

ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN ENTRE MICROESFERAS POLÍMERAS, TENSIOACTIVOS TIPO ETOXILADOS Y PARTÍCULAS DE CEMENTO PARA LECHADAS LIVIANAS POR MEDIO DE MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO Y DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Ramses Meleán*, Fedymar Pereira, Franklin Quintero, Manuel Mas

Instituto de Tecnología Venezolana para el Petróleo, Los Teques 1070, Venezuela. Correo electrónico: ramsesmeleán@gmail.com

Recibido: Noviembre de 2019; Aceptado: Enero de 2020

RESUMEN

La distribución de microesferas poliméricas en la matriz de cemento se determinó mediante las técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX). Adicionalmente, se estudió cómo influyen los tensioactivos en la distribución de las partículas, además de la morfología, porosidad del cemento fraguado y las estructuras formadas por la interacción de los aditivos. Este análisis tuvo como finalidad poder elucidar con eficiencia el efecto de los tensioactivos y polímeros en los arreglos estructurales y en los mecanismos de reacción del cemento utilizado para pozos petroleros, a fin de determinar las mejores condiciones de trabajo para las formulaciones de lechadas de cemento con microesferas poliméricas.

Palabras claves: Polímeros, tensioactivo, cemento petrolero.

ABSTRACT

The distribution of polymeric microspheres in the cement matrix was determined by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) techniques. Additionally, it was studied how the surfactants influence the distribution of the particles, as well as the morphology, porosity of the set cement and the structures formed by the interaction of the additives. The purpose of this analysis was to efficiently elucidate the effect of surfactants and polymers in the structural arrangements and in the reaction mechanisms of the cement used for oil wells, in order to determine the best working conditions for the formulations of cement slurries with polymeric microspheres.

Key words: Polymers, surfactant, morphology, oil cement.

INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años la cementación de pozos se ha convertido en una operación de mucha importancia en el momento de construir un pozo petrolero, es por ello que el estudio del cemento para uso petrolero ha aumentado ampliamente a lo largo de los años, es importante resaltar que para la formulación de lechadas cementantes no solo se utiliza cemento sino también una serie de aditivos que afectan las reacciones de hidratación del mismo, los cuales influyen directamente en las propiedades físicas y químicas del sustrato [1–3].

Entre los aditivos utilizados se encuentran los polímeros y tensioactivos, los cuales ayudan a mejorar las propiedades de la lechada cementante, cumpliendo con los requerimientos del pozo. Debido al uso excesivo de aditivos, la ciencia se ha visto en la obligación de realizar una serie de estudios para comprender los mecanismos que ocurren entre el cemento y los aditivos del tipo polimérico y tensioactivo [4–6].

En la formulación de lechadas livianas con microesferas poliméricas se presenta la dificultad en el mezclado homogéneo de las partículas del polímero con la lechada de cemento, debido a la baja densidad y alta tensión superficial de este polímero con el agua, lo que provoca que el cemento resultante no posea una dispersión homogénea de las partículas una vez fraguado. Por esta razón, se busca optimizar la dispersión del polímero con tensoactivos y así mejorar la baja densidad y las propiedades físicas del cemento ya fraguado. Por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido se ha determinado cómo están distribuidas las microesferas a lo largo de la matriz y como el tensoactivo puede afectar tanto la hidratación del cemento como la porosidad y estabilidad del mismo [7-12].

El poder comprender la interacción de los polímeros y tensioactivos dentro de la dinámica de los mecanismos de reacción que ocurren durante la hidratación del cemento, aportará la información necesaria para lograr optimizar la calidad de las lechadas de cemento de baja densidad, el tiempo de vida del cemento endurecido y por ende la productividad del pozo.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales. La Tabla 1 presenta los reactivos utilizados a lo largo de la investigación.

Tabla 1. Especificaciones de los reactivos empleados.

Muestras	Compuesto activo	Estado físico	Pureza (%)
Mezcla de Tensioactivos. (Tensioactivo A “T.A”)	No Iónico con 15 Óxidos de Etileno No Iónico con 3 Óxidos de Etileno Aniónico con 3 Óxidos de Etileno	Líquido incoloro	13
Tensioactivo No Iónico. (Tensoactivo B “T.B”)	No Iónico con 15 Óxidos de Etileno	Líquido anaranjado	98
Microesferas poliméricas “Mic. Pol.”	Poliestireno	Sólido blanco	99
Dispersante “Disp.”	Lignosulfonato de sodio	Sólido marrón	99
Antiespumante “Ant.”	Mezcla de tensoactivos, solventes alifáticos, aceites, glicoles, entre otros compuestos inertes	Líquido incoloro	99
Cemento, clase H. “Lote 178”	SiO ₂	22%	C ₃ S 53
	Al ₂ O ₃	5%	C ₂ S 22
	Fe ₂ O ₃	5%	C ₃ A 5
	CaO	65%	C ₄ AF 14
	SO ₃	3%	CaSO ₄ 6

Metodología desarrollada. Se estudió la interacción entre las microesferas poliméricas, los tensoactivos etoxilados y el cemento por medio de microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X a las siguientes lechadas bases formuladas (ver Tablas 2 y 3).

Tabla 2. Lechadas bases formuladas sin microesferas poliméricas.

Lechada	Componentes
1	Cemento H + Agua (Blanco)
2	Cemento H + Agua + Tensoactivo A (Conc. 0,65 gal/sx)
3	Cemento H + Agua + Tensoactivo B (Conc. 0,01 gal/sx)

Tabla 3. Lechadas bases formuladas con microesferas poliméricas.

