

Comportamiento mecánico de hormigones de escoria activada alcalinamente reforzados con fibras de acero

Mechanical behaviour of steel fibre-reinforced alkali activated slag concrete

S. Bernal^(*), R. Mejía de Gutiérrez^(*), E. Rodríguez^(*), S. Delvasto^(*) y F. Puertas^(**)

Recepción/Received: 10-V-07

Aceptación/Accepted: 25-X-07

Publicado online/Online publishing: 26-II-09

RESUMEN

En este estudio se investigó el comportamiento mecánico de hormigones alternativos reforzados con fibras de acero, basados en una escoria siderúrgica colombiana activada alcalinamente con waterglass ($Na_2SiO_3 \cdot nH_2O + NaOH$). Las mezclas en estudio fueron preparadas con 400 kg de cemento y las fibras fueron incorporadas en proporciones de 40 kg y 120 kg por metro cúbico de hormigón, respectivamente. Se evaluó el comportamiento mecánico de los hormigones frente a esfuerzos de compresión, tracción indirecta y flexión a edades de curado de 7, 14 y 28 días. Los resultados obtenidos indican que la incorporación de fibras de acero en los hormigones alcalinos reduce la resistencia a la compresión a edades tempranas siendo superior la pérdida de resistencia a mayores volúmenes de fibra incorporados, mientras que la resistencia a la flexión y tracción indirecta se incrementan significativamente, mejorando la tenacidad del material. En términos generales, es posible concluir que el comportamiento mecánico exhibido por los hormigones alcalinos en estudio, simples y reforzados con fibras, es superior al presentado por hormigones convencionales basados en cemento Portland ordinario (OPC) preparados con similares proporciones de cemento y fibra.

Palabras clave: hormigones de escoria activada, fibras de acero, resistencia mecánica.

SUMMARY

This study addressed the mechanical behaviour of a steel fibre-reinforced alternative concrete made from water-glass ($Na_2SiO_3 \cdot nH_2O + NaOH$)- activated Colombian blast furnace slag. The mixes studied were prepared with 400 kg of cement and the fibres were added in proportions of 40 and 120 kg per cubic metre of concrete. 7-, 14- and 28-day concrete was tested for compressive, splitting tensile and flexural strength. The results obtained showed that adding steel fibre to alkaline concrete lowered early age compressive strength, and that this decline was more intense with rising volumes of steel. Flexural and splitting tensile strength grew, however, enhancing the toughness of the material. As a general rule, the mechanical strength of the plain and fibre-reinforced alkaline concretes studied was higher than exhibited by conventional ordinary Portland cement concrete prepared with similar proportions of cement and fibre.

Keywords: alkali-activated slag concretes, steel fibre, mechanical strength.

^(*) Universidad del Valle, Cali (Colombia).

^(**) Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), Madrid (España)

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

1. INTRODUCCIÓN

El masivo impacto medio ambiental asociado al proceso de producción del cemento Portland, principal conglomerante hidráulico del siglo XX (1-2), ha sido un incentivo suficiente para transferir los estudios de la microestructura y química de hidratación de cementos convencionales al desarrollo de una nueva clase de cementos con sostenibilidad ambiental (3,4), entre los cuales se destacan los cementos de activación alcalina, materiales que presentan propiedades equivalentes o incluso superiores a los materiales tradicionales basados en cemento Portland. En la producción de estos materiales se utilizan como materias primas minerales naturales, desechos o subproductos industriales y tecnologías asociadas con bajos consumos energéticos. Entre estos cementos se encuentran los basados en escoria siderúrgica granulada de alto horno activada alcalinamente (AAS), que se caracterizan por desarrollar muy altas resistencias mecánicas a edades tempranas, así como presentar una baja porosidad, alta resistencia química, estabilidad frente al fuego, entre otras propiedades (5-7).

En Colombia, a partir de procesos de activación alcalina, ha sido posible la producción de morteros y hormigones, utilizando como único material cementante una escoria siderúrgica nacional de alto horno (GBFS); los cuales, poseen excelentes propiedades mecánicas y de durabilidad (8-12), y un comportamiento coherente con lo encontrado por otros investigadores (7, 13-16). Sin embargo, una de las limitaciones más importantes para el uso de los cementos alcalinos, basados en escorias activadas, que se ha encontrado en la literatura (16-22) es su elevada susceptibilidad a sufrir fenómenos de retracción, particularmente cuando el activador es *waterglass*. Están influenciados principalmente por factores tales como la composición, microestructura y finura de la escoria, el tipo y dosificación del activador alcalino y las condiciones de curado del material.

Un método eficiente para mejorar el comportamiento mecánico de matrices frágiles, tales como los morteros y hormigones basados en escorias activadas y detener la propagación de las microgrietas generadas por la retracción del material, es la incorporación de fibras como componente reforzante. Lo que también puede incrementar las propiedades de tenacidad de fractura por efecto de reforzamiento a lo largo del plano principal de las grietas y la extensión de las mismas (23-24).

Se ha señalado (25) que la incorporación de fibras de polipropileno en morteros de AAS en un porcentaje de un 1% en peso de cemento reduce la retracción en un 25%, presentando 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%

1. INTRODUCTION

The important environmental impact associated with the production of Portland cement, the world's primary hydraulic binder that dates from the 20th century (1-2), has spurred a shift in scientific focus from the microstructure and hydration chemistry of conventional cements to the development of a new kind of environmentally sustainable binders (3,4). Foremost among these alternative materials are alkali-activated cements, materials that perform as well or better than traditional OPCs. The manufacture of these new binders deploys natural raw materials, industrial waste or by-products and energy-efficient technologies. One such cement is based on alkali-activated granulated blast furnace slag (AAS), characterized by its high early age strength, low porosity and high chemical and fire resistance, among other properties (5-7).

