



Microestructura y propiedades mecánicas de cementos compuestos: Efecto de la reactividad de adiciones puzolánicas e hidráulicas

L. Y. Gómez-Zamorano¹, C. A. Iñiguez-Sánchez¹, B. Lothenbach²

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales, Ave. Universidad s/n, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, CP 66450.

²EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Laboratory for Concrete and Construction Chemistry, Switzerland

Información del artículo

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i1.74>

Artículo recibido el 02 de septiembre de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 04 de Diciembre de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2015 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2015.

© 2015 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 1, Enero – Abril 2015, 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, fecha de publicación: 30 de enero de 2015.

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.

RESUMEN

Este trabajo de investigación se centró en el uso de adiciones puzolánicas e hidráulicas como sustituto parcial del cemento Portland. Con la finalidad de evaluar las propiedades mecánicas, microestructurales y reacciones de hidratación de los cementos compuestos, se emplearon como sustitutos de cemento Portland: escoria granulada de alto horno, ceniza volante, metacaolín y sílice geotérmica. Se utilizaron niveles de reemplazo de 50, 40 y 30% de los materiales anteriormente mencionados, una relación agua/material cementante de 0.4, temperaturas de curado de 20 y 50°C, por un periodo de hasta 180 días. Los resultados indicaron un alto grado de reactividad de los materiales de reemplazo y un incremento en las propiedades mecánicas hasta en un 200% en comparación con el cemento puro, lo que impactó en una matriz de productos de reacción más densa y por tanto en una reducción en la porosidad.

Palabras clave: microestructura; reactividad; propiedades mecánicas; subproductos industriales.

ABSTRACT

This research was focused on the use of pozzolanic and hydraulic additions as partial replacement of Portland cement. In order to evaluate the mechanical properties, microstructure and hydration reactions of the composite cements phases, granulated blast furnace slag, fly ash, metakaolin, and geothermal silica were used as replacement materials. The following conditions were utilized: replacement levels of 50, 40 and 30% of the mentioned materials, a water/cementitious materials ratio of 0.4, curing temperatures of 20 and 50°C and curing intervals from 3 to 180 days. The results indicated a high degree of reactivity of replacement materials and an increase in the mechanical properties up to 200% compared to pure cement, resulting in a matrix of more dense reaction products and thus a reduction in porosity.

Keywords: microstructure; reactivity; mechanical properties; industrial byproducts.

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo a análise do uso de adições puzolánicas e hidráulicas como substituto parcial do cimento Portland. Com a finalidade de avaliar as propriedades mecânicas, microestrutura e as reações de hidratação dos cimentos compostos, utilizou-se como elemento substituinte do cimento: escória de alto forno, cinza volante, metacaulim e sílica ativa.

Foi utilizadas proporções de 50, 40 e 30% dos materiais anteriormente citados, com uma relação água/material cimentício de 0,40, temperaturas de cura de 20°C a 50°C, por um período de até 180 dias. Os resultados indicaram um alto grau de reatividade dos materiais de substituição e um incremento das propriedades mecânicas de até 200% em comparação com o cimento puro, resultando em uma matriz mais densa e, portanto uma redução na porosidade.

Palavras-chave: microestrutura; reatividade; propriedade mecânica; subprodutos industriais.

Autor de correspondencia: Lauren Y. Gómez Zamorano (lauren.gomezzm@uanl.edu.mx)

1. INTRODUCCIÓN

La industria del cemento Portland, ha experimentado una expansión considerable en los últimos años como consecuencia del crecimiento de la civilización y del proceso de desarrollo industrial y tecnológico.

El consumo de cemento Portland Ordinario (OPC) ha aumentado de forma muy importante en los últimos años: en 1998 fue de cerca de 1.5 mil millones de toneladas (Global Cement Information System), en el 2000 de 1.66 mil millones de toneladas (IMCYC) y en el 2013 de 3.4 mil millones de toneladas aproximadamente (Global Cement Report). Si la producción mundial de cemento continúa con esta tendencia al incremento se estima que para el primer cuarto del siglo XXI las emisiones de CO₂ procedentes de esta industria, pudieran llegar a alcanzar 3,000 millones de toneladas (Global Cement Report).

La industria cementera ha establecido como enfoque primordial la sustentabilidad alcanzando la prosperidad económica, la responsabilidad social y el cuidado del medioambiental. Hoy en día, es una preocupación a nivel mundial la investigación de nuevas formas de reducir las cantidades de gases contaminantes generados por la producción de OPC. Una de las vías principales de desarrollo es la combinación de cemento o sustitución del clínker por materiales de reemplazo, como las puzolanas o los materiales hidráulicos latentes que reduzcan de manera significativa el deterioro causado al medio ambiente, específicamente el 7% correspondiente a las emisiones de CO₂.

El empleo de materiales alternativos en la industria cementera; entre los cuales se pueden mencionar materias primas silicoaluminosas, desechos provenientes de plantas metalúrgicas, residuos agrícolas y de plantas generadoras de energía, ha demostrado ser un medio muy efectivo para alcanzar en gran parte su sustentabilidad.

Por otra parte, de acuerdo a que existen diversas publicaciones e informes sobre el buen funcionamiento de las pastas, morteros y concretos sustituidos con diversos materiales de reemplazo ricos en sílice, tales como el humo de sílice (SF), la ceniza volante (FA) clase F o la ceniza de cáscara de arroz, los cuales además de proporcionar comportamiento puzolánico, favorecen en la aceleración de las reacciones de hidratación inicial del cemento y mejoran sus propiedades mecánicas (Gómez-Zamorano y Escalante-García, 2009), se decidió trabajar con la sílice geotérmica (GSW) ya que presenta propiedades y características similares a estos materiales puzolánicos y con un campo de investigación poco desarrollado.

Thomas y cols. (1999) estudiaron la durabilidad de concreto con mezclas ternarias de cemento Portland, SF y un amplio rango de FA. Ellos reportaron que las FA con alto contenido de CaO son generalmente menos efectivas en la inhibición de la reacción álcali sílice y al ataque por los sulfatos en comparación con la FA clase F. Además, en este estudio se mostró que para niveles de reemplazo superiores al 60%, se requiere controlar la expansión debido a la reacción álcali sílice, ya que adiciones de cantidades relativamente pequeñas de SF (3 a 6%) fueron efectivas en la reducción de la expansión. Se demostró con este estudio que existe un efecto sinérgico entre la FA y el SF; la FA ayuda en los problemas de trabajabilidad asociados con altos contenidos de SF, mientras que el SF compensa la resistencia temprana relativamente baja de la ceniza volante. Los resultados indicaron que el concreto producido con mezclas ternarias cementantes tienen una muy alta resistencia a la penetración de los iones cloruro, característica especialmente importante debido a las condiciones ambientales a las que los concretos en servicio son sometidos.

