135]. Los resultados indicaron mejoramiento en el punto cedente [136], lo cual generó un mejor tiempo en la resistencia a la compresión [82]. Por otro lado, se usaron nanopartículas de hierro para el mejoramiento del comportamiento reológico, a una concentración de 1 % BWOC en un cemento clase H [137]. Los resultados demostraron que estas nanopartículas pueden aumentar propiedades de permeabilidad haciendo que el cemento se adhiera de una mejor manera a la roca y al casing. Por otro lado, las nanopartículas de hierro lograron disminuir la densidad permitiendo un flujo laminar constante a temperaturas de entre 25 y 80 °C y aumentó la resistencia a la compresión en un menor tiempo [138].

En otro estudio efectuado se adicionaron nanopartículas de hierro en un cemento clase G, con una concentración del 2 % y un tamaño de partícula menor a 100 nm. Este fluido presentó mejoras en la permeabilidad aumentando adherencia entre el cemento [139], el casing y la roca. Además, se reportó un aumento a la resistencia eléctrica, mejor hidratación del cemento y por consiguiente, se consiguió aumentar el punto cedente y la viscosidad plástica generando que el comportamiento reológico mejore en esta clase de cemento [11].

En un estudio elaborado por C. Vipulanandan et al. [136], las nanopartículas de carbonato de calcio aplicadas a un fluido de cementación clase H a una concentración del 1 %, ocasionaron un aumento en resistencia a la compresión en un 50 % y aumentaron el punto cedente y la viscosidad plástica en 28 días de prueba. Por otro lado, cuando se usaron nanopartículas de carbonato de calcio al 3 % en un cemento clase H, se disminuyó la viscosidad en los mismos 28 días de prueba. Se observó también en los dos casos de estudio, un aumento en la permeabilidad, lo cual repercute en que el cemento se adhiera de una mejor manera a la roca y al casing a su vez, evitando fugas a la formación [82]. Asimismo, se presentó un aumento en la resistencia a la compresión.

Otros estudios incluyeron las nanopartículas de metacaolin para generar un mejoramiento en las propiedades de los fluidos de cementación. Se ha reportado que este tipo de material a altas temperaturas (aproximadamente entre 70 y 80 °C) y a concentraciones entre 40 y 60 %, generó un aumento en la resistencia del fluido de cementación, buena hidratación del cemento, buen tiempo de fraguado estimado para este rango de temperaturas y también una alta resistencia ante agentes corrosivos [140].

A. Dawood et al. [94], desarrollaron nanopartículas de metacaolin (NMK) a una concentración de 6 % BWOC, con un tamaño de 75 nm en un cemento clase G. Los resultados indicaron un aumento en el punto cedente y de la viscosidad plástica. Así mismo, presentaron un aumento en la resistencia a la compresión, un aumento en la hidratación del fluido de cementación y un aumento de la densidad al adicionar estas nanopartículas.

Otros autores compararon dos clases de nanopartículas de sílice: el primer tipo, fueron sintetizadas a través del método sol-gel en laboratorio y el segundo tipo correspondió a sílice comercial. En el proceso, R. Qalandari et al. [141], adicionaron las nanopartículas sintetizadas en laboratorio al fluido de cementación a una concentración de 0,25 %. A través de las pruebas de reología, se comprobó que las nanopartículas sintetizadas actuaron como dispersantes en el sistema del cemento, disminuyendo

así la viscosidad plástica y manteniendo la viscosidad del fluido de cementación. El valor de punto cedente reportado fue idéntico para ambos tipos de nanopartículas. Similarmente, se reportó que dos clases de nanopartículas de sílice disminuyeron la densidad del fluido, presentaron un aumento en el esfuerzo a la compresión y generaron un aumento en la resistencia eléctrica del cemento.

Otros autores Z. Tang et al. [132], compararon el rendimiento de nanopartículas de celulosa (CNP), nanofibras de celulosa (CNF) y nano cristales de celulosa (CNC) [131] en el comportamiento reológico de un fluido de cementación. Los resultados indicaron que la mejor eficiencia entre los materiales se obtuvo con las nanofibras de celulosa, estas tienen la capacidad de formar una capa o estructura más compacta, generando así un aumento en las propiedades del comportamiento reológico como lo es en el punto cedente y en la viscosidad plástica [143]. También se reportó un aumento en la resistencia a la compresión a temperaturas elevadas y un aumento a la resistencia eléctrica en el fluido de cementación. Esto se debe a que las estructuras de las nanofibras de celulosa son más resistentes en comparación a las nanopartículas de celulosa y a los nanocristales de celulosa [144]. Las nanofibras de celulosa pueden formar estructuras más compactas y ligeras gracias a sus propiedades mecánicas que estas presentan [80].

Por otro lado, el uso nanotubos de carbono en un cemento Portland [145] a una concentración de 0,30 % BWOC, logró un aumento en el valor del punto cedente y la viscosidad plástica y ocasionó una mayor oposición a la tracción [146]. Otros estudios reportaron el uso de una mezcla de nanofibras de celulosa (CNF) y nanoplaquetas de grafeno (GNP) a una menor concentración de BWOC (0,04 % de CNF y 0,05% de GNP) [147] en un cemento clase H. Se presentó una mayor hidratación del cemento, un aumento en la flexibilidad y en la resistencia a la compresión [131].

La implementación de nanocristales de celulosa también es una tecnología prometedora para mejorar las propiedades reológicas de los fluidos de cementación. Los nanocristales de celulosa adicionados a un fluido de cementación tipo B, a una concentración de 0,20 % [148], demostró un aumento en el punto cedente y la viscosidad plástica del fluido de cementación. Asimismo, se reportó un aumento en la resistencia de la flexibilidad y en la hidratación del cemento, haciendo que estos nanomateriales también sean efectivos en el tiempo de fraguado del fluido [142,146].

DISCUSIÓN

Las nanopartículas de sílice fueron unas de las más económicas porque están compuestas por desechos orgánicos industriales, no obstante otros nanomateriales como las nanopartículas de alúmina y carbonato de calcio, tienden hacer muy costosas por su adquisición de materia prima; a un que las nanopartículas de sílice no tienen la “máxima” eficiencia, siendo superada por nanopartículas de hidróxido de hierro y las nanopartículas de zeolita, si tienen un balance “optimo” entre sus beneficios y economía, puesto que mejoran tanto la cristalización como la resistencia a la compresión, contribuyendo a los parámetros mecánicos, hidráulicos y económicos de las lechadas de cementación

Ningún nanomaterial presento disminución de su eficiencia a la resistencia a la compresión, si se pudo evidenciar que algunos nanomateriales tiene aumentar más su rendimiento en comparación a otros; como las nanopartículas de hidróxido de hierro (III), que aumentaron su eficiencia a los 28 días pasando de 54,36% a 69,28% (figura 6-7); en cambio los nanotubos de halloysita aumentaron su

resistividad a la compresión, pasando de 15,07% a 29%, siendo muy bajo en comparación con otros nanomateriales, igualmente las nanopartículas de sílice mantuvieron estable su eficiencia a través del tiempo manteniendo un 23,29% tanto a los 7 y 28 días.