The mortar and concrete manufactured in Colombia with national alkali-activated blast furnace slag (GBFS) as the sole cementitious material have been shown to have high mechanical strength and durability (8-12), a behaviour consistent with the findings reported by other researchers (7, 13-16). Nonetheless, according to the literature (16-22), one of the most severe limitations to the use of alkaline-activated slag cement is its high shrinkage rate, particularly when the activator used is waterglass. This property depends primarily on factors such as slag composition, microstructure and fineness, the type and dosage of the alkali activator and the curing conditions.

One efficient method for improving the mechanical performance of brittle matrices such as activated slag mortars and concretes and controlling the propagation of the microcracks generated by shrinkage is to reinforce the material with fibres. This may also enhance its fracture toughness due to the reinforcement along the plane and across the full length of the cracks (23-24).

The inclusion of 1% (by cement weight) of polypropylene fibre in AAS mortars has been shown (25) to reduce shrinkage by 25%, with compressive and flexural strength losses of 11% and enhanced fracture strength. The inclusion of 0,22% fibreglass strands, in turn, lowers AAS mortar shrinkage by 20% with no adverse effect on its mechanical properties (26).

disminuye la retracción en un 20%, sin afectar negativamente a las propiedades mecánicas de los morteros de AAS (26). Por otra parte, Penteado Dias *et al.* (27) observó que la incorporación de fibras de basalto incrementa la resistencia a la tracción indirecta y a la flexión en hormigones alcalinos con un mejoramiento sustancial de las propiedades de fractura frente a hormigones de OPC y Silva *et al.* (28-29) señala que la incorporación de microfibras de *wollastonita* en matrices de activación alcalina mejora la tenacidad del material hasta en un 34% respecto de la matriz sin fibra y en un 100% respecto de OPC equivalentes, lo que revela la potencialidad de estos materiales para aplicaciones estructurales.

En base a estos datos, el propósito de este estudio fue evaluar el efecto, a edades tempranas, de la incorporación de fibras de acero sobre las propiedades mecánicas de hormigones de una escoria siderúrgica colombiana activada, de tal manera que se contribuya a incrementar el conocimiento científico del comportamiento de sistemas basados en cementos alcalinos reforzados con fibras inorgánicas (25-30), con el objetivo de investigar sus potenciales aplicaciones como material de construcción.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Fueron evaluados dos tipos diferentes de cemento para la producción de las matrices de hormigón:

- Una escoria siderúrgica de alto horno (GBFS) colombiana activada alcalinamente, con una composición química de 31,08% SiO₂, 13,98% Al₂O₃, 3,09% Fe₂O₃, 43,92% CaO y 1,79% MgO, un peso específico de 2.980 kg/m³ y una finura Blaine de 399 m²/kg. La activación fue llevada a cabo con una solución de *waterglass* basada en una mezcla comercial de silicato de sodio con una composición química de 32,4% de SiO₂, 13,5% de Na₂O y 54,1% de agua, a partir de la cual es posible obtener un módulo de la solución (Ms= SiO₂/Na₂O) de 2,4, y
- Un cemento Portland ordinario, de uso comercial en la región, caracterizado por presentar una composición química de 20,35% SiO₂, 6,06% Al₂O₃, 4,58% Fe₂O₃, 57,06% CaO y 1,00% MgO y un peso específico de 2.990 kg/m³. Debe indicarse que este cemento contiene aproximadamente un 30% de adición de caliza.

Como áridos fueron utilizadas una grava silícea con un tamaño máximo de partícula de 19 mm y una arena de río. El reforzamiento del material se realizó a través de la incorporación de fibras de acero de superficie ondulada con una alta resistencia a la tracción. Sus especificaciones técnicas se presentan en la Tabla 1.

Penteado Dias *et al.* (27) observed that including basalt fibre increased flexural and splitting tensile strength in alkaline concretes, and raised their fracture performance to substantially higher levels than obtained for OPC concrete. Silva *et al.* (28-29), in turn, reported that adding wollastonite micro-fibre to alkali-activated matrices improved material toughness by up to 34% compared to the non-reinforced matrix and by 100% compared to equivalent OPCs, revealing the potential of these materials for structural applications.

Based on these data, the present study aimed to evaluate the effect of adding steel fibre to Colombian activated slag concrete on early age mechanical properties, with a view to enhancing scientific understanding of the behaviour of inorganic fibre-reinforced, alkaline-cement based systems (25-30) and exploring their potential use as construction materials.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

Two different types of cement were evaluated for use in concrete matrices:

- An alkali-activated Colombian blast furnace slag (GBFS) with a specific gravity of 2,980 kg/m³, a Blaine fineness of 399 m²/kg and the following chemical composition: 31.08% SiO₂, 13.98% Al₂O₃, 3.09% Fe₂O₃, 43.92% CaO, 1.79% MgO. The material was activated with a waterglass solution consisting in a commercial mix of sodium silicate containing 32.4% SiO₂, 13.5% Na₂O and 54.1% water, from which a modulus of solution of 2.4 (Ms= SiO₂/Na₂O) could be obtained, and
- A local ordinary Portland cement with a specific weight of 2,990 kg/m³ and a chemical composition as follows: 20.35% SiO₂, 6.06% Al₂O₃, 4.58% Fe₂O₃, 57.06% CaO and 1.00% MgO. This cement contains a 30% limestone addition.

