

Caracterización físico-mecánica de materiales cementicios puzolánicos avanzados y autocompactantes reforzados con fibras cortas de polipropileno

G. Melián

Profesor Doctor Contratado. Escuela Técnica Superior de Estudios Integrados de Arquitectura. Universidad SEK de Segovia, España.

G. Barluenga

Profesor Titular Interino. Departamento de Arquitectura de la ETS de Arquitectura, Universidad de Alcalá de Henares, España.

F. Hernández - Olivares

Catedrático de Universidad. Departamento de Construcción y Tecnología de la ETSA, Universidad Politécnica de Madrid, España.

J.M. Pérez

Profesor Titular de Universidad. Departamento de Construcción Arquitectónica de la ETSA, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España.

N. Flores

Becario de Investigación. Departamento de Construcción Arquitectónica de la ETSA, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España.

RESUMEN

Este artículo presenta el comportamiento de un hormigón al incorporarle distintos tipos de fibras de polipropileno y al variar sus composiciones. El fin principal del estudio es conseguir un material cementicio avanzado con la mayor ductilidad posible, de tal forma que cuando se produzca un fallo estructural la matriz cementicia tenga mayor capacidad de resistencia. Además también se buscaba conseguir que dicho material fuera autocompactante.

Los materiales componentes son de las Islas Canarias (España), de ahí la singularidad del material de control y del resto de materiales desarrollado. La resistencia del hormigón de control es 29 MPa a compresión a 28 días sin ningún tipo de adición. Se diseña un Fiber Reinforced Concrete (FRC) al incorporar diferentes fracciones volumétricas de fibras de polipropileno (PP) de 40 mm. (0,2%; 0,4% y 0,8%). Posteriormente se trabajó con un Self Compacting Concrete (SCC) y un Fiber Reinforced Self Compacting Concrete (FRSCC) con las mismas fibras del FRC pero con diferentes fracciones volumétricas (0,2% y 0,4%). Por último creamos un Engineered Cementitious Composite (ECC) con matriz cementicia puzolánica y árido procedente de las Islas Canarias con adiciones de fibras de PP de 19mm y 12mm.

En este artículo podemos ver como partiendo de un material de extrema fragilidad conseguimos diferentes materiales con diferentes comportamientos tenaces, dúctiles y autocompactos.

1. INTRODUCCIÓN

Los hormigones en Canarias no son sólo únicos por su situación geográfica o climatológica, sino también porque los propios componentes que los forman son

endémicos del lugar. Actualmente en estos hormigones canarios para la edificación sólo se tienen en cuenta si las resistencias resultantes a 28 días están en torno a los 25 y 30 MPa. Sin embargo, dada la importancia del ambiente marino en que se encuentran estos hormigones, existen otras muchas preocupaciones que están empezando a cobrar protagonismo. Como son por ejemplo los comportamientos mecánicos de estos hormigones ante fenómenos climatológicos, acciones sísmicas y vientos constantes y de altas velocidades. Por esta razón el objetivo principal de esta investigación es conseguir mejoras mecánicas (menor rigidez y mayor ductilidad) y físicas (autocompactabilidad) de los materiales cementicios canarios mediante la utilización de diferentes materiales cementicios con refuerzos de fibras sin sacrificar la resistencia de los mismos.

Los componentes de los hormigones canarios, áridos y cementos, son endémicos del lugar. Los áridos empleados son de carácter volcánico, principalmente fonolitas y basaltos que se extraen de canteras en las islas mediante métodos de machaqueo, a través de los cuales se obtienen las distintas granulometrías (normalmente 0/5, 5/10 y 10/20). Además se suele emplear como fino (0/1) arena del desierto del Sahara (Guigou 1990). Por otro lado los cementos utilizados realizados en Canarias poseen una característica común: la adición de una puzolana natural a la mezcla general de cal, sílice, hierro y aluminio. Esta puzolana proporciona al cemento una mayor durabilidad química, una mayor compacidad e impermeabilidad, un menor calor de hidratación y, por último, también contrarresta las expansiones producidas por la presencia de cal y magnesio libre (Pérez 1991). En la actualidad existen varias líneas abiertas en la investigación de estos hormigones, y habría que destacar la desarrollada por R. Santana con hormigones autocompactos pigmentados (Santana 2004).