Bijen (1996) resaltó el uso de la escoria de alto horno y la FA como reemplazo en el cemento, juntos y por separado.

El autor reportó que la mezcla de subproductos presenta mejores propiedades que utilizando sólo OPC; mejorando el desempeño con respecto a la corrosión, a la reacción álcali sílice y ataque por sulfatos en estructuras reforzadas. Lo más importante fue la enorme reducción de la velocidad de penetración de los iones cloruro en el concreto.

Adicionalmente, Gesoglu y cols. (2009) reportaron que un aumento en la cantidad de reemplazo de FA disminuyó la resistencia a la compresión de concretos auto-compactables hechos de caliza con FA y escoria de alto horno, en cambio en los concretos auto-compactables hechos con escoria y SF se mejoró la resistencia mecánica.

Gutteridge y Dalziel (1990), al igual que Taylor y Mohan (1985) estudiaron el proceso de hidratación de pastas de OPC reemplazadas con escoria y FA, y reportaron que el tamaño de partícula fino de la FA y la escoria beneficiaron la hidratación del cemento Portland, favorecimiento debido a la nucleación heterogénea de los productos de hidratación. Esto disminuyó la energía de activación y aceleró la reacción de todo el sistema.

Talero y Rahhal (2009) realizaron un estudio sobre el efecto que el SF y dos tipos de metacaolín (MK) tienen en el calor de hidratación de cementos compuestos con diferentes composiciones de C_3A y C_3S . Ellos mencionaron que la actividad puzolánica de los dos MK era dependiente de su estructura amorfa y de su composición química con respecto al contenido de Al_2O_3 . La razón por la que las pastas de OPC con SF mostraron una hidratación inicial elevada se debió a su naturaleza vítrea. Por el contrario, para las pastas de OPC con los dos MK, esta aceleración fue dependiente del contenido de Al_2O_3 . Adicionalmente, la cantidad de calor producido por gramo de cemento fue mayor para aquellos que contenían una mayor cantidad de C_3A .

Snelson y cols. (2008), investigaron el efecto en la evolución de calor liberado en muestras de OPC reemplazado con MK y FA. El proceso de hidratación de las pastas de OPC reemplazadas con FA cambió con el nivel de reemplazo, pues con el incremento en el contenido de FA el calor de hidratación disminuyó. Los resultados en pastas de OPC con MK sugirieron que el MK reducía la velocidad de hidratación inicial del OPC. Para ambos sistemas el factor principal de control de la cinética de hidratación del OPC fue el requerimiento de agua de la puzolana. Cuando se combinó MK y FA en pastas de OPC, la actividad puzolánica del MK incrementó el calor total liberado.

Cabe destacar que existe poca información respecto al uso del residuo de sílice geotérmica como material de reemplazo del cemento Portland y se estima (Patente USA, 1990) que más del 80% de las plantas geotérmicas en el mundo presentan problemas por la generación y acumulación de desechos de este tipo. Además, este material posee un enorme potencial para ser utilizado como material de reemplazo de cementos Portland, de acuerdo con trabajos precedentes, y no se utiliza actualmente de forma sistemática (Gomez-Zamorano y cols, 2004; Íñiguez, 2008).

De esta manera, en base a los resultados obtenidos, concernientes al desarrollo de cementos Portland substituidos con altos niveles de materiales puzolánicos e hidráulicos y curados a temperaturas moderadas y altas (Gomez-Zamorano, 2004, Battagin y cols, 1997), se decidió enfocar este proyecto a evaluar el comportamiento y funcionamiento de dichos materiales como reemplazo parcial del cemento, modificando los niveles de sustitución. En este artículo se presentan los resultados de un estudio experimental de muestras de pastas de cemento puro y compuesto curadas a 20 y 50°C por 180 días. Se utilizaron reemplazos de 50, 40 y 30%p de escoria de alto horno, ceniza volante, metacaolín y sílice geotérmica y una relación agua/material cementante de 0.4.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales seleccionados para el desarrollo de este proyecto fueron el cemento Portland que se obtuvo de Cemex México y cuatro materiales de sustitución: (a) dos tipos diferentes de escoria de alto horno granulada (SLAG1 y SLAG2) con composición química, índice hidráulico y porcentaje de fracción amorfa diferentes, (b) sílice geotérmica obtenida de la Comisión Federal de Electricidad en Baja California, México, (c) ceniza volante tipo F y (d) metacaolín. Las principales características de la GSW son: composición química rica en sílice amorfa, con trazas de cloruros de sodio y potasio, tamaño de partícula en el intervalo de 10-50nm (véase la figura 2), color blanco y densidad de 2.1g/cm³. La composición química analizada mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX) se presenta en la Tabla 1. Las escorias de alto horno se caracterizaron mediante DRX cuantitativa para analizar el porcentaje de fracción amorfa; para el caso de la SLAG1 fue de un 97% y para la SLAG 2 de un 82%.

Se prepararon diferentes sistemas de pastas de cemento puro y sustituido, con relación a/c de 0.40 y 0.4% de superplastificante, curados hasta 180 días, a 20 y 50 ° C. Los niveles de sustitución utilizados fueron de hasta el 50% de OPC, como se puede ver en la Tabla 1. La GSW se añadió a los sistemas como una suspensión alcalina, para modificar el pH en las mezclas y el contenido de iones de Ca y Si en la solución de los poros, lo que afectó directamente la composición de la fase sólida y acuosa final de los cementos sustituidos. Después de los períodos de hidratación de entre 3 y 180 días, las muestras se caracterizaron mediante resistencia a la compresión; fracciones sólidas de las muestras se sumergieron en acetona y fueron secadas en vacío a 50°C durante 24h, con el fin de detener las reacciones de hidratación. Las muestras fueron evaluadas mediante análisis termogravimétrico (TGA), utilizando un flujo constante de helio, a una velocidad de calentamiento de 20°C/min hasta 980°C. Se utilizó además difracción de rayos X para evaluar la composición mineralógica de las muestras y su microestructura fue analizada mediante el uso de imágenes de electrones retrodispersados en microscopía electrónica de barrido.