The aggregates used were a siliceous gravel with a maximum particle size of 19 mm and rolled sand. The material was reinforced with high tensile strength pleated steel fibre whose specifications are set out in Table 1.

Tabla 1 / Table 1
Especificaciones Técnicas de las Fibras de Acero (31).
Technical Specification of the Steel Fibers (31).

Diámetro / Diameter	1 mm
Longitud / Length	25 mm
Longitud de Onda / Wavelength	8 mm
Resistencia a la Tracción del Alambre / Tensile Strength of the wire	800 N/mm ²

2.2. Diseño de mezclas y preparación de especímenes

Los hormigones de cemento Portland ordinario (OPCC) y los hormigones de escoria activados alcalinamente (AASC) fueron diseñados en base a las especificaciones estándar de la normativa ACI, con una cantidad de cemento de 400 kg por metro cúbico de hormigón y una relación agua / cemento y agua / (escoria + activador anhidro) de 0,45. En el caso de los hormigones alcalinos el activador alcalino (*waterglass*) fue incorporado en una concentración del 5% de Na₂O, expresado como porcentaje en peso de escoria incorporada en la mezcla. Las fibras de acero fueron adicionadas en cantidades de 40 kg/m³ y 120 kg/m³ de hormigón, tanto en las mezclas de OPCC como en las de AASC. La nomenclatura de las mezclas en estudio se muestra en la Tabla 2.

El árido grueso fue incorporado en una proporción del 55% y 45% de árido fino con respecto al total del contenido de áridos en la mezcla. Para los hormigones de OPCC se utilizó un aditivo comercial superplastificante, tipo lignosulfonato, en una concentración del 1,5%, con respecto a la cantidad de cemento. Los asentamientos de las mezclas de OPCC y AASC fueron de 100 mm y 75 mm, respectivamente.

2.2. Mix design and specimen preparation

The ordinary Portland cement (OPCCs) and alkali-activated slag (AASCs) concretes were designed to the specifications set out in ACI standards, with 400 kg of cement per cubic metre of concrete and a water/cement and water/ (slag+anhydrous activator) ratio of 0.45. The Na₂O concentration in the waterglass activating solution added to the concrete mixes was 5% by slag weight. The steel fibres were added at rates of 40 and 120 kg/m³ of concrete to both the OPCC and AASC mixes. The mix nomenclature is given in Table 2.

The coarse aggregate accounted for 55% and the fines for 45% of the total aggregate in the mix. A commercial lignosulphonate superplasticizer was added to the OPCCs at a rate of 1.5% of the cement. The OPCC and AASC slump values were 100 and 75 mm, respectively.

Tabla 2 / Table 2
Nomenclatura de las Mezclas.
Mixes Nomenclature.

Mezclas / Mixes	Cantidad de Fibra / Fiber quantity [kg/m ³]
OPCC 1	0
OPCC 2	40
OPCC 3	120
AASC 1	0
AASC 2	40
AASC 3	120

2.3. Ensayos experimentales

Se elaboraron especímenes cilíndricos de hormigón, con un diámetro de 76,2 mm y una altura de 152,4 mm, para la evaluación de la resistencia mecánica a compresión y tracción indirecta (ASTM C496). Adicionalmente se realizaron muestras prismáticas para la

2.3. Experimental

Cylindrical concrete specimens measuring 76.2 mm in diameter by 152.4 mm tall were prepared to determine compressive and splitting tensile strength (ASTM C496). Prismatic samples were also prepared to determine flexural strength using the three-point load test

determinación del comportamiento a la flexión a través del método de carga a tres puntos (ASTM C 293), el cual se realizó con una velocidad de aplicación de carga de 3 mm/s (Figura 1).

(ASTM C 293) and a loading speed of 3 mm/s (Figure 1). In addition, prismatic samples were prepared to determine flexural strength using the three-point load test (ASTM C 293) and a loading speed of 3 mm/s (Figure 1).

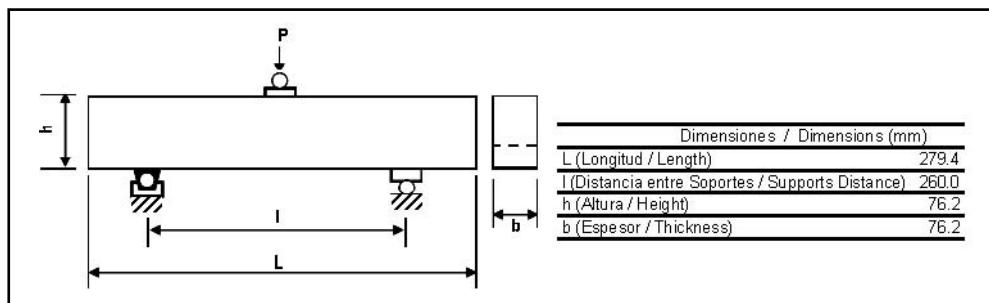


Figura 1. Ensayo de Flexión en Especímenes Prismáticos.
 Figure 1. Flexure Testing of Prismatic Specimens.