Lechada	Componentes
1	Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas (Blanco)
2	Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Tensioactivo A (Conc. 0,11 gal/sx y 0,65 gal/sx)
3	Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Tensioactivo B (Conc. 0,01 gal/sx)
4	Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Antiespumante + Tensioactivo A (Conc. 0,11 gal/sx y 0,65 gal/sx)
5	Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Antiespumante + Tensioactivo B (Conc. 0,01 gal/sx)
6	Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Antiespumante + Dispersante + Tensoactivo A (Conc. 0,11 gal/sx y 0,65 gal/sx)
7	Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Antiespumante + Dispersante + Tensoactivo B (Conc. 0,01 gal/sx)

Las lechadas mencionadas en las Tablas 2 y 3 fueron sometidas a 160°F de temperatura y 2.000 psi de presión por un tiempo de curado de 24 horas, y se prepararon de la siguiente manera: los aditivos sólidos (microesferas poliméricas a una concentración de 30% y de dispersante de 0,45% en relación a la masa de cemento) se agregaron al cemento H, luego de ello se añadió la mezcla seca en la mezcladora, la cual contenía la cantidad de agua a utilizar, esta adición duró aproximadamente 45 segundos en un mezclador (modo manual) a 2.000 r.p.m., y a medida que se añadía la mezcla seca se incrementaba progresivamente los r.p.m. de la mezcladora hasta un máximo de 7.000 r.p.m. Luego de adicionar toda la mezcla seca se procedió a agregar el tensoactivo a la concentración mencionada en las Tablas 2 y 3, dependiendo de la formulación a realizar y la de antiespumante fue de 0,01 gal/sx, y se mezcló durante 1:45 segundos para garantizar la homogeneidad de la lechada.

Después de 24 horas de curadas las lechadas se procedió a caracterizar las matrices cementantes obtenidas por MEB, visualizando morfología, porosidad y estructura, seguidamente se

realizó una caracterización química de las mismas por DRX obteniendo la composición química de las matrices.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES

Difractometría de rayos X para el estudio de la interacción de los tensioactivos etoxilados A y B para lechadas livianas. La Figura 1 presenta los difractogramas para el cemento anhidro, donde se puede identificar los compuestos presentes en la muestra con la ayuda de la base de datos de la ICDD: PDF-4+2013 y un software para identificación de compuestos, utilizando el programa *X'Pert HighScore plus* de *PANalytical*. Se obtuvieron los difractogramas de la A a la E mostrados en la Figura 1 para cada compuesto identificado en la muestra.

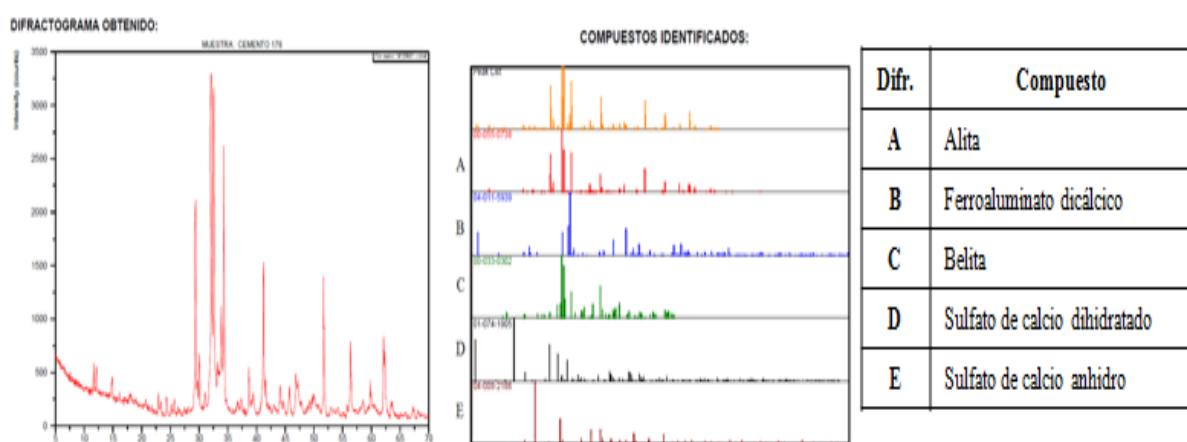


Figura 1. Difractogramas para el cemento anhidro clase H.

El difractograma A representa el silicato tricálcico (Alita) con una intensidad de 68,56, el B al ferroaluminato dicálcico, el C al silicato dicálcico (Belita) con una intensidad de 100, el D y E al sulfato de calcio dihidratado y anhidro con una intensidad de 6,58 y 6,02 respectivamente, todas estas son las diferentes estructuras presentes en el cemento anhidro [13–15].

Los difractogramas para la formulación cemento–agua luego de 24 horas de fraguado se presentan en la Figura 2, al compararlos con los difractogramas del cemento anhidro (ver Figura 1), se pueden observar las nuevas estructuras que aparecen cuando el cemento se encuentra hidratado, estas estructuras vienen representadas por el difractograma A perteneciente a la etringuita ($\text{Ca}_6(\text{Al}(\text{OH})_6)_2(\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_{26}$) con una intensidad de 2,82, el B para el hidróxido de calcio (*Portlandita*) ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) con una intensidad de 11,42, mientras que las estructuras como el C para la alita presenta una intensidad de 2,12, el D para el ferroaluminato dicálcico y por último el E para la belita la cual presentó una intensidad de 5,27 [13–15], mantienen su estructura original tal como se muestran en el cemento anhidro.

