





Resistencia a la compresión y microestructura de concretos fabricados con cementos supersulfatados base materiales de origen volcánico expuestos a un ambiente de sulfato

K. Cabrera Luna¹ , J. I. Escalante García² , D. Nieves Mendoza³ , E. E. Maldonado Bandala^{3*} 

*Autor de Contacto: erimaldonado@uv.mx

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.374>

Recepción: 09/12/2018 | Aceptación: 30/12/2018 | Publicación: 30/12/2018

RESUMEN

Esta investigación presenta los resultados de concretos fabricados con cementos supersulfatados (SSC) bases materiales volcánicos. Los concretos fueron curados bajo dos regímenes uno por 24 h a 25°C y otro por 22 h a 60°C y luego a 25 °C. Los especímenes fueron expuestos a dos condiciones, en seco en condiciones de laboratorio e inmersos en una solución con 3.5% CaSO₄ a 25°C hasta por 180 días. Después de 180 días, el concreto con un cementante compuesto de 5% An-10% PC-10% CaO-75% PM expuesto a la solución de CaSO₄ alcanzó una resistencia a la compresión de 46 MPa y 44 MPa en seco en condiciones de laboratorio. La microestructura fue analizada por microscopía electrónica de barrido, espectroscopia por dispersión de energía y DRX, mostró que los principales productos de hidratación son C-S-H y etringita.

Palabras clave: concreto supersulfatado; pómez; resistencia a la compresión; ambiente de sulfato.

Citar como: K. Cabrera Luna, J. I. Escalante García, D. Nieves Mendoza, E. E. Maldonado Bandala (2019), “Resistencia a la compresión y microestructura de concretos fabricados con cementos supersulfatados base materiales de origen volcánico expuestos a un ambiente de sulfato”, Revista ALCONPAT, 9 (1), pp. 106 – 116, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.374>

¹ Universidad Autónoma de Baja California, México.

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo, México

³ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2019.

Resistance to compression and microstructure of concrete manufactured with supersulfated cements-based materials of volcanic origin exposed to a sulphate environment

ABSTRACT

This research presents the results of concretes made with supersulfated cements (SSC) volcanic material bases. The concretes were cured under two regimes one for 24 h at 25 ° C and one for 22 h at 60 ° C and then at 25 ° C. The specimens were exposed to two conditions, dry under laboratory conditions and immersed in a solution with 3.5% CaSO₄ at 25 ° C for up to 180 days. After 180 days, the concrete with a 5% An-10% PC-10% CaO-75% PM cementant exposed to the CaSO₄ solution achieved a compressive strength of 46 MPa and 44 MPa dry under conditions of laboratory. The microstructure was analyzed by scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy and XRD, showing that the main hydration products are C-S-H and ettringite.

Keywords: supersulfated concrete; pumice; resistance to compression; sulfate environment.

Resistência à compressão e microestrutura do concreto fabricado com materiais à base de cimento supersulfatado de origem vulcânica expostos a um ambiente de sulfato

RESUMO

Esta investigação apresenta resultados de concretos fabricados con cements supersulfatados (SSC) bases materiales volcánicos. Os concretos fueron curados são regulados por 24 a 25 ° C e por 22 a 60 ° C e a 25 ° C. As especificações para a execução de testes de condições, em condições de trabalho e in vivo em uma solução de 3,5% CaSO₄ a 25 ° C hasta por 180 días. Depois de 180 días, o concreto com um componente compacto de 5% Um-10% de PC-10% de CaO-75% de PM expuesto para a solução de CaSO₄ atingiu uma resistência à compressão de 46 MPa e 44 MPa em seco en condiciones de laboratorio. La microestructura fue analized por microscopia electronica de barreto, spectroscopia por dispersion de energía y DRX, mostrada que os principais produtos de hidratação são C-S-H e etringita.

Palavras-chave: concreto supersulfatado; pómez; resistencia a la compresión; ambiente de sulfato.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es el material compuesto más usado en el mundo, lo que involucra que el cemento Portland (PC) sea el material de la industria de construcción con el más alto consumo y producción, con una producción anual de casi dos billones de toneladas, emitiendo cerca de dos billones de toneladas de CO₂ (Shi et al., 2011). El esfuerzo por reducir la contaminación del aire ha conducido a la búsqueda y uso de nuevos materiales cementantes que sean amigables con el medio ambiente, tales como, los cements supersulfatados (SSC), debido a su ahorro de energía, bajas emisiones de carbono y reutilización de residuos (Ding et al., 2014), estos pueden reducir las emisiones de CO₂ hasta un 90% comparado con el cemento Portland (Woltron et al., 2015). Los SSC están comúnmente compuestos por escoria granulada de alto horno, una fuente de sulfato como hemihidrato (HH) y anhídrita (An) y una pequeña cantidad de activador alcalino, principalmente clínquer y cemento Portland (Kühl, 1908; Midgley and Pettifer, 1971; Bijen and Niël, 1981; V.P. Mehrotra et al., 1982; Dutta and Borthakur, 1990; Grounds et al., 1995; Taylor, 1998; Juenger et al., 2011) o hidróxido de calcio e hidróxido de potasio (Kamlet, 1960). Pocas investigaciones han estudiado cements supersulfatados compuestos con puzolanas naturales (Cabrera-Luna et al., 2018).