Los especímenes de OPCC fueron curados a una humedad relativa del 100% mientras que las muestras de AASC fueron curadas a una humedad relativa del 90%, para prevenir la disolución y lixiviación del activador alcalino, lo cual podría afectar los procesos de reacción y la formación de los productos de hidratación. Debe indicarse que el curado de todas las muestras en estudio fue llevado a cabo a temperatura ambiente y los ensayos mecánicos fueron realizados a 7, 14 y 28 días de curado bajo las especificaciones ya mencionadas.

The OPCC specimens were cured at a relative humidity of 100% and the AASC samples at 90% RH to prevent dissolution and leaching of the alkaline activator, which would have affected the hydration reaction and product formation. All the samples studied were cured at ambient temperature and the mechanical tests were conducted after 7, 14 and 28 days of curing.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resistencia a la compresión

En la Figura 2, en general, se observa que la incorporación de fibras a la mezcla, en las proporciones evaluadas, afectó negativamente a los valores de resistencia mecánica a la compresión de los hormigones OPCC y AASC, presentando reducciones en los valores de la resistencia de hasta un 20% para las dos matrices en estudio, por efecto del aplastamiento de las fibras, hecho que debe ser tenido en consideración para ideas de diseño de estos materiales.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Compressive strength

Figure 2 shows that the inclusion of fibres in the mix in the proportions studied had an adverse impact on the compressive strength of OPCCs and AASCs. Declines of up to 20% were observed in both types of matrices due to fibre crushing, an effect that should be borne in mind in the design of these materials.

Es de resaltar que los hormigones AAS fibrorreforzados presentaron una resistencia a la compresión comparable con las de los hormigones de OPC sin fibras. El incremento de 40 kg a 120 kg de fibra por metro cúbico de hormigón, en los hormigones activados alcalinamente, parece ser que no afecta a su comportamiento mecánico.

The compressive strength of the fibre-reinforced AAS concretes was comparable to the strength of non-reinforced OPC concretes. Increasing the amount of steel fibre from 40 to 120 kg appeared to have no effect on the mechanical performance of alkali-activated concrete.

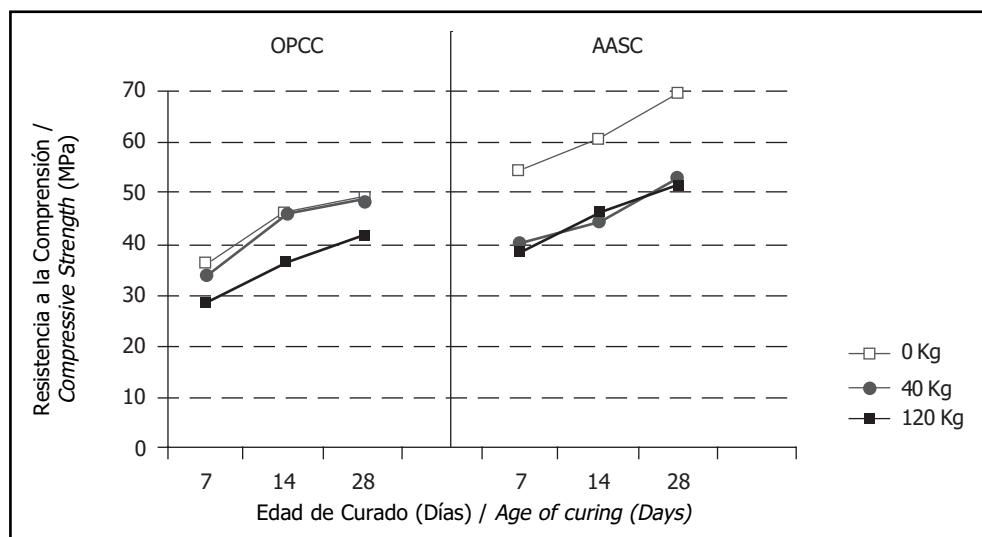


Figura 2. Resistencia a la Compresión de los Hormigones.
Figure 2. Compressive Strength of Concretes.

3.2. Resistencia a la tracción indirecta

Los resultados obtenidos de la resistencia a la tracción indirecta son presentados en la Figura 3. Las muestras de AASC presentaron un incremento en esta propiedad con la incorporación de fibras, de hasta un 15% a todas las edades de curado. En general, el comportamiento a la tracción es un 24% superior en los hormigones de activación alcalina con respecto a las mezclas equivalentes de OPCC. Cabe resaltar, que estos últimos presentan una reducción en la resistencia a la tracción a edades tempranas por la adición de fibras, aunque a 28 días de curado, el efecto se atenúa, alcanzando valores similares, independientemente de la cantidad de fibra incorporada.

3.2. Splitting tensile strength

The splitting tensile strength results are given in Figure 3. With the addition of fibre, AASC sample strength increased by up to 15% at all curing ages. On the whole, the alkali-activated concretes exhibited 24% greater tensile strength than the equivalent OPCCs. A decline was observed in OPCC early age tensile strength when fibre was added, although this effect was mitigated after 28 days, when similar values were reached regardless of the amount of fibre present.