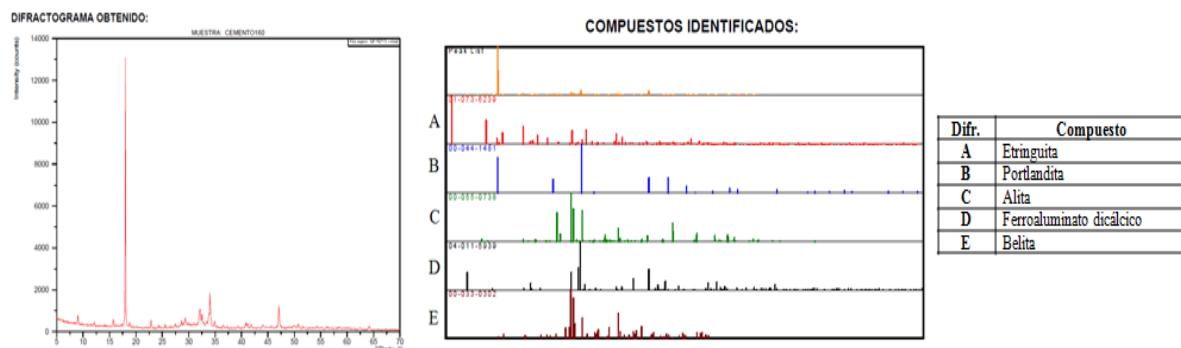


Figura 2. Difractogramas para la formulación cementante Cemento H + Agua.

En la Figura 3, se observan la difractometría de rayos X para las formulaciones cemento–agua–tensioactivo, en ella se observa que los tensioactivos A y B utilizados generan retardo en la hidratación del cemento, ya que se observa disminución en la intensidad de los picos de portlandita en comparación con el difractograma observado en la Figura 2, dichas intensidades vienen representadas para la portlandita presente en la formulación con tensioactivo A de 13,21 y para el tensioactivo B de 23,65 [16,17]. En el mismo tiempo de hidratación del cemento, las lechadas con tensioactivos presentaron señales de alita y belita con intensidades para el tensioactivo A de 2,69 y 9,55, respectivamente y para el tensioactivo B de 6,80 y 13,05 [13,14]. La belita comienza a reaccionar luego de que toda la alita ha reaccionado (hidratado), esto ocurre aproximadamente a los 27 días de haber comenzado la reacción [1]. Este resultado indica cómo los tensioactivos generan un cambio de mojabilidad y velocidad de hidratación del cemento [16, 17].

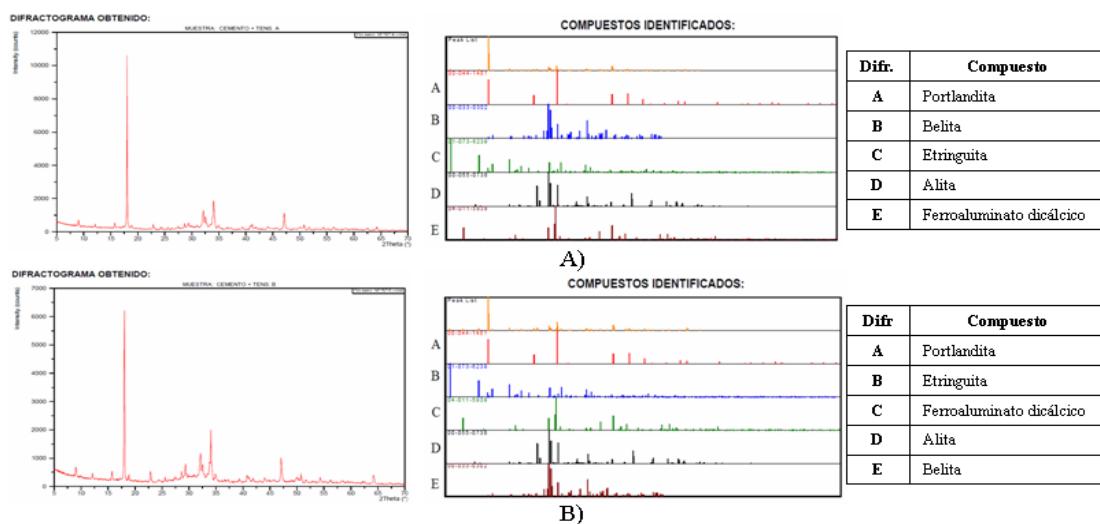


Figura 3. Difractogramas para la formulación cementante con tensioactivo. **A)** Formulación con Tensioactivo A. **B)** Formulación con Tensioactivo B.

Difractometría de rayos X para el estudio de la estabilidad de dispersión de microesferas poliméricas en solución acuosa de tensioactivo para lechadas livianas. La Figura 4 es representativa para todas las lechadas formuladas mencionadas en la Tabla 3 con microesferas

poliméricas y los aditivos añadidos, destacando que se evidencian las mismas estructuras en todas las formulaciones, donde se observa para el difractograma A perteneciente al hidróxido de calcio (*Portlandita*), el B para la belita, mientras que el difractograma C es para la etringuita ($\text{Ca}_6(\text{Al(OH})_6)_2(\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_{26}$), el D para la alita, y por último el E y F para el ferroaluminato dicálcico y el óxido de silicio respectivamente. Con la diferencia de que la aplicación de los tensioactivos genera una variación en la hidratación del cemento ya que los picos de portlandita y etringuita incrementan mientras que la alita y belita disminuyen en comparación a la formulación blanco, estos resultados se pueden evidenciar en la Tabla 4 usando como referencia en las lechadas la Tabla 3 [13–17].