Las nanopartículas de óxido de titanio, se ven muy afectadas por los cambios drásticos de temperatura, por lo cual son poco útiles para ser aplicadas a condiciones de yacimiento, en cambio, las nanopartículas de celulosa presentan buenas propiedades tanto fisicoquímicas y térmicas, debido a que tienen una estructura cristalina más ordenada, pero las nanopartículas que más demostraron resistencia a condiciones de trabajo fueron las nanopartículas de zeolita teniendo una las temperaturas más alta de 228°C y presión de 55,15 Mpa (Tabla 3).

Aunque se observó que los nano tubos de carbón, las nanopartículas de sílice, las nanofibras híbridas, entre otras nanopartículas, aumentaron en diferentes propiedades del fluido de cementación como en el caso de la resistencia eléctrica, resistencia a la compresión, tenacidad, no se observó una mayor eficiencia o un aumento significativo en la propiedad de durabilidad, como en el caso de las nanoplaquetas de grafito modificadas con una mezcla de ácido nítrico y ácido sulfúrico. Esta mezcla generó un aumento en la propiedad de durabilidad de entre un 42% en comparación a las otras nanopartículas, esto se debe a los ambientes trabajados, a las diferentes concentraciones que se usaron en cada uno de los estudios efectuados y al comportamiento de cada una de las nanopartículas utilizadas.

Las nanopartículas de carbón, el nano rubber, los nano tubos de carbón, las nanofibras de celulosa con nanoplaquetas de grafeno, fueron utilizadas en estudios de laboratorio para observar cuál de las nanopartículas era la más eficiente para mejorar la flexibilidad del cemento. Aunque las nanopartículas de carbón arrojaron resultados prometedores con un aumento en esta propiedad de aproximadamente un 20%, las que mejor se adaptaron al entorno, mejoraron la propiedad de la flexibilidad, aportaron mejoras en otras propiedades como en la resistencia a la compresión, durabilidad, la resistencia eléctrica y mejoras en las propiedades mecánicas del cemento, fueron los nanotubos de halloysita con nanopartículas de sílice. Esta mezcla genero aumento en la flexibilidad de aproximadamente un 36% a un 40 %, también se observó un aumento en el esfuerzo a la compresión generando que estas nanopartículas sean las más aptas y las más eficientes al momento de trabajar con esta propiedad.

En el comportamiento reológico se observó que la utilización de nanopartículas como, nanopartículas de sílice, nanopartículas de carbonato de calcio y nanopartículas de metacaolin, fueron las que evidenciaron aumento de entre un 40% a 50% en la propiedad de comportamiento reológico, se adaptaron mejor al entorno de trabajo y de igual manera fueron las que ocasionaron aumento en las propiedades del punto cedente y de la viscosidad plástica, también se observó aumento en las propiedades de la resistencia a la compresión, resistencia eléctrica, reducción de la filtración, mayor hidratación del cemento y modificaron las propiedades mecánicas del cemento. En comparación con las nanopartículas de celulosa, nanofibras de celulosa, nano cristales de celulosa y nanotubos de carbón demostraron que algunas nanopartículas bajo condiciones de yacimiento no trabajan de la mejor manera, un aumento en la propiedad del comportamiento reológico de entre un 10% a 22% y no fueron las que mejor se adaptaron al entrono de trabajo.

En la tabla 4 se clasifican las nanopartículas con mejor eficiencia conforme a los criterios de selección; según porcentajes más eficientes en el caso de resistencia a la compresión y migración de fluidos,

geometría más homogénea y uniforme como criterio de cristalización y durabilidad; mejoramiento de las viscosidades como criterio de reología, y resistencia a condiciones de yacimiento como criterio para flexibilidad. Cada una de estos nanomateriales fueron preseleccionados, porque presentaron los mejores cambios físico-químicos e interacciones dentro de la matriz del cemento, en cada propiedad de estudio, según cada autor.

Tabla 4.

Nanomateriales más eficientes.

Parámetro	Nanopartículas	Autores		Eficiencia
Cristalización	Nanofibras de celulosa	Z. Tang et al	[32]	Controla la complejidad de la matriz del fluido de cementación por medio de la generación de un apoyo fibroso que mejora el tiempo óptimo de cristalización.
	Nanotubos de carbono	X. Yan et al.	[29]	Formar configuraciones rómbicas o elipsoidales mejorando la cristalización de las moléculas de cemento.
Migración de fluidos	Nanopartículas de sílice	H. Lu et al.	[58]	Aumento de la tixotropía “aumento la resistencia a la presión y temperatura”, soportando mayores esfuerzos de “cizallamiento”.
	Nanoplaquetas de grafeno (GNP)	I. Mohammed et al.	[60]	Mejorar las fisuras del cemento actuando como un agente de puenteo entre las partículas de cemento, rellenando los espacios porosos.
Resistencia a la compresión	Nanopartículas de zeolita	Baig, M et al.	[11]	Mejoran la microestructura del cemento y reduciendo su permeabilidad, debido a una alta reactividad puzolánica.
	Nanopartículas de hidróxido de hierro	S. Ridha et al.	[85]	Impidieron el crecimiento de cristales grandes de cemento (producto hidratado, lo cual generó un cemento más compacto que evitó el colapso de las gargantas de poro.
Durabilidad	Nanoplaquetas de grafito	X. Kong and M. M. Ohadi	[121]	Modifica con una mezcla de ácido nítrico y ácido sulfúrico. Esta mezcla generó un aumento en la propiedad de durabilidad.
Flexibilidad	Nanotubos de halloysita	H. Liu et al	[26]	Aumentan la flexibilidad con un buen comportamiento a condiciones de yacimiento resistiendo condiciones dáticas.
Reológica	Nanopartículas de sílice	S. Goyal et al.	[133]	Mejoran las propiedades como la viscosidad plástica y el punto cedente logrando una mayor resistencia a la compactación, reducción en el filtrado y una mayor eficiencia en el tiempo de espesamiento.
	Nanopartículas de carbonato de calcio	C. Vipulanandan et al.	[136],	aumentaron el punto cedente, la viscosidad plástica y la permeabilidad, lo cual repercute en que el cemento se adhiera de una mejor manera a la roca y al casing a su vez, evitando fugas a la formación

Nota. Resumen de los nanomateriales más eficientes implementados en los diferentes parámetros estudiados.