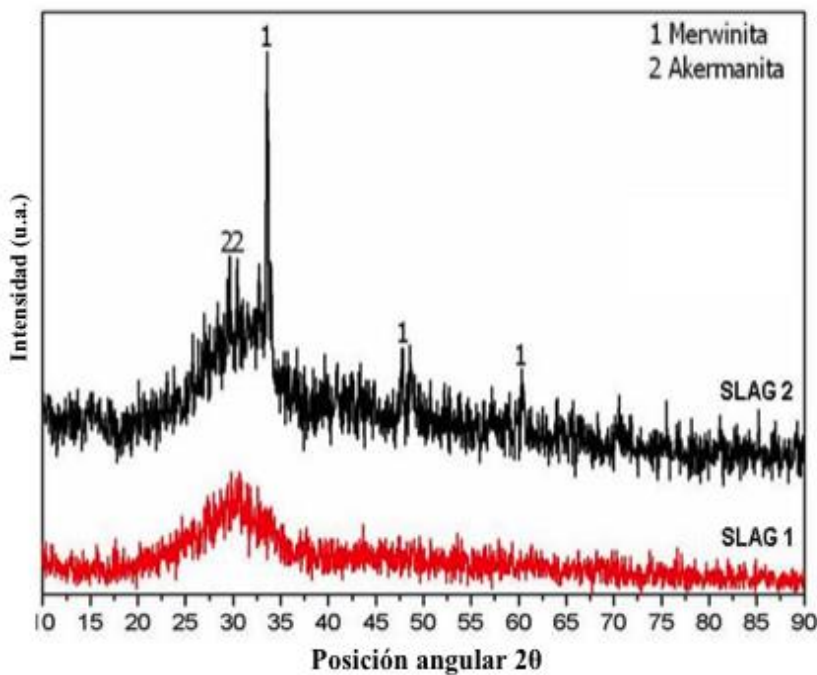


Figura 1. Patrones de difracción de rayos X de los dos tipos de escorias. (SLAG 1 y 2)

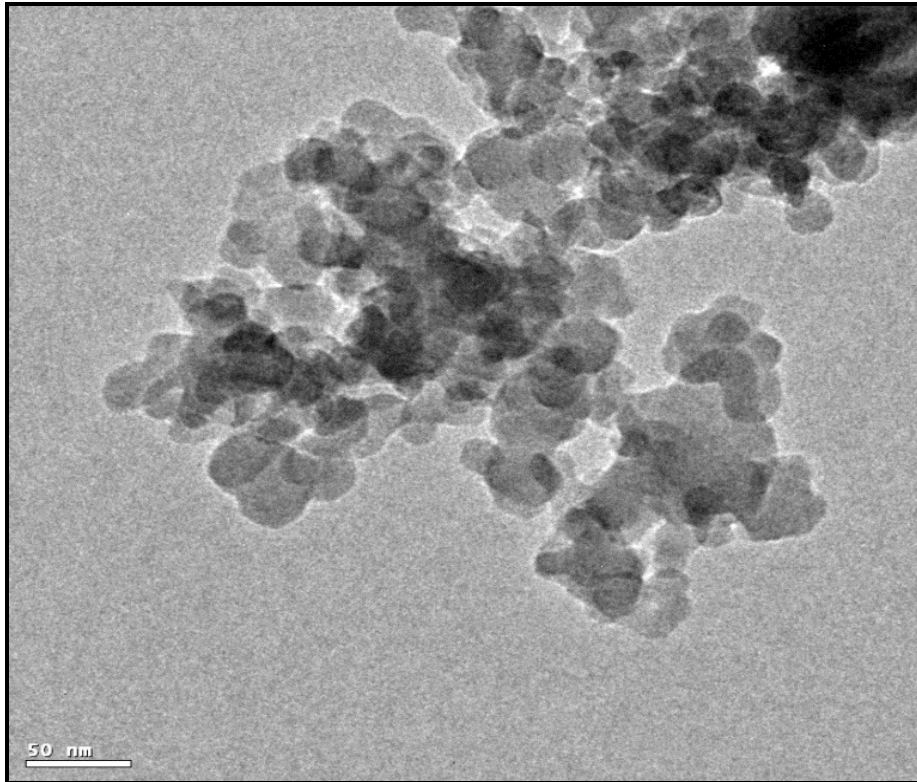


Figura 2. Micrografía de la sílice geotérmica mediante microscopía electrónica de transmisión, 50000X.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resistencia a la compresión.

Los resultados de resistencia a la compresión para todos los cementos con los dos tipos de escorias curados a 20 y 50°C se presentan en la figura 3. Todos los cementos sustituidos mostraron una reducción en el desarrollo de la resistencia a la compresión a edades tempranas en comparación con el OPC. Sin embargo, en períodos largos de hidratación, la evolución de la resistencia a la compresión muestra diferencias significativas. Las resistencias más altas fueron las mostradas por los cementos con 50% de sustitución, 10% GSW, SLAG1 y curados a 20°C. Este comportamiento va de acuerdo con lo reportado por Verbeck y Helmuth (1968) quienes afirmaron que a temperaturas menores, los productos de hidratación tienen tiempo suficiente para difundir y precipitar uniformemente en la pasta de cemento formando una matriz relativamente compacta de productos de hidratación. Sin embargo, a temperaturas elevadas de hidratación, como puede observarse en la figura 3, la velocidad de reacción es mayor que la velocidad de difusión y la mayoría de los productos de hidratación permanecen cerca de los granos de cemento anhidros, dejando espacios intersticiales relativamente abiertos.

Debido a esto, después de 28 días de hidratación, la resistencia del cemento puro curado a 50°C es menor, este fenómeno se ha publicado anteriormente para los cementos puros y sustituidos con GSW (De León Malacara, 2007 y Gómez-Zamorano y cols., 2004). De manera general, las adiciones de la GSW aceleraron la hidratación del OPC, generando sitios de nucleación al comienzo de las reacciones de hidratación y luego mediante la producción de C-S-H por el consumo del CH, este comportamiento de la GSW ha sido previamente reportado (Gomez-

Zamorano y cols., 2004, Iñiguez-Sanchez y cols. 2012). Sin embargo, es importante considerar que reemplazos mayores al 30% de humo de sílice, que posee características similares a la GSW, con tamaño de partícula pequeño podrían ser perjudiciales en las propiedades mecánicas y la hidratación del cemento Portland (Mehta, P.K., 1989).

Tabla 1. (a) Composición química y área superficial (BET) de los materiales usados, (b) sistemas experimentales.