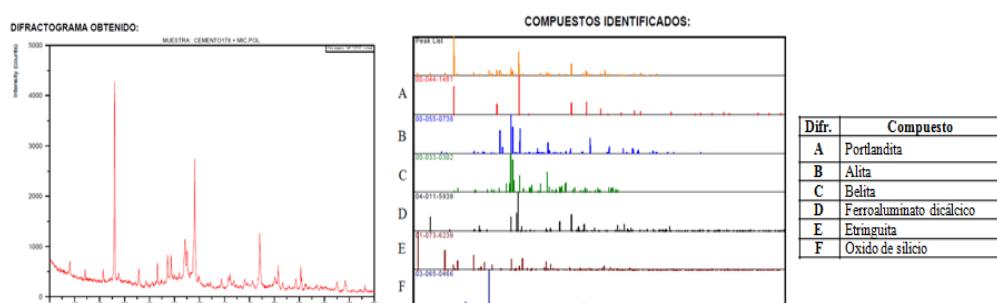


Figura 4. Difractogramas para la formulación cementante con microesferas poliméricas y tensioactivo.

Tabla 4. Intensidades de los compuestos de importancia encontrados por difracción de rayos X para las lechadas mencionadas en la Tabla 3.

Lechada	Compuesto							
	Alita		Belita		Etringuita		Portlandita	
	Teta	Intensidad	Teta	Intensidad	Teta	Intensidad	Teta	Intensidad
1 (Blanco)	29,21	13,08	32,05	19,12	9,03	3,00	34,00	59,79
2 Tens. A (0,11 gal/sx)	29,34	9,59	32,10	21,35	9,04	3,52	34,04	81,36
2 Tens. A (0,65 gal/sx)	29,32	3,34	32,07	11,86	9,04	3,29	34,01	35,06
3 Tens. B (0,01 gal/sx)	29,28	3,44	32,06	13,36	9,02	2,52	34,00	30,23
4 Tens. A (0,11 gal/sx)	29,29	2,52	32,04	15,34	9,02	3,20	34,00	66,04
4 Tens. A (0,65 gal/sx)	29,35	5,79	32,05	16,23	9,03	3,17	34,01	46,05
5 Tens. B (0,01 gal/sx)	29,33	3,71	32,06	13,04	9,03	3,08	34,00	36,52
6 Tens. A (0,11 gal/sx)	29,28	4,10	32,08	20,05	9,02	6,69	34,00	70,75
6 Tens. A (0,65 gal/sx)	29,33	7,29	32,09	20,77	9,07	4,82	34,04	30,79
7 Tens. B (0,01 gal/sx)	29,32	10,36	32,08	14,66	9,04	4,50	34,02	44,23

Microscopía electrónica de barrido para el estudio de la interacción de los tensioactivos etoxilados A y B para lechadas livianas. Por medio de la microscopía electrónica de

barrido se pudieron observar las morfologías de los diferentes aditivos utilizados, así como de las matrices cementantes obtenidas en esta etapa de la investigación, y observar detalladamente las morfologías que posee el cemento al hidratarse con y sin los aditivos.

La Figura 5 presenta dos microfotografías del cemento anhidro; la microfotografía A muestra una visión global de los granos de cemento sin hidratar a 200 X, en esta se detalla la morfología superficial de la muestra, compuesta por partículas con diferentes formas irregulares y heterogéneas. La microfotografía B tomada a 6.000 X, es el acercamiento a un grano de cemento [13, 18–20].

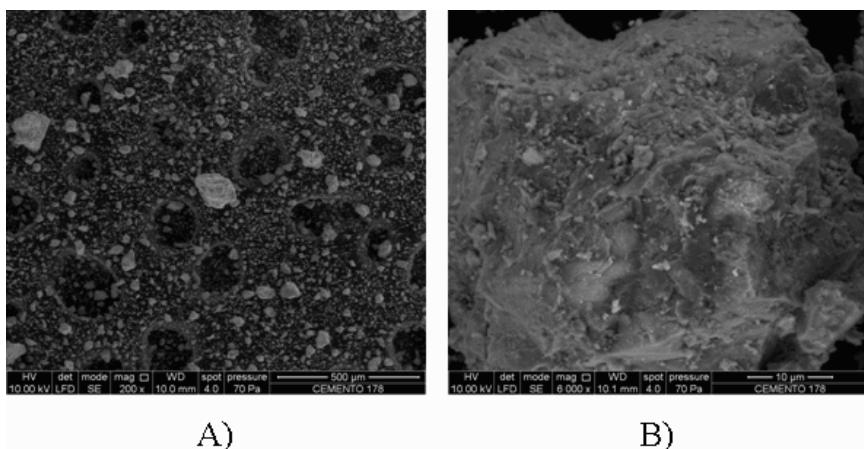


Figura 5. Micrográficas para el cemento anhídrico clase H. **A)** Tomada a 200 X, y **B)** Tomada a 6.000 X.