En esta investigación se intenta seguir con las investigaciones que existen en España en estos momentos sobre materiales cementicios con fibras y también con las que se están realizando con carácter internacional. En el ámbito español existen varias líneas de investigación abiertas sobre hormigones reforzados con fibras que tienen repercusión en el entorno internacional. Entre ellas cabe destacar tres: las que realizan en Barcelona M. por R. Gettu y su equipo (Barragan, Gettu, Martin, Zerbino, et al. 2003; Gettu, Gardner, Saldivar y Barragan, et al. 2005; Barragan, Gettu, Agullo y Zerbino, et al. 2006), y las dos realizadas en Madrid, una llevada a cabo por F. Hernández-Olivares y G. Barluenga (Hernández-Olivares, et al. 2002; Hernández-Olivares, et al. 2003; Hernández-Olivares y Barluenga et al. 2004) y otra por M. Fernández Cánovas (Fernández-Cánovas 2003; 2004).

En cuanto al ámbito internacional hay que destacar las investigaciones realizadas con Engineered Cementitious Composite (ECC). El ECC es un compuesto cementicio de última generación mezclado con altos contenidos de fibras (por encima del 2%) y elaborado con finos, cemento, cenizas volantes y aditivos. Aunque en la actualidad se han conseguido ECC con un endurecimiento pos-fisuración continuo hasta deformaciones por encima del 3% en su origen la principal característica de estos materiales era el endurecimiento pos-fisuración una vez se ha producido la primera fisura tal como lo explica el profesor Li "Engineered Cementitious Composites, or ECCs, belong to a class of short random fiber reinforced cement based materials with designed microstructures such that the composite undergoes pseudo strain-hardening, instead of softening, when the first crack strain is exceeded...As a result, ECCs are characterized by ultimate tensile strain and fracture energies which can be as much as

two orders of magnitude higher than conventional cementitious materials” (Li, Mishra, Naaman, Wight, Wu, y Inada, et al 1994).

La aplicación de la mecánica de la fractura a los compuestos cementicios no es nueva sin embargo en este material (ECC) es reciente el desarrollo del concepto de mecánica de la fractura y micromecánica (Peerapong et al 2003). Su comportamiento ante la tensión de rotura (Pseudos Strain Hardening) es obtenido mediante múltiples roturas (Li et al. 1992). Las investigaciones de este material se han centrado en sus propiedades en fatiga, en fallos estructurales por fatiga y en aplicaciones para reparaciones estructurales (Kim, al. 2004; Li 2004) y se han hecho propuestas como material de refuerzo estructural o para reparar daños estructurales. Además se ha investigado con este material como autocompactante y proyectable sobre elementos estructurales o para crear elementos prefabricados de difícil hormigonado y de elevadas resistencias (Kim et al. 2000).

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental de ensayos físicos y mecánicos se muestra en la tabla 1. Los ensayos físicos son de consistencia y trabajabilidad, ultrasonidos y densidad. Se han realizado ensayos de carga estática a compresión, utilizando probetas cilíndricas de diámetro 15 cm y altura 30 cm, y probetas cúbicas de 10 cm de arista. Los ensayos de flexión se han realizado a 3 y 4 puntos, con probetas prismáticas de 10 x 10 x 40 cm de dimensión. Todos los ensayos mecánicos se han realizado a 7 y 28 días.

Tabla 1 Plan de ensayos

Material	Ensayos físicos			Ensayos mecánicos estáticos		Total
	Consistencia UNE 83-313-90 UNE 83-314-90	Densidad	Ultra Sonidos	Comp	Flexión	
HC	Abrams	62	62	26	11	176
FRC	Vebe	108	108	33	24	324
SCC	Escurrecimiento	16	16	8	8	48
FRSCC	Escurrecimiento	32	32	16	16	96
ECC	Escurrecimiento	102	102	48	48	306
TOTAL		320	320	131	107	950

El cálculo de los índices de tenacidad se ha realizado mediante los métodos ASTM C1018-84 (ASTM, 1984) y ASTM C1018-89 (ASTM, 1989).

3. MATERIALES

El cemento utilizado se fabrica en las Islas Canarias y su única adición es la puzolana natural y activa de origen volcánico, procedente de la cantera de Cementos Especiales de las Islas, en Arguineguín (Gran Canaria), según todas las especificaciones que exige la norma UNE-EN 197-1. Este cemento tiene la nomenclatura CEM II / B-P 32,5 R (UNE-EN 197-1:2000).

Los áridos que se emplean son fonolitas. Estos se extraen de canteras de origen volcánico mediante machaqueo (ARICAN S.A.). Estos áridos no son reactivos y poseen unas características de dureza excelente, sin embargo su morfología es problemática. Los tamaños de áridos empleados son 0/5, 5/10 y 10/20 mm. Se ha empleado una arena de origen silicio calcáreo del desierto del Sahara y con un tamaño de árido 0/1 mm.

