

# Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo parcial y total del cemento Pórtland ordinario

L. Espinoza<sup>1\*</sup> e I. Escalante<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)  
PO Box 5595, Managua, Nicaragua  
E-mail: lester.espinoza@gmail.com

<sup>2</sup>Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional (IPN)  
Unidad Saltillo, Coahuila CP 25900, México  
E-mail: ivan.escalante@cinvestav.edu.mx

*(recibido/received: 08-Enero-2007; aceptado/accepted: 28-Mayo-2007)*

## RESUMEN

Se realizó una investigación con dos tipos de concreto siguiendo la norma ACI 211.1: a) concretos sustituidos al 30, 50 y 70 % con escoria de alto horno (EAH) y b) concretos 100 % EAH activada con 4, 6 y 8 % de óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) en forma de silicato de sodio de módulo 2.0. Todos los sistemas se caracterizaron mecánicamente de 1 a 28 días. Se utilizó microscopía electrónica de barrido y espectroscopía por dispersión de energía para analizar la microestructura, grado de avance de la reacción y productos formados. La sustitución parcial del cemento Pórtland (CPO) por EAH no fue benéfica para las propiedades mecánicas, contrario a la sustitución total por EAH activada, la cuál resultó en propiedades mecánicas superiores que las de concretos de puro CPO. La activación de la escoria con 8 % de  $\text{Na}_2\text{O}$  resultó más efectiva, seguido de 6 y 4 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Palabras claves: activación con silicato de sodio; concreto; escoria activada; escoria de alto horno; propiedades mecánicas del concreto

## ABSTRACT

An investigation was carried out with two kinds of concretes following the ACI 211.1 norm: a) replaced concretes with 30, 50 and 70 % with Blast Furnace Slag (BFS) and b) activated 100 % BFS concretes with 4, 6 and 8 % of waterglass ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2.0$ ) added in equivalent of  $\text{Na}_2\text{O}$ . All the systems were mechanically characterised from 1 to 28 days. Scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy were used to analyse the microstructure, reaction yield and by-products. The partial substitution of the neat Ordinary Portland Cement (OPC) was not good for the mechanical properties, against the total substitution by activated BFS, which resulted in mechanical properties better than the concretes of neat OPC. The slag activation with 8 %  $\text{Na}_2\text{O}$  was more effective, followed by 6 and 4 %  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Keywords: activated slag; activation with waterglass; blast furnace slag; concrete; concrete mechanical properties

---

\* Autor para la correspondencia

## INTRODUCCIÓN

El concreto es el material que ha tenido el mayor uso en la construcción de edificios e infraestructura en la historia de la civilización. Está constituido principalmente por cemento Pórtland, agregados (gruesos y finos) y agua. Sin embargo, la producción de cemento Pórtland es un proceso que demanda un alto consumo de energía (aproximadamente 4,000 kJ/kg cemento, 25 % pérdidas) y con alta emisión de contaminantes (0.85-1.0 kg de CO<sub>2</sub>/kg cemento) por descarbonatación de materia prima y uso de combustible (Escalante, 2002).

Desde el punto de vista mundial, existe el constante crecimiento de la población, que a su vez demanda infraestructura de vivienda y social. Para satisfacer la creciente demanda de cemento, es necesario encontrar otras alternativas, de otra forma, los costos económicos, energéticos y ambientales serán muy altos.

Es dentro de este contexto que aparece la escoria de alto horno (EAH), la cual es un subproducto no metálico obtenido de la fabricación de hierro. Su composición química es similar a la del cemento Pórtland, lo cual la hace un material de desecho altamente interesante para su uso como reemplazo parcial o total del cemento Pórtland.

La utilización de la EAH como reemplazo total del CPO implica su activación química con un agente alcalino tal como NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> o mezcla de ellos. La EAH al igual que el CPO, tiene propiedades hidráulicas, es decir, al entrar en contacto con el agua ocurren reacciones de hidratación que forman nuevas fases con propiedades cementosas. Sin embargo, la velocidad de reacción de la escoria con el agua es muy lenta, debido a la formación de una capa ácida rica en sílice que impide la penetración del agua hacia el interior de la estructura (Moranville, 1998). Durante la activación química de la escoria, la adición de los iones OH<sup>-</sup> incrementa la velocidad de reacción facilitando el rompimiento de la estructura vítrea de la escoria y precipitando los productos cementosos (Wang y Scrivener, 1995).