CONCLUSIONES

- Se observó que las nanoplaquetas de grafito modificadas con una mezcla de ácido nítrico y ácido sulfúrico, mostraron mejoras considerables en la propiedad de durabilidad en el fluido de cementación a comparación de otras nanopartículas, como es el caso del aumento en su tenacidad y durabilidad en un 42% aproximadamente, aumento en la resistencia a la compresión, mayor resistencia al cizallamiento y aumento en su densidad.
- Se concluyó que en la propiedad de la flexibilidad los nanotubos de halloysita con nanopartículas de sílice mostraron un aumento en la resistencia a la compresión, aumento en la flexibilidad y un buen comportamiento a condiciones de yacimiento en el fluido de cementación estudiado ocasionando que estas nanopartículas sean las más aptas para mejorar esta propiedad.
- Las nanopartículas de sílice y los nanotubos carbonato de calcio demostraron mejoras considerables en el fluido de cementación en la propiedad del comportamiento reológico y en otras propiedades como lo son, por ejemplo, la modificación de las propiedades mecánicas del cemento, aumento en la resistencia a la compactación, reducción de la filtración, aumento en el punto cedente, aumento en la viscosidad plástica y son útiles para trabajos a condiciones de yacimiento.
- De acuerdo con el estado del arte se evidencia que las nanopartículas más eficientes para evitar la migración de fluidos son las nanopartículas de sílice, logrando aumentar la tixotropía “aumento la resistencia a la presión y temperatura” del fluido de cementación, soportando mayores esfuerzos de “cizallamiento”, con una eficiencia del 93,42 % en comparación con su filtrado inicial, con una concentración del 0,04% y un tamaño de partícula de 60 nm.
- Se evidencio por medio de la recopilación bibliográfica, que las nanopartículas de zeolita presentan mejores resultados de resistencia a la compresión, mejorando la microestructura del cemento y reduciendo su permeabilidad, debido a una alta reactividad puzolánica, esto por medio de las “reacciones de hidratación, con una eficiencia del 54,64% a los 7 días, pero a los 28 días de prueba su aumento no es tan significativo como otros nanomateriales.
- De acuerdo con los más de 100 artículos estudiados y recopilados en el estado del arte, se evidencio que las nanopartículas de hidróxido de hierro presentaron una eficiencia significativa en resistencia a la compresión de 28 días, con un valor de 69,28%, Nanopartículas de hidróxido de hierro , lo cual permitió que las nanopartículas estuvieran por más tiempo suspendidas en el fluido, superando con gran medida a los otros nanomateriales.
- Por medio de la recopilación bibliográfica se pudo determinar que los nanotubos de carbono presentan mejores características de cristalización en comparación con los demás nanomateriales, debido a que sus “láminas de tubos”, generan geometrías “regulares” que aumentan la interacción con los compuestos del cemento formando mejores geometrías en la matriz de esta.

- Las nanofibras de celulosa presentan menor tiempo de fraguado generado por la alta reacción de hidratación logrando un tiempo de fraguado en tan solo 1 hora, en comparación con las nanopartículas de óxido de titanio que posee un tiempo de fraguado mayor a 22 horas, esto a causa de las masivas aglomeraciones por el nanomaterial disminuyendo su área de interacción.
- El tipo de cemento, la concentración a utilizar y el ambiente de estudio son factores fundamentales para tener en cuenta al momento de utilizar las nanopartículas, debido a que de ello depende su efectividad y su comportamiento.
- Se debe garantizar una buena dispersión de las nanopartículas en el fluido de cementación. De esta manera se evita que las mismas pierdan eficacia.

REFERENCIAS

- [1] V. Thakar, S. Nambiar, M. Shah, and A. Sircar, "A model on dual string drilling: on the road to deep waters," *springer link*. p. 13, 2018.
- [2] K. Huang;, M. Azimi, and L. Guo, "Blockchain Technology in the Oil and Gas Industry: A Review of Applications, Opportunities, Challenges, and Risks," *xplore*, vol. 7, p. 41426–41444, 2019.
- [3] S. Bolaños and A. Víctor, "Estudio de las propiedades mecánicas de los cementos usados para la cementación de zonas productivas en pozos del bloque 15 operado por Petroamazonas," 2012.
- [4] A. J. Teplitz and W. E. Hassenbroek, "An Investigation Of Oil-Well Cementing." *OnePetro*, Jan. 1946.
- [5] J. Gusman, L. Gonzales, and K. Malave, "Aplicación de cementación remedial para solucionar problemas de producción en pozos petroleros," *Dsp. en ESPOL*, vol. 0, no. 0, pp. 1–8, 2012.
- [6] P. H. Jones and D. Berdine, "Oil-Well Cementing." *OnePetro*, Jan. 1940.
- [7] A.M.Talmonab and A.Bezuijen, "Simulating the consolidation of TBM grout at Noordplaspolder," *scienceDirect*, vol. 24, pp. 493–499, 2009.
- [8] N. Yepes, "Factibilidad de la cementación de zonas productoras con tecnología CemCRETE en los campos VHR y Cuyabeno," 2012.
- [9] M. Kamali, Mohammadreza Khalifeh, A. Saasen, and L. Delabroy., "Materials for Well Integrity – Short-Term Mechanical Properties of Cement Systems," *onepetro*, vol. 200739–MS, no. 5–13, 2020.
- [10] K. J. Krakowiak, J. J. Thomas, S. Musso, S. James, A. T. Akono, and F. J. Ulm, "Nano-chemo-mechanical signature of conventional oil-well cement systems: Effects of

elevated temperature and curing time,” Cem. Concr. Res., vol. 67, pp. 103–121, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2014.08.008.

