MORTEROS GEOPOLIMERICOS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO BASADOS EN UN SISTEMA BINARIO DE UN SUBPRODUCTO INDUSTRIAL

Susan Bernal, Johanna Esguerra, Javier Galindo, Ruby Mejía de Gutiérrez, Erich Rodríguez, Marisol Gordillo y Silvio Delvasto

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (2): 587-592

MORTEROS GEOPOLIMERICOS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO BASADOS EN UN SISTEMA BINARIO DE UN SUBPRODUCTO INDUSTRIAL

Susan Bernal, Johanna Esguerra, Javier Galindo, Ruby Mejía de Gutiérrez, Erich Rodríguez, Marisol Gordillo y Silvio Delvasto

Grupo Materiales Compuestos, CENM, Universidad del Valle, A.A. 2188, Cali, Colombia.

**E-mail: susana.bernal@gmail.com; rudeguti@yahoo.com*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008

Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

El objetivo de este artículo es presentar los resultados de una investigación sobre las propiedades mecánicas de morteros geopoliméricos basados en una escoria siderúrgica colombiana (GBFS) y en un metacaolín (MK) de alta pureza, reforzados con fibras de carbono (FC). El anterior reforzamiento fue incorporado al sistema en volúmenes del 0.10, 0.15 y 0.21%. En estos morteros se evaluaron propiedades tales como: resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y sensitividad a la entalla. Los resultados obtenidos muestran que sí es posible la producción de morteros con altas resistencias mecánicas (70 MPa) a partir de la geopolimerización de GBFS-MK. La incorporación de FC produce una ligera (>20%) reducción en la resistencia a la compresión. El módulo de ruptura con la adición de 0.15% de fibra de carbono aumenta hasta en un 61% en especímenes sin entalla y en un 86% en muestras con entalla, lo cual es coherente con el incremento en la tenacidad de fractura (K_{IC}) del material.

Palabras Claves: *Cementos Alternativos, Geopolímeros, Sistemas Binarios, Fibras de Carbono..*

Abstract

The purpose of this paper is to present the results of a research about the mechanical properties of geopolymeric mortars reinforced with carbon fibers. Solely a binary system composed by granulated blast furnace slag (GBFS) and metakaoline (MK) was used as binder. The reinforcement in volumes of 0.10, 0.15 y 0.21% was incorporated in the mortar matrix. Compressive strength, flexural strength and notch sensitivity were evaluated. The results show that it is possible the production of mortars with high compressive strength (70 MPa), after 60 days of curing, through the geopolymerization of GBFS+MK. The addition of carbon fibers generates a slight decrease (>20%) in the compressive strength. The modulus of rupture is increase up to 61% and 86% in samples without and with notch, respectively, when a volume of 0.15% of carbon fibers is incorporated in the mortars. This behavior is according to an augment in the fracture toughness (K_{IC}) of the material.

Keywords: *Alternative Cements, Geopolymers, Binary Systems, Carbon Fibres, Mechanical Properties.*

1. INTRODUCCION

El cemento portland (CP) es el material ligante más utilizado en la construcción moderna, sin embargo, su proceso de manufactura es considerado contaminante, debido a su alto consumo energético, su elevado consumo de recursos minerales y a la emisión de cerca del 5% de CO_2 a nivel mundial [1].

Lo anterior ha sido incentivo suficiente para el desarrollo de cementos alternativos tales como los *cementos adicionados*, con los cuales se ha logrado la sustitución parcial del CP a través de la incorporación de adiciones químicamente activas tales como puzolanas y escorias siderúrgicas [1-3] y los *cementos de activación alcalina (CAA)*, los cuales son cementos no-Portland y se basan únicamente en minerales naturales, desechos o subproductos industriales y un activador alcalino [4-7].

