

Materiales de Construcción
 Vol. 60, 300, 83-97
 octubre-diciembre 2010
 ISSN: 0465-2746
 eISSN: 1988-3226
 doi: 10.3989/mc.2010.52309

Aumento de la tenacidad de hormigones autocompactables reforzados con fibras cortas de polipropileno

Toughness increase of self compacting concrete reinforced with polypropylene short fibers

G. Melián^(*), G. Barluenga^(**), F. Hernández-Olivares^(***)

Recepción/Received: 23-V-09
 Aceptación/Accepted: 5-X-10
 Publicado online/Online publishing: 14-VII-10

RESUMEN

Se presentan en este artículo hormigones autocompactables que, mediante la adición de pequeñas fracciones volumétricas de fibras cortas de polipropileno, consiguen incrementos importantes de tenacidad en su comportamiento mecánico a flexión. Estos aumentos de tenacidad son semejantes a los que presentan un grupo de hormigones reforzados con fibras, denominados ECC (Engineered Cementitious Composites), que muestran también alguna ductilidad y endurecimiento por deformación en ensayos de tracción directa y flexión. Los hormigones se dosificaron empleando cemento Pórtland con Puzolana natural, áridos volcánicos de machaqueo y arena fina procedente de dunas del desierto del Sáhara (0-1 mm), de canteras y depósitos de Las Palmas de Gran Canaria (Islas Canarias), respectivamente, además de arena silíceo ordinaria (0-4 mm) y cenizas volantes de una central térmica de combustible antracita.

Palabras clave: hormigón, refuerzo de fibras, puzolana, propiedades físicas, propiedades mecánicas.

SUMMARY

Increases in bending tests by the addition of low volume fractions of Polypropylene (PP) Short Fibers PP. These toughness increases are similar to those attained by Fiber Reinforced Concrete (FRC) referred elsewhere as Engineered Cementitious Composites (ECC), having some ductility and strain hardening in direct tensile and flexural tests. Concretes mixtures were manufactured using natural pozzolanic blended Portland cement, volcanic crushed coarse aggregates and fine sand from Sahara desert dunes (0-1 mm) from Canary Islands quarries and sand reservoirs, respectively, besides ordinary siliceous sand (0-4 mm) and fly ash from an anthracite-coal heat generator.

Keywords: concrete, fiber reinforce, pozzolana, physical properties, mechanical properties.

^(*) IE University (Segovia, España).

^(**) Universidad de Alcalá de Henares (Madrid, España).

^(***) Universidad Politécnica de Madrid (Madrid, España).

1. INTRODUCCIÓN

Mediante la adición de pequeñas fracciones volumétricas de fibras cortas de polipropileno al hormigón (0,1%) se busca principalmente reducir la microfisuración a edades tempranas del hormigón fresco, inmediatamente después de su puesta en obra. También se recomiendan con esta finalidad otras fibras cortas poliméricas, de acero o de vidrio. Estas adiciones pequeñas de fibras cortas no tienen efectos destacables en las propiedades mecánicas del hormigón endurecido (1, 2).

Para mejorar las propiedades mecánicas a tracción y a flexión del hormigón estructural, se añaden también fibras cortas, de acero principalmente en forma de grapas o hilos, además de las necesarias barras de refuerzo, pero en mayor fracción volumétrica (1-2%) que la requerida para el control de la microfisuración a edades tempranas (3, 4). Estas mezclas de hormigones reforzados con mayores cantidades de fibras cortas de acero presentan consistencia seca o muy seca en los ensayos de cono de Abrams.

Durante los últimos años, ha surgido un nuevo concepto de hormigón reforzado con fibras cortas poliméricas. Fibras cortas fabricadas a partir de poliolefinas de alta resistencia, y con un ensimaje de grosor controlado para mejorar la adherencia con la matriz cementícea y la compatibilidad de deformaciones entre fibra y matriz, se mezclan con hormigones en fracciones volumétricas medias y bajas (1-3%), para lograr hormigones endurecidos con ductilidad mejorada e incluso presentando endurecimiento por deformación en ensayos de tracción directa y flexión. Estos hormigones reforzados con fibras se han denominado por algunos de sus investigadores "Engineered Cementitious Composites (ECC)" (5). El estado actual del conocimiento y de las propuestas de desarrollo normativo para el uso y diseño estructural con los hormigones reforzados con fibras cortas ha sido resumido recientemente por di Prisco y colaboradores en un reciente artículo RILEM (6).

La innovación en la ciencia del hormigón ha ido evolucionando desde conceptos tan restrictivos como el de hormigón de alta resistencia, fabricado con materiales costosos y sofisticados, hacia hormigón de prestaciones elevadas, en el sentido del término inglés de *performance*. Es decir, de coste razonable, durables, fáciles de poner en obra sin segregación, fabricados a partir de materias primas locales sin empeoramiento de sus propiedades sino con mejoras globales de sus características especificadas para aplicaciones en edificación y construcción civil (7).

En esta investigación se ha obtenido un hormigón reforzado con fibras, de altas prestaciones, con comportamiento

1. INTRODUCTION

The additions of low volume fractions (0.1%) of short Polypropylene (PP) fibers in concrete mainly attempt to reduce the early age microcracking of fresh concrete admixtures after placing. Other polymeric fibres can be recommended too for this purpose. These low-additions do not have any remarkable influence on the mechanical properties of hardened concrete (1, 2).

To improve the tensile and flexural mechanical properties of concrete structures, short hooked or wired fibers, mainly of steel, are incorporated in the concrete mixtures, besides the necessary reinforcing bars. However this reinforcement is present in higher volume fractions (1-2%) than the common fiber additions for reducing early age microcracking (3, 4). Fresh higher volume fraction steel-FRC mixtures attain stiff and very dry consistency in slump tests.

In recent years, a new concept on polymeric short fibers reinforcing concrete was emerging. Short fibers made from high strength polyolefins, having controlled sizing to enhance its adherence and strain compatibility with the cementitious matrix, were mixed in medium-low volume fraction (1-3%), obtaining hardened concrete exhibiting improved ductility and even strain hardening behaviour. These fiber reinforced concretes were named Engineered Cementitious Composites (5). Current status of rules for use and structural design of FRC were briefly summarized by di Prisco, et al. in a RILEM paper (6).

The innovation in concrete science evolved from restricted concepts, —such as high strength concrete made with expensive and sophisticated materials— towards high performance concrete; that is to say, cost-effective, durable, easy to place without segregation, with local raw-material constituents in the mixtures. The use of these local raw materials does not worsen its main properties for building and civil engineering construction, but rather it globally improves its performance (7).

In this research a high performance fibre reinforced concrete has been obtained and characterized, having

de autocompactable en estado fresco y propiedades semejantes a los ECC en flexión, pero fabricado con materiales de coste razonable y locales. En lugar de fibras de poliolefinas de alta resistencia y con ensimaje de grosor controlado, se han utilizado fibras ordinarias de polipropileno (PP) de coste razonable, obteniéndose propiedades mecánicas semejantes a las de los ECC. Aunque en este trabajo se han utilizado en las dosificaciones de estos hormigones de altas prestaciones materiales procedentes principalmente de las Islas Canarias, estos resultados pueden generalizarse y reproducirse en cualquier lugar, mezclando otros materiales constituyentes.

El archipiélago de las Islas Canarias (IC) presenta un clima bastante confortable, subtropical templado marino. Sin embargo, en algunas ocasiones soporta vientos fuertes permanentes o esporádicos, lluvia y ambiente húmedo conteniendo sales marinas diluidas, así como cargas sísmicas que pueden alterar las prestaciones de las estructuras en ingeniería civil y edificación, construidas principalmente de hormigón armado ordinario y bloques de hormigón para elementos constructivos de fábrica y albañilería en general. El uso de los FRC puede acrecentar la durabilidad de estas estructuras de hormigón. En regiones de riesgo sísmico debe ser de interés general usar estos nuevos materiales en edificación para mejorar la ductilidad de las estructuras de hormigón armado. El archipiélago de las IC debe considerarse bajo esta clase de riesgo de terremotos y actividad volcánica.