El propósito de esta investigación es presentar el estudio de las propiedades mecánicas y microestructura de concretos fabricados con SSC compuesto de un material volcánico tipo pómez. Los concretos fueron expuestos en seco en condiciones de laboratorio e inmersos en una solución de 3.5% CaSO_4 , iniciando a los 28 días de edad. Este trabajo forma parte de una investigación sobre SSC base material de origen volcánico (Cabrera-Luna et al., 2018).

2. MATERIALES

Cemento supersulfatado base pómez compuesto de un material de origen volcánico tipo pómez (PM), con un área superficial de $600 \text{ m}^2/\text{kg}$, dos fuentes de sulfato: hemihidrato (HH) comercialmente disponible y anhidrita (An) subproducto industrial, dos fuentes alcalinas: CPC 30R (PC) (ONNCCE, 2014) y óxido de calcio (CaO) comercialmente disponible. La Tabla 1 muestra la composición química de los principales óxidos de los materiales de partida.

El agregado fino fue de origen volcánico con un módulo de finura de 2.84. El agregado grueso con un tamaño máximo nominal de 12.5 mm y una densidad volumétrica de $1,388.54 \text{ kg/m}^3$. Se usó un superplastificante tipo policarboxilato para mantener la relación agua/cementante de 0.30 y revenimiento de 75 a 100 mm.

Tabla 1. Composición química de los materiales de partida por fluorescencia de rayos-X (% wt)

| Óxidos %wt | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Otros |
|------------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|-------|
| PM | 68.73 | 14.01 | 5.45 | 3.69 | 2.50 | 1.64 | 0.34 | | 3.64 |
| An | | | | | 0.11 | 43.83 | | 55.45 | 0.61 |
| HH | 0.94 | | | | | 39.70 | 0.58 | 51.69 | 7.09 |
| PC | 17.74 | 3.97 | 1.09 | | 3.65 | 62.71 | 1.36 | 4.45 | 5.03 |
| CaO | | | | | | 87.68 | 0.35 | 0.83 | 11.14 |

3. EXPERIMENTACIÓN

3.1 Diseño de mezclas y fabricación de especímenes

Cuatro mezclas de concreto fueron diseñadas con base al procedimiento propuesto por el Método de Volúmenes Absolutos, publicado por el ACI 211.1 (ACI Committee 211, 2002), con una relación de agua/cementante de 0.30, con respecto a 720 kg/m^3 de cementante y un revenimiento de 75 a 100 mm. Fueron usados cuatro cementantes diferentes, compuestos por: 1) 5%HH-20%PC-75%PM, 2) 15%HH-10%PC-10%CaO-65%PM, 3) 5%An-10%PC-10%CaO-75%PM y 4) 15%An-20%PC-65%PM. La Tabla 2 muestra la cantidad de los componentes de los cementantes. Un concreto de referencia fue elaborado con 100% PC (C-R).

Para el ensaye de resistencia a la compresión fueron fabricados cubos de 100 mm por lado de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-1 (AENOR, 2001). Los especímenes de concreto tuvieron un tratamiento inicial de curado: un curado a 25°C (T25) durante 24 h y el otro un curado térmico inicial a 60°C por 22 h y luego a 25°C (T60).

Después de 28 días los especímenes fueron expuestos a dos ambientes, uno en seco en condiciones de laboratorio a 25°C (L) y otro que consistió en ciclos de 7 días inmersos en una solución de 3.5% CaSO_4 a 25°C luego 7 días en el laboratorio a 25°C (S).

Tabla 2. Composición de cementantes para los concretos (kg/m³)

| Nomenclatura | Pómez (PM) | Hemihidrato (HH) | Anhidrita (An) | Óxido de calcio (CaO) | Cemento Portland (PC) |
|--------------|-------------------|------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| | kg/m ³ | | | | |
| C-1 | 540 | 36 | - | - | 144 |
| C-2 | 468 | 108 | - | 72 | 72 |
| C-3 | 540 | - | 36 | 72 | 72 |
| C-4 | 468 | - | 108 | - | 144 |
| C-R | - | - | - | - | 415 |

3.2 Caracterización

La resistencia a la compresión de los concretos fue determinada hasta 180 días aplicando una carga con una velocidad de 0.4 MPa/s de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-3 (AENOR, 2003). Fragmentos de cubos ensayados fueron secados por 72 h en metanol y en seguida en una cámara de vacío a 38°C por un periodo de 72 h. Después, fragmentos de cubos secos fueron montados en resina, desbastados, pulidos y cubiertos con una capa de carbono, estos fueron analizados a través de un microscopio electrónico de barrido (MEB, Phillips modelo XL-30ESEM) operado a 20 kV.

4. RESULTADOS

4.1 Resistencia a la compresión

Los valores reportados representan el promedio de tres cubos. Los resultados de la evolución de la resistencia a la compresión de los concretos para el régimen de curado de T25 expuestos en seco en condiciones de laboratorio a 25°C (L) e inmersos en una solución de 3.5% CaSO₄ a 25 °C (S) hasta 180 días de edad son mostrados en la Figura 1. A los 28 días se observó que el concreto C-2 mostró la menor resistencia con 22 MPa, sin embargo, después de 180 días, la resistencia incrementó alcanzando alrededor de 41 MPa para ambas condiciones de exposición, siendo más altas que el valor del concreto de referencia. Por otra parte, el concreto C-3 alcanzó la más alta resistencia con alrededor de 44 MPa cuando fue expuesto a la solución de 3.5% de CaSO₄, siendo superior en un 24% con respecto al concreto de referencia (C-R) a la edad de 180 días. Los valores de la desviación estándar de los promedios fueron ±0.10–2.30 MPa.