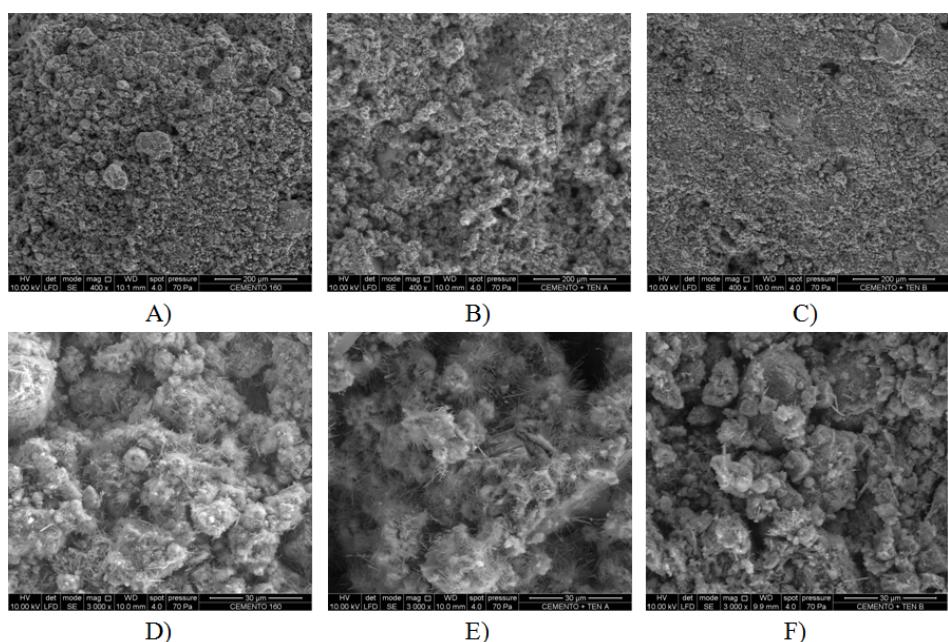


Figura 6. Micrografías para la formulación cementante con y sin tensioactivo. **A)** y **D)** Micrografías sin tensioactivo **A)** tomada a 400 X y **D)** tomada a 3.000 X, **B)** y **E)** micrografías con Tensioactivo A (0,65 gal/sx), **B)** tomada a 400 X y **E)** tomada a 3.000 X, **C)** y **F)** micrografías con Tensioactivo B (0,01 gal/sx) **C)** tomada a 400 X y **F)** tomada a 3.000 X.

La Figura 6 presenta seis microfotografías donde se comparan las formulaciones de la Tabla 2. Las microfotografías A, B, y C muestran una visión global para cada formulación a 400X y detalla la morfología superficial de la muestra, la cual presenta agregados con características irregulares y heterogéneas. Seguidamente, en las microfotografías D, E, y F a 3.000 X se observan los productos de hidratación del cemento como es la tobermorita conocida como gel CSH durante el fraguado este es el producto mayoritario y se presenta en forma de algodones de azúcar y la etringuita en forma de agujas [13, 18–20].

La Figura 7 presenta tres microfotografías a 800 X utilizando el detector BSED, el cual permite observar la porosidad de las muestras. La microfotografía A pertenece a la formulación cemento puro, el cual presenta una baja porosidad con presencia de gel CSH de tamaños irregulares.

Luego se observa la microfotografía B, cuya formulación es cemento y tensioactivo A (0,65 gal/sx); esta vez se evidencia una formulación con una alta porosidad, con un pequeño número de granos sin hidratar, esto pudiera atribuirse a la presencia del tensioactivo A que al adsorberse cambia la mojabilidad levemente a hidrófoba alterando la hidratación del cemento; sin embargo, parte de la superficie se mantiene hidrófila garantizando su hidratación, esto ocurre porque el tensioactivo A posee una estructura lineal la cual recubre de manera más eficiente la partícula de cemento. Por último, se observa la microfotografía C perteneciente a la formulación cemento y tensioactivo B (0,01 gal/sx), esta lechada presenta la menor porosidad entre las microfotografías observadas, esto ocurre debido a la voluminosidad que presenta el tensioactivo B en solución, ya que por ser ramificado se adsorbe un menor número de cadenas en la superficie de cemento evitando un recubrimiento eficiente del mismo permitiendo a la molécula de agua interaccionar e hidratarlo [16, 17].

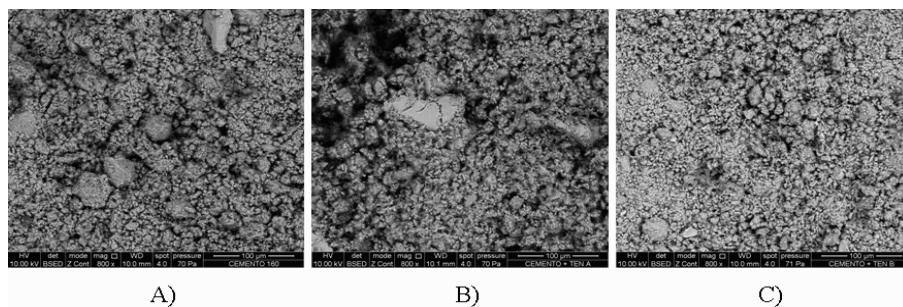


Figura 7. Microfotografías comparativas para las formulaciones cementantes con y sin tensioactivos tomadas a 800 X. A) Sin Tensioactivo, B) con Tensioactivo A (0,65gal/sx), y C) con Tensioactivo B (0,01 gal/sx)

Microscopía electrónica de barrido para el estudio de la estabilidad de dispersión de microesferas poliméricas en solución acuosa de tensioactivo para lechadas livianas. La Figura 8 presenta dos microfotografías de las microesferas poliméricas, en donde la microfotografía A muestra una visión global del polímero a 200 X, en esta se detalla la forma circular de la muestra, la

cual es homogénea en todas las partículas observadas. Seguidamente se observa la microfotografía B tomada 1.600 X donde se evidencia la presencia de una superficie rugosa producto de la expansión del polímero.

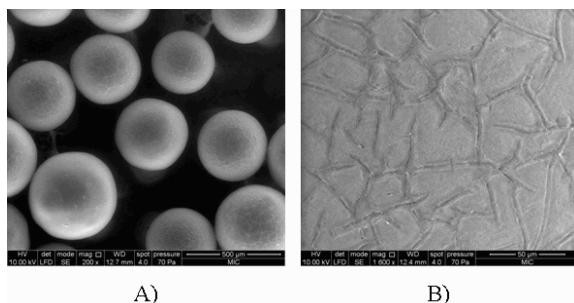


Figura 8. Micrografías para las microesferas poliméricas. **A)** Tomada a 200 X, y **B)** tomada a 1.600 X.