La introducción de la EAH como un nuevo material de construcción no es trivial, especialmente cuando hay vidas humanas que dependen de la solidez de una construcción.

## METODOLOGÍA

### *Materiales*

Se utilizó cemento Pórtland ordinario (CPO) con una gravedad específica de 3.15 (ASTM C 188-89, 1995) y un área superficial de 3,250 cm<sup>2</sup>/g (ASTM C204, 1995). La escoria de alto horno (EAH) utilizada provino de la planta Altos Hornos de México, S.A. (AHMSA), ubicada en Monclova, México. Esta escoria tiene una gravedad específica de 2.86 (ASTM C188-89, 1995) y un área superficial de 2,900 cm<sup>2</sup>/g (ASTM C204, 1995).

La composición química del CPO y la EAH utilizada se determinó por microscopía electrónica de barrido acoplada con espectroscopía por dispersión de energía y se presenta en la Tabla 1 (promedio de 8 mediciones):

Tabla 1 Composición química del CPO y la EAH.

Óxido (% p/p)	CPO	EAH
CaO	61.58	35.69
SiO <sub>2</sub>	22.31	36.40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.90	11.22
SO <sub>3</sub>	4.41	3.91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.87	0.64
MgO	1.60	9.40
K <sub>2</sub> O	1.34	0.87
TiO <sub>2</sub>	-	1.29
MnO	-	0.59

Para la preparación de las mezclas de concreto se utilizó grava de 19 mm, arena de caliza comercializada como No. 5 y agua potable de la zona de Ramos Arizpe, Coahuila, México.

Para la activación química de la escoria se utilizó silicato de sodio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) grado industrial con una relación en peso SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O de 2.0, a lo que se conoce como el módulo del silicato de sodio.

### Caracterización

Se fabricaron probetas cúbicas de control (100 % CPO, de 10 cm por lado) con una resistencia a la compresión de diseño de 25 MPa, a 28 días de curado, siguiendo el proporcionamiento de mezclas de concreto establecido por el *American Concrete Institute* en su norma ACI 211.1 (1993). Así mismo, se fabricaron probetas de concreto de CPO sustituido con EAH a diferentes niveles (30, 50 y 70 %) y probetas de concreto 100 % EAH como cementante, activada con Na<sub>2</sub>O en forma de silicato de sodio de módulo 2.0.

En la Tabla 2 se presenta el arreglo experimental de la investigación:

Tabla 2 Arreglo de trabajo.

Sistema	CPO (%)	EAH (%)	Agua/MC	Na <sub>2</sub> O (% p/p respecto a EAH)
CPO	100	0		
CE-30	70	30	0.61	–
CE-50	50	50		
CE-70	30	70		
E-40	0	100		4.0
E-60	0	100	0.45	6.0
E-80	0	100		8.0

Se fijó como variable controlada que todas las mezclas tuvieran un revenimiento en el cono de Abrams (ASTM C143-90 a, 1995) de  $20 \pm 2$  cm, ya que se obtiene un mejor manejo del concreto muy bien aceptado en obra.

Todos los sistemas se caracterizaron por ensayo mecánico a 1, 3, 7, 14 y 28 días de curado en cámara isotérmica a  $20 \pm 2$  °C. Para cada tiempo de curado se extrajeron aleatoriamente tres probetas de la cámara isotérmica. Los ensayos mecánicos se realizaron en una prensa hidráulica marca D.A.V.I.S.A con una capacidad de 180 toneladas.

Después de ensayadas las probetas, se tomaron muestras representativas. Para analizar las muestras por microscopía electrónica de barrido,

se secaron a vacío (40 °C y 635 mm Hg) por 24 horas para detener la reacción de hidratación del cementante. El horno de vacío utilizado es marca VWR, modelo 1430M.

Luego del secado, las muestras se montaron en resina epóxica de lento fraguado, se sometieron a vacío para evitar burbujas de aire en su interior y se dejaron fraguar por 24 horas. Después, cada espécimen fue desmoldado, desbastado y pulido con pasta de diamante de hasta 0.25 µm. Las muestras se recubrieron con grafito previo a su análisis. El equipo utilizado fue un microscopio electrónico de barrido marca Phillips XL 30 ESEM.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resistencia mecánica a la compresión

En la Tabla 3 se presentan los resultados de resistencia mecánica a la compresión de todos los sistemas. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar para un promedio de tres probetas por cada día de curado.