- [11] Baig, M. Talha, Rahman, and M. K. A. Al-Majed, “*Application of Nanotechnology in Oil Well Cementing*,” onepetro, vol. SPE-187543, pp. 3–11, 2017.
- [12] M. M. T, S. D. Lupyana, and G. Jun, “*Nanotechnology in the petroleum industry: Focus on the use of nanosilica in oil-well cementing applications - A review*,” scienceDirect, pp. 1–2, 2020.
- [13] P. D. McElroy, H. Emadi, M. C. Watson, and L. Heinze, “*Hydration products and mechanical properties investigations of nanofiber additives in cement wellbore environments*,” in SPE Western Regional Meeting Proceedings, Jan. 2020, vol. 2020–April, doi: 10.2118/200811-ms.
- [14] M. Khalil, B. M. Jan, C. W. Tong, and M. A. Berawi, “*Advanced nanomaterials in oil and gas industry: Design, application and challenges*,” Applied Energy, vol. 191. Elsevier Ltd, pp. 287–310, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.01.074.
- [15] A. G. Mehairi Maen, and M. Husein, “*Enhancement of cement properties by means of in situ grown nanoparticles*,” scienceDirect, vol. 261, no. 120496, pp. 1–14, 2020.
- [16] S. Lu *et al.*, “*The mechanical properties, microstructures and mechanism of carbon nanotube-reinforced oil well cement-based nanocomposites*,” RSC Adv., vol. 9, no. 46, pp. 26691–26702, Aug. 2019, doi: 10.1039/c9ra04723a.
- [17] M. T. Maagi, S. D. L. Gu, and Jun, “*Effect of Nano-SiO₂, Nano-TiO₂ and Nano-Al₂O₃ Addition on Fluid Loss in Oil-Well Cement Slurry*,” springer link, pp. 1–3, 2019.
- [18] by Phillip McElroy and M. C. Watson James Sheng Habib K Menouar Mark Sheridan, “*Improving cement wellbore integrity with nanomaterials: Design of experiments and machine learning techniques*,” 2020.
- [19] A. Shahriar and M. L. Nehdi, “*Rheological properties of oil well cement slurries*,” Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater., vol. 165, no. 1, pp. 25–44, Feb. 2012, doi: 10.1680/coma.2012.165.1.25.
- [20] B. R. Reddy, Y. Xu, K. Ravi, D. W. Gray, and P. Pattillo, “*Cement Shrinkage Measurement in Oilwell Cementing - A Comparative Study of Laboratory Methods and Procedures*,” Soc. Pet. Eng. - Rocky Mt. Oil Gas Technol. Symp. 2007, pp. 36–53, Apr. 2007, doi: 10.2118/103610-MS.
- [21] H. Assaedi and Shaiks, “*Effect of nano-clay on mechanical and thermal properties of geopolymers*,” J. Asian Ceram. Soc. □, vol. 4, no. 1, 2016.
- [22] A Peyvandi, A. Dahi Taleghani, P. Soroushian, Ryan, R. Cammarata, “*The Use of Low-Cost Graphite Nanomaterials to Enhance Zonal Isolation in Oil and Gas Wells*,” onepetro, pp. 1–4, 2017.
- [23] H. Liu *et al.*, “*Influence of halloysite nanotube on hydration products and mechanical properties of oil well cement slurries with nano-silica*,” scienceDirect, pp. 1–3, 2020.

- [24] D. Baglieri, F. Cesaroni, P. Macnaght, and J. S. Guivant, "Dominique Vinck Related papers Does t he Nano-pat ent 'Gold Rush' Lead t o Ent repreneurial-Driven Growt h? Some Policy Lesso... Nanoscience and Nanot echnology: How an Emerging Area on t he Scient ific Agenda of t he Core Count r... Noela Invernizzi, Mat t h," scienceDirect, vol. 6, 2021.
- [25] C. A. Franco, R. Zabala, and F. B. Cortés, "*Nanotechnology applied to the enhancement of oil and gas productivity and recovery of Colombian fields*," Pet. Sci. Technol., vol. 157, pp. 39–55, 2017.
- [26] C. A. Franco, C. A. Franco, R. D. Zabala, Í. Bahamón, Á. Forero, and F. B. Cortés, "*Field Applications of Nanotechnology in the Oil and Gas Industry: Recent Advances and Perspectives*," Energy & Fuels, vol. 35, pp. 19266–19287, 2021.
- [27] J. Lozada, "*Investigación Aplicada*," Divulg. científica la Univ. Tecnológica Indoamérica, vol. 3, no. 1390–9592, 2014.
- [28] A. Ali *et al.*, "*Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles*," Nanotechnol. Sci. Appl., vol. 9, p. 49, 2016.
- [29] X. Yan, H. Cui, Q. Qin, W. Tang, and X. Zhou, "*Study on Utilization of Carboxyl Group Decorated Carbon Nanotubes and Carbonation Reaction for Improving Strengths and Microstructures of Cement Paste*," no. 8: 153, 2016.
- [30] H. M.Saleh, S. M.El-Sheikh, E. E.Elshereafy, and A. K.Essa, "*Mechanical and physical characterization of cement reinforced by iron slag and titanate nanofibers to produce advanced containment for radioactive waste*," scienceDirect, vol. 200, pp. 135–145, 2019.
- [31] Y. Yang and E. A. Grulke, "*Thermal and rheological properties of carbon nanotube-in-oil dispersions*," Journal of Applied Physics. p. 114307, 2006.
- [32] G. YingLiab, P. Ming Wangb, and X. Zhao, "*No TitleMechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes*," scienceDirect, vol. 43, pp. 1239–1245, 2005.
- [33] O. J. Silva, "*How the cement hydration process is produced.*" p. 76, 2016.
- [34] J. ChenabShi, C. KouaChi, and S. Poon, "*Hydration and properties of nano-TiO₂ blended cement composites*," scienceDirect, vol. 34, no. 5, 2012.
- [35] D. P.Bentz, E. J.Garboczi, C. J.Haecker, and O. M.Jensen, "*Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials*," scienceDirect, vol. 29, no. 10, pp. 1663–1671, 1999.
- [36] E. Cerro-Prada, S. García-Salgado, and Á. Q. andFernando Varela, "*Controlled Synthesis and Microstructural Properties of Sol-Gel TiO₂ Nanoparticles for Photocatalytic Cement Composites.*" 2019.
- [37] D. EldinFouad *et al.*, "*Enhanced properties of low crystalline α -Fe₂O₃ nanoparticles synthesized via mechanical-ultrasonic activated precipitation as a green alternative to the conventional route: A comparative study*," scienceDirect, vol. 318, no. 113964, 2020.