La Figura 2 muestra los resultados de resistencia a la compresión de especímenes para el régimen de curado de T60 expuestos a condiciones de laboratorio a 25°C e inmersos en una solución de 3.5% CaSO₄ a 25°C. La resistencia a la compresión de los concretos C-1 y C-3 a 28 días alcanzó valores alrededor de 32 MPa, similar a C-R, sin embargo, después de 180 días C-1 y C-3 expuestos a condiciones de laboratorio presentaron alrededor de 42 y 44 MPa, respectivamente, siendo más altos que el concreto de referencia con 36 MPa, mientras que C-3 inmerso en una solución de 3.5% CaSO₄ alcanzó 46 MPa. El curado inicial favoreció la resistencia inicial y tardía de acuerdo con resultados previos (Cabrera-Luna et al., 2018). Los valores de la desviación estándar de los promedios fueron ±0.17–1.76 MPa.

En general, se observó que la composición química y el curado inicial influyeron en el desarrollo de la resistencia de acuerdo con resultados previos (Cabrera-Luna et al., 2018). Estos factores tuvieron un efecto favorable en la densificación de la matriz, proporcionando resistencia al sulfato de calcio (Grounds et al, 2003). Por otra parte, el desarrollo de la resistencia de los SSC es más lento en comparación con el del cemento Portland (Noor-ul-Amin, 2014), debido a que el proceso de hidratación de SSC es lento a edades tempranas, por lo tanto, la resistencia a la compresión de

los concretos aumenta bruscamente a edades avanzadas (Ding et al., 2014). La ganancia de la resistencia a la compresión más allá de los 28 días puede estar relacionada con la velocidad de los productos de hidratación y la morfología del yeso formado (Cabrera-Luna et al., 2018).

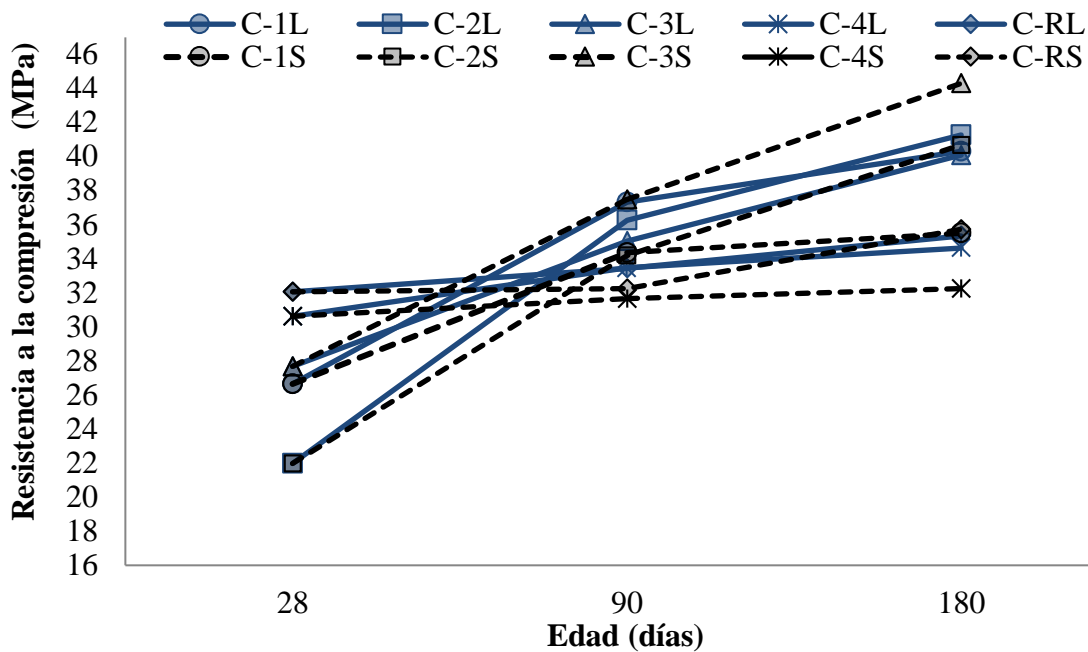


Figura 1. Resistencia a la compresión de especímenes para el régimen T25 expuestos en seco en condiciones de laboratorio (L) e inmersos en una solución de 3.5% CaSO₄ a 25°C (S).