Tabla 3 Resistencia a la compresión de concretos.

Sistema	Tiempo de curado (Días)				
	1	3	7	14	28
CPO	16.55 (1.46)	18.98 (0.65)	22.85 (2.28)	24.53 (2.53)	24.61 (1.99)
CE-30	11.11 (0.28)	11.95 (0.61)	15.49 (1.08)	15.93 (0.91)	20.50 (2.18)
CE-50	6.81 (0.31)	8.96 (0.57)	12.35 (0.44)	14.67 (1.74)	16.69 (0.69)
CE-70	3.67 (0.21)	6.40 (0.60)	8.65 (0.67)	10.91 (1.29)	14.36 (0.79)
E-40	2.97 (0.14)	3.30 (0.16)	4.92 (0.61)	16.89 (0.65)	27.12 (1.15)
E-60	8.85 (0.39)	10.95 (0.89)	20.73 (1.17)	30.06 (1.67)	32.14 (1.57)
E-80	14.41 (1.19)	16.16 (0.80)	21.49 (1.18)	27.86 (0.87)	34.98 (4.87)

En la Fig. 1 se presentan los valores de resistencia a la compresión de concretos de CPO sustituidos con EAH a diferentes niveles. Para

efectos de comparar, se han insertado los valores de resistencia de concretos 100 % CPO (probetas de control).

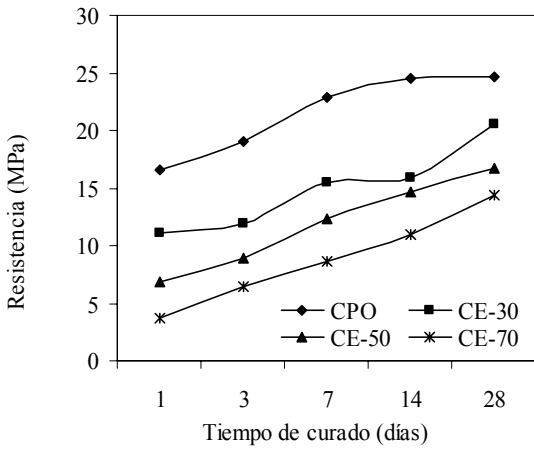


Fig. 1 Resistencia a la compresión de concretos sustituidos con EAH.

Se observa que, la sustitución del CPO con EAH no resultó benéfica para las propiedades mecánicas del concreto. A medida que aumenta el % de sustitución con EAH, disminuyen las propiedades mecánicas del concreto. En la Fig. 2 se presentan los resultados de resistencia mecánica a la compresión de concretos 100 % EAH activada con álcalis. Para efectos de comparar, se han insertado los valores de resistencia de concretos 100 % CPO (probetas de control).

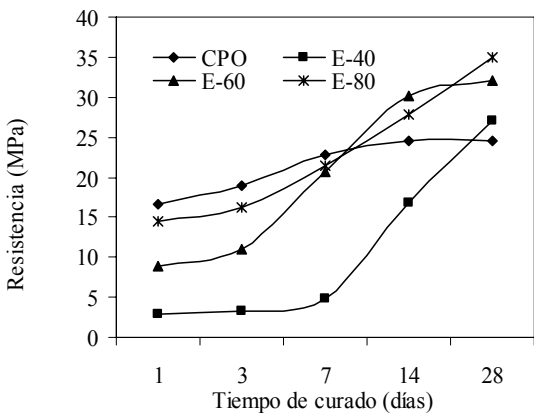


Fig. 2 Resistencia a la compresión de concretos de EAH activada con álcalis.

Se observa que, el desarrollo inicial de resistencia de los concretos 100 % EAH activada es lento en comparación con los concretos 100 % CPO. Sin embargo, a los 28 días de curado, todos los concretos han alcanzado resistencias mayores a las probetas de control. El desarrollo de resistencia es mayor cuando la EAH se activa con 8 % de  $\text{Na}_2\text{O}$  y este desarrollo disminuye al disminuir la concentración del agente activante.