La durabilidad de las estructuras de hormigón armado en las IC es de suma importancia. Los conglomerantes empleados tradicionalmente para la fabricación de morteros de albañilería son de cemento Pórtland con adiciones de puzolanas naturales (CEM II/A o B-P). Estas puzolanas naturales abundan en las IC. La incorporación de puzolanas naturales al cemento Pórtland mejora la durabilidad química del hormigón armado en ambientes que puedan promover corrosión de las armaduras, o reactividad árido-álcali en la intercara entre los áridos volcánicos y la pasta de cemento-mortero hidratado. La adición de puzolanas naturales en el cemento Pórtland aumenta la compactación de la pasta de cemento hidratada cuando fragua y endurece; reduciéndose su permeabilidad al agua y a la difusión de las sales marinas en el ambiente húmedo, que de otra manera podrían introducirse en la masa del hormigón llegando a zonas muy próximas a las armaduras de acero, promoviendo su corrosión. Finalmente, los cementos Pórtland con puzolanas naturales producen menos calor de hidratación que el cemento Pórtland ordinario, lo que contribuye a reducir la microfisuración a edades tempranas por la retracción autógena de la pasta de cemento hidratada.

En la actualidad se permite en las IC construir en edificación con hormigones que alcancen resistencias a compresión a 28 días comprendidas entre 25 MPa y 30 MPa,

self compacting fresh concrete behaviour and similar values in flexure as the ECC, but manufactured with cost-effective and local raw materials. In this case, the high-expensive strengthened and sized polyolefin fibers, have been substituted by ordinary low-cost PP fibers, obtaining mechanical properties similar to those of ECC. Although in this work, raw materials mainly from Canary Island have been used to manufacture these high performance concrete mixtures, these results can be generalized and reproduced elsewhere, mixing other raw materials.

Canary Islands (CI) archipelago has a quite comfortable template subtropical marine climate. Nevertheless, sometimes supports sporadic or permanent high winds, rain and humid environment containing diluted marine salts, as well as suffering seismic movements that can damage the building and civil engineering structures performance. These structures are mainly made from ordinary steel reinforced concrete and concrete blocks for masonry construction. The use of FRC can enhance the durability of those concrete structures. Indeed, the use of these new materials in building construction in regions under seismic risk is of great interest to increase the ductile performance of reinforced concrete structures. CI archipelago can be considered under this class of earthquake and volcanic risk behaviour.

Durability of steel reinforced concrete structures in CI is one of the main concerns. Blended cements with natural pozzolanic additions are the traditional conglomerates for manufacturing masonry mortars and ordinary concretes. These natural pozzolans are abundant in the CI. The blending of Portland cement and natural pozzolana improves the chemical durability of the reinforced concrete under weather conditions that can promote steel bars corrosion, or alkali-silica reactivity in the interface between the volcanic aggregates and hydrated cement-mortar paste. The addition of natural pozzolana to Portland cement increases the compaction of the hydrated paste as it sets and hardens; it reduces its water permeability and saline moist diffusion, which otherwise, could be spread in concrete very close to the steel reinforcing bars, causing their corrosion. Finally, the pozzolana blended cements produce lower hydration heat than the ordinary Portland cements does, which contributes to reduce the early age microcracking due to autogenous shrinkage in the hydrated cement paste.

Currently, the use of CI hardened concretes which attain compressive strengths at aged 28 days comprise between 25 MPa and 30 MPa, is permitted for building

en concordancia con las normas de obligado cumplimiento vigentes (EHE, 2008 (8)). Estos hormigones se dosifican con relaciones agua/cemento en peso ligeramente por encima de 0,5, para obtener descensos del cono de Abrams próximos a 6 cm en estado fresco. En otro caso, deberían incorporar costosos aditivos superfluidificantes en la dosificación para mejorar su trabajabilidad sin por ello reducir la resistencia a compresión tras el fraguado, curado y endurecimiento. Este exceso de agua en la dosificación puede aumentar la porosidad abierta del hormigón endurecido, lo que puede hacer empeorar su durabilidad en las condiciones ambientales y climáticas a las que se expone en las IC.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Programa experimental

Se programaron ensayos experimentales en laboratorio para obtener y comparar propiedades físicas y mecánicas de cinco tipos diferentes de hormigones y hormigones reforzados con fibras cortas de PP (Tabla 1), en condición fresca y endurecidos, designados de la siguiente manera: hormigón de control (CC); hormigón reforzado con fibras (FRC); hormigón autocompactable (SCC); hormigón autocompactable reforzado con fibras (FRSCC) y, por último, hormigón autocompactable tenaz reforzado con fibras (TFRSCC).

Para la realización en laboratorio de estos ensayos físicos y mecánicos se fabricaron probetas cilíndricas (diámetro, 15 cm; altura, 30 cm), cúbicas (10x10x10 cm³), y prismáticas

construction in agreement with standard regulations (EHE, 2008 (8)). They are proportioned in the mixture having water/cement ratios by weight above 0.5, to obtain Abrams-cone slump close to 6 cm in fresh state. In other cases expensive superplasticizers additives must be incorporated to the concrete mixtures in order to improve its workability without reducing the compressive strength after setting, curing and hardening. This excess of water in the mixture can increase the open porosity of the hardened concrete, which can worsen its durability under the CI environment and climate exposure.

2. MATERIALS AND METHODOLOGY

2.1. Experimental program

An experimental testing schedule was designed to obtain and compare the physical and mechanical properties of five different types of concrete and short PP fiber reinforced concrete (Table 1), in fresh and hardened conditions, namely: Control Concrete (CC); Fibers Reinforced Concrete (FRC); Self Compacting Concrete (SCC); Fiber Reinforced Self Compacting Concrete (FRSCC); and finally, Toughened Fiber Reinforced Self Compacting Concrete (TFRSCC).

Physical and mechanical testing of hardened concrete samples in laboratory were made on cylindrical (diameter: 15 cm; height: 30 cm), cubic (10x10x10 cm³),

Tabla 1 / Table 1
Número de muestras ensayadas en laboratorio para obtener las propiedades físicas y mecánicas.
Number of specimens tested in laboratory to obtain the physical and mechanical properties reported.

Tipo de hormigón / Concrete Type	Ensayos físicos / Physical Testing			Ensayos mecánicos / Mechanical Testing		Total de muestras / Total Specimens
	Consistencia / Slump Test	Densidad / Density ^a	Ultrasonidos / Ultrasonic ^b	Compresión / Compressive ^c	Flexión / Bending ^d	
CC	Cono de Abrams / Abrams-Cone ^e	62	62	26	11	176
FRC	Ensayo Vebe / Vebe Test ^f	108	108	33	24	324
SCC	Escurrimiento / Slump flow A-C ^g	16	16	8	8	48
FRSCC	Escurrimiento / Slump flow A-C ^g	32	32	16	16	96
TFRSCC	Escurrimiento / Slump flow A-C ^g	102	102	48	48	306
TOTAL		320	320	131	107	950

^a UNE 83414 EX.

^b UNE 83308.

^c UNE 83304.

^d UNE 83305.

^e UNE 83314.

^f UNE EN 12350-3.

^g UNE 83361.

(10x10x40 cm³) de los diferentes tipos de hormigón curado y endurecido estudiados en esta investigación, a 7 y 28 días: CC, FRC, FRSCC y TFRSCC. Se determinaron también los índices de tenacidad de los hormigones FRC, FRSCC y TFRSCC. Probetas de estos últimos hormigones se repitieron en dos series con fibras cortas de PP de dos longitudes distintas (12 mm y 19 mm), para comparar la efectividad de la longitud de la fibra en las propiedades mecánicas finales de los TFRSCC.

Se midió la densidad y la velocidad de los ultrasonidos en cada probeta de hormigón endurecido, en condiciones de laboratorio, para calcular el Módulo de Young Ultrasonico para cada tipo de hormigón ensayado, a distintas edades. La velocidad de los ultrasonidos se midió con un equipo calibrado E-46 IEP de Control, operando a 0,5 kV. El Módulo de Young E se calculó utilizando la fórmula bien conocida $E = \rho v^2$, siendo ρ (kg/m³) la densidad normal de cada probeta y v (m/s) la velocidad de los ultrasonidos en la misma probeta, en condiciones de laboratorio. Los ensayos mecánicos a compresión, tracción indirecta y resistencia a flexión a tres puntos (CC y FRC) se realizaron utilizando los equipos de laboratorio usuales para estos ensayos. Las probetas prismáticas de los hormigones SCC, FRSCC y TFRSCC se ensayaron a flexión a cuatro puntos en una máquina dinámica electromecánica Codein, equipada con una célula de carga de 300 kN. En ambos casos (flexión a tres y a cuatro puntos) con lectura y registros independientes simultáneos de la carga y de la deformación. Las relaciones experimentales tensión-deformación se emplearon para calcular los índices de tenacidad de cada tipo de hormigón endurecido.