(a)

Óxido (%p)	OPC	SLAG1	SLAG2	FA	GSW	MK
iO ₂	18.69	35.55	31.49	60.67	94.76	58.71
Al ₂ O ₃	4.73	9.97	9.41	26.08	0.17	23.54
Fe ₂ O ₃	2.17	1.06	0.51	5.47	0.03	1.86
CaO	64.55	38.84	43.45	2.68	0.41	7.18
MgO	1.77	7.86	8.78	0.74	-	0.14
TiO ₂	0.21	2.38	1.42	1.23	-	0.36
Na ₂ O	0.25	0.42	0.32	0.72	0.29	0.58
K ₂ O	0.69	0.57	0.44	1.8	0.22	0.81
MnO	0.07	0.89	1.26	-	0.04	-
P ₂ O ₅	0.12	-	-	-	-	0.5
Cl	-	-	-	-	0.05	-
SO ₃	4.12	2.41	2.89	0.53	-	1.68
PPI	3.60	-	-	-	4.96	2.89
BET* (m ² /kg)	523	494	-	446	665	-

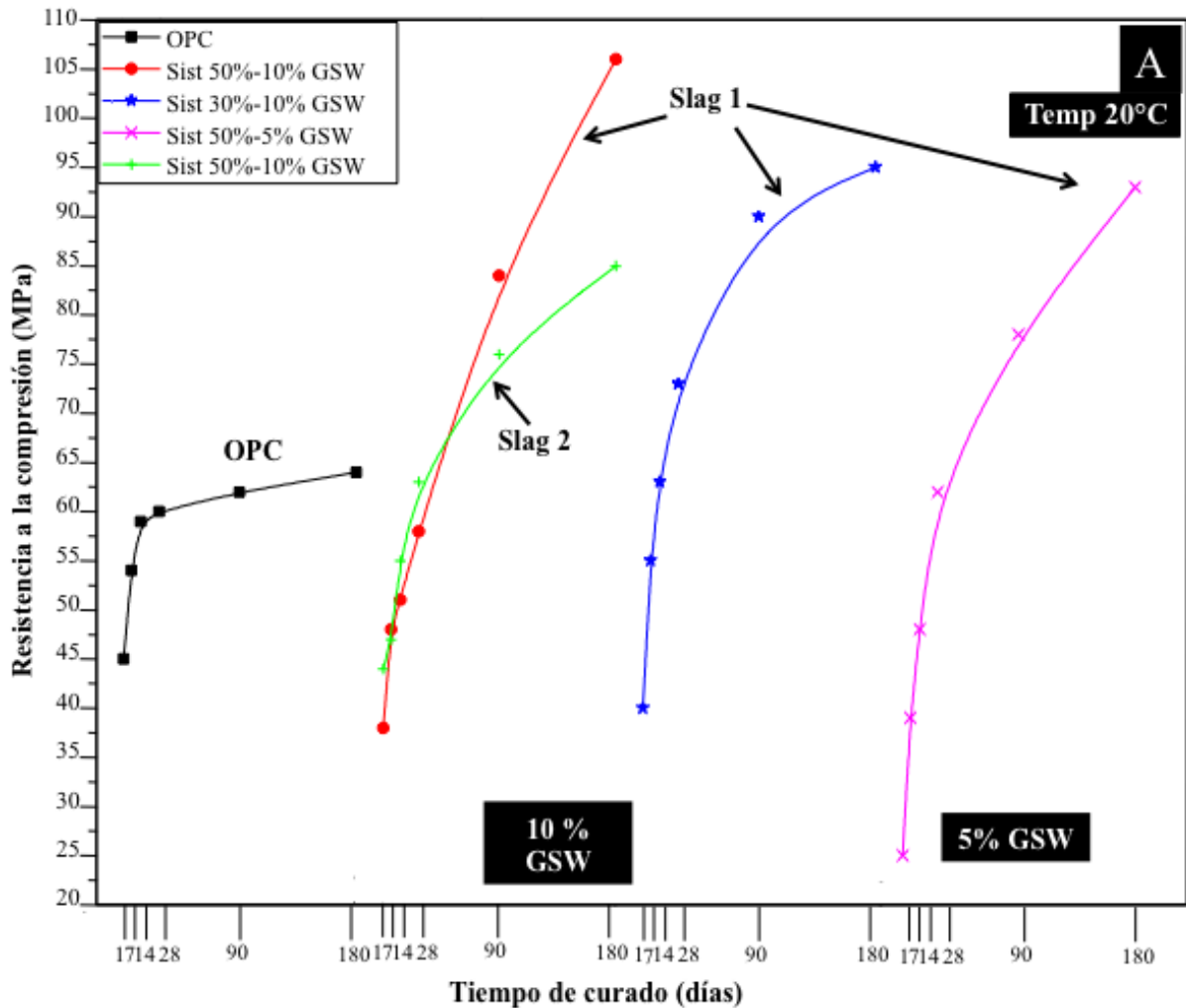
(b)

Sistema	Nivel de reemplazo (%)						TEMP
	OPC	SLAG1	SLAG2	FA	GSW	MK	
T1	100	-	-	-	-	-	20°C
S1	50	30	-	5	10	5	
S3	70	10	-	5	10	5	
S4	50	30	-	10	5	5	
S7	50	-	30	5	10	5	
T7	100	-	-	-	-	-	50°C
S13	50	30	-	5	10	5	

* Área superficial

En el sistema con la menor cantidad de GSW y la cantidad más elevada de FA (ver S4) la ganancia temprana de la resistencia a la compresión presentó una reducción en comparación con el resto de los sistemas. Este comportamiento podría estar relacionado con la pobre reacción de la FA, que en las etapas iniciales sólo podría estar ayudando en la reología de las pastas, pero que no contribuye en la aceleración de las reacciones de cemento, lo que podría provocar una disminución de los valores de resistencia a la compresión en edades tempranas. Es importante destacar que, los valores finales de los tres sistemas con SLAG1 presentaron un aumento considerable en las

propiedades mecánicas en comparación con el cemento puro (véase S1 y S3). La escoria SLAG2 también mostró una menor resistencia mecánica en comparación con SLAG1, aunque, como el resto de los sistemas sustituidos, sus propiedades mecánicas fueron superiores a las del cemento puro. Este comportamiento es debido a que la SLAG2 presentó un menor porcentaje de fracción amorfa, disminuyendo su reactividad en el sistema, esto ha sido previamente reportado para estudios similares (Escalante y cols. 2001). La figura 3b presenta una comparación entre el OPC y cementos sustituidos curados a 50°C, en donde se puede observar que a edades tempranas, las propiedades mecánicas son superiores para el OPC curado a alta temperatura en comparación con aquél curado a 20°C, sin embargo, después de 28 días este comportamiento se revirtió, lo cual podría ser debido al fenómeno explicado anteriormente.