#### Microscopía electrónica de barrido

Las muestras seleccionadas fueron analizadas a 250X. En la Fig. 3 se presentan las microestructuras para concretos con 0 y 50 % de EAH. A 250X, para una sustitución con 50 % EAH, se puede observar la presencia de EAH parcialmente reaccionada, en contraste para concretos 100 % CPO donde no se aprecian muchos granos de CPO sin reaccionar. Esto indica que la EAH no ha reaccionado lo suficiente para incrementar las propiedades mecánicas y que el CPO ha progresado significativamente en sus reacciones logrando las resistencias a la compresión para las cuales se diseñó el concreto.

La falta de participación de la escoria en las reacciones de hidratación podría ser la causante de la reducción en la resistencia mecánica. En la medida en que la escoria se comporte más cercana a un material inerte químicamente, la comparación entre estos dos concretos sería equivalente a pretender comparar dos concretos de puro CPO, pero uno con 329 y otro con 164.5  $\text{kg CPO/m}^3$  concreto. Sin embargo, este no es el caso, pues un concreto con 164.5  $\text{kg CPO/m}^3$  concreto tendría una resistencia del orden de 10 MPa a 28 días (ACI 211.1, 1993) y no de 16.7 MPa a como se registró. Esto indica que la escoria está participando en las reacciones pero de forma muy limitada.

La Fig. 4 presenta las microestructuras para comparar el efecto del % de  $\text{Na}_2\text{O}$  en los concretos de EAH activada. Del lado superior se muestra el concreto activado con 4 % de  $\text{Na}_2\text{O}$  y del lado inferior el activado con 8 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ . A 250X para 4 % de  $\text{Na}_2\text{O}$  se observa una mayor cantidad de granos de EAH sin reaccionar con respecto a 8 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ . Se puede observar que

la matriz de productos de reacción del concreto con 4 % de  $\text{Na}_2\text{O}$  tiene mayor porosidad que la

del concreto con 8 % de  $\text{Na}_2\text{O}$  (mayor cantidad de espacios de color negro).

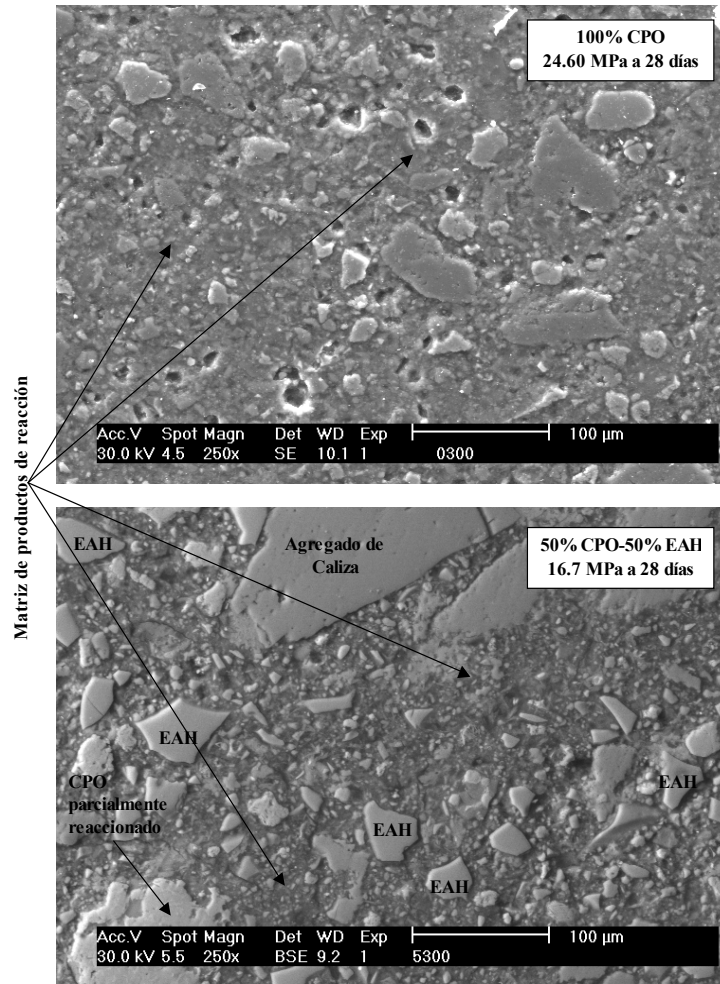


Fig. 3 Microestructura de concreto 100 % CPO (Arriba) y 50 % CPO-50% EAH (Abajo).

