

Resistencia a temperaturas elevadas de escorias activadas alcalinamente

Performance of alkaline activated slag at high temperatures

R. MEJÍA DE GUTIÉRREZ, J. MALDONADO, C. GUTIÉRREZ.

Grupo de Materiales Compuestos, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Cali

Persona de contacto/Corresponding author: rudeguti@hotmail.com

Fecha de recepción: 10-IX-03

Fecha de aceptación: 10-X-03

COLOMBIA

RESUMEN

En el presente trabajo se estudió el comportamiento frente a la temperatura de morteros producidos a partir de escorias siderúrgicas activadas alcalinamente (EAA), utilizando diferentes activantes tales como silicato sódico, hidróxido de sodio y sus correspondientes mezclas. Cada espécimen se expuso por dos horas a temperaturas hasta de 1.000 °C, en intervalos de 200 °C, y en cada caso se determinaron los cambios de color, peso, resistencia mecánica y durabilidad. Esta última propiedad se evaluó determinando las modificaciones de porosidad y permeabilidad a cloruros. Los resultados se comparan con los obtenidos en morteros de cemento Portland con y sin adición, específicamente con aquéllos que incorporan humo de sílice.

SUMMARY

This paper presents an investigation into the performance of alkali-activated slag (AAS) mortar exposed to elevated temperatures. Sodium silicate, sodium hydroxide and a mix (waterglass) with a modulus (SiO_2/Na_2O) of 1.5 were used as activators. The specimens were heated in an electric furnace up to 1000 °C in steps of 200 °C for a constant period of 2 hours. The weight loss, residual compressive strength, resistance to chloride ion penetration, porosity and capillary sorption were evaluated and the results were compared with those of ordinary and blended Portland cement mortar.

PALABRAS CLAVE: escorias activadas alcalinamente, materiales refractarios, cementos alternativos.

KEYWORDS: alkaline activated slag, refractory materials, fire resistance, alternative cements.

1. INTRODUCCIÓN

Algunos de los campos de utilización del hormigón a escala industrial, aparte del riesgo normal de un incendio, exigen un comportamiento específico a las altas temperaturas. Aunque el hormigón es considerado un material incombustible, en general el calor excesivo puede causar fenómenos patológicos que inducen a pérdidas de sus propiedades mecánicas y cambios en sus características microestructurales. Los cambios físicos están ligados a dilataciones y contracciones de la masa del hormigón,

mientras los químicos se atribuyen a la deshidratación de los componentes de la pasta o fase aglomerante y a los cambios microestructurales de los áridos en el hormigón. De otra parte, la aparición de grietas y la delaminación del hormigón que recubre el acero de refuerzo, deja expuesto al acero a las altas temperaturas y, por tanto, su deterioro y posible colapso es más inminente.

En general, los factores que influyen en el comportamiento final de la estructura una vez se ha sometido a la acción del fuego son: el proceso térmico (tiempo, temperatura,

velocidad de calentamiento): la naturaleza y porosidad de los áridos; el estado de humedad inicial del hormigón; el nivel de esfuerzos a que está sometido el hormigón; y otros propios del elemento (espesor, tipo de refuerzo, dimensiones) (1). El modificar los componentes convencionales de elaboración del hormigón así como utilizar diferentes áridos, adiciones o fibras, con el fin de mejorar propiedades como ductilidad, tenacidad y resistencias mecánicas, es considerado una alternativa para incrementar su desempeño frente a la acción del fuego (2-4).

Ante la importancia de la estabilidad de las estructuras al fuego se hace necesario alcanzar un conocimiento del comportamiento de los materiales previo a su utilización en elementos estructurales (5). Un material nuevo de construcción son los hormigones producidos a base de escorias activadas alcalinamente, los cuales, aunque no han sido ampliamente investigados en este aspecto, son considerados por algunos autores como un grupo de materiales con características refractarias (6-8). El objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento al fuego de morteros de escoria activada alcalinamente (EAA), producidos a partir de materias primas nacionales, a temperaturas en el rango de 25 °C a 1.000 °C y evaluar su desempeño en propiedades mecánicas y de durabilidad.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el presente estudio se utilizaron los siguientes materiales (Tabla 1):

- . Cemento Portland tipo V (OPC)
- . Adiciones: carbonato de calcio (CC), humo de sílice (HS), y escoria siderúrgica de alto horno (ESC).
- . Árido silíceo y calizo
- . Soluciones activantes: NaOH, Na₂SiO₃ y mezcla NaOH+Na₂SiO₃.