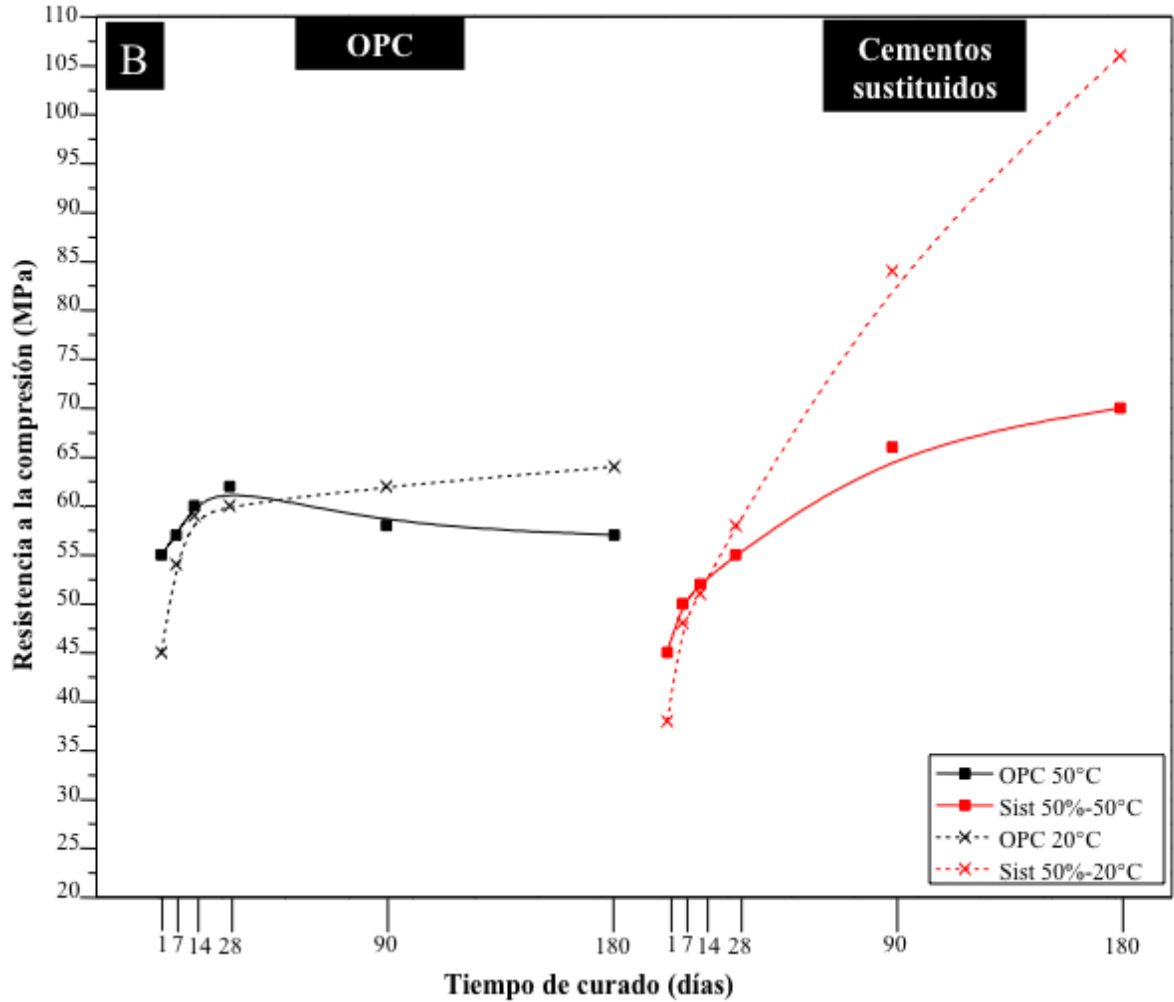


Figura 3. Resistencia a la compresión de: (a) muestras curadas a temperatura ambiente y (b) comparativa con el incremento en la temperatura.

3.2 Análisis por difracción de rayos X.

La hidratación del cemento fue seguida por medio de la estimación de los cambios en la intensidad de las reflexiones de las fases cristalinas en los patrones de difracción de rayos X y los cambios observados en el análisis TGA.

La figura 4 muestra los patrones de difracción de rayos X de los cementos puros y sustituidos en un 50 y 30%, curados a 20°C por 28 días. Es posible observar que los productos de hidratación formados son similares en todas las muestras. Sin embargo, la principal diferencia entre los cementos puros y sustituidos fue la intensidad en la reflexión del hidróxido de calcio (CH), presentándose una disminución para el caso de los cementos sustituidos debido a la reacción puzolánica, lo cual está relacionado con el aumento en los valores de resistencia a la compresión. Cabe mencionar que el comportamiento puzolánico se vio afectado por la cantidad de GSW utilizada (Sistema S1 el 10% de GSW y Sistema S4 con un 5% de GSW) y la temperatura de curado; observando el mayor consumo de CH en el sistema S13 (10% de GSW y 50°C). Lo anterior corrobora el comportamiento puzolánico de la GSW, que es similar al reportado por otros autores con diferentes materiales puzolánicos (Yogendran y cols, 1991).