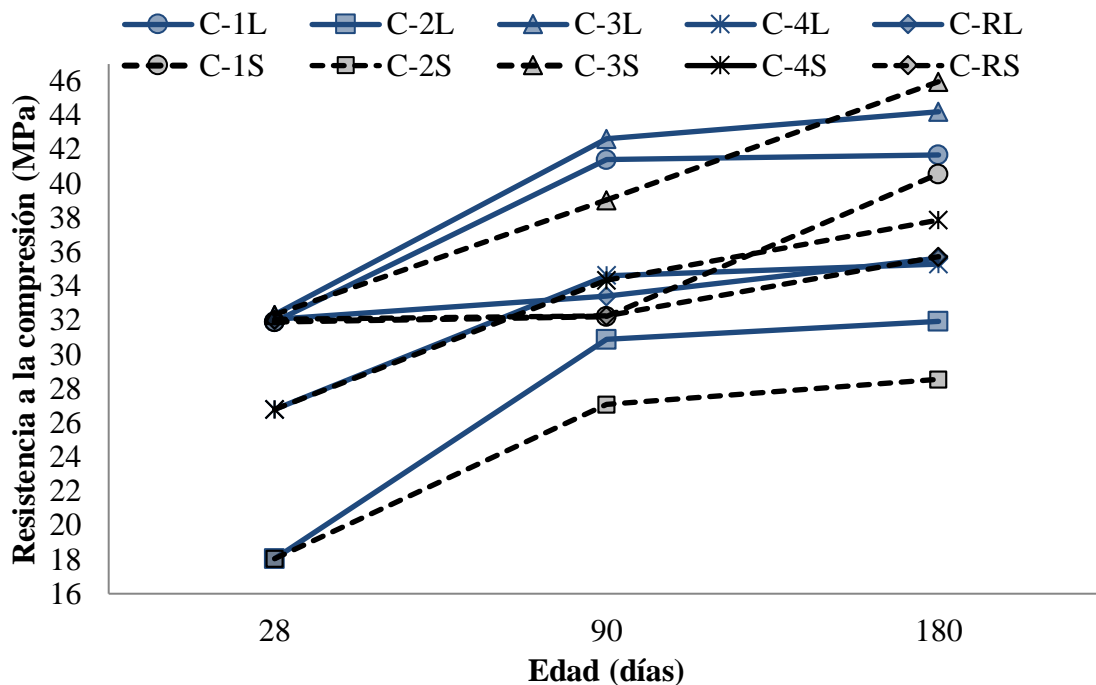


Figura 2. Resistencia a la compresión de especímenes para el régimen T60 expuestos en seco en condiciones de laboratorio (L) e inmersos en una solución de 3.5% CaSO₄ a 25°C (S).

4.2 Difracción de rayos-X (DRX)

La Figura 3 presenta los patrones de DRX de la PM y del cementante compuesto por 15% An-20% PC -65% PM a 28 días, que fue usado para elaborar el concreto C-4. Después de la activación química de la PM a 28 días fue observado que el halo amorfo de la PM disminuyó de intensidad y fue ligeramente desplazado hacia la derecha, sugiriendo que las partículas de PM reaccionaron con los activadores para formar los productos de hidratación como etringita, anhidrita, yeso y C-S-H, identificados como principales fases hidratadas. Los picos de reflexión de la anhidrita revelan una baja solubilidad y reactividad, que influyó en una baja cantidad de etringita formada, eso está de acuerdo con la presencia de picos de reflexión débiles de etringita, sugiriendo que el desarrollo de la resistencia a edades posteriores se debe principalmente a la formación de C-S-H de acuerdo con (Cabrera-Luna *et al.*, 2018).

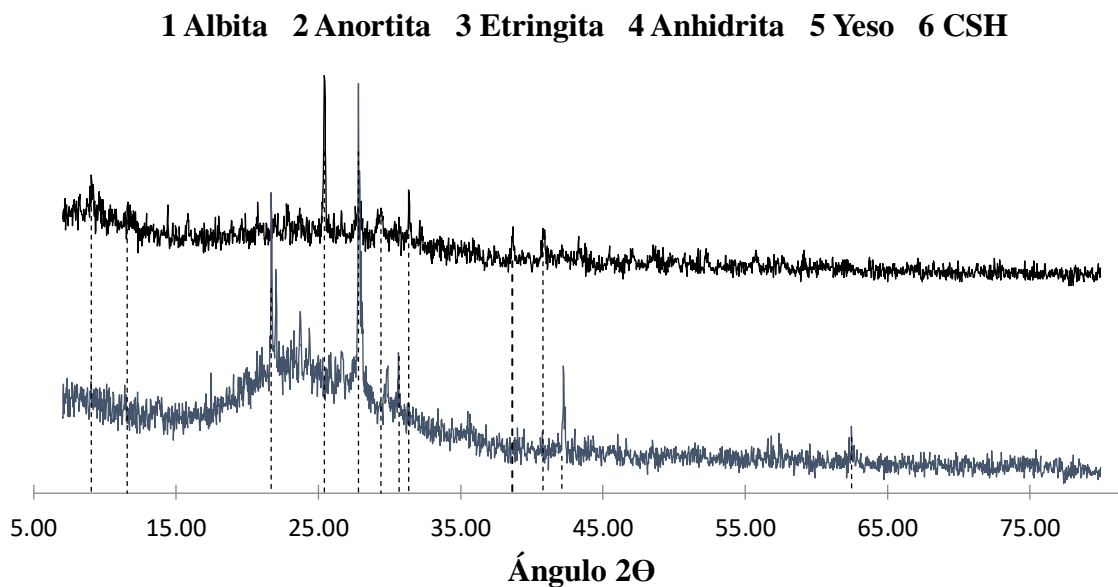


Figura 3. Patrones de DRX del cementante compuesto 5% An-20% PC -75% PM (C-4)