Las mezclas evaluadas corresponden a las presentadas en la Tabla 2. Las mezclas, M1 a M4, se prepararon con relación cementante:árido 1:2; en M1 el cementante corresponde a OPC y en las siguientes es ESC. Se utilizó como activadores alcalinos: mezcla de Na₂SiO₃+NaOH (relación SiO₂/Na₂O de 1.5), NaOH, y NaOH con adición de retardante de fraguado; el activante se incorporó en concentración del 5% de Na₂O en peso con respecto al peso de la escoria presente en la mezcla. Las mezclas M1-1 a M1-4 se prepararon en relación 1:2.75 cemento:arena donde las adiciones fueron incorporadas como reemplazo en peso del cemento (9). El árido utilizado en

TABLA 1
Características de los materiales utilizados

Componente, %	OPC	ESC	HS	Arena Silícea	
				Granulometría	
				Tamiz, N° (mm)	% Pasa
SiO ₂	20.9	32.0	96.85	4 (4.76)	98.88
Al ₂ O ₃	6.1	16.6	1.88	8 (2.38)	94.73
Fe ₂ O ₃	3.8	2.3	0.50	16 (1.19)	67.81
CaO	63.3	42.0	0.00	30 (0.595)	36.61
MgO	1.7	0.7	0.00	50 (0.297)	10.23
SO ₃	1.9	5.7	-	100 (0.149)	2.13
P.F.	0.7	3.5	0.43	Densidad 2.66 g/mL	
ESC: Grado 100 (ASTM 989)				Absorción 1.87%	

TABLA 2
Códigos de mezclas

Código	Composición
M1	OPC
M2	ESC activada con Na ₂ SiO ₃ + NaOH
M3	ESC activada con NaOH
M4	ESC activada con NaOH + aditivo retardante de fraguado
M1-1	OPC-1
M1-2	OPC-1+HS 10%
M1-3	OPC-1+CC 34%
M1-4	OPC-1- árido calizo

las mezclas fue de tipo silíceo, excepto en la M1-4 donde fue de tipo calizo. Las diferentes mezclas fueron curadas a 28 días y posteriormente expuestas durante dos horas a temperaturas en el rango de 25 °C a 1.000 °C. En cada caso se evaluó el aspecto final del espécimen, el cambio de coloración y las modificaciones en el peso y resistencia mecánica, así como el efecto en las propiedades de absorción, porosidad capilar, y permeabilidad de cloruros.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Pérdidas de peso y color

Los cambios microestructurales como consecuencia de cambios de fase, pérdidas y transformaciones de componentes durante el proceso de exposición a la temperatura se manifiestan en pérdidas de peso y modificaciones del color, los cuales, finalmente están asociados con las propiedades mecánicas y de durabilidad. En las muestras (EAA) evaluadas, la pérdida de humedad inicial (100 °C) fluctuó entre 8,27 y 9,30 %. Las pérdidas de peso referidas a especímenes sometidos a 100 °C se presentan en la Figura 1. En esta se aprecia, en términos generales, la aparición de tres zonas claramente diferenciadas; 100 a 300 °C asociada a la pérdida del agua capilar; de 300 a 700 °C donde la pérdida de peso es relativamente baja; y la zona de temperaturas superiores a 700 °C donde la pérdida es más drástica.

En estas dos últimas zonas, el efecto de la temperatura está relacionado directamente con el tipo de materiales en la mezcla. Así, la mezcla M1-4 con agregado calizo, debido al alto porcentaje de material calizo presente (73,3%) y, en consecuencia, a la descomposición de este material y su transformación en CO₂, logra a 1.000 °C

una pérdida de peso del 26%. Por el contrario, la mezcla M1-3, aunque el cemento utilizado contiene una adición de caliza del 34% respecto al peso de cemento, esta adición apenas representa un 9% de la mezcla total, y, por tanto, su pérdida de peso por efecto del incremento de la temperatura es del mismo orden de las mezclas M1-1 y M1-2.