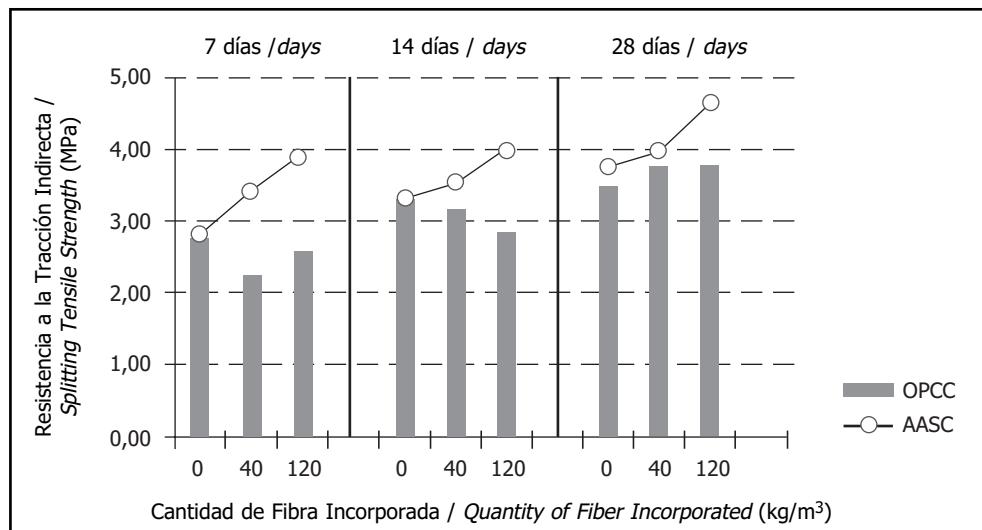


Figura 3. Resistencia a la Tracción Indirecta.
Figure 3. Splitting Tensile Strength.

Los resultados obtenidos son coherentes con lo encontrado en la literatura (29), en el sentido de que el comportamiento de materiales frágiles sometidos a esfuerzos de tensión puede ser mejorado con la incorporación de fibras de alta resistencia, tales como las fibras de acero. Al incorporar volúmenes bajos de fibra (< 1,5%) el desempeño elástico-lineal de las matrices cementicias no es afectado significativamente, sin embargo, el comportamiento en post-fractura puede ser modificado sustancialmente obteniéndose un incremento en la resistencia a la tensión y la tenacidad del material (30). Asimismo, con un aumento en la concentración volumétrica de fibras, es posible que las microgrietas presentes en la matriz sean estabilizadas debido a la interacción de las fibras, a consecuencia de los mecanismos de deslizamiento y *pull-out* que tienen lugar en los AASC reforzados con fibras de acero (24), generando una mejora importante de la capacidad portante a tracción del material.

3.3. Resistencia a la flexión

Los valores de los Módulos de Rotura (MOR) de los OPCC y los AASC son presentados en la Figura 4. Se observa un incremento de los módulos de rotura con la edad de curado. Ello está en concordancia con el desarrollo mecánico debido a la contribución de los altos módulos de las fibras de acero y también debido a las progresivas reacciones de hidratación que ocurren a edades tempranas en las matrices de hormigón alcalino. El MOR obtenido en la mezcla AASC con un contenido de fibra de 120 kg por metro cúbico fue el módulo más alto (8,86 MPa) a 28 días de curado. En términos generales se observa una mejora sustancial en la capacidad de carga y un incremento en la tenacidad del material con la adición de mayores cantidades de fibra.

The results obtained were consistent with reports in the literature (29) to the effect that the tensile behaviour of brittle materials can be improved with the addition of high strength fibres such as the steel fibres studied here. According to these reports, while the inclusion of small volumes of fibre (< 1.5%) has no significant effect on the elastic-linear performance of cementitious matrices, the post-fracture behaviour can be substantially modified, with rises in both tensile strength and toughness (30). Similarly, increasing the volume of fibre added may stabilize the microcracks in the matrix thanks to interactions between fibres. These are the result of the slip and pull-out mechanisms taking place in steel-fibre reinforced AASCs (24) that raise the material's tensile capacity substantially.

3.3. Flexural strength

The modulus of rupture (MOR) values for the OPCCs and AASCs are given in Figure 4. The moduli were observed to rise with curing age. This is in keeping with the mechanical strength development resulting from both the contribution of the high steel fibre moduli and the early age hydration reactions that take place in alkaline concrete matrices. The highest MOR (8.86 MPa) was obtained for the 28-day AASC mix with a fibre content of 120 kg per cubic metre. As a rule, load capacity and material toughness were both observed to rise with increasing amounts of fibre.