2.2. Materiales

Los hormigones investigados se han dosificado con árido grueso procedente de machaqueo de rocas fonolitas de origen volcánico (5/10 mm, 10/20 mm); árido fino (0/5 mm); cemento Pórtland con puzolanas naturales (resistente al agua de mar), CEM II/B-P 32.5 R (UNE-EN 197-1:2000), con adiciones puzolánicas de origen volcánico (21-35%, en peso con relación al clínker), y arena fina silíceas (0/1 mm) procedente de las dunas del desierto del Sáhara vecino a las IC. Estas arenas finas las transporta frecuentemente el viento y las corrientes marinas a las costas y valles de las IC, donde se acumulan en grandes depósitos que son explotados por la industria minera y la de los materiales de construcción. El árido grueso de machaqueo presenta una moderada resistencia al desgaste y bajos coeficientes de absorción de agua. El árido fino se compuso mezclando arenas naturales y de machaqueo en proporción del 50% en peso. La composición química de óxidos del cemento y de los áridos se muestra en la Tabla 2 y en la Tabla 3, respectivamente.

and prismatic specimens (10x10x40 cm³) of cured and hardened CC, FRC, FRSCC and TFRSCC samples, at 7 and 28 days. Toughness indexes were calculated for the FRC and TFRSCC mixtures according to standards ASTM C1018-84 (ASTM, 1984) and ASTM C1018-89 (ASTM, 1989). Two series of TFRSCC were performed: the first one of them containing short PP fibers 12 mm long, and the second one PP fibers 19 mm long, for comparing and assessing the relationship between fiberlength and mechanical properties of this type of reinforced concrete.

Measurements concerning density and ultrasonic wave velocity in each hardened concrete specimens were carried out in laboratory room conditions, in order to calculate the Ultrasonic Young Modulus for each type of concrete tested. The ultrasonic velocity was measured by an E-46 IEP Control testing facility, operating at 0.5 kV. The Young Modulus E was calculated using the simplified well-known formula $E = \rho v^2$, being ρ (kg/m³) the density of each sample and v (m/s) the ultrasonic velocity in the same specimen in laboratory room conditions. Ordinary testing facilities were carried out to obtain compressive, indirect tensile strength and three-point flexural strength (on CC and FRC specimens). Four-point bending tests on SCC, FRSCC and TFRSCC samples were run in a Codein electromechanical dynamic test facility, equipped with a maximum load cell of 300 kN, and an independent stress-strain data register, to obtain the flexural strengths of the mixtures and the stress-strain relationships on which to calculate the toughness indexes of each mixture.

2.2. Materials

The concrete mixtures in this investigation were mainly composed of crushed Phonolite stone aggregate of volcanic origin (5/10 mm, 10/20 mm); fine aggregate (0/5 mm); natural pozzolanic blended Portland cements (sea water resistant), CEM II / B-P 32.5 R (UNE-EN 197-1:2000), with natural pozzolanic additions (21-35%, by weight of clinker) of volcanic origin, and fine siliceous sand (0/1 mm) from the close Sahara desert dunes. This fine sand is frequently transported by wind and marine streams to the CI beaches and valleys, piling up in big reservoirs where they are quarried by the mining industry and construction materials sector. Crushed coarse aggregates show moderate crushing resistance and low water absorption. Fine aggregate was composed by blending natural and crushed sands (at 50% by weight). The bulk oxide chemical composition of cement and the oxide composition of the volcanic phonolite used as coarse aggregate are presented in Table 2 and in Table 3, respectively. Natural fine sand,

Tabla 2 / Table 2
Composición en óxidos del cemento CEM II / B-P 32.5 R.
Bulk oxide composition of blended cement CEM II / B-P 32.5 R.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl-	LOI	H ₂ O	IR	ND
35.67	6.31	3.14	45.39	2.01	2.74	0.05	3.57	1.06	16.36	1.38

^a Planta de Cemento de Arguineguín (Gran Canaria, 2005. Datos del suministrador. % Peso) / Cement Plant of Arguineguín (Gran Canaria, 2005. Data from supplier. Wt.%).

Tabla 3 / Table 3
Composición del árido grueso (% peso).
Composition of coarse aggregate (wt. %).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	H ₂ O
60.80	15,80	5.61	0.75	0.58	0.40	5.23	7.68	1.12	0.05	1.66

^a Fonolita de origen volcánico. Arican S.A. Gran Canaria / Phonolite of volcanic origin. Arican S.A. Company. Gran Canaria.

Tabla 4 / Table 4
Composición química de las arenas del Sáhara (% Peso) (9).
Chemical composition of Sahara sands by weight % (9).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	%P.F.	%TOT
97.24	0.81	0.225	0.09	0.23	0.16	0.03	0.135	0.005	0.05	0.015	0.01	0.615	99.6

Las arenas finas del desierto del Sáhara son principalmente silíceas, como se muestra en la Tabla 4 (9).

from the Sahara desert dunes, is mainly siliceous as Table 4 reports (9).

Para obtener hormigones Autocompactables (SCC) se han añadido otras adiciones sólidas y aditivos líquidos superfluidificantes a los anteriores componentes principales. Con las adiciones de cenizas volantes de granulometría muy fina (Figura 1) se reduce completamente la segregación en las mezclas de SCC. Estas cenizas volantes se obtuvieron de la central térmica de Ponferrada (España). Su composición química ha sido descrita por Armesto y otros (10) y se resume en la Tabla 5. En la Tabla 6 se contienen las propiedades físicas y químicas de las cenizas volantes utilizadas en esta investigación, construida con el propósito de explorar su posible uso como adición puzolánica al cemento Portland para obtener cementos Portland compuestos. Existe buen acuerdo entre las propiedades medidas y las especificaciones de la normativa, lo que hace adecuadas a estas cenizas volantes para su consumo por la industria del cemento. Sin embargo, la aplicación principal de estas cenizas volantes en esta investigación fue emplearlas como finos en las mezclas para obtener hormigones autocompactables, sin segregación.

To obtain self compacting fresh concretes, solid additions and liquid chemical superplasticizers additives were mixed with the main components. Solid fly ashes of fine particle size gradation were used in the mixture to completely reduce the segregation in the SCC (Figure 1). These fly ashes come from a coal power plant in Ponferrada (Spain). Their chemical composition is reported in Table 5 from Armesto et al. (10). Table 6 reports the physical and chemical properties of fly ashes in this research, obtained to explore their performance as additions to Portland cement in order to obtain blended pozzolanic cements. The agreement with standard specifications is good and in fact they are currently consumed by the cement industry. Nevertheless, the main application in this work was to use the fly ashes as fine particulates additions to obtain self compacting fresh concretes, without segregation.

La distribución porcentual acumulada de tamaños de partículas (granulometría) de los demás componentes granulares en los hormigones de esta investigación se

Figure 1 contains the particle size distribution (PSD) of the granular materials used (cumulative finer fraction). The PSD of sands and gravel was determined by sieving.