Los CAA se caracterizan por desarrollar muy altas resistencias mecánicas a edades tempranas, una baja porosidad, alta resistencia química, estabilidad

frente al fuego, entre otras propiedades [8-10]. Sin embargo, se ha identificado que estos materiales son susceptibles a sufrir fenómenos de retracción, especialmente cuando se emplea como activador alcalino una solución de *waterglass* [11-12]. A pesar de que tanto los CAA de escoria siderúrgica (GBFS) como los *geopolímeros* basados en ceniza volante (FA) y metacaolín (MK), son considerados sistemas cementicios de activación alcalina, se ha identificado que tanto la estructura formada como las rutas de los mecanismos químicos de adquisición de resistencias mecánicas son diferentes entre sí [13-14]. La bibliografía consultada indica que hay un mejoramiento de las propiedades mecánicas de los CAA al emplear dos materiales simultáneamente, de tal manera que se combinen materias primas tales como MK, FA y GBFS, contribuyendo ello al control de la reacción y al desarrollo resistente del material [15-17]. Lo anterior ha motivado la investigación alrededor de sistemas binarios de CAA.

La incorporación de fibras como material reforzante en materiales frágiles, tales como morteros y concretos basados en CAA, es un método eficiente para el mejoramiento del desempeño mecánico y la reducción de la propagación de las microgrietas generadas por la retracción del material.

Aunque las fibras de vidrio, las de polipropileno y las fibras de acero han sido usadas extensivamente en matrices cementicias, el uso de fibras de carbono (FC) se ha incrementado en las últimas décadas [18-19]. En cementos convencionales reforzados con fibras de carbono se ha identificado que la respuesta eléctrica de los compuestos, asociadas a la presencia de las FC, les proveen la capacidad de auto-monitoreo con respecto a daños y deformaciones durante su vida útil, lo que hace a estos materiales intrínsecamente inteligentes. En términos generales, los CFRC son materiales que actúan como un alternativa tecnológica para un amplio rango de aplicaciones donde sea requerida la detección y el monitoreo de fisuramiento, vibración o fatiga de estructuras de concretos tales como puentes o represas, de manera eficiente y rápida [18-20].

Pocos reportes en la literatura han sido encontrados referentes a compuestos basados en matrices de CAA reforzados con fibras. Puertas *et at* [21] observó que la incorporación de fibras de polipropileno en morteros EAA en un porcentaje de un 1% en peso de cemento, genera pérdidas de resistencia a la compresión y a la flexión en un 11% y un mejoramiento en la resistencia a la fractura de los materiales en estudio; mientras que la incorporación de fibras de vidrio en porcentajes del 0.22% disminuye la retracción en un 20%, sin afectar negativamente a las propiedades mecánicas de los morteros de EAA [22]. Igualmente reporta [23] que la adición de fibras de carbono con longitudes de 3 mm, en morteros de escoria activada alcalinamente (EAA), no modifica positivamente las propiedades mecánicas de estos materiales.

Por otra parte, Penteado-Días [24] identificó que la incorporación de fibras de basalto incrementa la resistencia a la tracción indirecta y a la flexión en concretos basados en CAA con un mejoramiento sustancial de las propiedades de fractura frente a concretos de CP y señala que la incorporación de micro-fibras de *wollastonita* en CAA mejora la tenacidad del material hasta en un 34% respecto de la matriz sin fibra y en un 100% respecto de CP equivalente [25]. Finalmente, Bernal et al [26] reporta que concretos de EAA reforzados con fibras de acero exhiben mejores propiedades mecánicas que concretos de CP con la misma proporción de fibras incorporada, donde cabe resaltar que los concretos de AAS a 28 días de curado presentaron incrementos en el módulo de rotura de hasta un 52% al incorporar 120 kg de fibras de acero por metro cubico de concreto, respecto de la matriz sin reforzamiento, lo que revela la potencialidad de estos materiales para aplicaciones estructurales con requerimientos de alta tenacidad.

El objetivo del presente estudio fue evaluar las propiedades mecánicas de morteros reforzados con FC, los cuales fueron elaborados empleando como único material cementante un CAA basado en la mezcla binaria de una escoria colombiana y un metacaolín de elevada pureza, activada con una solución comercial de silicato de sodio.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y preparación de muestras

Para la preparación de los morteros se empleó como único material cementante un sistema geopolimérico basado en un 80% de GBFS y en un 20% de MK de alta pureza, ambos de origen colombiano. A partir de la composición química de la GBFS (Tabla 1) se determinó un coeficiente de basicidad (K_b=CaO+MgO/SiO_2+Al_2O_3) de 1.00 y un coeficiente de calidad (CaO+MgO+Al_2O_3/SiO_2+TiO_2) de 1.73.

La geopolimerización se llevó a cabo empleando como activador alcalino una solución de *waterglass* ($Na_2SiO_3.nH_2O$ + NaOH).