La Figura 9 busca comparar las siete formulaciones con microesferas poliméricas por medio de microfotografías a una resolución de 100 X, para observar la abundancia de microesferas poliméricas en la lechada.

La Figura 9 presenta la microfotografía A perteneciente a la formulación 1.1, la cual muestra una alta porosidad, así como también una cantidad de microesferas considerables, las cuales se encuentran un poco alejadas entre sí debido a que el polímero no es estable en la matriz a causa de su poca afinidad con el agua. Las microfotografías B y E pertenecientes a las formulaciones 1.2 y 1.5, respectivamente, presentan una baja porosidad y una alta afinidad de las microesferas poliméricas en la matriz debido a que estas se encuentran en mayor proporción. Aunado, a esto la interacción del tensoactivo A sobre el polímero a una concentración de 0,11 gal/sx genera un cambio de mojabilidad haciendo a las microesferas más afines a la matriz cementante, debido a que el tensoactivo por ser de estructura lineal se adsorbe eficientemente en la superficie del polímero cambiando su mojabilidad a hidrofílica lo que permite una atracción mayor a la matriz de cemento, además que la cantidad de tensoactivo es tal, que siente mayor atracción al polímero que al cemento por lo que no retarda la hidratación del mismo.

Las microfotografías C y F pertenecen a las formulaciones 1.3 y 1.6 respectivamente, estas formulaciones presentan una alta porosidad y algunos granos de cemento sin hidratar, además de una disminución en el número de microesferas poliméricas encontradas en la matriz de cemento, indicando que la concentración de tensioactivo A de 0,65 gal/sx empleada afecta tanto la mojabilidad del cemento como la del polímero, ya que su estructura lineal y alta concentración, este es capaz de adherirse al cemento retardando la hidratación generando en la matriz granos sin reaccionar, esto provoca que al haber menos cemento hidratado las microesferas no se encuentren adheridas a la matriz cementante, sin embargo, las partículas que lograron hidratarse sin interacción

con el polímero, ya que el tensioactivo que se adsorbió en su superficie cambio su mojabilidad, haciéndolo afín al agua permitiendo su interacción con la matriz de cemento.

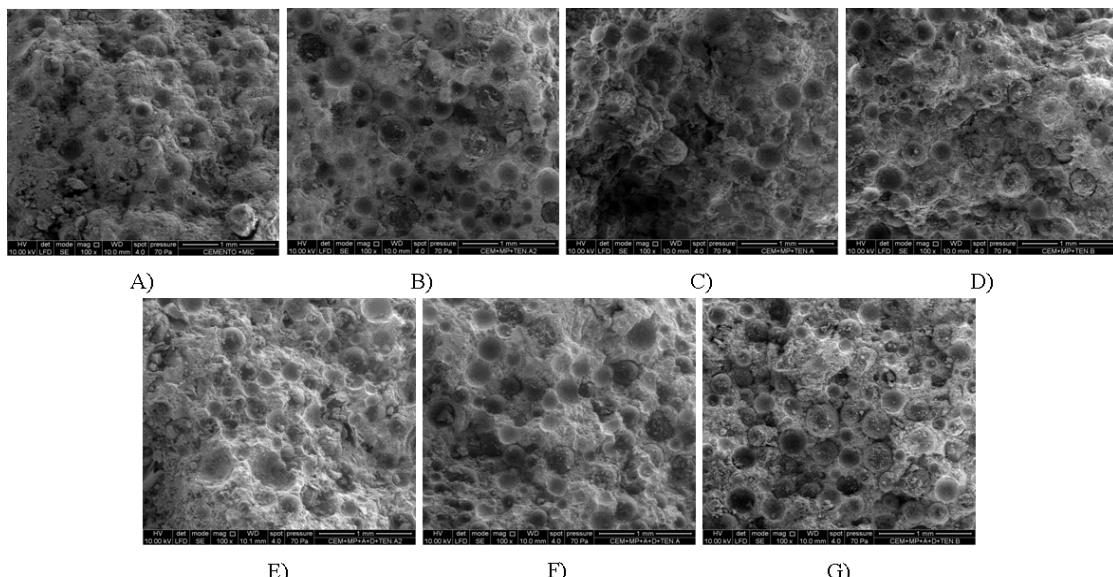


Figura 9. Micrografías comparativas para las formulaciones cementante con dispersión del 30% de microesferas poliméricas tomadas a 100X. **A)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas “1.1”, **B)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Tensioactivo A (0,11 gal/sx) “1.2”, **C)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Tensioactivo A (0,65 gal/sx) “1.3”, **D)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Tensoactivo B (0,01 gal/sx) “1.4”, **E)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Antiespumante + Dispersante + Tensioactivo A (0,11 gal/sx) “1.5”, **F)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Antiespumante + Dispersante + Tensioactivo A (0,65 gal/sx) “1.6”, **G)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Antiespumante + Dispersante + Tensoactivo B (0,01 gal/sx) “1.7”.

Las microfotografías D y G, las cuales pertenecen a las formulaciones 1.4 y 1.7 respectivamente, presentan una baja porosidad y muestran una gran cantidad de polímero en su matriz. Esto indica que el tensioactivo B a una concentración de 0,01 gal/sx cambia adecuadamente la mojabilidad de las microesferas poliméricas logrando que sean afines al agua y ayudando a que se encuentren estables y lo más cercanas posibles en la matriz de cemento, además de no interferir en la hidratación de cemento lo que genera una matriz estable para mantener el polímero dentro del cemento, debido a que el tensioactivo por ser ramificado satura la superficie rápidamente adsorbiéndose menos eficientemente que el tensioactivo A [16,17].