Tabla 5 / Table 5
Composición en óxidos (% peso) de las cenizas volantes de la Central Térmica de Ponferrada (10).
Oxide Composition (wt. %) of Fly Ash from Ponferrada Coal Plant (10).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Ba (ppm)	Co (ppm)	Be (ppm)	Ce (ppm)
44.70	28.80	10.11	3.68	2.67	4.60	2.11	1.10	276	156	77	55	<10	<10

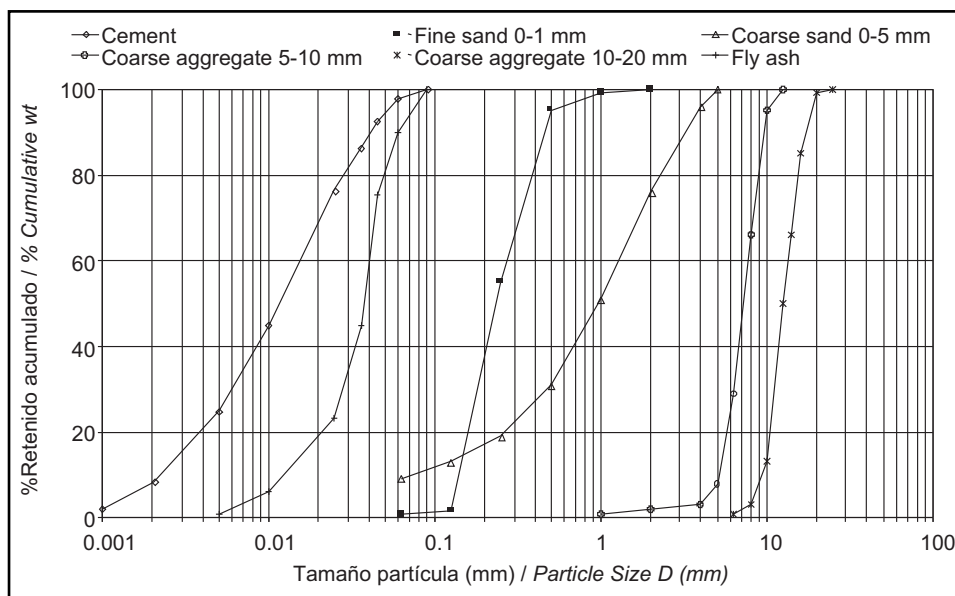


Figura 1. Distribuciones granulométricas del cemento, cenizas volantes arenas y árido grueso (porcentaje retenido acumulado).
 Figure 1. PSD of cement powders, fly ash powders, sand and coarse aggregates (cumulative finer mass fraction).

muestra también en la Figura 1. La granulometría de arenas y gravas se obtuvo por tamizado. La de los cementos por tamizado y microscopía electrónica de barrido (SEM). La de las cenizas volantes por microscopía óptica y SEM. En la Tabla 6 se muestran las propiedades físicas y químicas de las cenizas. Se utilizaron como superfluidificantes (UNE-EN 934-2) los productos ADVA 115 y ADVAFlow 340 de Grace Construction Products.

La mejora en la tenacidad de las mezclas de hormigones se ha investigado mediante adiciones en las mezclas de los hormigones estudiados de tres tipos diferentes de fibras cortas de Polipropileno. La fibra STRUX® 90/40 (longitud, 40 mm), la fibra MicroFiber® de PP (longitud, 19 mm), ambas de "Grace Construction Products", y la fibra Sikafiber® M-12 de PP (longitud, 12 mm), suministrada por "SIKA Company". Sus propiedades más importantes a los efectos de esta investigación son las siguientes (de las fichas técnicas de los suministradores): peso específico (0,92); absorción (cero); módulo de elasticidad (9,5 GPa); resistencia a tracción (620 MPa); temperatura de fusión (160 °C); temperatura de inflamación (590 °C). Todas las fibras empleadas en esta investigación presentan también elevada resistencia a los álcalis, a los ácidos y a las sales.

En la Tabla 7 se muestran las dosificaciones de los diferentes tipos de hormigones de esta investigación. Las probetas del hormigón de control y de FRC se fabricaron en moldes cúbicos de acero y en moldes prismáticos de madera, y se compactaron en una mesa vibradora evitando la segregación. Las probetas de hormigón SCC, FRSCC y TFRSCC se fabricaron en los mismos moldes pero no necesitaron vibrado para compactarse. Todas las

The PSD of cement powders was established by sieving and scanning electronic microscopy (SEM). The PSD of fly ash powders was obtained by SEM and optical microscopy. Table 6 shows the physical and chemical properties of fly ashes. Superplasticizers ADVA 115 and ADVA Flow 340 from Grace Construction Products (UNE EN 934-2), were used to make self compacting concretes mixture and specimens for testing.

Three different types of Polypropylene fibers were used to study the improvement of concrete toughness behaviour. Polypropylene (PP) STRUX® 90/40 (40 mm length); Grace MicroFiber® PP (19 mm length); both supplied by Grace Construction Products; Sikafiber® M-12 PP fiber (12 mm length), supplied by the SIKA Company. Properties stated by the supplier's technical report data sheet include: specific gravity (0.92), absorption (none), Modulus of elasticity (9.5 GPa). Tensile strength (620 MPa). Melting point (160 °C). Ignition point (590 °C). High alkali, acid & salt resistance.

Table 7 contains the mixture proportions to make the different types of concrete in this study. The ordinary control concrete and FRC specimens to be hardened have been poured in cubical, cylindrical cast steel and prismatic wooden moulds, and compacted on a vibration table, avoiding segregation. Control SCC concrete, FRSCC and TFRSCC, similarly moulded did not need vibration for compaction. The test pieces were water

Tabla 6 / Table 6
Propiedades físicas y químicas de las cenizas volantes de la Central Térmica de Ponferrada.
Fly Ash from Ponferrada Coal Plant. Physical and Chemical properties.

Propiedad / Property	Norma / Standard	Valor / Value	Especificación (como adición al cemento) / Specification (as cement addition)
Superficie específica tamizado en húmedo / Fineness by wet sieving	UNE-EN 451-2:1995	4040 cm ² /g	-
Densidad real / Real density	UNE 80103	2.37 g/cm ³	-
Contenido en humedad / Moisture content	UNE 83431 :1992	0.12%	<1.5%
Trióxido de azufre / Sulfur trioxide	UNE-EN 196-2:2006	0.30%	< 3%
Estabilidad de volumen (Le Chatelier) / Volume stability Le Chatelier	UNE-EN 196-3: 2005	0.25 mm	< 10 mm
Retenido acumulado tamiz 45 µm / Cumulative retained sieve 45 µm	UNE-EN 451-2:1995	24.6%	< 40%
Demanda de agua / Relative water demand	UNE 83452:1988	87.6%	< 100%
Índice de actividad / Activity Index @ 28 days	UNE-EN 196-1 and -3	83.9%	> 75%
Índice de actividad / Activity Index @ 90 days	UNE-EN 196-1 and -3	86.4%	> 85%
Óxido de Calcio / Calcium oxide	UNE-EN 451-1	0.03%	< 1% (or 2.5%)
Pérdida al fuego / Loss on ignition (LOI)	UNE-EN 196-2	8.30%	< 5%

probetas se curaron en agua a temperatura ambiente durante 3, 5 o 7 días, y se conservaron posteriormente en aire en condiciones ambientales de laboratorio, antes de ensayarlas a edades de 5, 7 o 28 días, respectivamente. Las propiedades reológicas de muestras de hormigón fresco se evaluaron mediante los procedimientos de ensayo de rutina.

cured during 3, 5 or 7 days, and conserved at room conditions before testing at ages of 5, 7, or 28 days, respectively. Rheological properties of fresh concrete samples were assessed by means of routine testing procedures.

Tabla 7 / Table 7
Dosificación de los diferentes hormigones de esta investigación.
Mix proportions of different types of concrete in this research.

	CC	FRC			SCC	FRSCC		TFRSCC (ECC)		
		0.2%	0.4%	0.8%		0.2%	0.4%	100% SS*	70% SS*	50% SS*
CEM II / B-P 32.5R (kg/m ³)	320	320	320	320	350	350	350	650	650	650
Arena fina del Sáhara 0/1 (kg/m ³) / Fine Sahara sand 0/1 (kg/m ³)	326	326	326	356	350	350	350	552	386	276
Arena gruesa 0/5 (kg/m ³) / Coarse sand 0/5 (kg/m ³)	489	489	489	459	600	600	600		166	166
Árido grueso 5/10 (kg/m ³) / Coarse aggregate 5/10 (kg/m ³)	382	382	382	382	850	850	850			110
Árido grueso 10/20 (kg/m ³) / Coarse aggregate 10/20 (kg/m ³)	623	623	623	623						
Cenizas volantes (kg/m ³) / Fly ash (kg/m ³)					155	162	170	828	828	828
Superfluidificante ADVA 115 (kg/m ³) / Superplasticizer ADVA 115 (kg/m ³)		0.96	1.92	2.88						
Superfluidificante ADVA 115 (kg/m ³) / Superplasticizer ADVA Flor 340 (kg/m ³)					6.06	6.14	6.76	20.7	20.7	20.7
Agua (dm ³ /m ³) / Water (dm ³ /m ³)	195	195	195	195	210	210	210	357.5	357.5	357.5
Fibras PP 40 mm (% fracción volumétrica) / PP Fibers 40 mm (% volume fraction)		0.2	0.4	0.8						
Fibras 12 mm or 19 mm (% fracción volumétrica) / PP Fibers 12 mm or 19 mm (% volume fraction)								2	2	2
Relación agua/cemento (peso) / Water/cement ratio by weight	0.61	0.61	0.61	0.61	0.6	0.6	0.6	0.55	0.55	0.55

* SS: Arena fina del Sáhara (0/1) / SS: Fine Sahara sand (0/1).