4.3 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

La Figura 4 y Figura 5 muestran la microestructura del concreto C-3 (5% An-10% PC-10% CaO-75% PM) para el régimen T60 expuestos en seco en condiciones de laboratorio a 25°C (L) a 28 días e inmersos en una solución de 3.5% CaSO₄ a 25 °C (S) a 90 días, respectivamente. Las imágenes fueron obtenidas usando electrones retrodispersados. En todas las micrografías fueron observadas partículas de pómez identificadas por una morfología irregular de diferentes tamaños, sugiriendo que no todas las partículas reaccionaron para formar productos de hidratación, además, por su tamaño, se puede distinguir fácilmente partículas de agregados que están embebidas en la matriz de productos de reacción. Partículas de anhidrita no fueron observadas lo que sugiere que los iones de Ca²⁺ y SO₄²⁻ reaccionaron con la fase alúmina de la PM para formar etringita (Juenger *et al.*, 2011; Sadique *et al.*, 2012; Bazaldúa-Medellín *et al.*, 2015; Gracioli *et al.*, 2017; Rubert *et al.*, 2018). En la Figura 4 la ausencia de granos de PC sugirió que reaccionaron con agua para formar más Ca(OH)₂, promoviendo la disolución de PM para producir C-S-H y otros productos (Sadique *et al.*, 2012). La microestructura fue densa con grietas originadas por el secado del gel bajo las condiciones del alto vacío de la columna del microscopio (Avila-López *et al.*, 2015). In general, la interface matriz-agregado es continua, no se observaron grietas en esta área mostrando buena adherencia. Por otra parte, en las muestras pulidas la etringita es difícil de detectar, además, esta es

fácilmente descompuesta bajo las condiciones de secado al alto vacío de la columna del microscopio (Bazaldúa-Medellín et al., 2015). Sin embargo, los espectros de microanálisis por rayos-X (EDS) permitieron su identificación, estos mostraron que los principales productos de hidratación de los concretos SSC son C-S-H y etringita distribuidos a través de la matriz finamente intermezclados, esto está de acuerdo con (Cabrera-Luna et al., 2018). La presencia de cristales de etringita proporciona resistencia en lugar de expansión (Sadique et al., 2012), estos fueron depositados en los espacios de poros (Wolfe et al., 2001), inicialmente ocupados por agua (Cabrera-Luna et al., 2018), densificando la microestructura de la matriz junto con el C-S-H (Bazaldúa-Medellín et al., 2015), mejorando la resistencia, así, esta fase no fue acompañada de expansión (Wolfe et al., 2001), no hubo expansión visible en las muestras de concreto después de 180 días. Estos resultados coinciden con los patrones de DRX.