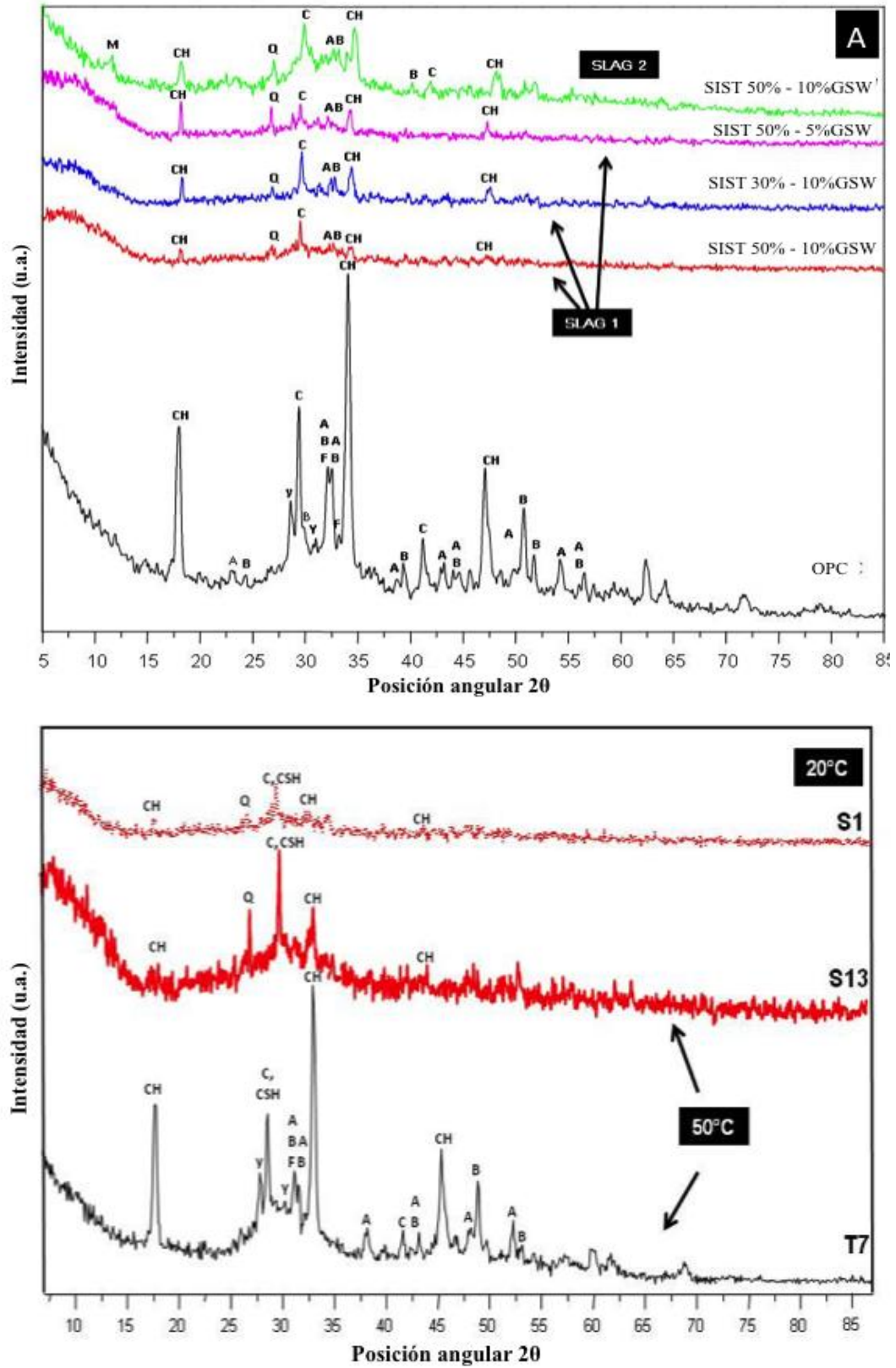


Figura 4. Patrones de difracción de rayos X para todos los sistemas curados a (a) 20°C y (b) 50°C; M=monosulfoaluminato, A=alita, B=belita, Q=Cuarzo, C=calcita, CH=hidróxido de calcio, Y=yeso, F=ferrita

3.3 Análisis térmico.

Los análisis térmicos fueron llevados a cabo para dar seguimiento a la hidratación de los cementos puros y sustituidos. Las cantidades de etringita, yeso e hidróxido de calcio se estimaron a partir de la pérdida de peso entre 50-110, 110-140 y 450-550°C, respectivamente. Además, el análisis térmico diferencial mostró la formación de gel C-S-H, AFm, hidrotalcita e hidróxido de calcio como se observa en la Fig. 5. Los datos indican una disminución de la calcita, y la formación de monocarbonato de calcio (C_4AcH_{11}) en todos los cementos sustituidos en comparación con el OPC. Kuzel y cols. (1996) reportó la formación de monocarboaluminatos en presencia de carbonatos, lo que impide la formación de etringita, y la generación de monosulfoaluminato, como se indica en el sistema S7. Este comportamiento también fue observado en los resultados de DRX en la figura 4.

La reactividad puzolánica e hidráulica de todos los sistemas sustituidos se refleja en el aumento de las cantidades de gel C-S-H en el rango de 105 a 200°C y la disminución de CH en el rango de 450 a 550°C, indicando un fuerte comportamiento puzolánico de dichos materiales. La presencia de calcita también fue observada a aproximadamente 750°C, al mismo tiempo, la aparición de un segundo pico a 700°C, que se refiere de la liberación de CO_2 , indicando la formación de monocarboaluminato de calcio, como se mencionó previamente. Es posible además establecer mediante estos resultados la reducción en el contenido AFt para todos los cementos sustituidos.