Se dosificaron tres tipos diferentes de mezclas TFRSCC (Tabla 7) con alto contenido en cemento (650 kg/m^3) variando la proporción de arenas finas del Sáhara (SS). La primera, un microhormigón sin árido grueso ni arena gruesa (100% SS, como árido) en la mezcla; la segunda, con el 70% de SS respecto del árido total en peso (SS(70%) + arena gruesa(30%)); la tercera incorporaba el 50% de SS respecto del árido total (SS(50%) + arena gruesa (30%)+ árido grueso 5/10 mm (20%)). Estos TFRSCC no pudieron compararse con el hormigón de control SCC, por la diferencia notable entre sus dosificaciones.

3. RESULTADOS

Las propiedades físicas y mecánicas de los hormigones estudiados en esta investigación se recogen en la Tabla 8. Se midió la consistencia de muestras de hormigón fresco de cada dosificación: descenso del cono de Abrams, tiempo Vebe o escurrimiento (diámetro medio de la torta), según sus características. Cada uno de los valores mostrados del Módulo de Young por ultrasonidos se obtuvo haciendo el promedio de cuatro medidas del Módulo de Young sobre cuatro probetas diferentes de hormigón curado y endurecido de la misma dosificación, midiendo densidad y velocidad sobre la misma probeta para calcular su Módulo de Young con la fórmula usual (cfr. §2, in fine). Cada una de las propiedades mecánicas incluidas en la Tabla 8 se obtuvo como la media de medidas sobre dos probetas diferentes de cada dosificación.

La trabajabilidad del hormigón fresco FRC resultó peor que la del hormigón de control CC, para cualquier fracción volumétrica de fibra. A medida que aumenta el contenido en fibra en la mezcla en las cantidades indicadas, el tiempo Vebe $t(s)$ de las muestras de hormigón fresco FRC también se incrementa (Figura 2), evolucionando desde consistencia seca a muy seca y extremadamente seca, respectivamente. Los tiempos Vebe y sus correspondientes fracciones volumétricas de fibra se ajustan con precisión a una ley exponencial ($R^2=0,9948$).

Three types of TFRSCC mixtures (Table 7) with high cement content (650 kg/m^3) were designed having different contents of Fine Sahara Sand (SS). The first one was a Microconcrete without containing coarse sand or aggregates (100% SS) in the mixture; the second one, contained 70% of SS in relation with the total aggregates (SS(70%) + coarse sand(30%)); the third one, incorporated 50% of SS relative to its total aggregate content in the mix (SS(50%) + coarse sand (30%)+ coarse aggregate 5/10 mm (20%)). TFRSCC could not be compared with the control SCC, because the mixture proportions were quite different.

3. RESULTS

Experimental measurements of physical and mechanical properties of concretes studied in this research are reported in Table 8. Slump, slump-flow and Vebe time were measured on each batch. Density and ultrasonic velocity were measured for each of the four specimens with the same mixture proportions. Having obtained these values the Young Modulus was calculated (see §2, in fine) for each specimen. Afterwards the mean of these four Young Modules data is included in Table 8, and using the usual formula referred above (see §2, in fine) Each of the other mechanical properties, also reported in Table 8, were obtained as the mean value of two different specimens tested.

Workability of fresh FRC was worse than that of CC, irrespective of its fiber volume fraction. As the fiber content increases in the referred volume fractions, the Vebe time $t(s)$ of fresh FRC samples increases too (Figure 2), evolving from stiff to very stiff, dry and extremely dry consistency, respectively. The Vebe times and their correspondent fiber volume fractions relationship closely fits an exponential law ($R^2=0.9948$).

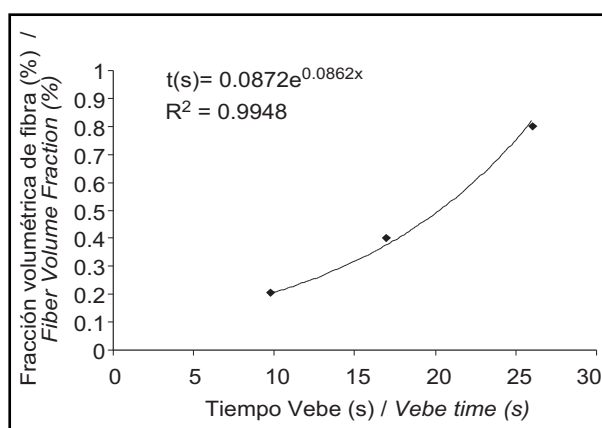


Figura 2. Relación entre el tiempo Vebe (s) y la fracción volumétrica de fibras en el FRC.
Figure 2. Relationship between Vebe time and Fiber Volume Fraction of FRC.

Tabla 8 / Table 8
Propiedades físicas y mecánicas.
Physical and mechanical properties.

Propiedad / Property	CC	FRC			SCC	FRSCC	
		0.2%	0.4%	0.8%		0.2%	0.4%
Consistencia / Description	Plástica / Stiff-Plastic	Seca / Stiff	Muy seca / Very stiff	Extremadamente seca / Extremely dry	Autocompactante / Self-compacting		
Descenso Cono Abrams (cm) / Slump A-C (cm)	6	-	-				
Tiempo Vebe (s) / Vebe time (s)	-	10	17	26			
Escurrimiento (cm) / Slump-flow diameter (cm)					70	66	65
Módulo de Young ultrasónico (GPa)28 días / Ultrasonic Young Modulus (GPa)28 days	42.28	37.35	34.42	33.00	49.90	45.90	45.60
Densidad (g/cm ³) 28 días / Density (g/cm ³) 28 days	2.30	2.29	2.27	2.26	2.37	2.32	2.30
Resistencia compression 28 días (MPa) / Compressive strength 28 days (MPa)	29.30	31.80	29.60	28.00	39.40	37.30	37.00
Resistencia tracción indirecta 28 días (MPa) / Indirect tensile strength 28 days (MPa)	3.00	3.25	3.50	4.26	-	-	-
Módulo de ruptura (MOR) 28 días (MPa) / Modulus of rupture (MOR) 28 days (MPa)	5.60	4.47	4.42	4.30	4.23	2.92	3.84
Índices de tenacidad / Toughness Indexes							
I5	1	3.40	3.45	4.00	1	1.77	2.21
I10	1	5.29	5.83	6.86	1	2.72	3.73
I20	1	10.16	11.85	12.70	1	4.55	6.71
I30	1	13.22	14.37	16.86	1	6.25	9.62
Propiedad / Property	TFRSCC (ECC) PP 12 mm			TFRSCC (ECC) PP19 mm			
	100% SS	70% SS	50% SS	100% SS	70% SS	50% SS	
Escurrimiento (cm) / Slump-flow diameter (cm)	71	66	63	65	64	63	
Módulo de Young ultrasónico (GPa)28 días / Ultrasonic Young Modulus (GPa)28 days	31.26	29.72	30.75	30.45	29.72	30.67	
Densidad (g/cm ³) 28 días / Density (g/cm ³) 28 days	2.02	2.01	2.00	2.01	2.00	1.99	
Resistencia compression 28 días (MPa) / Compressive strength 28 days (MPa)	42.30	35.70	33.10	37.00	33.30	35.20	
Módulo de ruptura (MOR) 28 días (MPa) / Modulus of rupture (MOR) 28 days (MPa)	4.99	5.60	5.25	4.21	4.32	4.35	
Índices de tenacidad / Toughness Indexes							
I5		5.31	6.50	6.47	5.60	6.17	6.05
I10		9.61	16.84	13.27	9.73	13.54	11.77
I20		13.92	29.69	19.60	11.75	19.35	13.72
I30		14.23	31.99	19.60	11.75	19.35	13.72