En resumen, se puede decir que las microfotografías expuestas en la Figura 11 presentan dos características importantes para las matrices cementantes con microesferas poliméricas evaluadas en la investigación, la primera es la porosidad y la segunda es la cantidad de microesferas poliméricas contenidas en la matriz, por ende se puede sintetizar el análisis a través de lo siguiente:

- Porosidad:

$$1,7 \geq 1,4 > 1,5 \geq 1,2 > 1,6 \geq 1,3 > 1,1$$

- Microesferas poliméricas contenidas en las matrices cementantes:

$$1,7 \geq 1,4 > 1,5 \geq 1,2 > 1,6 \geq 1,3 > 1,1$$

La Figura 10 presenta siete microfotografías para las formulaciones presentes en la Tabla 3, todas tomadas a 400 X para comparar la morfología superficial de las muestras evaluadas en ella se evidencia que el mezclado con las microesferas poliméricas presenta una superficie de agregados con características irregulares, amorfas y heterogéneas. Sin embargo, las microesferas se encuentran fusionadas en la matriz de cemento.

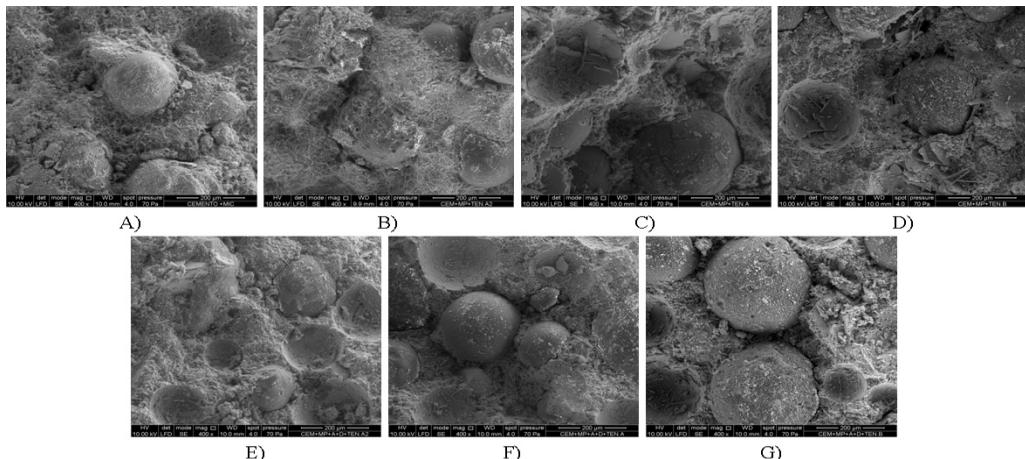


Figura 10. Micrografías comparativas para las formulaciones cementante con dispersión del 30% de microesferas poliméricas tomadas a 400X. **A)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas, **B)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Tensioactivo A (0,11 gal/sx), **C)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Tensioactivo A (0,65 gal/sx), **D)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Tensioactivo B (0,01 gal/sx), **E)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Antiespumante + Dispersante + Tensioactivo A (0,11 gal/sx), **F)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas+ Antiespumante + Dispersante + Tensioactivo A (0,65 gal/sx), **G)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Antiespumante + Dispersante + Tensioactivo B (0,01 gal/sx).

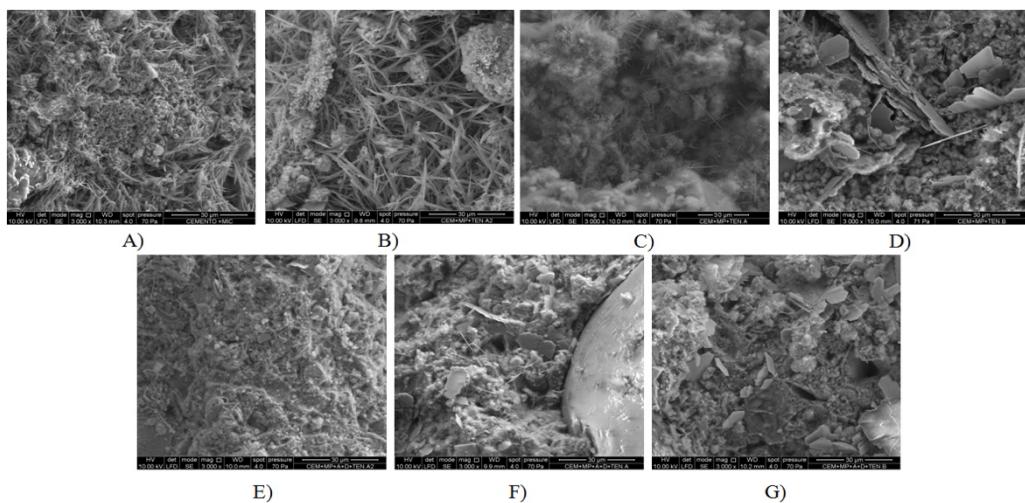


Figura 11. Micrografías comparativas para las formulaciones cementante con dispersión del 30% de microesferas poliméricas tomadas a 3.000X. **A)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas, **B)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Tensioactivo A (0,11 gal/sx), **C)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Tensioactivo A (0,65 gal/sx), **D)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Tensioactivo B (0,01 gal/sx), **E)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Antiespumante + Dispersante + Tensioactivo A (0,11 gal/sx), **F)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Antiespumante + Dispersante + Tensioactivo A (0,65 gal/sx), **G)** Formulación Cemento H + Agua + Microesferas poliméricas + Antiespumante + Dispersante + Tensioactivo B (0,01 gal/sx).