La mayor resistencia del concreto activado con 8 % de  $\text{Na}_2\text{O}$  se puede explicar por dos efectos: 1) Al incrementar la concentración de  $\text{Na}_2\text{O}$  se incrementa la intensidad del ataque químico sobre los granos de EAH, lo que resulta en una mayor cantidad de productos de reacción formados y 2) Se incrementa la cantidad de gel de sílice que polimeriza a partir del silicato de sodio. Ambos fenómenos densifican la matriz, disminuyendo la porosidad e incrementando la resistencia a la compresión.

#### Análisis puntual

Se realizaron caracterizaciones por análisis puntual en muestras de concreto con 100 %

CPO, 50 % EAH-50 % CPO y 100 % EAH activada con 8 % de  $\text{Na}_2\text{O}$  en forma de silicato de sodio de módulo 2.0. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido Phillips XL 30 ESEM acoplado con un microanalizador EDAX modelo Falcon. El tiempo de cada análisis fue de 50 segundos.

Los análisis puntuales se realizaron en la matriz de productos de hidratación y se tomaron 30 microanálisis para cada muestra de concreto. Los resultados se muestran en relaciones de composición  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$  vs.  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  como se reportan comúnmente para sistemas de cemento Portland y escoria activada (Fraire, 2001).

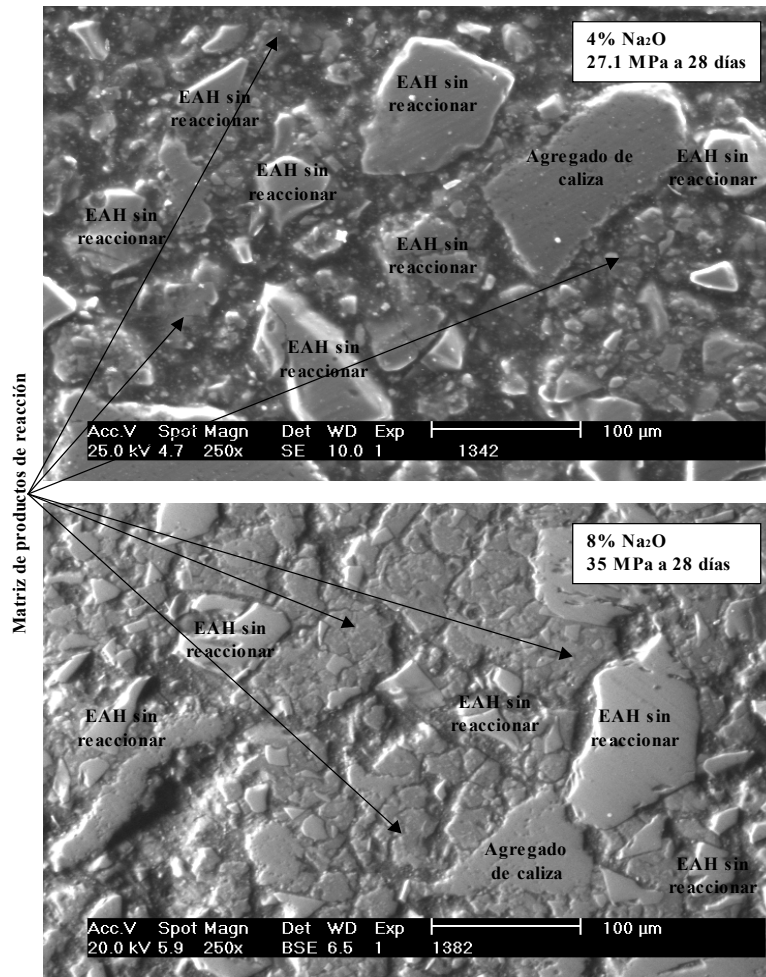


Fig. 4 Microestructura de concreto 100 % EAH activado con 4 % y 8 % de Na<sub>2</sub>O.

En la Fig. 5 se muestran los resultados para el concreto 100 % CPO; en ella se observa que la composición de los productos de reacción es dispersa. Sin embargo, considerando los productos de la reacción de hidratación del CPO es posible entender mejor la gráfica; para esto se incluyen las composiciones teóricas del AFt (Trisulfoaluminato de calcio hidratado), AFm (Monosulfoaluminato de calcio hidratado) y Ca(OH)<sub>2</sub> (Portlandita). Se puede notar que existe un grupo de puntos cuya composición se agrupa en una relación SiO<sub>2</sub>/CaO entre 0.40 y 0.50, los cuales corresponderían al C-S-H (C<sub>2,22</sub>-S-H).