Las mezclas de FRSCC se comportaron en estado fresco como hormigones autocompactables, aunque contenían fracciones volumétricas semejantes a las dosificaciones de los FRC, con longitudes de fibras similares. Estos últimos, los FRC, presentaron consistencias secas y muy secas (en ensayos Vebe) para contenidos de fibra de fracciones volumétricas 0,2% o 0,4%, respectivamente. Sin embargo y de manera sorprendente, las mezclas TFRSCC exhibieron un nuevo comportamiento inesperado

The FRSCC mixtures behaved as self-compacting in fresh conditions, although they contained similar fiber volume fractions and lengths to those of the FRC mixtures, which on the contrary, showed stiff and very stiff consistency (under Vebe tests), for 0.2% and 0.4% fiber volume fractions, respectively. TFRSCC mixtures showed a new unexpected behaviour in fresh and in hardened conditions related to the other concretes in this study. In fact, FRSCC mixtures, having 0.2% or 0.4% volume

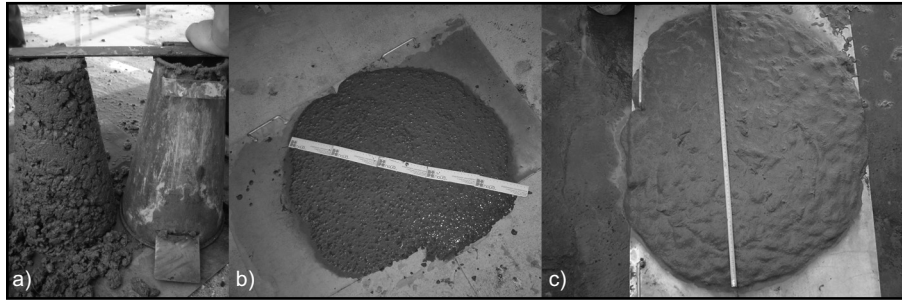


Figura 3. a) Cono de Abrams del FRC (0,2% fracción volumétrica, longitud de las fibras, 40 mm); b) Escurrimiento del FRSCC (0,2% fracción volumétrica, longitud de las fibras, 40 mm); c) Escurrimiento del TFRSCC (2% fracción volumétrica de fibra, longitud de las fibras, 12 mm).

Figure 3. a) Slump cone of fresh FRC (0.2% fiber volume fraction. 40 mm fiber length); b) Slump flow diameter of fresh FRSCC (0.2% fiber volume fraction. 40 mm fiber length); c) Slump flow diameter of fresh TFRSCC (2% fiber volume fraction. 12 mm fiber length).

en estado fresco, y curado y endurecido, en relación con las correspondientes propiedades de las otras dosificaciones de este estudio. En efecto, los hormigones FRSCC con 0,2% o 0,4% de fracción volumétrica de fibras de 40 mm de longitud tuvieron comportamiento SCC en estado fresco, sin segregación. Por otra parte, las dosificaciones de los hormigones TFRSCC que contenían una cantidad de fibra mucho mayor (fracción volumétrica del 2%, es decir, diez o cinco veces mayor que la correspondiente de los FRSCC), aunque de menores longitudes, 12 mm o 19 mm, también se comportaron con características de hormigón autocompactable en ensayos de consistencia (Figura 3).

El escurrimiento medio de las dosificaciones de control SCC fue de 70 cm. Los valores medios medidos de los diámetros de escurrimiento de los hormigones FRSCC y TFRSCC estaban comprendidos entre 66 cm y 65 cm, respectivamente. Por otra parte, al aumentar la longitud de las fibras cortas en los hormigones TFRSCC desde 12 mm hasta 19 mm, disminuía el comportamiento SCC de estas mezclas, aunque sin perder esta característica de autocompactables, para estas pequeñas adiciones de fibras cortas, bien controladas (2% en volumen, en esta investigación). Sin

fractions of 40 mm length fibers, showed SCC behaviour in fresh conditions without segregation. On the other hand, the TFRSCC mixtures that contained remarkable higher fiber volume fractions (2%, that is to say, ten or five times higher than the FRSCC ones) although of shorter lengths, 12 mm or 19 mm, showed also the same SCC behaviour in slump testing (Figure 3).

A mean value of 70 cm the slump-flow diameter was obtained for a batch of Control SCC fresh samples. The slump-flow diameter of FRSCC and TFRSCC diminished to mean values comprises between 66 cm and 65 cm, respectively. At the same time, increasing the fibre length in the TFRSCC from 12 to 19 mm, the SCC behaviour decreases although this concrete does not loose this property for small and well controlled short fiber additions (2% by volume, in this research). Nevertheless, the influence of the fibre length in the self

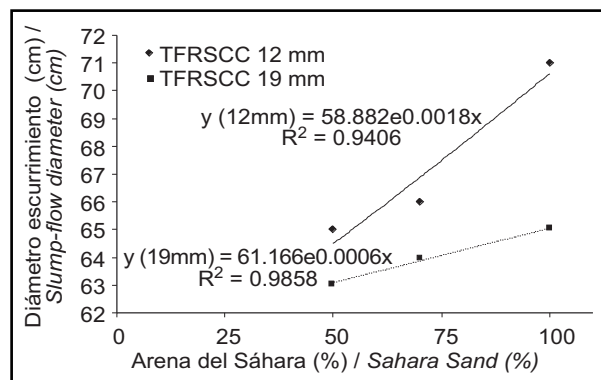


Figura 4. Medidas del escurrimiento (diámetro medio, cm) sobre muestras de hormigón fresco TFRSCC con fibras cortas de 12 mm y 19 mm, respectivamente, en relación con la fracción volumétrica (%) de arena fina del Sáhara en las dosificaciones.

Figure 4. Slump-flow diameter measurements on samples of fresh TFRSCC containing fibers 12 mm and 19 mm length, respectively, in relation with the aggregate weight fraction (%) of fine Sahara Sand in the concrete mixtures.

embargo, la influencia de la longitud de la fibra en las propiedades de autocompactabilidad de los hormigones está también relacionada con los contenidos de arenas finas en las dosificaciones (Figura 4). Las probetas de TFRSCC endurecido a 28 días de edad muestran un incremento destacable de la resistencia a flexión (Módulo de ruptura, MOR) y en los índices de tenacidad (Tabla 8), obtenidos en ensayos de flexión a cuatro puntos (Figura 5).

compacting properties of concrete is closely related to the finest sand content in the mixture (Figure 4). Hardened TFRSCC specimens aged 28 days show a remarkable increase of the flexural strengths (Modulus of Rupture: MOR) and toughness indexes (Table 8), in four-point bending tests (Figure 5).

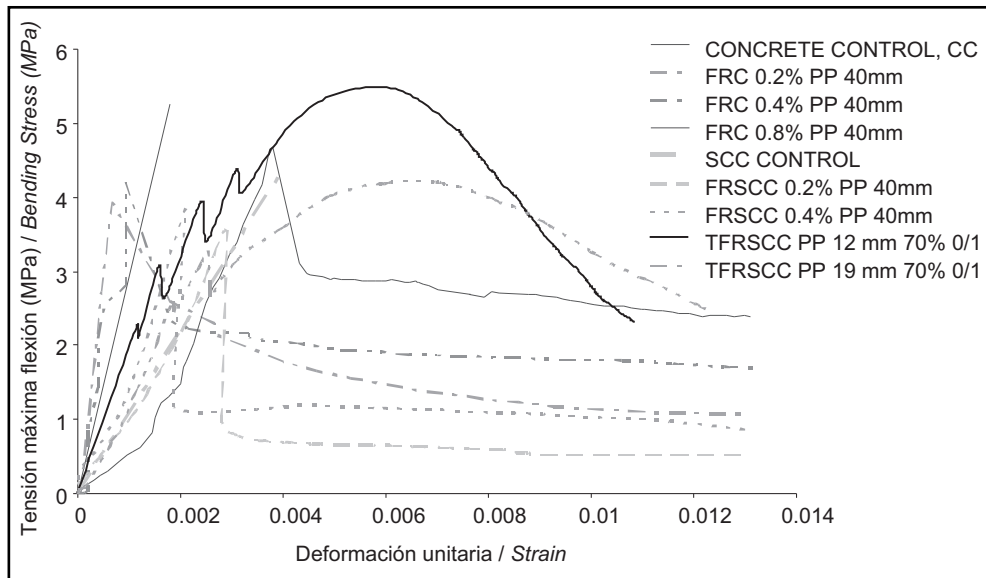


Figura 5. Relaciones experimentales tensión-deformación de probetas de los hormigones investigados, edad 28 días, en ensayos a flexión.