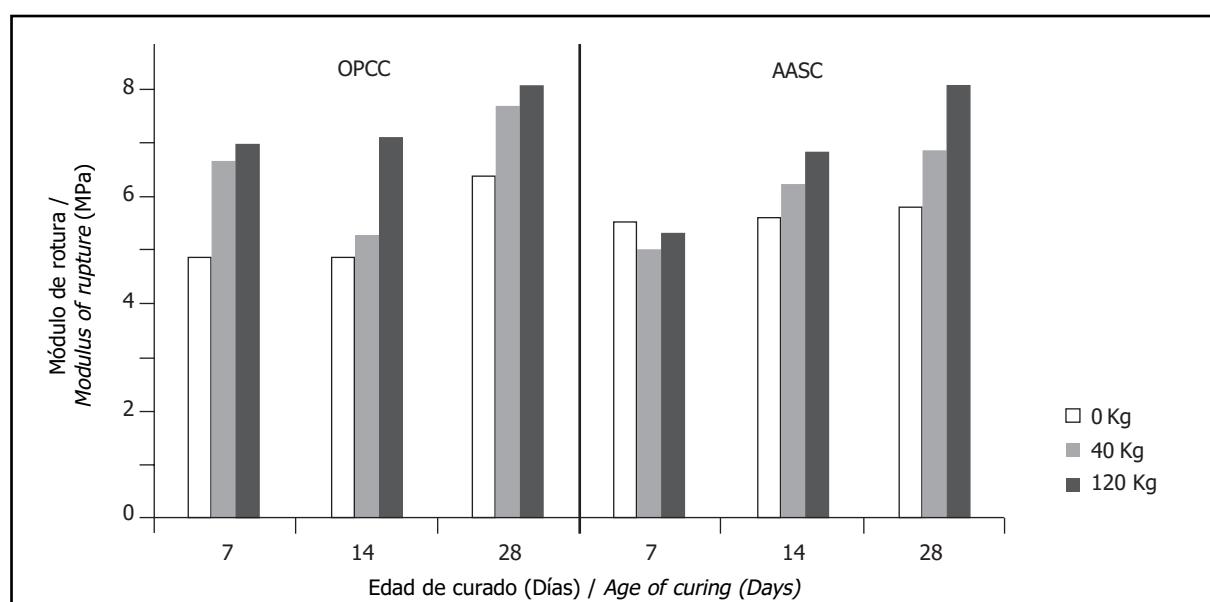


Figura 4. Módulos de Ruptura a 7, 14 y 28 días de curado.
 Figure 4. Modulus of Rupture at 7, 14 and 28 days of Curing.

Los valores correspondientes a la deflexión media (δ_{MOR}) en el MOR y la deflexión media (δ^*) presentada por los hormigones en estudio después de la fractura a una carga de 0,5KN son presentados en la Tabla 3.

The mid-span deflection values at MOR loads (δ_{MOR}) and the mid-span deflection after fracture under a load of 0.5 kN (δ^*) are given for the six mixes studied in Table 3.

Tabla 3 / Table 3
Deflexión Media presentada por los hormigones a Cargas del MOR.
Mid-Span deflexure presented by Concretes at Load of the MOR.

Mezcla / Mix	Edad de Curado / Age of Curing			
	14 Días / 14 Days		28 Días / 28 Days	
	δ_{MOR} [mm]	δ^* [mm]	δ_{MOR} [mm]	δ^* [mm]
OPCC 1	0.74	1.37	0.87	1.39
OPCC 2	0.93	1.55	1.54	2.58
OPCC 3	1.05	4.75	1.45	4.16
AASC 1	0.78	1.48	0.99	1.54
AASC 2	0.93	1.41	0.95	1.46
AASC 3	1.29	5.85	1.46	4.25

Con base en los resultados obtenidos, puede afirmarse que los AASC presentan una ductilidad mayor que los hormigones convencionales con la incorporación de fibras. Posterior a la fractura de los especímenes, se obtuvieron similares deflexiones en los hormigones alcalinos que las observadas en OPCC pero con menores contenidos de reforzamiento de acero. El comportamiento en ambos materiales (AASC y OPCC) con la incorporación de fibras puede ser atribuido a las interacciones entre la fibra y la matriz. Para el caso de matrices de hormigón alcalino reforzadas con fibras de acero, se ha identificado en un trabajo previo (24), que el mecanismo que controla la resistencia post-fractura es un típico desplazamiento de alta fricción cortante, el cual favorece la capacidad total de consumo de energía del compuesto y es responsable de la generación de una mayor ductilidad.

Por otra parte, el comportamiento a la flexión presentado a edades tempranas por los AASC reforzados con fibras de acero, puede ser explicado por la presencia de grietas y microgrietas en el material generadas por el efecto de las contracciones volumétricas asociadas a este material (17). Estas grietas pueden estar localizadas en los bordes entre la fibra y la matriz endurecida, favoreciendo que la fibra se desprenda mientras se transfiere la carga a la grieta principal. Este proceso es deseable, ya que el compuesto exhibirá un comportamiento de endurecimiento por deslizamiento, debido al fisuramiento múltiple de la matriz reforzada (33). Complementariamente, el C-S-H tipo gel generado en sistemas de activación alcalina presenta una alta densidad, lo que permite que éste pueda actuar como taponador de poros, y que dé lugar a un efecto de cicatrización que previene la propagación de la falla (34).

The findings showed that fibre-reinforced AASCs were more ductile than similarly reinforced conventional concretes. After specimen fracture, the deflection found for the alkaline concretes was similar to the values observed in the OPCCs, but with lower steel reinforcement contents. The behaviour of both materials after inclusion of the fibre can be attributed to fibre-matrix interactions. A prior study (24) identified the mechanism that governs post-fracture strength in steel fibre-reinforced alkaline concrete matrices: a typical high shear stress-induced shift that enhances the compound's overall capacity to absorb energy, generating greater ductility.

Moreover, the early age flexural behaviour observed in the steel fibre-reinforced AASCs may be explained by the presence of cracks and microcracks generated by the shrinkage associated with this material (17). These cracks may be located around the edges between the fibre and the hardened matrix, favouring fibre detachment as it transfers the load to the main crack. This process is desirable, for the compound will exhibit slip hardening due to multiple fissuring in the reinforced matrix (33). In addition, the high density of the C-S-H-type gel generated in alkali-activated systems enables it to plug pores, giving rise to a healing effect that prevents propagation of the fault (34).