A esta misma temperatura las mezclas con cemento (OPC), pierden, como máximo, un 13% de su peso original. Por el contrario, las mezclas con escoria activada alcalinamente (M2, M3, M4) presentan apenas un 6% de pérdida de peso; ésta puede atribuirse a la descomposición del gel de silicato cálcico hidratado, el cual también es considerado el producto principal de la hidratación en estos materiales (6). Estudios en pastas de cemento Portland, desarrollados por DRX, han comprobado (10) que el CSH inicia su proceso de descomposición a temperatura superior a los 600 °C, sin embargo, existen autores (11) que indican que ésta puede iniciarse desde 180 °C, aunque sus efectos mayoritarios se produzcan a temperaturas superiores a los 300 °C.

En la Figura 2 se pueden observar las modificaciones de color asociadas a la temperatura; cabe anotar que para el caso de los especímenes de EAA, a diferencia del cemento de referencia (M1), las alteraciones de color se presentan después de los 700 °C; esto corrobora una mayor estabilidad de estos materiales con la temperatura. Cabe anotar que los especímenes de mortero de EAA muestran una mayor integridad, aun a temperaturas de 1000 °C. En general, estos cambios de color en hormigones de cementos Portland son considerados importantes para dictaminar temperaturas de exposición y posible pérdida de propiedades en estudios de diagnóstico de estructuras afectadas por fuego (11).

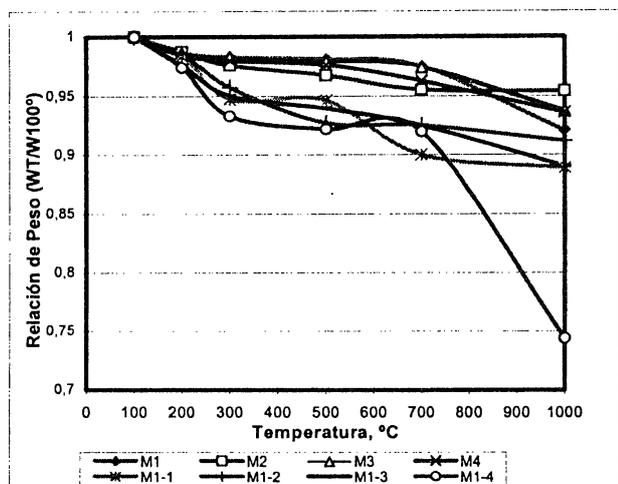


Figura 1.- Reducción de peso por efecto de temperatura.

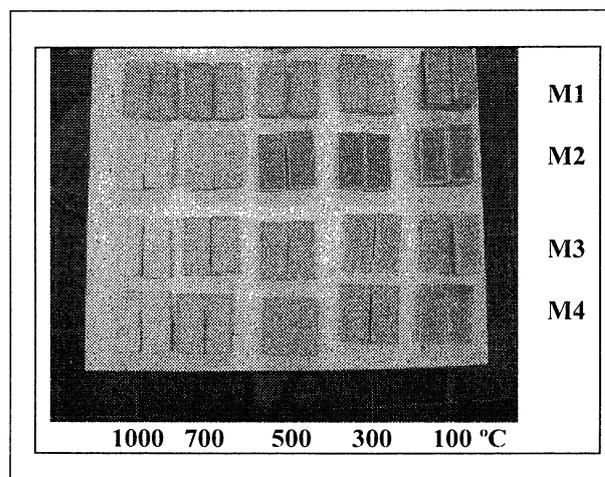


Figura 2.- Cambios de color con la temperatura.

3.2. Ensayos físicos y de resistencia

En la Figura 3 se presentan, en forma comparativa, los resultados obtenidos en las muestras de EAA con los diferentes activantes utilizados, Mezcla de silicato de sodio e hidróxido (M2), NaOH (M3) y NaOH con retardante de fraguado (M4); en ésta se aprecia que, en general, la caída resistente a 300 °C es del 5,75, 12,88, y 7,8% respectivamente. Entre los 300 y 500 °C aunque este valor se incrementa no supera, en ninguna de las mezclas EAA estudiadas, el valor del 25%. La mezcla M4 a esta temperatura retiene el 87% de su resistencia inicial. Difiere este comportamiento de lo observado para las mezclas preparadas con cemento Portland, M1, M1-1, M1-2, la última de las cuales contiene microsilice, las que a 500 °C presentan entre el 30 a 50% de pérdida resistente. El mayor efecto ocurre en la región de 500 a 700 °C; aquí la mayoría de las mezclas presentan una resistencia residual entre el 22 y el 50%.