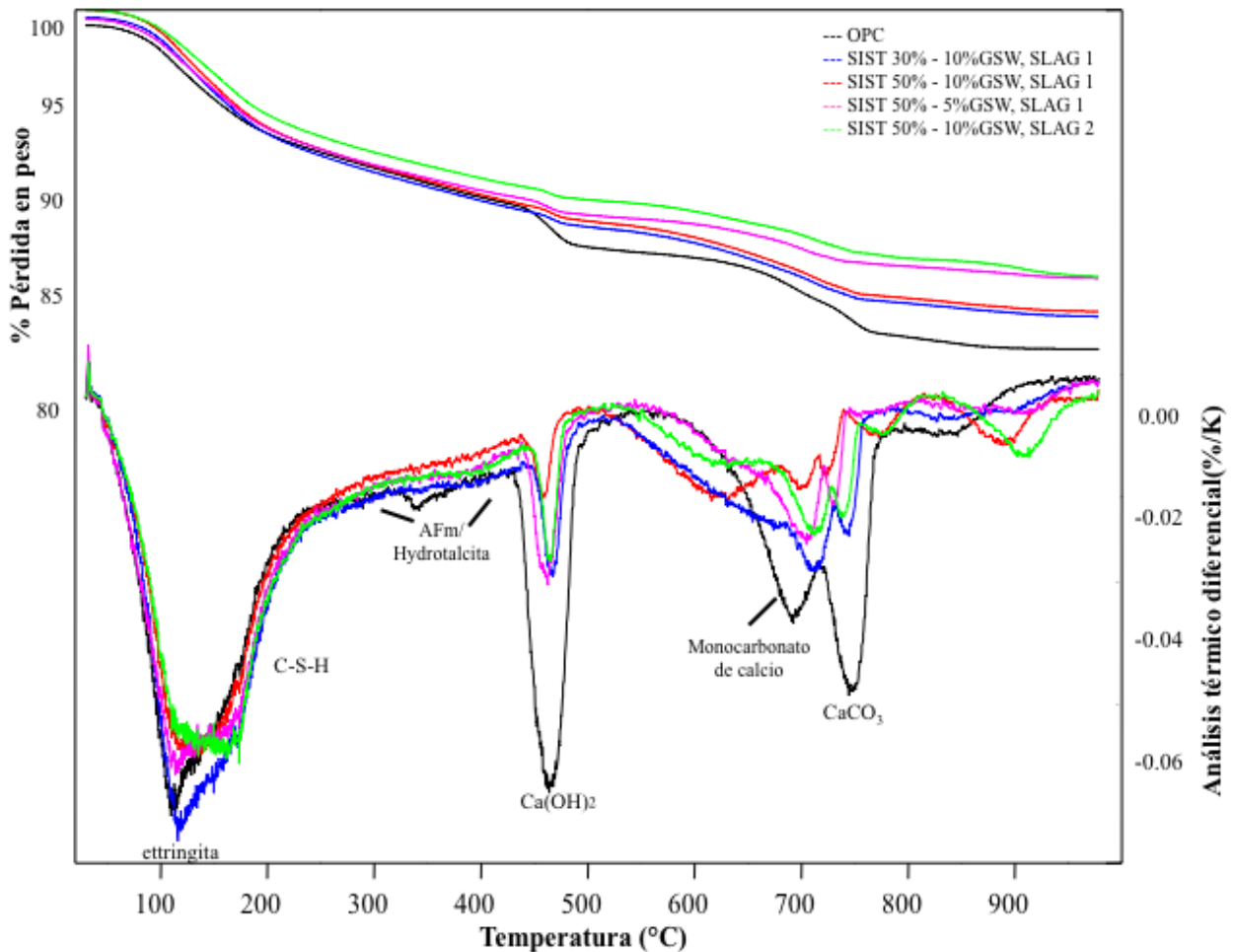


Figura 5: Resultados del análisis térmico de los sistemas con ambas escorias curados a 20°C.

3.4 Microscopía electrónica de barrido.

Las muestras hidratadas durante 90 días a 20°C se analizaron mediante imágenes por electrones retrodispersados (ver Fig. 6). Las características principales observadas fueron las que comúnmente se presentan en las pastas de cemento con relación a/c de 0.40, con una fracción de cemento sin reaccionar, con cristales de hidróxido de calcio (para el cemento puro) y porosidad dispersa en la microestructura. Todos los cementos sustituidos (Fig. 6.S1, 6.S7 y 6.S13) mostraron una microestructura y evolución química similar, con granos de cemento ya reaccionados y una matriz más compacta, en donde estos sistemas generaron mayores sitios de nucleación favorables para las reacciones de hidratación, desarrollando una matriz rica en C-S-H debido al consumo del CH, en comparación con el cemento puro (Fig. 6.T1), lo cual va ligado al incremento en las propiedades mecánicas. La reducción en la porosidad puede ser debida a: A) el efecto de microrellenado de la FA y GSW, la formación de nuevos sitios de nucleación por parte de la GSW, debido a su tamaño de partícula nanométrico, y B) el consumo de hidróxido de calcio por la reacción puzolánica, ocasionando la formación de nuevos productos de hidratación. En la fig. 6, S13 muestra la microestructura de un cemento sustituido (sistema 13) curado a 50°C, donde es posible observar algunos granos de cemento parcialmente reaccionados, con bordes irregulares debido a la rápida reacción inicial a temperatura elevada lo que impidió la generación de una mayor cantidad de productos de reacción, incrementando la porosidad, sin ser comparable con la de un cemento puro. En el caso de la SLAG2 (figura 6.S7), se observó un patrón similar al presentado por la SLAG1 con productos de hidratación similares y una reducción en la porosidad.

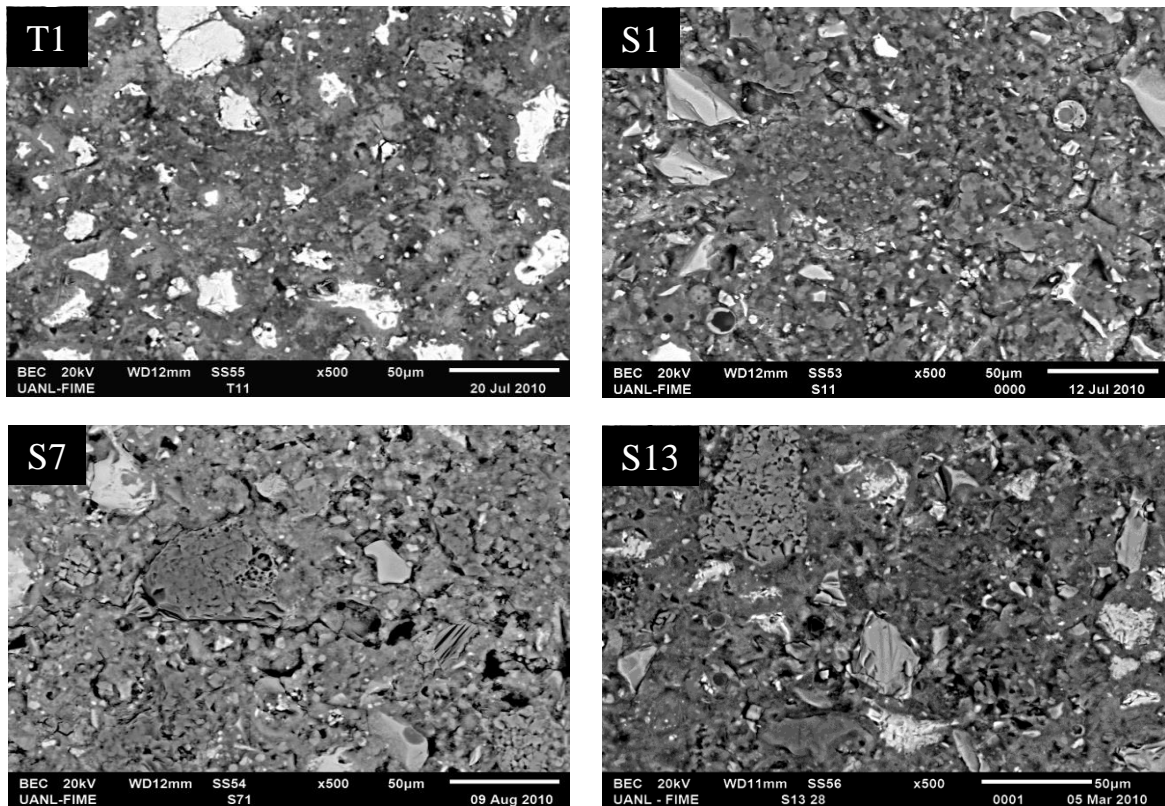


Figura 6: Imágenes obtenidas mediante electrones retrodispersados por microscopía electrónica de barrido mostrando la microestructura del cemento puro curado a temperatura ambiente (T1), cemento con 50% de reemplazo y escoria SLAG 1 (S1), cemento con 50% de reemplazo y escoria SLAG 2 (S7) y cemento con 50% de reemplazo y escoria SLAG 1 curado a 50°C (S13).