- [38] H. Li, T. Du, H. Xiao, and Q. Zhang, "Crystallization of calcium silicate hydrates on the surface of nanomaterials," American Ceramic Society. 2017.
- [39] C.-S. Poon, L. L. Ma, S. C. Kou, and L. W. Wong, "Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes," *scienceDirect*, vol. 31, no. 9, pp. 1301–1306, 2001.
- [40] T. Meng, Y. Hong, H. Wei, and Q. Xu, "Effect of nano-SiO₂ with different particle size on the hydration kinetics of cement," *scienceDirect*, vol. 675, pp. 127–133, 2019.
- [41] J. Tullianib, S. Musso, A. Tagliaferro, G. Ferro, "Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites," *scienceDirect*, vol. 69, no. 11–12, 2009.
- [42] J. Ramasamy and M. Nullaha, "Nanocellulose for oil and gas field drilling and cementing applications," *scienceDirect*, vol. 184, no. 106292, 2020.
- [43] J. Rieger, M. Kellermeier, and L. Nicoleau, "Formation of Nanoparticles and Nanostructures—An Industrial Perspective on CaCO₃, Cement, and Polymers." 2014.
- [44] W. Donga, W. Lia, Kirk, V. Xuzhen, H. Z. Sunb, and D. Sheng, "Piezoresistivity deterioration of smart graphene nanoplate/cement-based sensors subjected to sulphuric acid attack," *scienceDirect*, vol. 23, no. 100563, 2021.
- [45] SudongHua, X. Yaoa, and K. Wang, "Developing high performance phosphogypsum-based cementitious materials for oil-well cementing through a step-by-step optimization method," *scienceDirect*, vol. 72, pp. 299–308, 2016.
- [46] W. Lerch, "Hydration of Portland Cement Compounds," ACS Publications, vol. 8, pp. 837–847, 1934.
- [47] S. Sharma and N. C. Kothiyal, "Synergistic effect of zero-dimensional spherical carbon nanoparticles and one-dimensional carbon nanotubes on properties of cement-based ceramic matrix: microstructural perspectives and crystallization investigations," *interfaces compuestas*, pp. 899–92, 2015.
- [48] E. Tsampali, E.-C. Tsardaka, E. Pavlidou, K. M. Paraskevopoulos, and M. Stefanidou, "Comparative Study of the Properties of Cement Pastes Modified with Nano-Silica and Nano-Alumina," *Trans Tech Publ. Suiza*, vol. 286, pp. 133–144, 2018.
- [49] S. Sharma and N.C.Kothiyal, "Facile growth of carbon nanotubes coated with carbon nanoparticles: A potential low-cost hybrid nanoadditive for improved mechanical, electrical, microstructural and crystalline properties of cement mortar matrix," *scienceDirect*, vol. 123, pp. 829–846, 2016.
- [50] F. Puertas, "Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas de futuro," *Cons. Super. Investig. Científicas Licenc. Creat. Commons*, vol. 45, no. 239, pp. 1–12.
- [51] A. Bayanak, S. Zarinabadi², K. Shahbazi, and A. Azimi, "Reduction of fluid migration in well cement slurry using nanoparticles," *IJP energies Nouv.*, vol. 75, no. 15, pp. 1–3, 2020.

- [52] P. Y. Yao-Hui Liu, X. W. Ze-Bin Ouyang, and L. Zhang, “*Effect of Nano-CaCO₃ on the Sealing Efficiency of Grouts in Flowing Water Grouting*,” *springer link*, vol. 24, pp. 1–3, 2020.
- [53] J. C. Newlove, K. Kitano, R. C. Portnoy, and D. N. Schulz, “*Fluid loss control in oil field cements*,” *osti.*, 1984.
- [54] Il. Yaohu, Z. Lei, Y. Ping, and W. Xiao, “*Experimental investigation on sealing efficiency of CNT composite grouts in inclined fractures with flowing water*,” *scienceDirect*, vol. 270, pp. 1–2, 2021.
- [55] C. A. R. Villacis, “*Nanopartículas aplicadas al control de pérdidas por filtrado en procesos de cementación de pozos petrolíferos*,” 2018.
- [56] M. Bayanak, S. Zarinabadi, and A. Azimi, “*Effects of Nano Silica on oil well cement slurry characteristics and control of gas channeling*,” *scienceDirect*, vol. 34, p. 25, 2020.
- [57] G. A. Balza , O. Corona , A. Alarcón , J. Echevarrienta , M. Goite, “*Estudio Microestructural Del Cemento Portland Aditivado Con Nanomateriales*,” *Acta Microsc.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–4, 2016.
- [58] H. Lu *et al.*, “*The Study and Application of Intelligent Thixotropic Cement Slurry Based on Nanotechnology*,” *onepetro*, pp. 1–3, 2019.
- [59] J. Němeček, L. Li, and Y. Xi, “*Electrokinetic nanoparticle injection for remediating leaks in oil well cement*,” *scienceDirect*, vol. 156, pp. 63–72, 2017.
- [60] I. Mohammed ,Alkhamis Abdulmohsin, “*New Cement Formulations Utilizing Graphene Nano Platelets to Improve Cement Properties and Long-Term Reliability in Oil Wells*,” *SPE Int.*, vol. 192342–MS, 2018.
- [61] A. H. Hassan and A. A. Hassan, “*Experimental Investigation of Nano Alumina and Nano Silica on Strength and Consistency of Oil Well Cement*,” *J. Eng. (Eng. J.)* /, vol. 23, no. 12, p. 14, 2017.
- [62] C. G. Marcondes, M. H. Medeiros, J. M. Filho, and P. Helene, “*Nanotubos de carbono en concreto de cemento Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción de agua*,” *ALCONPAT*, vol. 5, no. 2, p. 14, 2015.
- [63] O. A. Mendoza Reales, “*A review on the chemical, mechanical and microstructural characterization of carbon nanotubes-cement based composites*,” *scienceDirect*, vol. 154, p. 710, 2017.
- [64] W. C. Xiaopeng Zhai, Y. Xu, Y. Lou, S. Xu, L. Zheng, and J. J. Zhiyang Guo , Yuanchang Chen , Hongyong Hao, “*Recent Advances in Coupled Thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) Processes for Hydrocarbon, Geothermal, and Natural Gas Hydrate Development*,” *Hindawi*, no. 8886426, 2021.
- [65] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), “*NANOMATERIALES*.” pp. 2–12, 2015.
- [66] Y. Yang, C. Zhang, C. Lai, and G. Zeng, “*Nanomateriales fotocatalíticos BiOX (X = Cl,*

Br, I): Aplicaciones para combustibles y gestión ambiental, scienceDirect, vol. 254, p. 96, 2018.