Tabla 1. Composición química y propiedades físicas de las materias primas empleadas para la producción del nuevo cementante

Componente	*GBFS*	*MK*
SiO_2	32.29	50.72
Al_2O_3	16.25	44.63
Fe_2O_3	2.35	-
CaO	42.45	2.69
MgO	2.87	-
Perdida fuego (%)	1.91	1.02
Superficie específica (m^2/kg)	498	391
Gravedad específica (kg/m^3)	3000	2500
Color	Gris	Beige

Los morteros fueron elaborados de acuerdo al procedimiento estándar ASTM C305 usando arena de río (modulo de finura 2.10) y una relación agua/cementante anhidro de 0.47. Estos fueron curados en cámara húmeda a temperatura ambiente durante 24 h. Posteriormente, las muestras fueron desmoldeadas y curadas bajo condiciones de humedad relativa (HR) > 90% a una temperatura de 27±2 °C, durante 28 días.

Como material reforzante se emplearon fibras de carbono (FC) (SikaWrap 103C), cuya presentación es un tejido unidireccional. Las fibras fueron extraídas del tejido y llevadas a una longitud de 3 mm e incorporadas en el sistema en volúmenes de 0.10, 0.15 y 0.21%. Las especificaciones de las FC se presentan en la Tabla 2 [27].

Tabla 2. Datos técnicos de las fibras de carbono.

Propiedad	
Resistencia a la tracción (MPa)	3790
Módulo elástico (GPa)	234,4
Densidad (g/cm^3)	1,8
Alargamiento de rotura (%)	1,5
Diámetro (μm)	12
Longitud (mm)	5

Teniendo en consideración que las fibras estaban revestidas por una resina polimérica, éstas fueron tratadas térmicamente a 450 ºC durante 2 horas, con la finalidad de remover dicha resina y mejorar su superficie de adherencia con la matriz cementante.

2.2 Ensayos realizados

Se determinó la resistencia a la compresión de los morteros en estudio en especímenes cúbicos con 50.8 mm de arista, de acuerdo a la normativa estándar ASTM C109. La resistencia a la flexión de probetas con y sin entalla fue evaluada de acuerdo a la normativa estándar ASTM C 293, haciendo los ajustes necesarios, en muestras prismáticas con dimensiones de 4 cm x 4 cm x 16 cm.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resistencia a la compresión

En la Figura 1 se presenta el comportamiento resistente de los morteros geopoliméricos reforzados con fibras de carbono a 28 y 60 días de curado. Se aprecia que la incorporación de FC no afecta el desarrollo resistente de los morteros en estudio, alcanzándose resistencias superiores a 40 MPa a 28 días de curado, para todos los volúmenes de fibra incorporados. Los valores de resistencia a la compresión reportados permiten catalogar estos morteros como de alto desempeño mecánico. Al comparar el comportamiento en compresión de los especímenes fibrorreforzados con la matriz de mortero sin reforzamiento, tanto a 28 días como a 60 días de curado, se observa que la incorporación de fibra de carbono en volúmenes del 0.1%, 0.15% y 0.21%, genera una reducción de la resistencia a la compresión, lo cual debe ser considerado para efectos de diseño del material.

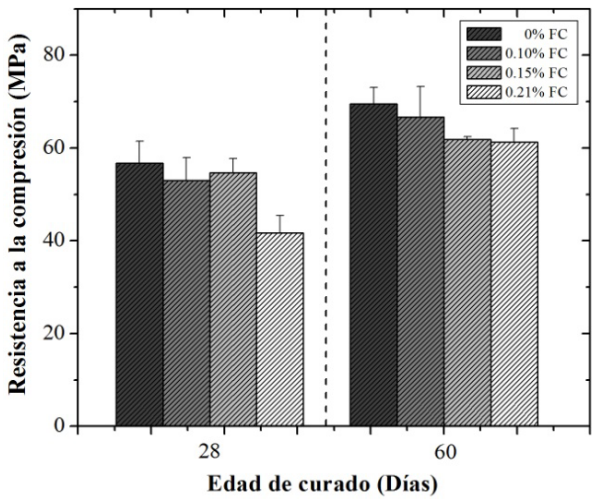


Figura 1. Resistencia a la compresión de morteros geopoliméricos reforzados con fibras de carbono.