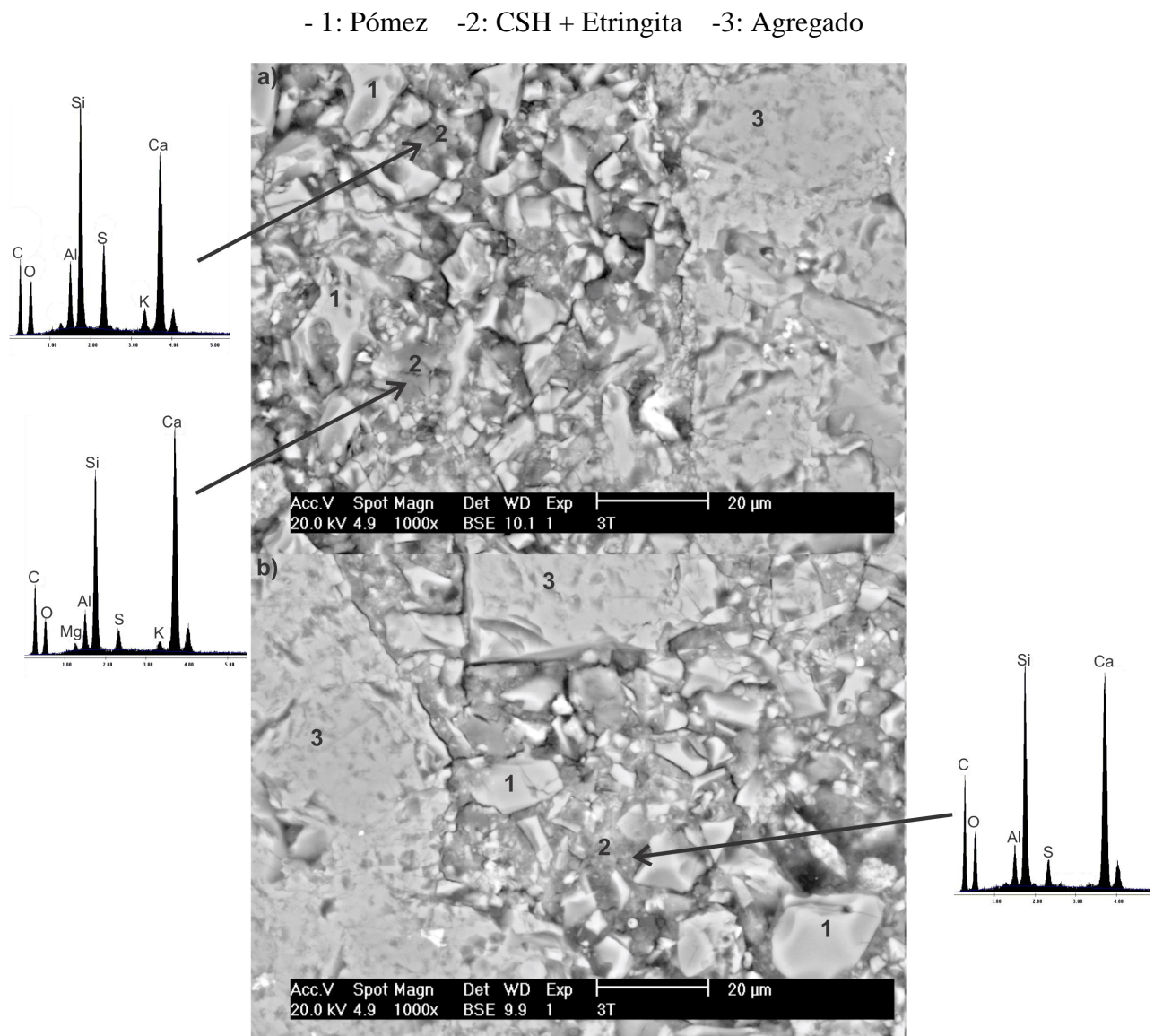


Figura 4. Imágenes por MEB usando electrones retrodispersados del concreto C-3 (5% An-10%PC-10%CaO-75%PM) para el régimen T60 expuesto en seco en condiciones de a 25°C a 28 días.

-1: Pómez -2: CSH + Etringita -3: PC parcialmente hidratado -4: Agregado

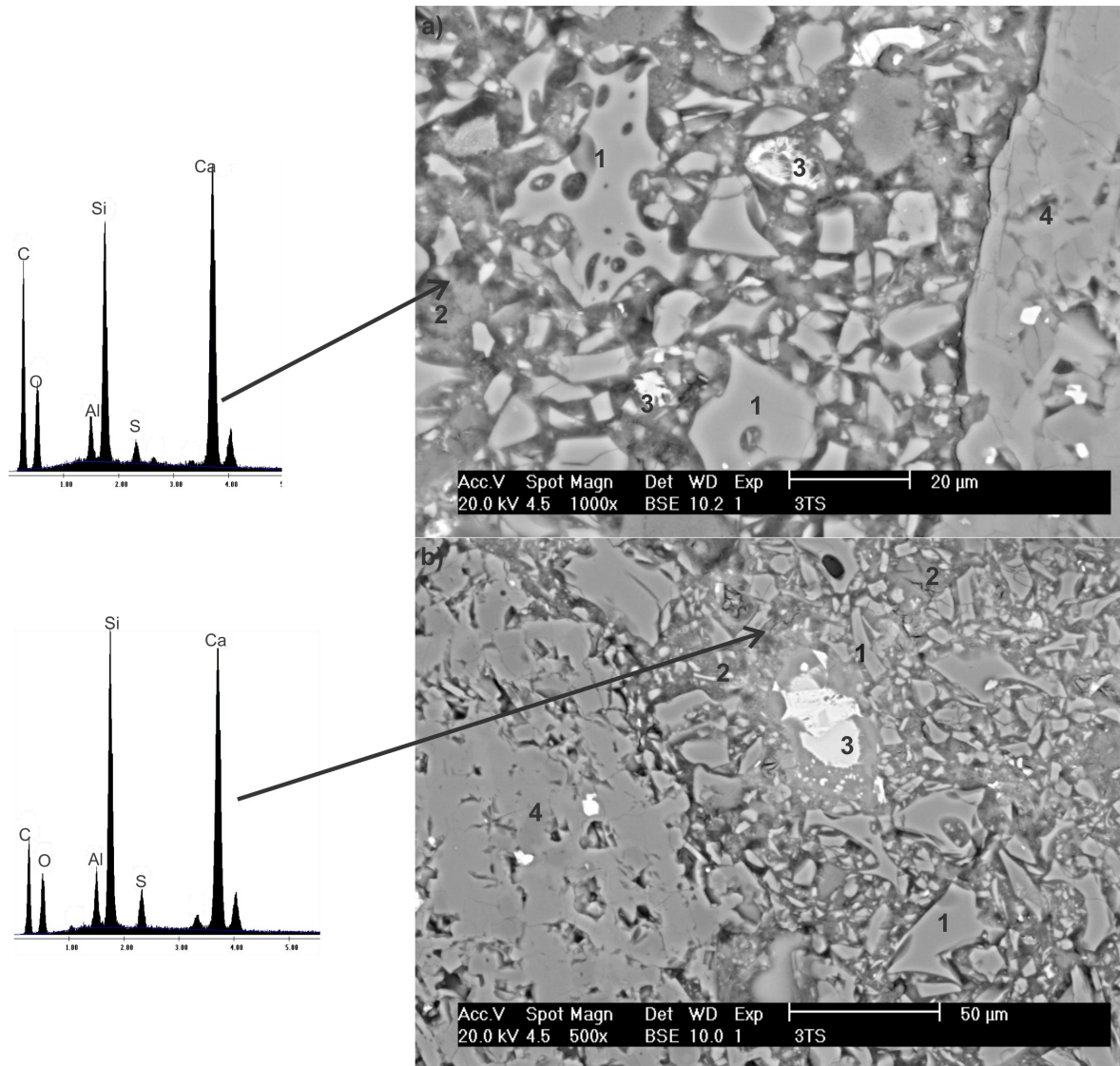


Figura 5. Imágenes por MEB usando electrones retrodispersados del concreto C-3 (5% An-10%PC-10%CaO-75%PM) para el régimen T60 inmersos en una solución de 3.5% CaSO_4 a 25°C a 90 días.