- [67] S. Odenbach, “Soret coefficient of nanoparticles in ferrofluids in the presence of a magnetic field.” p. 869737, 1998.
- [68] A. F. Lozano and E. F. Camacho, “Evaluación del desempeño de un nano compuesto en las lechadas de cemento en la empresa superior energy services a nivel laboratorii,” 2018.
- [69] J.M.Reynouard and J.F.Georgin, “Modeling of structures subjected to impact: concrete behaviour under high strain rate,” scienceDirect, vol. 25, pp. 131–143, 2003.
- [70] M. J. Gordon, X. Huang, S. L. Pentoney, and Richard N. Zare, “Capillary Electrophoresis,” Sci. reports, vol. 242, no. 4876, pp. 224–228, 1988.
- [71] “Cemento Petrolero Clase G | Holcim Colombia S.A. - Holcim Colombia S.A.” .
- [72] C. Igwe, “Novel Trends in Magnetic Polymeric Nanoarchitectures.” pp. 830–848, 2021.
- [73] B. L. de Sena, C. G. G. DeSouza, J. C. de Oliveira, F. R. Silva, A. P. Henrique, and S. Santos, “Silica content influence on cement compressive strength in wells subjected to steam injection,” scienceDirect, vol. 158, pp. 626–633, 2017.
- [74] Y. Wu, H. Patel, and S. Salehi, “Parametric Study of Mechanical Stresses within Cement Sheath in Geothermal Wells,” scienceDirect, vol. 90, no. 102000, 2021.
- [75] A. Thakkar, A. Raval, S. Chandra, and M. Shah, “A comprehensive review of the application of nano-silica in oil well cementing,” scienceDirect, vol. 6, no. 2, pp. 1–2, 2020.
- [76] J. A. Ali, A. M. Kalhury, A. N. Sabir, R. N. Ahmed, N. H. Ali, and A. D. Abdullah, “A state-of-the-art review of the application of nanotechnology in the oil and gas industry with a focus on drilling engineering,” J. Pet. Sci. Eng., vol. 191, p. 107118, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.petrol.2020.107118.
- [77] L. L. Cha Ma, S. Li, and X. L. Han, “Application of Nanomaterials in the Fields of Drilling Fluids and Completion Fluids,” Key Eng. Mater., vol. 562–565, pp. 576–580, 2013.
- [78] M. T.Maagi, S. D.Lupyana, and GuJun, “Nanotechnology in the petroleum industry: Focus on the use of nanosilica in oil-well cementing applications - A review,” scienceDirect, vol. 193, no. 107397, pp. 5–12, 2020.
- [79] H. Biricik and N. Sarier, “Comparative study of the characteristics of nano silica - , silica fume - and fly ash - incorporated cement mortars,” scielo, vol. 17, no. 3, pp. 4–10, 2014.
- [80] F. T. Isfahani, E. Redaelli, F. Lollini, W. Li, and L. Bertolini, “Effects of Nanosilica on Compressive Strength and Durability Properties of Concrete with Different Water to Binder Ratios,” Hindawi, no. 8453567, p. 16, 2016.
- [81] S. Kawa, L. Ahmed, S. Omer, L. Salar, and A. Salih, “Improving Rheological Properties and Compressive Strength of Oil Well Cement Using Nano silica,” Nanotechnol. Catal. Res. Cent. , Univ. Malaya, Malaysia Int. Conf. Nanotechnol. Salahaddin Univ. Erbil, Iraq,

pp. 1–2, 2020.

- [82] A. S. Mohammed, “*Vipulanandan models to predict the electrical resistivity, rheological properties and compressive stress-strain behavior of oil well cement modified with silica nanoparticles*,” *Egypt. J. Pet.*, vol. 27, no. 4, pp. 1265–1273, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.ejpe.2018.07.001.
- [83] S.Chithra, S. R. R. S. Kumar, and K.Chinnarajuc, “*The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate*,” *scienceDirect*, vol. 113, no. 3, pp. 794–804, 2016.
- [84] C. Wang, X. Chen, X. Wei, and R. Wang, “*Can nanosilica sol prevent oil well cement from strength retrogression under high temperature?*,” *scienceDirect*, vol. 144, pp. 1–6, 2017.
- [85] S. Ridha* and U. Yerikania, “*The Strength Compatibility of Nano-SiO₂ Geopolymer Cement for Oil Well under HPHT Conditions*,” *Journal of Civil Engineering Research*, vol. 5, p. 6-10. 2015.
- [86] S. El-Gamal, F.S.Hashem, and M. Amin, “*Influence of carbon nanotubes, nanosilica and nanometakaolin on some morphological-mechanical properties of oil well cement pastes subjected to elevated water curing temperature and regular room air curing temperature*,” *scienceDirect*, vol. 146, pp. 531–546, 2017.
- [87] M. A. A. Alvi, M. Khalifeh, M. B. Agonafir, “*Effect of nanoparticles on properties of geopolymers designed for well cementing applications*,” *scienceDirect*, vol. 191, no. 107128, p. 16, 2020.
- [88] R. Kaur and N. C. Kothiyal, “*Positive synergistic effect of superplasticizer stabilized graphene oxide and functionalized carbon nanotubes as a 3-D hybrid reinforcing phase on the mechanical properties and pore structure refinement of cement nanocomposites*,” *scienceDirect*, vol. 222, pp. 358–370, 2019.
- [89] M. Rahimirad and J. D. Baghbadorani, “*Properties of Oil Well Cement Reinforced by Carbon Nanotubes*,” *onepetro*, 2012.
- [90] P. D. McElroy, H. Emadi, M. C. Watson, and L. Heinze, “*Hydration Products and Mechanical Properties Investigations of Nanofiber Additives in Cement Wellbore Environments*,” *onepetro*, pp. 1–3, 2021.
- [91] S. Ahmed, Ezeakacha, C. Peter, and S. Salehi, “*Improvement in Cement Sealing Properties and Integrity Using Conductive Carbon Nano Materials: From Strength to Thickening Time*,” *onepetro*, vol. SPE-191709, pp. 6–11, 2018.
- [92] R. Kaur and N.C.Kothiyal, “*Comparative effects of sterically stabilized functionalized carbon nanotubes and graphene oxide as reinforcing agent on physico-mechanical properties and electrical resistivity of cement nanocomposites*,” *scienceDirect*, vol. 202, pp. 121–138, 2019.
- [93] Santra, Ashok, P. J. Boul, and X. Pang, “*Influence of Nanomaterials in Oilwell Cement Hydration and Mechanical Properties*,” *onepetro*, vol. SPE-156937, p. 8.13, 2012.