En el presente estudio se destaca el mejor comportamiento de las mezclas M4 y M1-2. Valores similares han sido obtenidos por otros investigadores (12) en hormigones de altas resistencias producidos con cementos Portland adicionados con puzolanas, en cuyo caso asocian el mejor desempeño a la reducción en portlandita en las mezclas como consecuencia de la acción de la puzolana. En

morteros de cemento Portland adicionados con grafito, se han observado pérdidas resistentes del 29% a 300 °C y del 65% a 600 °C, valores estos que superan los encontradas en el presente estudio con mezclas de EAA.

El porcentaje de absorción y de poros permeables fue realizado en base a la Norma ASTM C642, los datos obtenidos se dan en las Figuras 4 y 5. Se observa que la absorción y la porosidad se incrementan con la temperatura de exposición, aunque las muestras de escoria activada se comportan de manera similar al OPC, cabe anotar que las mezclas EAA con menor afectación en el porcentaje de absorción corresponden a las de mayor resistencia mecánica inicial, M2 y M4. Los resultados de porosidad total concuerdan con los rangos reportados para hormigones de cementos Portland (5,12).

De la misma manera se comprobó que la porosidad capilar, medida por la técnica de succión capilar, aumenta con la temperatura, esto puede asociarse con la disociación de los componentes y la pérdida del agua químicamente enlazada (11). Así, en la mezcla M2 el coeficiente de absorción capilar en probetas expuestas a 1000 °C se aumentó en cuatro veces comparado al valor a temperatura ambiente, y la resistencia a la penetración de agua fue reducida en un 60%. Cabe anotar que en la mezcla M1, basada en OPC, el efecto es aún más severo.

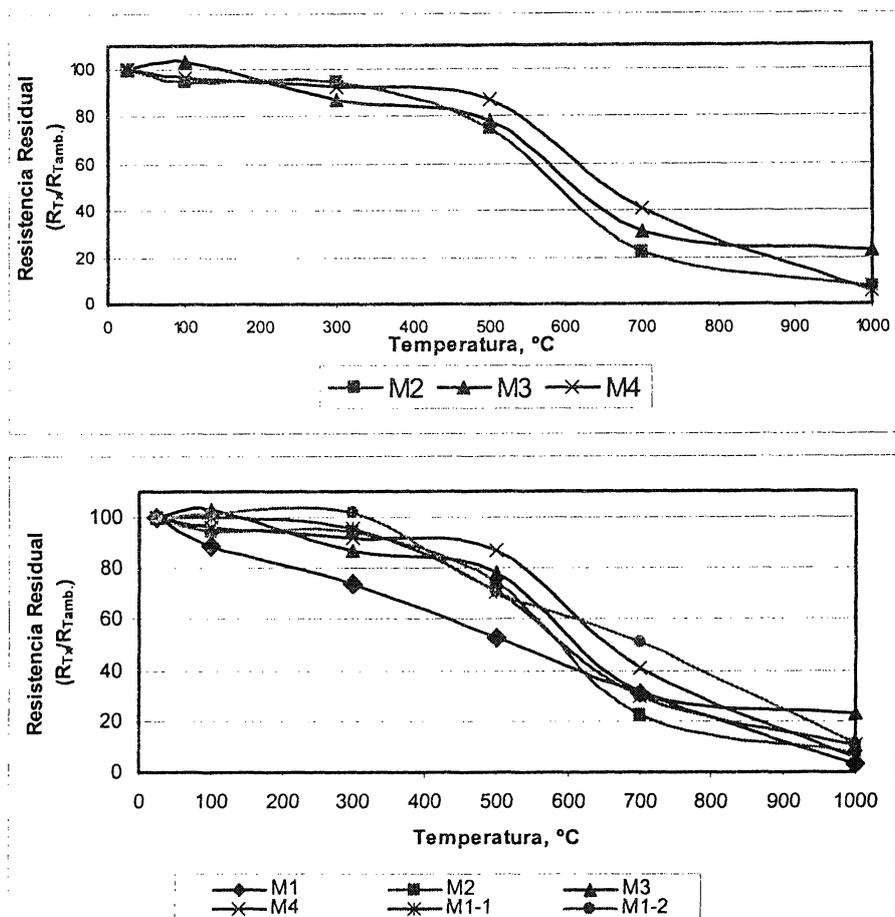


Figura 3.- Resistencia a la compresión.