En CCA basados únicamente en GBFS, el elevado desarrollo resistente se atribuye principalmente a

que las reacciones de hidratación, características tras la activación alcalina de la escoria, se rigen por fenómenos de disolución y precipitación los cuales presentan una cinética de reacción mayor que las reacciones de difusión en la hidratación del cemento Portland [4,9]. Las altas concentraciones de OH^+ en la solución activante permiten la rotura de la estructura de la escoria (Ca-O; Si-O y el Al-O), estas especies disueltas (Ca^{2+}, $[H_2SiO]^{2-}$ $[H_3SiO_4]^-$ $[HAlO_4]^-$) pueden precipitar una vez alcanzado un valor máximo de concentración y generar la nucleación de aluminatos y silicatos disueltos en el entorno alcalino favoreciendo la formación de un hidrato C-S-H [29]. Así mismo, al emplear como activador alcalino una solución de *waterglass,* las contribuciones de los iones silicato a la resistencia son tanto por la activación alcalina de la escoria como por la formación de la sílica gel, la cual puede reaccionar con el calcio para formar nuevos hidratos C-S-H ricos en sílice [30].

En contraste, en CCA basados únicamente en MK las propiedades resistentes de los geopolímeros son atribuidas a la formación de una red amorfa o semi-cristalina tridimensional de aluminosilicatos alcalinos (ASA) referenciados como polisialatos [31]. La geopolimerización involucra la reacción química de los óxidos alumino-silicatos (Al^{3+} en coordinación IV) con un poli-silicato en presencia de OH^-, generándose enlaces Si-O-Al [32-33]. La sílice y el aluminio tetraédricos son unidos en tres direcciones compartiendo átomos de oxígeno, a través de los cationes suministrados por el activador alcalino (Na^+, K^+, Li^+, Ca^{2+}, Ba^{2+}, NH^{4+}, H_3O^+) y que están presenten en las cavidades de la estructura para balancear las cargas negativas de Al^{3+} en coordinación IV [34].

En sistemas binarios GBFS/MK, se ha identificado que el gel de ASA y el gel de C-S-H se forman simultáneamente, de tal manera se obtiene un cementante homogéneo que consta de ambas fases con una estructura interconectada, lo cual favorece el buen desempeño resistente del sistema [13,17].

3.2 Resistencia a la flexión

A las muestras prismáticas con 28 días de curado, se les aplicó una carga en el punto central de la superficie superior (ensayo a tres puntos), a una velocidad de ensayo de 1 mm/min. Los módulos de rotura (MOR) y la relación del módulo de elasticidad en flexión (RME) de los morteros reforzados con fibra (ME_{CF}), respecto de las muestras referencia sin reforzamiento (ME_{SF}) (ecuación 1), son presentados en la Tabla 3.

$$RME=\frac{ME_{CF}}{ME_{SF}} \quad (1)$$

Para el mortero basado en el sistema binario de GBFS+MK en estudio, se aprecia que los módulos de rotura se incrementan en un 16% y 9%, al incorporar 0.15 y 0.21% de FC, respectivamente. Este tipo de comportamiento es típico en morteros basados en CP reforzados con FC [30].

Tabla 3. Comportamiento a la flexión de morteros geopoliméricos reforzados con fibras de carbono

Volumen de fibra incorporado (%)	*MOR (MPa)*	*RME*
0	8.84	-
0.10	7.17	1.41
0.15	10.22	1.85
0.21	9.65	1.99

Estos resultados son contradictorios a lo observado por Alcaide et al [23] en morteros basados únicamente en EAA, donde se identificó que a superiores porcentajes de FC incorporado en el sistema, la resistencia a la flexión del material se reduce. El mejoramiento de la resistencia a la flexión en el mortero en estudio con la incorporación de FC podría ser asociado tanto a que ésta matriz geopolimérica presenta superiores contenidos de Aluminio (Al) (asociado ello al MK en el sistema) que matrices de EAA, lo que favorece la interacción superficial fibra-matriz por la reacción que tiene lugar entre los iones Al^{3+} disueltos en la fase acuosa y los grupos orgánicos funcionales de la fibra tales como COOH y C=O que son formados en su superficie [34], como al mejoramiento del anclaje entre la fibra y la matriz por la modificación de la textura superficial de la misma. Ambos fenómenos serían consecuencia del tratamiento térmico al que fueron sometidas

Así mismo, la incorporación de mayores volúmenes de FC en los morteros geopoliméricos genera un aumento sustancial en el ME y por ende en la ductilidad del material. Este comportamiento en coherente con el mejoramiento de la ductilidad en tensión y el incremento de la tenacidad del material, típica de compuestos fibrorreforzados con FC [19].