- [94] C. Vipulanandan, A. Mohammed, and A. S. Ganpatye, "Smart Cement Performance Enhancement with NanoAl₂O₃ for Real Time Monitoring Applications Using Vipulanandan Models," *onepetro*, vol. OTC-28880-, 2018.
- [95] M. Murtaza, M. K. Rahman, and A. A. Al-Majed, "Mechanical and Microstructural Studies of Nanoclay Based Oil Well Cement Mix under High Pressure and Temperature Application," *onepetro*, Nov. 2016, doi: 10.2523/iptc-18991-ms.
- [96] X. Sun, Q. Wu, S. Lee, and Y. Wu, "Cellulose Nanofibers as a Modifier for Rheology, Curing and Mechanical Performance of Oil Well Cement," *scientific reports*, no. 31654. 2016.
- [97] R. de La Roij, C. Egyed, J. P. Lips, "Nano-engineered Oil Well Cement Improves Flexibility and Increases Compressive Strength: A Laboratory Study," *onepetro*, pp. 1–3, 2012.
- [98] A. Javadi, S. M. Fakoorpoor, P. Hosseini, and A. Khaloo, "Interactions between superabsorbent polymers and cement-based composites incorporating colloidal silica nanoparticles," *scienceDirect*, vol. 37, pp. 196–204, 2013.
- [99] H. Sabahia, M. Khoramia, A. Hossein, R. YanaYaser, H. Karami, and J. Mohammad, "Surface functionalization of halloysite nanotubes via curcumin inclusion," *scienceDirect*, vol. 538, pp. 834–840, 2018.
- [100] V. S. Romanov, S. V. Lomov, I. Verpoest and L. Gordbatikh, "Stress magnification due to carbon nanotube agglomeration in composites," *scienceDirect*, vol. 133, p. 244.256, 2015.
- [101] A. D. Salman, "Studying The Effect of Nano-Metakaolin Admixture Material On Mechanical Properties of Oil Well Cement (OWC)," *Eng. Technol.*, vol. 35, no. 9, pp. 1–5, 2017.
- [102] G. Lizia Thankam and N. Thurvas, "Ideal supplementary cementing material – Metakaolin: A review," *Akjournals*, vol. 11, no. 1, 2020.
- [103] K. Eqhlim, A. Lotfi, M. S. Said, and M. Kazem, "Mechanical and Economic Investigation of Soft Computing Based Zeolites of High Strength Concrete," *Int. J. Mod. Trends Sci. Technol.*, vol. 6, no. 2, 2020.
- [104] O. A. M. Reales, P. A. Carisioa, W. C. Pearl Jr. b, and R. Dias Toledo, "Effect of pozzolanic micro and nanoparticles as secondary fillers in carbon nanotubes/cement composites," *scienceDirect*, vol. 281, no. 122603, 2021.
- [105] S. Ma, T. Yu, Y. Wang, and S. Chaouche, Mohend Kawashima, "Phase Evolution of Oil Well Cements with Nano-Additive at Elevated Temperature/Pressure," *Am. Concr. Inst.*, vol. 113, no. 5, pp. 571–578, 2017.
- [106] L. Jiao, M. Su, L. Chen, Y. Wang, H. Zhu, and H. Dai, "Natural Cellulose Nanofibers As Sustainable Enhancers in Construction Cement." *plos one*, p. 168422, 2016.
- [107] O. Opeoluwa, "Nanocompletions versus intelligent well completions, investigating the future of nanotechnology in well completions - A case study," in 38th Nigeria Annual

International Conference and Exhibition, NAICE 2014 - Africa's Energy Corridor: Opportunities for Oil and Gas Value Maximization Through Integration and Global Approach, Aug. 2014, vol. 1, pp. 401–411, doi: 10.2118/172380-ms.

- [108] M. Tabatabaei, A. D. Taleghani, and N. Alem, “*Economic Nano-Additive to Improve Cement Sealing Capability*,” *onepetro*, pp. 1–3, 2019.
- [109] W. Di, “*Applications of Nanomaterials in Wellbore Fluids in Oil and Gas Fields*,” *Mater. Eng. Mater.*, vol. 881, pp. 33–37, 2021.
- [110] E. Lécolier, A. Rivereau, G. Le Saoût, and A. Audibert-Hayet, “*Durability of hardened Portland cement paste used for oilwell cementing*,” *Oil Gas Sci. Technol.*, vol. 62, no. 3, pp. 335–345, May 2007, doi: 10.2516/ogst:2007028.
- [111] A. Ghajari, H. Soltanian, and S. A. Mortazavi, “*An improvement to physical properties of heavy-weight oil well cements using carbon nanotubes*,” *Pet. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 10–19, 2014.
- [112] S.Chithra, S. R. R. S. Kumar, and K.Chinnaraju, “*The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate*,” *scienceDirect*, vol. 113, pp. 794–804, 2016.
- [113] M. Choolaei, A. M. Rashidi, M. Ardjmand, A. Yadegari, and H. Soltanian, “*The effect of nanosilica on the physical properties of oil well cement*,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 538, pp. 288–294, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.msea.2012.01.045.
- [114] Z. Rozynek, A. Józefczak, K. D. Knudsen, A. Skumiel, T. Hornowski, J. O. Fossum, M. Timko, P. Kopčanský and M. Koneracká , “*Structuring from nanoparticles in oil-based ferrofluids*,” *springer link*. pp. 11028–5, 2011.
- [115] S. Abd El-Baky and S. Yehia, “Influence of nano-silica addition on properties of fresh and hardened cement mortar.”*Nanocon*, 2013.
- [116] A. Pourjavadi, S. M. Fakoopoor, A. Khaloo, and P. Hosseini, “*Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO₂ particles*,” *Mater. Des.*, vol. 42, pp. 94–101, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.05.030.
- [117] J.-F. Baret, “*Why Cement Fluid Loss Additives Are Necessary*,” *onepetro*, Nov. 1988, doi: 10.2118/17630-ms.
- [118] M. Tabatabaei and A. D. Taleghani, “*Nanoengineered cement for more effective remedial cementing jobs*,” in *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Oct. 2020, vol. 2020–Octob, doi: 10.2118/201361-ms.
- [119] M. Tabatabaei, A. D. Taleghani, and N. Alem, “*Surface-modified graphite nanoplatelets to enhance cement sheath durability*,” *SPE Drill. Complet.*, vol. 35, no. 3, pp. 452–464, Sep. 2020, doi: 10.2118/199897-PA.
- [120] W. Wang and A. D. Taleghani, “*Three-dimensional analysis of cement sheath integrity around Wellbores*,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 121, pp. 38–51, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.petrol.2014.05.024.