4. CONCLUSIONES

Según los resultados, la reactividad en los cementos sustituidos fue fuertemente afectada por el estado amorfo de la SLAG 1, proporcionando mejores propiedades de resistencia mecánica en los sistemas con altos niveles de sustitución.

Al mismo tiempo, el uso de GSW en forma de suspensión demostró una evolución favorable en la formación de los productos de hidratación, debido a la nucleación heterogénea de los mismos, así como la obtención de una matriz de productos de reacción más compacta, mejorando en general la microestructura de los cementos compuestos.

El fuerte comportamiento puzolánico de la GSW se evidenció por el consumo de CH y la generación de una mayor cantidad de gel C-S-H, como se muestra en los resultados de DRX y TGA. La alta reactividad de este material es debida a su composición, su finura y su estado amorfo; sin embargo, el utilizar este material como una suspensión promovió excelentes propiedades mecánicas, físicas y químicas.

En general, el uso de altas cantidades de materiales puzolánicos e hidráulicos en la formación de cementos cuaternarios produce un aumento en las propiedades mecánicas de los sistemas, así como en las reacciones de hidratación mejorando la microestructura final mediante de la reducción de la porosidad.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece ampliamente el soporte financiero de CONACYT - Mexico para la realización de este proyecto.

6. REFERENCIAS

- Battagin, A. F., Camarini, G., Cincotto, M. A. (1997), “*A study of early hydration of slag cement pastes subjected to thermal curing*”, 10th International Congress on the Chemistry of Cement, p.3.
- Bijen, J., (1996). “*Benefits of slag and fly ash*”, Construction and building materials. 10, p. 309.
- De León Malacara, B. (2007), “*Efecto de los perfiles de concentración de cloro y azufre en la estabilidad mecánica y dimensional de morteros de cemento Pórtland sustituido con desecho geotérmico*”, Tesis de Maestría, Cinvestav-Mexico.
- Escalante, J. I., Gomez, L. Y., Johal, K. K., Mendoza, G., Mancha, H., Mendez, J.; *Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions*, Cement and Concrete Research 31 (10), 1403-1409.
- Gesoglu, M., Guneyisi, E., Özbay, E. (2009), “*Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume*”, Construction and Building Materials, 23, p. 1847.
- Global Cement Information System (<http://www.global-cement.dk>)
- Global Cement Report: <http://www.cemnet.com/members/companies/Global-Cement-Report>
- Gómez-Zamorano, L. Y. (2004), “*Geothermal waste as a replacement material of Portland cement pastes*”, Tesis de Doctorado. Cinvestav-Mexico.
- Gómez-Zamorano, L. Y., Escalante-García, J. I., Mendoza-Suárez, G. (2004), “*Geothermal Waste: An Alternative Replacement Material Of Portland Cement*”, Journal of Materials Science 39, p. 4021-4025.

- Gómez-Zamorano, L. Y., Escalante-García, J. I. (2009), “*Hidratación y microestructura de cemento Portland sustituido parcialmente con sílice ultrafina*”, *Materiales de construcción* 59, p. 5.
- Gutteridge, W. A., Dalziel, J. A. (1990), “*The effect of a secondary component on the hydration of Portland cement, Part II: Fine hydraulic binders*”; *Cement and Concrete Research*, 20, p. 853.
IMCYC: <http://www.imcyc.com/cyt/junio04/siglo.htm>
- Íñiguez-Sánchez, C. A. (2008) “*Análisis de la solución de los poros en pastas de Cemento Portland Ordinario parcialmente reemplazado con desecho geotérmico*”. Tesis de Maestría. UANL-Mexico.
- Kuzel, H. J. (1996), *Initial hydration reactions and mechanism of delay ettingite formation in Portland cements*. *Cement and Concrete Composites* 18, pp. 195-203.
- Mehta, P. K. (1983), “*Pozzolanic and Cementitious By-Products as mineral admixture for concrete – A crystal Review.*” *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral by-products in concrete*. ACI SP, pp. 1-46.
- Mehta, P. K. (1989), “*Pozzolanic and Cementitious By-Products in concrete – Another look.*” *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural pozzolanic in concrete* pp.114 (1) 1-43.
- Patente (1990): “*Process for Using sludge from geothermal brine to make concrete and concrete composition*”, Número de patente: 4900360, Inventores: Olin D. Whitescarver, Indian Wells; Jonathan T. Kwan, Santa Maria; M. Kenneth Chan, Los Angeles; Daniel P. Hoyer, Palm Desert, California, E. U.
- Snelson, D. G., Wild, S., O’Farrel, M. (2008), “*Heat of hydration of Portland Cement-Metakaolin-Fly ash (PC-MK-PFA) blends*”, *Cement and Concrete Research*, 38, p. 832.
- Talero, R., Rahhal, V. (2009), “*Calorimetric comparison of Portland cements containing silica fume and metakaolin*”; *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 96, p. 383.
- Taylor, H. W. F., Mohan, K. (1985), “*Analytical study of pure and extended Portland cement pastes: II fly ash and slag-cement pastes*”, *Journal of the American Ceramic Society*, 68, p. 685.
- Thomas, M. D. A., Shehata, M. H, Shashiprakash, S. G., Hopkins, D. S, Cali K. (1999), “*Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash concrete*”, *Cement and concrete research* 29, p. 1207.
- Verbeck, G. J., Helmuth, R. H. (1968), “*Structures and Physical Properties Of Cement Paste*”, *Proceedings of the 5th Intl. Symposium on the Chemistry of Cement*”, Tokyo, pp. 1-32.
- Yogendran, V., Langan, B. W., Ward, M. A. (1991), *Hydration of cement and silica fume paste*, *Cement and Concrete Research* 21, pp.691-708.