Por último, la Figura 11 compara siete microfotografías para las formulaciones mencionadas en la Tabla 3 en las cuales se realizó un acercamiento de la muestra para observar las estructuras formadas en la hidratación del cemento en estas se observan para todos los casos la presencia de la tobermorita en forma de algodón de azúcar y agujas forma típica de la etringuita ambos producto de hidratación del cemento.

Cabe destacar que las microfotografías E, F, y G presentan en la imagen además de las estructuras mencionadas anteriormente, unas láminas hexagonales que indican la presencia de portlandita en la muestra. Esto se debe a que la presencia de los aditivos como antiespumante y dispersante incrementan la velocidad de hidratación del cemento y contrarrestan el efecto de retardo de los tensioactivos [13, 16–20].

CONCLUSIONES

Por difracción de rayos X se confirmó que los tensioactivos varían la hidratación del cemento, sin embargo, no afecta las estructuras obtenidas.

El tensioactivo B produce lechadas cementantes con menor porosidad que el tensioactivo A.

El tensioactivo A y tensioactivo B en una concentración de 0,11 y 0,01 gal/sx empaquetan y dispersan mejor las microesferas poliméricas en la matriz de cemento que el tensioactivo A en un concentración de 0,65 gal/sx.

Las matrices cementantes aditivadas con el tensioactivo A y B presentan una morfología con agregados irregulares, amorfos y heterogéneas, además de la presencia de gel CSH y etringuita.

BIBLIOGRAFÍA

1. Erick N, Dominique G, Well G “*Cementing*”, Schlumberger, Texas–Estados Unidos (2006)
2. Taylor H “*Cement Chemistry*”, Academic Press Limited, Londres–Inglaterra (1990)
3. Robles J, Pestana D “Tecnologías PDVSA en la construcción de pozos”, *Visión Tecnológica PDVSA Inteve*, **10(2)**, 85 (2003)
4. Beltrán M, Marcilla A “Tecnología de polímeros”, Universidad de Alicante, Valencia–España 2012
5. Mas M, Bastos V, Colina A, Corona O “Aditivos poliméricos como mejoradores de las propiedades de las lechadas de cemento”, SEA–0087 Informe Confidencial PDVSA–Inteve, Los Teques–Venezuela 2008
6. Fernández I “Polímeros en solución y aplicación de los polímeros en la industria petrolera”, *Visión Tecnológica PDVSA Inteve*, 1–14 (2003)
7. Hernández R “Evaluación de surfactantes como agente dispersante de las microesferas poliméricas en lechadas de cemento de baja densidad bajo condiciones operacionales del campo Tía Juana”. Tesis Pregrado, Universidad Central de Venezuela, Caracas–Venezuela (2012)
8. Rivas H, Gutiérrez X “Los surfactantes comportamiento y algunas de sus aplicaciones en la industria petrolera”, *Acta Científica Venezolana*, **50(1)**, 54 (1999)
9. Holmberg K, Jonsson B, Kronberg B, Lindman B “*Surfactants and polymers in aqueous solution*”, Jhon Wiley & Sons, Inc, Chichester–Inglaterra (2003)
10. López E “Evaluación de las propiedades interfaciales de los surfactantes del producto tecnológico Tensioactivo A y sus mezclas”, INT–11724 Informe Confidencial PDVSA–Inteve, Los Teques–Venezuela (2008)
11. Pereira F, Buccellato V “Protocolo de aplicación del producto tecnológico microesferas poliméricas”,

- M-0448 Informe Confidencial PDVSA–Intevep, Los Teques–Venezuela (2006)
12. Pardey R “Diseño y prueba de la lechada de cemento liviano con microesferas poliméricas”, INT-3514 Informe Confidencial PDVSA–Intevep, Los Teques–Venezuela (1997)
13. Fernandez L, Alonso C, Hidalgo A, Andrade C “The role of magnesium during the hydration of C₃S and C–S–H formation. Scanning electron microscopy and mid-infrared studies”, *Advances in Cement Research*, **17(1)**, (2005)
14. Páez Rodríguez JE, Ahumada LM, Bustamante JM, Ruiz de Murgueitio J “Obtención de silicatos de calcio utilizando el método de precipitación controlada”, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, **44(6)**, 421 (2005)
15. Giraldo M, Tobón J “Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación”, *Dyna*, **73(148)**, 69 (2006)
16. Meleán R, Quintero F, Pereira, F, Gonzalez JM, Mas M “Estudio de propiedades interfaciales de dos tensoactivos etoxilados en partículas de cemento y microesferas poliméricas para lechadas de baja densidad” Artículo por publicar en Revista de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, **33** (2018)
17. Meleán R, Quintero F, Pereira F, Mas M “Estudio del efecto de tensoactivos etoxilados utilizados para la dispersión de microesferas poliméricas en lechadas cementantes”, *Revista Ciencia e Ingeniería de la Universidad de Los Andes*, **40(2)**, 107 (2019)
18. Silva DA, Monteiro PJM, “The influence of polymer on the hydration of portland cement phases analyzed by soft X-ray transmission microscopy”, *Cement and Concrete Research*, **36**, 1501 (2006)
19. Ylmén R, Jaglid U, Steenari BM, Panas I “Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques”, *Cement and Concrete Research*, **39**, 433 (2009)
20. Ylmén R “Early hydration of portland cement. An infrared spectroscopy perspective complemented by calorimetry and scanning electron microscopy”, Universidad de Tecnología de Chalmers, Gothenburg–Suecia, (2013)