- [121] X. Kong and M. M. Ohadi, “*Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry-An Overview of the Recent Progress*,” Soc. Pet. Eng. - 14th Abu Dhabi Int. Pet. Exhib. Conf. 2010, ADIPEC 2010, vol. 3, pp. 1703–1713, Nov. 2010, doi: 10.2118/138241-MS.
- [122] A. I. El-Diasty and A. M. Ragab, “*Aplicaciones de la nanotecnología en la industria del petróleo y el gas: últimas tendencias mundiales y desafíos futuros en Egipto*,” onepetro, no. SPE-164716-MS, 2013.
- [123] Y. Yang and Y. Deng, “*Mechanical properties of hybrid short fibers reinforced oil well cement by polyester fiber and calcium carbonate whisker*,” Constr. Build. Mater., vol. 182, pp. 258–272, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.110.
- [124] H. . Williams, D. . Khatri, R. . Keese, S. . Le Roy-Delage, J. . Roye, D. . Leach, P. . Rottler, O. . Porcherine, J. .Rodriguez, “*Flexible, Expanding Cement System (FECS) Successfully Provides Zonal Isolation Across Marcellus Shale Gas Trends*,” Soc. Pet. Eng. - Can. Unconv. Resour. Conf. 2011, CURC 2011, vol. 3, pp. 2154–2172, Nov. 2011, doi: 10.2118/149440-MS.
- [125] F. L. Sabins, “*Problems in Cementing Horizontal Wells*,” J. Pet. Technol., vol. 42, no. 4, pp. 398–400, Apr. 1990, doi: 10.2118/20005-PA.
- [126] L. V. Pineda Mateus, “*Un ajuste a la estrategia territorial de hidrocarburos con enfoque sostenible y de prevención de riesgos en el desarrollo de sus actividades*,” 2020.
- [127] G. Q. Bianchi, B. A. Balza, O. Corona, and A. Colina, “*Tendencias en el uso de nanopartículas en sistemas cementantes: presente y futuro en investigación estratégica en la industria petrolera venezolana*,” in EINDHOVEN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2009, pp. 1–10.
- [128] Y. Li, S. Dong, R. Ahmed, L. Zhang, and B. Han, “*Improving the mechanical characteristics of well cement using botryoid hybrid nano-carbon materials with proper dispersion*,” Constr. Build. Mater., vol. 270, p. 121464, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121464.
- [129] S. Q. Ding, L. Q. Zhang, S. W. Sun, J. Ou-Yang, and B. G. Han, “*Nano-Engineered Strong, Durable and Multifunctional/Smart Concretes*,” Key Eng. Mater., vol. 727, pp. 1084–1088, 2017, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.727.1084.
- [130] N.B.Singh, “*Properties of cement and concrete in presence of nanomaterials*,” sciencedirect, vol. 12, pp. 9–39, 202AD.
- [131] X. Sun, Q. Wu, J. Zhang, Y. Qing, Y. Wu, and S. Lee, “*Rheology, curing temperature and mechanical performance of oil well cement: Combined effect of cellulose nanofibers and graphene nano-platelets*,” Mater. Des., vol. 114, pp. 92–101, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2016.10.050.
- [132] M. R. and S. Jafariesfad, N., Gong, Y., Geiker, “*Impact of ultrafine fibrous clay on tensile properties of oil well cement systems*,” Int. Congr. Chem. Cem., 2015.
- [133] S. Goyal, P. Joshi, R. Singh, and Rohan, “*Applications and role of Nano-Silica particles on altering the properties and their usage for oil well cementing*,” scienceDirect, vol. 46,

no. 20, pp. 10681–10686, 2021.

- [134] A. Pikłowska, J. Ziaja, and M. Kremieniewski, “*Influence of the Addition of Silica Nanoparticles on the Compressive Strength of Cement Slurries under Elevated Temperature Condition*,” *Energies*, vol. 14, no. 17, 2021.
- [135] “*Petrolero Clase H Tipo MSR -HSR | Venezolana de Cementos*.” .
- [136] D. Makwana, J. Bellani, D. K. Harsh Kumar Verma, and M. Shah, “*Emergence of nano silica for oil and gas well cementing: application, challenges, and future scope*,” *springer link*, vol. 28, pp. 37110–37119, 2021.
- [137] J. E. Thomas *et al.*, *Fundamentos de engenharia de petróleo*. Interciência, 2004.
- [138] C. Vipulanandan *et al.*, “*Iron nanoparticle modified smart cement for real time monitoring of ultra deepwater oil well cementing applications*,” in *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, May 2015, vol. 3, pp. 2216–2231, doi: 10.4043/25842-ms.
- [139] P. D. McElroy and H. Heber, Bibang Hossein, Emadi Yildirim, Kocoglu Athar, “*Artificial neural network (ANN) approach to predict unconfined compressive strength (UCS) of oil and gas well cement reinforced with nanoparticles*,” *scienceDirect*, vol. 88, p. 103816, 2021.
- [140] Y. Bu, J. Du, S. Guo, H. Liu, and C. Huang, “*Properties of oil well cement with high dosage of metakaolin*,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 39–48, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.173.
- [141] R. . Qalandari, A. . Aghajanpour, and S. . Khatibi, “*A Novel Nanosilica-Based Solution for Enhancing Mechanical and Rheological Properties of Oil Well Cement*,” *Soc. Pet. Eng. - SPE Asia Pacific Oil Gas Conf. Exhib. 2018, APOGCE 2018*, Oct. 2018, doi: 10.2118/192031-MS.
- [142] Y. Cao, P. Zavaterra, J. Youngblood, R. Moon, and J. Weiss, “*The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste*,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 56, pp. 73–83, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.11.008.
- [143] H. Panchal, H. Patel, J. Patel, and Manan Shah b, “*A systematic review on nanotechnology in enhanced oil recovery*,” *sciencedirect*, vol. 6, no. 3, pp. 204–212, 2021.
- [144] A. SadikDahlan, “*Impact of nanotechnology on high performance cement and concrete*,” *sciencedirect*, vol. 1223, no. 128896, 2021.
- [145] K. Ramos Vesco, “*Fabricación de cementos Portland para la cementación de pozos de petróleo en condiciones de laboratorio*,” Jul. 2015.
- [146] “(PDF) *Characterization of Portland cement manufactured with carbon nanotubes directly synthesized over clinker in a continuous process*.” .
- [147] J. Tangpagasit, R. Cheerarot, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, “*Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar*,” *sciencedirect*, vol. 35, pp. 1145–1151, 2005.

[148] *“Petrolero Clase B Tipo MSR -HSR | Venezolana de Cementos.”* .