Figure 5. Experimental stress-strain relationship in bending tests on prismatic samples of the different concretes mixes investigated aged 28 days.

4. DISCUSIÓN

Como era de esperar, la adición de fibras de PP de 40 mm de longitud aumentó la tenacidad de las probetas ensayadas, tanto en los FRC como en los FRSCC. Los aumentos de tenacidad y del MOR en las dosificaciones de los FRC fueron mayores que los que se dieron en las dosificaciones de FRSCC, con relación a sus respectivas dosificaciones de control.

Los hormigones TFRSCC investigados se dosificaron con una fracción volumétrica del 2% de fibra de PP (de longitudes 12 mm y 19 mm). Mostraron un nuevo e inesperado mejor comportamiento tanto en estado fresco como en estado endurecido, con relación a las otras mezclas estudiadas y es pertinente compararlos entre sí para destacar las elevadas prestaciones de los TFRSCC, derivadas de su dosificación. Se obtuvieron aumentando el contenido en cemento hasta 650 kg/m³, suprimiendo la fracción mayor de árido grueso (10/20 mm), reduciendo o suprimiendo la fracción menor de árido grueso (5/10 mm) y arena gruesa (0/5 mm), incrementando de manera destacada las proporciones en la mezcla de cenizas

4. DISCUSSION

As it was expected, the additions of PP fibers 40 mm long increase the concrete specimens' toughness both, in FRC and in FRSCC. The toughness and Modulus of Rupture (MOR) increases of FRC mixtures were higher than those of FRSCC in relation with their respective control concrete mixtures.

TFRSCC mixtures in this work, having 2% fiber volume fraction (of 12 mm and 19 mm lengths), show a new unexpected better behaviour in fresh and in hardened conditions regarding other concretes in this study. The comparison between them is pertinent in order to remark the high performance of TFRSCC, in their mixture proportions. They were obtained increasing the cement content to 650 kg/m³, suppressing the higher fraction of coarse aggregate (10/20 mm), reducing or suppressing the lower fraction of coarse aggregate (5/10 mm), noticeably increasing the fly ash and Superplasticizer proportions in the mixture and with higher fine Sahara sand (0/1 mm) ratio in concrete. These new mixtures

volantes y de arenas finas del Sáhara (0/1 mm). Estas nuevas dosificaciones alcanzaron buen comportamiento autocompactable en ensayos de escurrimiento, y aumentos en los índices de tenacidad y MOR respecto de las dosificaciones de los FRSCC.

De este modo, desde el bien conocido clásico comportamiento mecánico de los FRSCC en ensayos a flexión, se obtuvo uno nuevo, designado aquí TFRSCC, semejante al de los celebrados ECC en flexión, mostrando también propiedades de cuasi-endurecimiento por deformación y un sensible aumento de la tenacidad, aunque empleando únicamente fibras cortas de PP ordinarias, sin ensimaje en su superficie y, por ello, de menor coste que las correspondientes fibras recomendadas por otros autores para obtener un comportamiento semejante (5). Estos resultados están en concordancia y buen acuerdo con reportados por di Prisco y colegas (6).

Los diámetros de escurrimiento medidos en ambos TFRSCC con fibras cortas aumentan exponencialmente con el porcentaje de arena fina del Sáhara en las dosificaciones (Figura 4). La pendiente es mayor para los TFRSCC con longitudes menores de las fibras cortas (12 mm) que para los TFRSCC con fibras de mayor longitud (19 mm), lo que demuestra mayor sensibilidad a las adiciones de arenas finas en las mezclas con fibras más cortas que en las que contienen fibras de mayor longitud. Los dos ajustes exponenciales presentan elevados valores de R^2 , lo que demuestra la fiabilidad de esta tendencia: el comportamiento autocompactable es mejor cuanto mayor es el contenido en arena fina del hormigón fresco que de esta manera compensa la influencia negativa sobre la consistencia de la mayor longitud de las fibras cortas en las dosificaciones de hormigones con fibras.

El tiempo Vebe y la fracción volumétrica de fibra corta ajusta muy bien a una ley exponencial ($R^2=0,9948$), mostrando que en los FRC cada incremento de tiempo Vebe es proporcional al incremento relativo de cantidad de fibra sobre su contenido actual, lo que sugiere que se puede utilizar como un buen parámetro para evaluar el contenido real de fibra corta en muestras de hormigón fresco en obra o en la planta de hormigonado.

El origen volcánico de los áridos en esta investigación merece alguna discusión. El contenido en álcalis del árido grueso es elevado (12,91%), de acuerdo con los datos del suministrador. Sin embargo, según los conocimientos de los autores, no hay evidencias consignadas en los antecedentes de reactividad árido-álcali en hormigones dosificados en las IC mezclando estos áridos con cementos Pórtland con elevadas proporciones de puzolanas naturales de origen volcánico (11). Las razones para este comportamiento son bien conocidas, ya que para iniciar y mantener reacciones árido-álcali en el hormigón

attained good SCC slump-flow behaviour, and increases in toughness indexes and MOR, in relation with FRSCC mixtures.

Therefore, from the well-known mechanical behaviour of the FRSCC mixtures in flexural tests a new one was obtained, here named TFRSCC, similar to that of the celebrated ECC material in flexure. In fact, the TFRSCC mixtures showed a quasi-hardening behaviour and a toughness increase, by the addition of ordinary PP fibers, without any sizing on the fiber surface and therefore, at lower cost than the fibers recommended elsewhere to obtain ECC behaviour (5). These results in this work are in close agreement with those reported by di Prisco and colleagues (6).

The slump-flow diameters measured on both TFRSCCs increase exponentially with the fine Sahara sands percentage in the mixtures (Figure 4). The slope is higher for SCC with shorter fibers (of 12 mm length) than for SCC containing longer fibers (19 mm long), which demonstrates higher rate sensibility to fine sand additions in the mixtures with shorter fibers than in the mixtures with longer fibers. The two exponentially fitted curves displayed show high R^2 values, demonstrating the sound fit to this tendency: the better self compact behaviour the greater the fine sand content in the concrete, which can compensate the negative influence of higher fiber lengths on the slump of fresh fiber concrete.

The Vebe time and the fiber volume fraction relationship closely fits to an exponential law ($R^2=0.9948$), showing that in FRCs each Vebe time increment is proportional to the relative increase of fiber over its actual content. This suggests that it can be used as a good parameter to assess the real fiber content of fresh samples on site.

The volcanic origin of aggregates in this work claims some discussion. The alkali content in the volcanic coarse aggregate is high (12.91%), in accordance with the supplier data. Nevertheless, to the author's knowledge, there is no historical reported evidence for alkali-silica reactivity in concrete carried out in the CI mixing these aggregates with blended cements with high percentage of Natural Pozzolan of volcanic origin (11). The reasons of this behaviour are well known, because to initiate and sustain alkali-aggregate reactions in concrete three conditions must be accomplished: (1) aggregates potentially reactive;

han de darse simultáneamente tres condiciones: (1) que los áridos sean potencialmente reactivos; (2) elevada concentración de álcalis en solución en los poros del hormigón; y (3) elevadas condiciones de humedad (12). La tercera condición no es corriente en las IC, ya que su clima es más bien templado, marino y predominantemente seco, no es un clima húmedo. Las puzolanas de las IC mezcladas en el cemento son muy activas en convertir cal hidratada en más contenido en silicatos de calcio hidratados (CSH), reduciendo la porosidad total en la pasta de cemento e incrementando la resistencia de los enlaces en la intercara entre los áridos y la pasta de cemento hidratada. Además de lo que antecede, los áridos empleados en la fabricación de los hormigones en esta investigación no mostraron reactividad árido-álcali en los ensayos normalizados en laboratorio (UNE-EN 146507-1, 2).