3.3 Sensitividad a la entalla

La relación entre la resistencia a la flexión evaluada en muestras con entalla y la equivalente determinada

en muestras sin entalla es conocida como sensitividad a la entalla (SE). Para la evaluación de esta relación se utilizaron especímenes prismáticos con una entalla triangular igual a la mitad del espesor de las mismas. Todas las muestras con entalla fueron cargadas usando el método de tres puntos, con una distancia entre apoyos igual a 12 cm. Los valores de los módulos de ruptura (MOR_E) para especímenes con entalla se presentan en la Tabla 4.

La sensitividad a la entalla de los morteros en estudio fue evaluada en términos de las propiedades de fractura aplicando conceptos de mecanismos de fractura no-lineal, lo cual es indicado por la tenacidad de fractura (K_{IC}). Para materiales geopoliméricos, Penteado-Dias et al [25] propuso que la eficiencia del reforzamiento (ER) podría ser definida como un factor de endurecimiento (F_A) el cual es calculado a partir de la relación entre el K_{IC} determinado en especímenes con fibra y su equivalente de muestras sin fibra. Los valores de SE y F_A son presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Comportamiento a la flexión de morteros geopoliméricos reforzados con fibras de carbono

Volumen de fibra incorporado (%)	*MOR_E (MPa)*	*SE*	*F_A*
0	5.43	0.85	-
0.10	9.56	1.33	1.76
0.15	9.92	0.97	1.83
0.21	11.04	1.14	2.04

La incorporación de fibras en los morteros geopoliméricos genera un incremento sustancial en la capacidad portante del material, asociado ello al incremento en el MOR_E de especímenes con entalla reforzados con FC, respecto de los especímenes sin reforzamiento, donde se identifica que el valor más alto (11.04 MPa) es alcanzado con la incorporación de un 0.21% de FC.

La eficiencia de la FC en morteros geopoliméricos aumenta con la incorporación de mayores volúmenes de fibra en el sistema, de tal manera que los F_A exhibidos por los materiales en estudio son incluso superiores a lo reportado por Bernal et al [26] en concretos basados únicamente en EAA. Estos resultados son coherentes con una óptima adherencia entre la fibra y la matriz, lo cual puede asociarse a la modificación que tiene lugar en la superficie de FC tratadas térmicamente (exposición a una temperatura >450°C).

Finalmente, el incremento en el K_{IC} en muestras con entalla con el aumento de la fracción volumétrica de fibra es atribuido a fenómenos de puenteo y a la generación de un camino más tortuoso para la propagación de las grietas [26].

4. CONCLUSIONES

La incorporación de FC en el mortero geopolimérico en estudio no afecta el desarrollo resistente del material y genera reducciones en la resistencia a la compresión, inferiores a un 20%, para todos los volúmenes de fibra incorporados.

El efecto más notorio de la incorporación de FC en las propiedades mecánicas de morteros geopoliméricos fue observado en el comportamiento en flexión del material. El módulo de rotura de los morteros reforzados es superior que el de la matriz sin reforzamiento cuando se incorporaron porcentajes de FC iguales o superiores a un 0.15%.

La incorporación de FC en el sistema genera un incremento sustancial en el K_{IC} del material, lo cual puede ser atribuido a un proceso de detención de propagación de grieta.

En términos generales los compuestos basados en cementos de activación alcalina y reforzados con fibras de carbono (CFRC) pueden ser considerados materiales muy novedosos ya que en ellos se conjuga el desarrollo de una matriz con excelentes propiedades mecánicas, cuyos procesos de producción compensan los elevados costos asociados a la incorporación de las FC, y que pueden ser empleados para la producción de elementos de construcción más eficientes para aplicaciones especializadas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Universidad del Valle (Colombia), al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas” (COLCIENCIAS), y al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) por el soporte para el desarrollo de este estudio.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Damtoft JS, Lukasik J, Herfort D, Sorrentino D, Gartner EM. Cem. Concr. Res. 2008; **38**: 115–127.