Así mismo, si se trazan arbitrariamente líneas entre el grupo de datos del C-S-H y las composiciones teóricas antes citadas, puede notarse que algunos puntos caen en tales líneas. Por ejemplo, puede decirse que los análisis que

caen a lo largo de la línea C-S-H--Ca(OH)<sub>2</sub> corresponden a una mezcla de ambos compuestos.

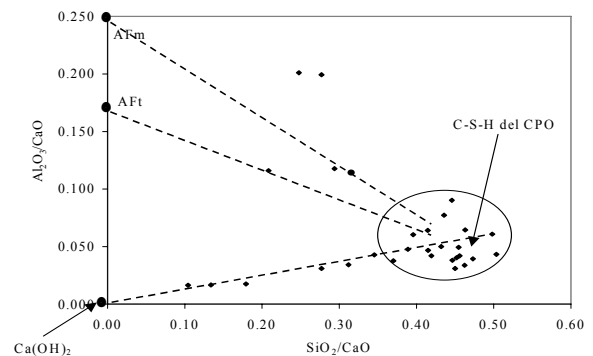


Fig. 5 Análisis puntual del concreto 100 % CPO.

La Fig. 6 presenta los resultados del microanálisis para el concreto 50 % CPO-50 % EAH. Los resultados muestran dispersión como los productos de 100 % CPO. Sin embargo, puede notarse que la composición química es en general diferente. El C-S-H del cemento sustituido tiene una relación  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  entre 0.40 y 0.65, que es mayor que la del CPO puro. Esto indica una menor presencia de CaO en los productos C-S-H del CPO-EAH; la escoria tiene menos CaO que el CPO y para satisfacer esta deficiencia y formar C-S-H reacciona con el  $\text{Ca(OH)}_2$  formado por el CPO y descalcifica al C-S-H formado por la fracción del CPO. Puede notarse que para este concreto no hay puntos entre el C-S-H y la composición teórica del  $\text{Ca(OH)}_2$ , lo cual indica que este ha sido consumido al no aparecer en los productos de reacción.

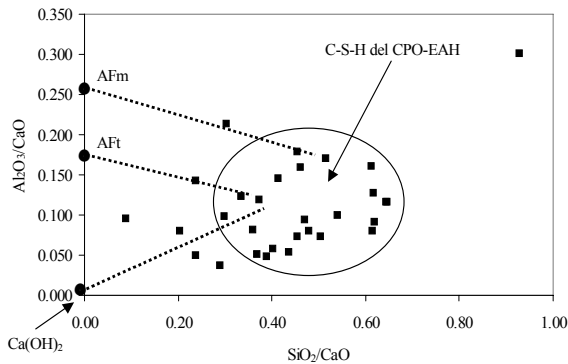


Fig. 6 Análisis puntual para el concreto 50 % CPO-50 % EAH.

En la Fig. 7 se presentan los resultados obtenidos para el concreto 100 % EAH activada con 8 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ . Las diferencias en las composiciones de los productos de reacción entre los diferentes sistemas cementantes son claras. La relación  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  está entre 1.20 y 1.78 con un promedio de 1.49. Escalante *et al.* (2002) reportó un promedio de 1.38 (con valores entre 1.22 y 1.53) para pastas de escoria activada con 5 % de silicato de sodio de módulo 2.0. La relación  $\text{SiO}_2/\text{CaO}$  obtenida para concretos de EAH activada es alrededor de 4 veces mayor que la obtenida para CPO y CPO-EAH. Esto se debe a los altos contenidos de  $\text{SiO}_2$  y bajos contenidos de CaO de la EAH, relativo al CPO. Estos datos indican que la hidratación de la

escoria ha avanzado notablemente. Además, el  $\text{SiO}_2$  agregado al concreto en forma de silicato de sodio aumenta esta relación.