5. DISCUSIÓN

La degradación del concreto causada por mecanismos de ataque de sulfatos depende de factores como tipo de cemento, presencia de adiciones minerales, relación agua/cemento, tipo de catión asociado al anión sulfato, concentración de sulfato, tiempo y duración de exposición, ambiente, grado de hidratación y condiciones de curado (Hossain and Lachemi, 2006; Prasad *et al.*, 2006; Indu Siva Ranjani and Ramamurthy, 2012), además, otros parámetros como estructura de poro, permeabilidad, difusividad y propiedades mecánicas (Prasad *et al.*, 2006). En concretos fabricados con cemento Portland, el ataque de sulfato depende de la disponibilidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y C_3A (Hossain and Lachemi, 2006), por lo tanto la composición química del cementante tiene un papel importante en la resistencia al sulfato (Prasad *et al.*, 2006). Los SSC de esta investigación fueron base pómez volcánica, sulfato de calcio y fuentes alcalinas; cuando se expusieron a la solución de

sulfato de calcio por medio de ciclos húmedo y seco, estos mostraron estabilidad y desarrollo de resistencia, con microestructuras estables. Esto sugiere que los iones externos de sulfato no encontraron las condiciones para descalcificar la $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o el C-S-H. Además, la disminución en el consumo de PC reduce la cantidad de aluminatos de calcio, el cual ya había encontrado una fuente abundante de sulfato de calcio a partir de los aditivos del SSC, así estos formaron etringita que se estabilizó como tal; además, el bajo contenido de Al de la PM y la abundancia de sulfato de calcio también minimizó la posibilidad de etringita retardada deletérea. Sin embargo, la expansión no solo depende de la cantidad y el tiempo de formación de la etringita, la ubicación de la formación también es importante (Wojceich, Marczewska and Jaworska, 1985); en este caso, la naturaleza de la microestructura, la velocidad de reacción de los componentes de SSC, favoreció una secuencia de reacciones y la deposición de productos de reacción que mostraron un equilibrio favorable que resultó en microestructuras resistentes formando cementos duraderos. Por otra parte, la baja relación agua/cementante usada debe haber tenido un efecto positivo, al reducir el volumen y la conectividad de la red porosa, lo que redujo la penetración de agentes externos (Indu Siva Ranjani and Ramamurthy, 2012). En general, no se observó degradación física durante el período de estudio, como agrietamiento, desprendimiento, pérdida de fuerza y adhesión. Los concretos SSC parecen adecuados para uso en condiciones marinas y para la construcción de tuberías de aguas residuales.

6. CONCLUSIONES

La resistencia a la compresión de especímenes curados a 25°C mostró que los concretos elaborados con cementantes compuestos de 15%HH-10%PC-10%CaO-65%PM y 5%An-10%PC-10%CaO-75%PM, alcanzaron alrededor de 41 y 44 MPa, respectivamente, cuando son inmersos en una solución de 3.5% CaSO_4 .

Los concretos supersulfatados con cementantes compuestos de 5%HH-20%PC -75%PM, 5%An-10%PC-10%CaO-75%PM y 15%An-20%PC -65%PM curados a 60°C mostraron resistencias más altas que el concreto de referencia hasta en un 30%, inmersos en una solución de 3.5% CaSO_4 .

Los principales productos de hidratación de los concretos supersulfatados detectados por DRX, SEM y EDS fueron C-S-H y etringita, que proporcionaron una resistencia a la compresión favorable cuando son expuestos a condiciones de laboratorio y sulfato de calcio.

El curado a 60°C por 22 h favorece la resistencia a edades tempranas y el desarrollo a edades posteriores, principalmente de las muestras expuestas en sulfato en casi todos los concretos.

La microestructura del concreto con cementante compuesto de 5%An-10%PC-10%CaO-75%PM mostró partículas de PM sin reaccionar y agregados embebidos en una estructura de pasta de matriz relativamente densa.

En general los concretos supersulfatados muestran valores favorables de resistencia a la compresión cuando son expuestos a una solución de 3.5% CaSO_4 , mostrando adecuadas propiedades para su uso en ambientes marinos.

7. AGRADECIMIENTOS

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca a K Luna-Cabrera, y por el apoyo financiero del proyecto Conacyt FC-2015-2 / 906.

8. REFERENCIAS

ACI Committee 211 (2002), *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*.