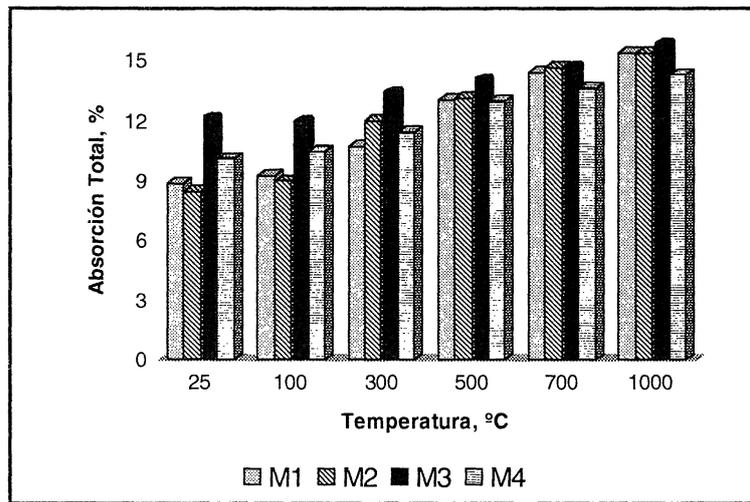


Figura 4.- Absorción (%) en función de la temperatura.

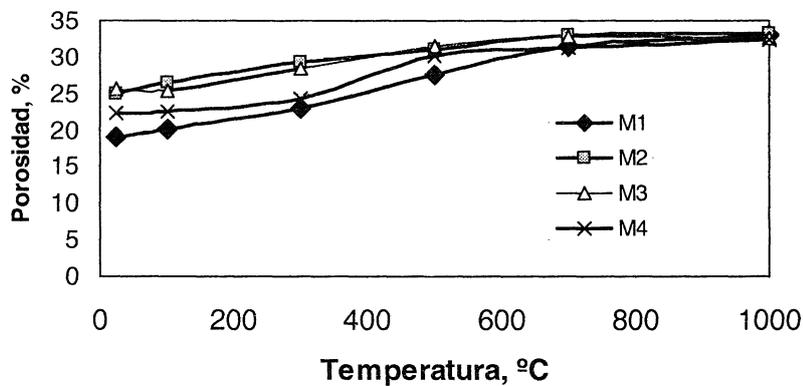


Figura 5.- Evaluación de la porosidad total.

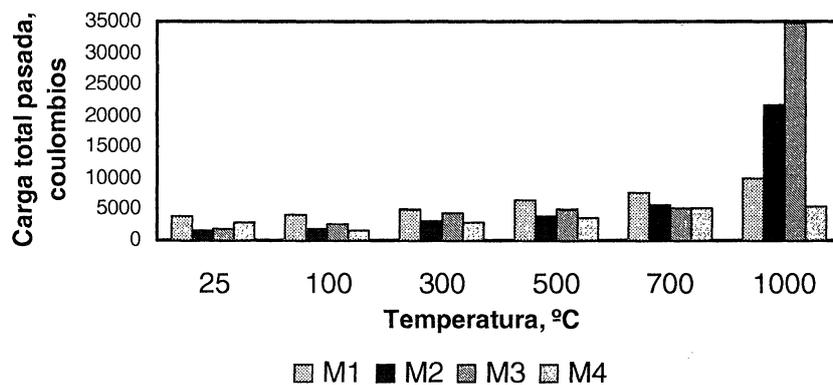


Figura 6.- Penetración de cloruros.

3.3. Penetración de cloruros

Este ensayo se efectuó de acuerdo a la norma ASTM C1202, monitoreando la corriente que circula a través de un espécimen de 50 mm de espesor al aplicar 60 voltios durante 6 horas. La carga se considera relacionada con la resistencia a la penetración de cloruros. En la Figura 6 se

aprecia un incremento de carga con la temperatura de tratamiento.

Esta pérdida de impermeabilidad o resistencia a cloruros puede asociarse con el agrietamiento de las muestras internamente y la mayor porosidad a altas temperaturas (13).