5. CONCLUSIONES

Se han obtenido hormigones autocompactables con un incremento destacable de tenacidad y comportamiento similar al de endurecimiento por deformación, en ensayos de flexión, designados en esta investigación como TFRSCC. Estos hormigones se han dosificado aumentando el contenido de cemento a 650 kg/m^3 , suprimiendo la fracción de mayor tamaño del árido grueso (10/20 mm) y reduciendo o suprimiendo también la fracción de menor tamaño de árido grueso (5/10 mm); además se ha reducido considerablemente la fracción de arena gruesa (0/5 mm), o suprimido en algunas dosificaciones, sustituyéndola por una mayor fracción de cenizas volantes y arenas finas (0/1 mm). A estas mezclas se han añadido fracciones volumétricas del 2% de fibras cortas de Polipropileno (PP) de longitudes 12 mm y 19 mm, sin ensimaje. La dosificación de estos hormigones demandó una mayor cantidad de aditivos superfluidificantes, manteniendo una relación agua/cemento de 0,55.

Se dosificaron también otras mezclas de hormigones autocompactables reforzados con fibras de PP de mayor longitud, 40 mm, designados aquí FRSCC, con menores fracciones volumétricas de fibras (0,2% y 0,4%). Estos hormigones se han dosificado con 350 kg/m^3 de cemento y una relación agua/cemento de 0,6. También incorporan cenizas volantes en menor proporción, arenas finas y gruesas y árido grueso de la fracción 5/10 mm. En estado fresco son autocompactables pero carecen del comportamiento de cuasi-endurecimiento por deformación que muestran las dosificaciones de TFRSCC, sino el clásico comportamiento en flexión hasta rotura de los hormigones reforzados con fibras cortas. La dosificación de estos hormigones demandó mucha menor cantidad de superfluidificante que la de los TFRSCC.

(2) high alkali concentration in the concrete pore solution; and (3) high humidity conditions (12). The third condition is not common in the CI as its weather is rather mild, marine and predominantly dry climate; there is not a humid climate. The CI pozzolans blended in the cement are quite active in converting hydrated lime into additional Calcium Silicate Hydrates (CSH), reducing the total porosity in the cement paste and increasing the bonding strength at the hydrated cement-aggregate interface. This reduction of porosity in mass concrete increases the protection of the steel rebars against corrosion. In this way, the high alkali percentage in the volcanic pozzolans saturates the cement paste consuming its free hydrated lime and mitigates the alkali-silica reaction in the interface between the hydrated cement paste and the aggregates. In addition, the aggregates used to manufacture the concrete in this research did not show alkali-silica reactivity under the standard laboratory tests (UNE-EN 146507-1 and 2).

5. CONCLUSIONS

Self Compacting Concretes have been obtained (TFRSCC) showing remarkable toughness increases and quasi-strain hardening behaviour in flexural tests, here named as TFRSCC. The mixture proportions of these fiber reinforced SCC were designed increasing the cement content at 650 kg/m^3 , suppressing the higher coarse aggregate fraction (10/20 mm) and limiting or discharging the lower coarse aggregate fraction (5/10 mm). At the same time, the coarse sand ratio (0/5 mm) was severely reduced or completely suppressed in some mixtures (100% SS), being substituted by a higher fly ash and fine Sahara sand (0/1 mm) proportions. These mixtures contained 2% short PP fiber volume fraction of 12 mm and 19 mm lengths, without fiber sizing. These mixture proportions demanded higher Superplasticizers additions to maintain the water/cement ratio at 0.55.

Other mixture proportions of SCC reinforced with longer PP fibres (of 40 mm length) here named FRSCC were researched, having lower short fibre volume fractions (0.2% and 0.4%). Mixture proportions were: cement 350 kg/m^3 ; 0.6 water/cement ratio. They contained in a lower fractions fly ashes, fine and coarse sands and coarse aggregates of the lower fraction (5/10 mm). These mixtures showed self compacting fresh behaviour, but their hardened mechanical behaviour did not present quasi-strain hardening, as TFRSCC mixtures did, but rather the classical flexural mechanical behaviour of FRC composites before failure. The mixture proportions of these FRSCC demanded lower Superplasticizers additions than TFRSCC.

Todas las dosificaciones de hormigones autocompactables reforzados con fibras cortas investigadas mostraron elevados índices de tenacidad y valores altos del módulo de rotura en flexión. Sin embargo, los FRSCC dieron menores valores del módulo de rotura a flexión y de los Índices de tenacidad que FRC, no autocompactables. Las dosificaciones de los hormigones TFRSCC presentaron globalmente mejores propiedades mecánicas que los FRC, tanto en módulo de ruptura como en índices de tenacidad.

Every short fibre SCC mixtures here investigated showed high values of toughness indexes, and high values of the Modulus of Rupture (MOR). Nevertheless, the mixtures FRSCC showed lower MOR and toughness indexes increase than the not SCC FRC mixtures, in relation with their respective control mixtures. The hardened mixtures corresponding to TFRSCC showed better mechanical performance than the FRSCC hardened mixtures: MOR and toughness indexes.

AGRADECIMIENTOS

Isabel Salto-Weis, de la Universidad Politécnica de Madrid, revisó la ortografía y gramática del texto inglés de este artículo.

ACKNOWLEDGEMENTS

Isabel Salto-Weis from Polytechnic University of Madrid, for the English language revision.

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Balaguru, P. N.; Shah, S. P.: "Plastic and early drying shrinkage", *Fiber Reinforced Cement Composites*, McGraw-Hill (1992).
- (2) Barluenga, G.; Hernández-Olivares, F.: "Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC", *Cem Concr Res*, vol. 37, (2007), pp. 1624-1638. doi:10.1016/j.cemconres.2007.08.019
- (3) Zhu, W.; Gibbs, J. C.; Bartos, P. J. M.: "Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements", *Cem. Concr. Comp*, vol. 23, (2001), pp. 57-64. doi:10.1016/S0958-9465(00)00053-6
- (4) Gettu, R.: "Fibre Reinforced Concrete: design and applications", BEFIB 2008, Bagnaux, France, *RILEM Publications S.A.R.L.*; PRO60 (2008).
- (5) Li, V. C.: "From micromechanics to structural engineering—the design of cementitious composites for civil engineering applications", *JSCCE J Struct Mech Earthq Eng*, vol. 10, nº 2 (1993), pp. 37-48.
- (6) Prisco, M. di; Plizzari, G.; Vandewalle, L.: "Fibre reinforced concrete: new design perspectives", *Materials and Structures*, RILEM (2009) Online First. DOI 10.1617/s11527-009-9529-4.
- (7) Bentur, A.; Mitchell, D.: "Material performance lessons", *Cem Concr Res*, vol. 38 (2008), pp. 259-272. doi:10.1016/j.cemconres.2007.09.009
- (8) EHE 2008. RD 1247/2008. BOE 203 (22/08/2008; Supplement), pp. 35176.
- (9) Taфраoui, A.; Lebailli, S.; Slimani, A.: "Study Physico-Chemical of the Sand of the Western Erg of the Area of Saoura (Western South Algeria)", *Research J. of Applied Sciences* 1 (1-4): 1-6 (2006), Medwell Online, 2006.
- (10) Armesto, L.; Merino, J. L.; Cabanillas, A.: Characterization of AFBC and PFBC residues. 8th International Conference on Coal Science. Proceedings (ISBN: 0-444-82227-5). Pajares, J. A.; Tascon, J. M.; Eds. Elsevier. Oviedo-Spain (1995).
- (11) Lomoschitz, A. *et al.*: "Basaltic Lapilli Used for Construction Purposes in the Canary Islands, Spain", *Environmental and Engineering Geoscience*, vol. 12, nº 4 (2006), pp. 327-337. doi:10.2113/gsegeosci.12.4.327
- (12) Bérubé, M. A.; Duchesne, J.; Dorion, J. F.; Rivest, M.: "Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity", *Cement and Concrete Research*, vol. 32 (2002), pp. 1215-1227. doi:10.1016/S0008-8846(02)00766-4

* * *