- AENOR (2001), *UNE-EN 12390-1, Testing hardened concrete. Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds*.
- AENOR (2003), *UNE-EN 12390-3, Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens*.
- Avila-López, U., Almanza-Robles, J. M., Escalante-García, J. I. (2015), "Investigation of novel waste glass and limestone binders using statistical methods", *Construction and Building Materials*, 82, pp. 296–303. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.085>
- Bazaldúa-Medellín, M. E., Fuentes, A. F., Gorokhovskiy, A., Escalante-García, J. I. (2015), "Early and late hydration of supersulphated cements of blast furnace slag with fluorgypsum", *Materiale de Construcție*, 65(317), p. e043. <https://doi.org/10.3989/mc.2015.06013>.
- Bijen, J., Niël, E. (1981), "Supersulphated cement from blastfurnace slag and chemical gypsum available in the Netherlands and neighbouring countries", *Cement and Concrete Research*, 11(3), pp. 307–322. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90104-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90104-6).
- Cabrera-Luna, K., Maldonado-Bandala, E. E., Nieves-Mendoza, D., Escalante García, J. I. (2018), "Supersulfated binders based on volcanic raw material: Optimization, microstructure and reaction products", *Construction and Building Materials*, 176, pp. 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.024>.
- Ding, S., Shui, Z., Chen, W., Lu, J., Tian, F. (2014), "Properties of supersulphated phosphogypsumslag cement (SSC) concrete", *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 29(1), pp. 109–113. <https://doi.org/10.1007/s11595-014-0876-9>.
- Dutta, D. K., Borthakur, P. C. (1990), "Activation of low lime high alumina granulated blast furnace slag by anhydrite", *Cement and Concrete Research*, 20(5), pp. 711–722, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90005-1)
- Gracioli, B., Favero Varela, M. V., Beutle, C. S., Frare, A., Angulski da Luz, C., Pereira Filho, J. I. (2017), "Considerações sobre a resistência mecânica e o processo de hidratação de cimentos supersulfatados (CSS) formulados com fosfogesso", *Matéria (Rio de Janeiro)*, 22(1). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0107>.
- Grounds, T., Nowell, D. V., Wilburn, F. W. (2003), "Resistance of supersulfated cement to strong sulfate solutions", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 72(1), pp. 181–190. <https://doi.org/10.1023/A:1023928021602>.
- Grounds, T., Nowell, D. V., Wilburn, F. W. (1995), "The influence of temperature and different storage conditions on the stability of supersulphated cement", *Thermal Analysis*, 45, pp. 385–394. <https://doi.org/10.1007/BF02549342>.
- Hossain, K. M. A., Lachemi, M. (2006), "Performance of volcanic ash and pumice based blended cement concrete in mixed sulfate environment", *Cement and Concrete Research*, 36(6), pp. 1123–1133. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.010>.
- Indu Siva Ranjani, G., Ramamurthy, K. (2012), "Behaviour of foam concrete under sulphate environments", *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Ltd, 34(7), pp. 825–834. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.03.007>.
- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., Ideker, J. H. (2011), "Advances in alternative cementitious binders", *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 41, pp. 1232–1243. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>.
- Kamlet, J. (1960), "US2947643A Hydraulic Cements".
- Kühl, H. (1908), "German Patent No. 237777". German.
- Midgley, H. G., Pettifer, K. (1971), "The microstructure of hydrated super sulphated cement", *Cement and Concrete Research*, 1(1), pp. 101–104. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(71\)90086-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(71)90086-X).
- Noor-ul-Amin (2014), "An overview on comparative study of alternatives for Ordinary Portland cement", *Journal of Basic and Applied Chemistry*, 4(6), pp. 15–22, ISSN 2090-424X

- ONNCCE (2014), *NMX-C-414-ONNCCE, Building industry - hydraulic cement -specifications and testing methods*.
- Prasad, J. *et al.* (2006), "Factors Influencing The Sulphate Resistance of Cement Concrete and Mortar", *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 7(3), pp. 259–268.
- Quanlin, N., Rui, Z. (2015), "Experimental study on some properties of a low-carbon cement", in *International Conference on Advances in Energy and Environmental Science*, pp. 1440–1443.
- Rubert, S., Angulski da Lu, C., Varela, M. V. F., Pereira Filho, J. I., Hooton, R. D. (2018), "Hydration mechanisms of supersulfated cement: The role of alkali activator and calcium sulfate content", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Springer Netherlands, 134(2), pp. 971–980. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7243-6>.
- Sadique, M., Nageim, H. A., Atherton, W., Seton, L., Dempster, N. (2012), "A new composite cementitious material for construction", *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 35, pp. 846–855. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.107>.
- Shi, C., Jiménez, A. F., Palomo, A. (2011), "New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement", *Cement and Concrete Research*. Elsevier B.V., 41(7), pp. 750–763. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>.
- Taylor, H. F. W. (1998), *Cement chemistry*. 2nd edn, *Cement and Concrete Composites*. 2nd edn. Thomas Telford Publishing. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00023-7).
- V.P. Mehrotra, Sai, A. S. R., Kapur, P. C. (1982), "Plaster of Paris activated supersulphated slag cement", *Cement and Concrete Research*, 12(4), pp. 463–473. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(82\)90061-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(82)90061-8).
- Wojceich, P., Marczevska, J., Jaworska, M. (1985), "Some Aspects and Mechanisms of sulphate attack", *Structure*, pp. 19–24.
- Wolfe, W. E. *et al.* (2001), "The Effect of Ettringite Formation on Expansion Properties of Compacted Spray Dryer Ash", in *International Ash Utilization Symposium*.
- Woltron, G. (2009), "The utilisation of GGBFS for advanced supersulfated cements", *World Cement*.