4. CONCLUSIONES

- Los hormigones alcalinos basados en escoria siderúrgica de alto horno presentan resistencias a la compresión superiores que los hormigones tradicionales de cemento Portland ordinario. Asimismo, fue identificada una alta susceptibilidad de reducción de la resistencia a la compresión en los OPCC y AASC con la adición de fibras.
- La incorporación de fibras aumenta la resistencia a la tracción indirecta y la resistencia a la flexión a edades tempranas de curado tanto en los OPCC como en los AASC. Sin embargo, el incremento es mayor en los AASC reforzados con fibras de acero que los OPCC fibrorreforzados, siendo esto atribuido a los mecanismos de puenteo y desprendimiento de las fibras. Asimismo, se aprecia un elevado incremento en los módulos de ruptura con la incorporación de fibra en las mezclas en estudio, en particular en los AASC.
- La capacidad de deformación por flexión posterior al fisuramiento de la matriz es superior en los AASC, hecho que revela un incremento sustancial en la capacidad de almacenamiento de energía del material.
- En términos generales, los hormigones alcalinos reforzados con fibras de acero exhiben un comportamiento mecánico superior comparado al de las mezclas de control reforzadas basadas en cemento Portland, lo cual hace de estos nuevos materiales una alternativa óptima para su aplicación como material de construcción.

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.

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Sarkar, S.; Roumain, J. C.: “New Cements for sustainability”. International Symposium *Modern Cement Manufacture*, Theme 1, (2003), pp. 45-57.
- (2) Gartner, E.: “Industrially Interesting Approaches to Low CO₂ Cements”. *Cem. Concr. Res.*, vol. 34 (2004), pp. 489-498. doi:10.1016/j.cemconres.2004.01.021
- (3) Moranville-Regourd, M.: “Portland Cement-Based Binders Cements for the Next Millennium”. *Modern Concrete Materials* (1999), pp. 87-100.
- (4) Roy, D. M.; Silsbee, M. R.: “Novel Cements and Cement Products for Applications in the 21st Century”. *Symposium Concrete Technology, Past, Present and future*, ACI, SP 144, 349-382 (1994).
- (5) Brough, A. R.; Atkinson, A.: “Sodium Silicate-Based Alkali-Activated Slag Mortars. Part I. Strength, Hydration and Microstructure”. *Cem. Concr. Res.*, vol. 32 (2002), pp. 865-879. doi:10.1016/S0008-8846(02)00717-2
- (6) Fernández, A.; Puertas, F.; Sobrados, I.; Sanz, J.: “Structure of Calcium Silicate Hydrates Formed in Alkaline Activated Slag: Influence of the Type of Alkaline Activator”. *J. Am. Ceramic Society*, vol. 86, 8 (2003), pp. 1389-1394.
- (7) Puertas, F.: “Cementos de Escoria Activados Alcalinamente: Situación Actual y Perspectivas de Futuro”. *Mater. Construcc.*, vol. 45, 239 (1995), pp. 53-64.

4. CONCLUSIONS

- *Alkaline blast furnace slag concretes show higher compressive strength than traditional ordinary Portland cement materials. Furthermore, both OPCCs and AASCs are highly sensitive to declines in compressive strength when fibres are added to their matrices.*
- *The inclusion of fibre increases early age flexural and splitting tensile strength in both OPCCs and AASCs. The increase is greater in the steel fibre-reinforced AASCs than in the reinforced OPCCs, however, due to fibre bridging and pull-out mechanisms. The moduli of rupture also rise substantially with the inclusion of fibres in the mixes studied, especially the AASCs.*
- *Matrix post-cracking flexural deformability is greater in the AASCs, revealing a steep increase in the material's capacity to store energy.*
- *With generally higher mechanical performance than reinforced Portland cement-based control mixes, steel fibre-reinforced alkaline concretes constitute an optimal alternative material for use in construction.*

ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks for their support in the present study go to the Valle University, Colombia, the Francisco José de Caldas Institute for Scientific and Technological Development of Colombia (COLCIENCIAS), and the Centre for New Materials Excellence (CENM).