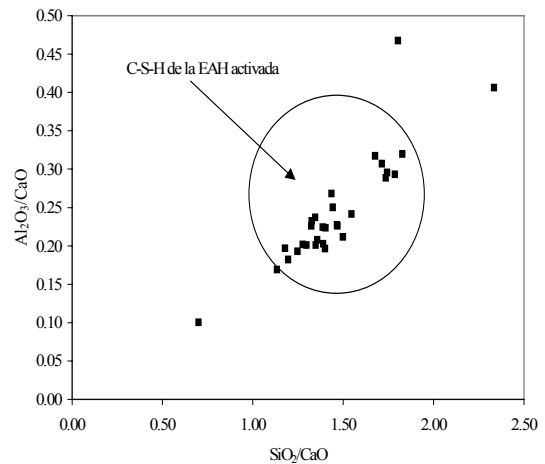


Fig. 7 Análisis puntual par el concreto 100 % EAH activada con álcalis.

## CONCLUSIONES

Ninguno de los concretos de cemento compuesto (CPO-EAH) alcanzó resistencia mecánica a la compresión mayor que la de los concretos de puro CPO. La sustitución parcial del CPO por EAH no fue favorable para las propiedades mecánicas. La resistencia a la compresión disminuyó conforme se aumentó el % de sustitución con EAH. Esto se debió a una limitada participación de la escoria en las reacciones de formación de C-S-H.

Los concretos 100 % EAH activados con álcalis alcanzaron resistencias mayores que los concretos 100 % CPO. Los concretos que alcanzaron las mayores resistencias y a velocidades mayores fueron aquellos activados con 8 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ , seguido de los activados con 6 y 4 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ . A mayor concentración de  $\text{Na}_2\text{O}$ , el ataque químico sobre la escoria es más intenso dando como resultado una mayor cantidad de productos de hidratación que densifica la matriz aumentando la resistencia mecánica. El principal producto de hidratación encontrado es el silicato de sodio hidratado (C-S-H), aunque con diferente composición entre los diferentes sistemas cementantes (CPO, CPO-EAH, EAH activada).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Ingeniería, al Centro de Investigación y Estudios Avanzados, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, al proyecto Coahuila No. 403 y a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por el apoyo y financiamiento para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

ACI 211.1. (1993). *Proporcionamiento de Mezclas de Concreto (concreto normal, pesado y masivo)*, pp. 21-28. México D.F, México.

ASTM C143-90 a. (1995). *Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete*. Annual book of ASTM standards, Volume 04.02, concretes and aggregates. Philadelphia, USA.

ASTM C188-89. (1995). *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement Concrete*. Annual book of ASTM standards, Volume 04.01, cement, lime and gypsum. Philadelphia, USA.

ASTM C204. (1995). *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus*. Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.01, cement, lime and gypsum. Philadelphia, USA.

Escalante, J.I. (2002). *Materiales Alternativos al Cemento Pórtland*. Avance y Perspectiva. Vol. 21, pp. 79-88.

Escalante, J.I., J.M. Nonell, A. Gorokhovskiy, P.E. Fraire, H.M. Molinar y G.M. Suárez (2002). *Reactividad y Propiedades Mecánicas de la Escoria de Alto Horno Activada por Alcalis*. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 41, pp. 451-458.

Fraire, P.E. (2001). *Propiedades Mecánicas y Reactividad de la Escoria de Alto Horno Activada por diferentes Agentes Alcalinos*. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Cerámica. CINVESTAV del IPN. Saltillo, México.

Moranville, M. (1998). *Chemistry of Cement and Concrete*. 4<sup>TH</sup> Edition. pp. 637-673. Editorial Elsevier. Londres, Inglaterra.

Wang, S.D. y K.L. Scrivener (1995). *Hydration Products of Alkali Activated Slag Cement*. Cement and Concrete Research. Vol. 25, No. 03, pp. 561-571.



**Léster Espinoza** se graduó de Ingeniero Químico en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) en el 2006. Realizó su tesis de graduación en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados de México en el área de Ingeniería Cerámica bajo la dirección del Dr. Iván Escalante.



**Iván Escalante** se graduó de Doctor (PhD) en la Universidad de Sheffield, Reino Unido en 1996. Su línea de investigación es el desarrollo de nuevos materiales cementosos sustitutos parciales o totales del cemento Pórtland. Profesor Investigador titular del Centro de Investigación y Estudios Avanzados e Investigador Nivel II del Sistema Nacional de Investigadores de México.