Hasta 700 °C el comportamiento de las muestras de EAA es superior al del cemento (M1) tomado como referencia, aunque cabe anotar que éste corresponde a un material de alta resistencia mecánica inicial (63.8 MPa a 28 días de curado). De todas las mezclas evaluadas la M4 (Activante: NaOH con retardante de fraguado) presenta un mejor desempeño aun a temperatura de 1.000 °C.

Poon *et al.* (5,12) aplicaron esta misma técnica a hormigones de cemento Portland adicionados con metacaolín, cenizas volantes, escorias y humo de sílice y reportan a temperaturas de 600 y 800 °C valores de carga muy superiores a los aquí presentados. Esto es un indicativo del buen comportamiento de las mezclas EAA.

4. CONCLUSIONES

A diferencia de los cementos tradicionales, los cementos alternativos producidos con base en EAA pueden retener

porcentajes elevados de su resistencia mecánica original a temperaturas de 500 °C, lo cual permite incluirlos en la categoría de los materiales refractarios.

Esto indica que materiales producidos a partir de escorias activadas alcalinamente pueden considerarse materiales de alto comportamiento.

Se comprobó que la acción del fuego afecta las propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros y hormigones, en particular causa incrementos notables en su capacidad de absorción y porosidad capilar, dejando expuesta la estructura a los efectos de agentes agresivos.

Por ello, es recomendable en el estudio de estructuras afectadas por el fuego, además de valorar las propiedades mecánicas residuales, realizar un análisis de las propiedades de comportamiento frente al ambiente de exposición, previo a dictaminar su rehabilitación.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) A. F. Delfin, G. E. Gómez. y S.O. Torres: *Efectos del Fuego en Estructuras de Hormigón*, Revista del IDIEM, 22, 2 (1983): pp.71-100.
- (2) L.T. Phan and N.J. Carino: *Fire Performance of High Strength Concrete: Research Needs*, Proc. Advanced Technology in Structural Engineering. ASCE/SEI Structures Congress, Philadelphia (2000).
- (3) F. A. Ali, D. O'Connor and A. Abu-Tair: *Explosive Spalling of High-strength Concrete Columns in Fire*. Mag. Con. Res., 53, 3 (2001): pp. 197-204.
- (4) M. S. Cullík, T. Ozturan: *Effect of Elevated Temperatures on the residual mechanical properties of high performance mortar*. Cem. Con. Res., 32 (2002): pp. 809-816.
- (5) C. S. Poon *et al.*: *Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures*. Cem. Con. Com., 25 (2003): pp. 83-89.
- (6) S. Wang *et al.*: *Alkali Activated slag Cement and Concrete*. Adv. Cem. Res., 7, 27 (1995): pp. 93-102.
- (7) F. Puertas: *Cementos de Escorias Activadas Alcalinamente, Situación actual y perspectivas de futuro*. Mater Construcc, Vol. 45, nº 239 (1995): pp. 53-64.
- (8) F. Puertas, R. M. de Gutiérrez, A. Fernández-Jiménez, S. Delvasto, J. Maldonado. *Morteros de cementos alcalinos. Resistencia química al ataque por sulfatos*. Mater Construcc, Vol. 52, nº 267, pp. 55-71 (2002)
- (9) R. M. de Gutiérrez, N. Duque, C. Delgado: *Propiedades Mecánicas de Materiales Cementicios expuestos a temperaturas elevadas*. Proc. COI.LOQUIA 2002, Maracaibo, Venezuela.
- (10) G. F. Peng, S.Y.N. Chan, M. Anson: *Chemical Kinetics of CSH Decomposition in hardened Cement Paste subjected to elevated Temperatures up to 800 °C*. Adv. Cem. Res., 13, 2 (2001): pp. 47-52.
- (11) T. Nijland, J. Larbi: *Unraveling the temperature distribution in fire-damaged concrete by means of PFM microscopy: Outline of the approach and review of potentially useful reactions*. HERON, 46, 4 (2001): pp. 253-264.
- (12) C. S. Poon, *et al.*: *Comparison of the strength and durability performance of normal and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures*. Cem. Con. Res., 31 (2001): pp. 1291-1300.
- (13) S. Y. N. Chang, G. F. Peng, M. Anson: *Residual Strength and pore structure of high strength concrete and normal-strength concrete after exposure to high temperatures*. Cem. Con. Com., 21(1999): pp. 23-27.

* * *