- (8) Rodríguez, E.; Bernal, S.; Mejía de Gutiérrez, R.; Puertas, F.: "Alternative concrete based on alkali-activated slag". *Mater. Construcc.*, vol. 58, 291 (2008), pp. 53-67.
- (9) Bernal, S.; Mejía de Gutiérrez, R.; Rodríguez, E.: "Nuevos Concretos para el Aprovechamiento de un Sub- Producto Industrial". Proc. Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales, IBEROMET IX La Habana - Cuba (2006), pp. 793-802.
- (10) Bernal, S.; Mejía de Gutiérrez, R.; Delvasto, S.; Rodríguez, E.: "Performance of Geopolymeric Concrete Reinforced with Steel Fibers". 10th Int. Bonded Inorganic Bonded Fiber Composites Conference. Proceedings IIBCC. Sao Pablo - Brasil (2006), pp. 156-167.
- (11) Bernal, S.; Mejía de Gutiérrez, R.; Delvasto, S.; Rodríguez, E.: "Non Conventional Concretes Based on GGBS". Proceedings of the 20th International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia-USA (2005), pp. 259-267.
- (12) Mejía de Gutiérrez, R.; Bernal, S.; Rodríguez, E.; Maldonado, J.: "Properties of Alkali-Activated Slag Concrete". Proceedings Brazilian Conference on Non-Conventional Materials and Technologies: Affordable Housing and Infrastructure. NOCMAT 2004. Pirassununga - Brasil (2004), 10 p.
- (13) Bakharev, T.; Sanjayan, J. G.; Cheng, Y. B.: "Resistance of Alkali-Activated Slag Concrete to Acid Attack". *Cem. Concr. Res.*, vol. 33 (2003), pp. 1607-1611. doi:10.1016/S0008-8846(03)00125-X
- (14) Bakharev, T.; Sanjayan, J. G.; Cheng, Y. B.: "Sulfate Attack on Alkali-Activated Slag Concrete". *Cem. Concr. Res.*, vol. 32 (2002), pp. 211-216. doi:10.1016/S0008-8846(01)00659-7
- (15) Roy, D. M.; Jiang, W.; Silsbee, M. R.: "Chloride Diffusion in Ordinary, Blended, and Alkali-Activated Cement Pastes and Its Relation to Other Properties". *Cem. Concr. Res.*, vol. 30 (2000), pp. 1879-1884. doi:10.1016/S0008-8846(00)00406-3
- (16) Wang, S. D.; Scrivener, K.; Pratt, P. L.: "Alkali Activated Slag Cement and Concrete: A Review of Its Properties and Problems". *Advances in Cement Research*, vol. 24 (1995), pp. 93-102.
- (17) Acacio de Melo, A.: "Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada". Thesis do Mestre. Escola politécnica da Universidade de São Pablo, Brasil (2002).
- (18) Palacios, M.: "Empleo de Aditivos Orgánicos en la Mejora de las Propiedades de Cementos y Morteros de Escoria Activada Alcalinamente". Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid (2006).
- (19) Collins, F.; Sanjayan, J. G.: "Effects of Ultra-Fine Materials on Workability and Strength of Concrete Containing Alkali-Activated Slag as the Binder". *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, 3 (1999), pp. 459-462. doi:10.1016/S0008-8846(98)00237-3
- (20) Collins, F.; Sanjayan, J.G. "Strength and Shrinkage Properties of Alkali-Activated Slag Concrete Containing Porous Coarse Aggregate". *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, 4 (1999), pp. 607-610. doi:10.1016/S0008-8846(98)00203-8
- (21) Collins, F.; Sanjayan, J. G.: "Cracking Tendency of Alkali-Activated Slag Concrete Subjected to Restrained Shrinkage". *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, 5 (2000), pp. 791-798. doi:10.1016/S0008-8846(00)00243-X
- (22) Collins, F.; Sanjayan, J. G.: "Microcracking and Strength Development of Alkali Activated Slag Concrete". *Cement and Concrete Composites*, vol. 23, 4-5 (2001), pp. 345-352.
- (23) Nemi, B.; Godoy, M. L.; Rocco, C.: "Medición de Propiedades de Fractura en Hormigones Reforzados con Fibras de Acero". Jornadas SAM - CONAMET - AAS (2001), pp. 927-934.
- (24) Bernal, S.; Mejía de Gutiérrez, R.; Rodríguez, E.; Delvasto, S.: "Performance of Geopolymeric Concrete Reinforced with Steel Fibers". Proceedings of 10th Int. Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference. Sao Pablo- Brazil (2006), pp. 156-167.
- (25) Puertas, F.; Amat, T.; Fernández-Jiménez, A.; Vázquez, T.: "Mechanical and Durable Behaviour of Alkali Cement Mortars Reinforced with Polypropylene Fibres". *Cem. Concr. Res.*, vol. 33 (2003), pp. 2031-2036. doi:10.1016/S0008-8846(03)00222-9
- (26) Puertas, F.; Gil-Maroto, A.; Palacios, M.; Amat, T.: "Morteros de Escoria Activada Alcalinamente Reforzados con Fibra de Vidrio AR. Comportamiento y Propiedades". *Mater. Construcc.*, vol. 56, 283 (2006), pp. 79-90.
- (27) Penteado Dias, D.; Thaumaturgo, C.: "Fracture Toughness of Geopolymeric Concretes Reinforced with Basalt Fibers". *Cement and Concrete Composites*, vol. 27 (2005), pp. 49-54. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.02.044
- (28) Silva, F. J.; Thaumaturgo, C.: "Fiber Reinforcement and Fracture Response in Geopolymeric Mortars". *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 26 (2003), pp. 167-172. doi:10.1046/j.1460-2695.2003.00625.x
- (29) Silva, F. J.; Thaumaturgo, C.: "The Chemistry, Reinforcement and Fracture in Geopolymeric Cement Composites". 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC), Durban - South Africa (2003).
- (30) Savastano, H. Jr.; Warden, P.; Coutts, G.: "Microstructure and Mechanical Properties of Waste Fibre-Cement Composites". *Cement and Concrete Composites*, vol. 27 (2005), pp. 583-592. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.009
- (31) Dramix, Data Sheet Aztec Building Products - Wiremix®.
- (32) Li, Z.; Möbasher, B.; Shah, S.: "Characterization of Interfacial Properties in Fiber-Reinforced Cementitious Composites". *Journal of American Society*, vol. 74, 9 (1991), pp. 2156-2164.
- (33) Redon, C.; Li, V. C.; Wu, C.; Hoshiro, H.; Saito, T.; Ogawa, A.: "Measuring and Modifying Interface Properties of PVA Fibers in ECC Matrix". *Journal of Materials in Civil Engineering* (2001), pp. 399-406. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:6(399)
- (34) Hakkinen, T.: "The Influence of Slag Content on the Microstructure, Permeability and Mechanical Properties of Concrete. Part 2". *Cem. Concr. Res.*, vol. 23 (1993), pp. 518-530. doi:10.1016/0008-8846(93)90002-Q

* * *