[2] Gartner E. Cem. Concr. Res. 2004; **34**: 489-498.

[3] Shi C. J. Mater. Civ. Eng. 2004; 230 – 236.

[4] Puertas F. Mater. Constr. 1995; 45 (239): 53-64

[5]Roy D. Cem. Concr. Res. 1999; **29**: 249-254.

[6] Živica V. Const. Build. Mater. 2007; **21** (7):1463-1469

[7] Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, van Deventer JSJ. J Mater Sci. 2007; **42**:2917–2933

[8] Brough AR, Atkinson A. Cem. Concr. Res. 2002; 32: 865-879.

[9]Wang SD, Pu XCH, Scrivener KL, Pratt PL. Adv. Cem. Res. 1995; **24**: 93-102.

[10] Mejía de Gutiérrez R, Bernal S, Rodríguez E. En: Proceedings del 48th Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON) 2006. Rio de Janeiro (Brasil), 2006, p. 1 – 16.

[11] Collings F, Sanjayan JG. Cem. Concr. Comp. 2001; **23**: 345-352.

[12] Collins F, Sanjayan JG. Cem. Concr. Res. 2000; **30**:791-798.

[13] Yip CK, Lukey GC, van Deventer JSJ. Cem. Concr. Res. 2005; **35**:1688 – 1697.

[14] Fernández-Jiménez A, Puertas F, Adv Cem Res 2003; **15** (3): 129-136.

[15] Xu H, van Deventer JSJ. Miner. Eng. 2002; **15**:1131 – 1139.

[16] Puertas F, Fernández-Jiménez A, Cem Concr Comp 2003; **25**: 287–292.

[17] Buchwald A, Hilbig H, Kaps Ch, J Mat Sci 2007; **42**: 3024 – 3032.

[18] Wen S, Chung DDL. Cem. Concre. Res. 2001; **31**: 665-7.

[19] Cheng DDL. Composites: Part B. 2000; **31:** 511-526.

[20] Puertas F, Amat T, Fernández-Jiménez A, Vázquez T. Cem. Concr. Res. 2003; 33: 2031-2036.

[21] Puertas F, Gil-Maroto A, Palacios M, Amat T. Mater. Constr. 2006; **56** (283):79-90.

[22] Alcaide JS, Alcocel EG, Puertas F, Lapuente R, Garcés P. Mater. Constr. 2007; **57**(288):33-48.

[1] [23]Penteado Dias D, Thaumaturgo C. Cem. Concr. Comp. 2005; **27**: 49-54.

[2] [24] Silva FJ, Thaumaturgo C. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. 2003; **26**:167-172.

[3] [25] Bernal S, Mejía de Gutiérrez R, Rodríguez E, Delvasto S. En: Proceedings del 10th Int. Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference (IIBCC) 2006. San Pablo (Brasil), 2006, p. 156 – 167.

[26] SikaWrap 103C, Product data sheet, Sika® products. Disponible en la web:< >

[27] Sugama T, Kukacka LE, Carciello N, Stathopoulos D. Cem. Concr. Res. 1989; **19**: 355-365.

[28] Garcés P, Fraile J, Vilaplana-Ortego E, Cazorla-Amorós D, Alcocel EG, Andión LG. Cem. Concr. Res. 2005; **35**: 324–331

[29] Shi C. En: Proceedings del 10th Intern. Cong Chem, Cem (Goteborg) 1997. Trondlheim (Noruega), 1997, vol.3-3ii099.

[30] Bernal S, Rodríguez E. Durabilidad y propiedades mecánicas de concretos de escoria siderúrgica activada alcalinamente. Cali (Colombia): Universidad del Valle, 2004.

[31] Davidovits J, J Therm Analy. 1991; **37**: 1633-1656.

[32] Van Jaarsveld J.G.S. The physical and chemical characteristics of fly ash based geopolymers, PhD Thesis. Melbourne (Australia): The University of Melbourne, 2000.

[33] Davidovits J. En: Proceedings del Geopolymere '99. Saint-Quentin (Francia), 1999. CD-ROM.

[34] Okuyama K. J. Enviro. Scien. Sust. Soc. 2008; **2**:13-20.