Los aditivos que se emplean son un superplastificante/reductor de agua de alta actividad, (ADVA 115 – Grace Construction Products) y superplastificante para hormigón autocompacto (ADVA Flow 340 – Grace Construction Products) elaborados ambos según UNE EN 934-2.

Las fibras de polipropileno empleadas son de tres tipos: una de longitud de 40mm., otra de 19mm. y una de 12mm. Las denominaciones comerciales de las diferentes fibras son: STRUX 90/40 para el PP. de 40mm., Grace MicroFiber para el PP. 19mm. ambas suministradas por la empresa GRACE Construction Products y Sikafiber M-12 para el PP. 12mm. suministrada por la empresa SIKA.

Para mejorar la trabajabilidad y consistencia de la mezcla y las resistencias finales del hormigón se ha incluido en la dosificación cenizas volantes. Las cenizas volantes empleadas proceden de la central térmica de Ponferrada.

4. DOSIFICACIONES

Las distintas dosificaciones que se han realizado se pueden ver en la tabla 2.

Tabla 2 Dosificaciones

	HC	FRC			SCC	FRSCC		ECC		
		0,2 %	0,4 %	0,8 %		0,2 %	0,4 %	100% AS*	70% AS *	50% AS*
CEM II / B-P 32,5 R (Kg/m ³)	320	320	320	320	350	350	350	650	650	650
Arena 0/1 (Kg/m ³)	326	326	326	356	350	350	350	552	386	276
Árido 0/5 (Kg/m ³)	489	489	489	459	600	600	600		166	166
Árido 5/10 (Kg/m ³)	382	382	382	382	850	850	850			110
Árido 10/20 (Kg/m ³)	623	623	623	623						
Cenizas volantes (Kg/m ³)					155	162	170	828	828	828
Superp. (Kg/m ³)		0,96	1,92	2,88						
Superp. Autocomp. (Kg/m ³)					6,06	6,14	6,76	20,7	20,7	20,7
Agua (Kg/m ³)	195	195	195	195	210	210	210	357,5	357,5	357,5
Fibras de PP de 40mm.		0,2 %	0,4 %	0,8 %		0,2 %	0,4 %			
Fibras de PP 12 mm o 19 mm.								2%	2%	2%
Relación agua-cemento	0,61	0,61	0,61	0,61	0,6	0,6	0,6	0,55	0,55	0,55

* AS: Arena del Sahara (Arena 0/1)

5. RESULTADOS

El valor medio de los distintos resultados obtenidos está reflejado en la tabla 3.

Tabla 3 Resultados

	HC	FRC			SCC	FRSCC	
		0,2%	0,4%	0,8%		0,2%	0,4%
Consistencia, trabajabilidad y escurrimiento	Blanda 6 cm.	Seca 10 sg	Muy seca 17 sg	Extr. seca 26 sg	70 cm	66 cm	65 cm
Ultrasonidos (GPa)	42,28	37,35	34,42	33,00	49,90	45,90	45,60
Densidad (g/cm ³)	2,30	2,29	2,27	2,26	2,37	2,32	2,30
Compresión 28 días (MPa)	29,30	31,80	29,60	28,00	39,40	37,30	37,00
T. Indirecta 28 días (MPa)	3,00	3,25	3,50	4,26	-	-	-
Flexión 28 días (MPa)	5,60	4,47	4,42	4,30	4,23	2,92	3,84
Índices de tenacidad							
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
ECC PP 12 mm.				ECC PP 19 mm.			
		100% A.Sh.	70% A.Sh.	50% A.Sh.	100% A.Sh.	70% A.Sh.	50% A.Sh.
Consistencia, trabajabilidad y escurrimiento	71 cm.	66 cm.	63 cm.	65 cm.	64 cm.	63 cm.	
Ultrasonidos (GPa)	31,26	29,72	30,75	30,45	29,72	30,67	
Densidad (g/cm ³)	2,02	2,01	2,00	2,01	2,00	1,99	
Compresión 28 días (MPa)	42,30	35,70	33,10	37,00	33,30	35,20	
Flexión 28 días (MPa)	4,99	5,60	5,25	4,21	4,32	4,35	
Índices de tenacidad							
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	

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Consistencia y trabajabilidad

La media del descenso del cono de Abrams en el hormigón de control es de 6 cm. Si se compara el hormigón de control con los FRC se observa que se ha pasado de un hormigón de cono 6 (consistencia blanda) a unos hormigones de consistencia seca por incorporar fibras en la mezcla que no permiten que el árido fluya con naturalidad, por lo que la trabajabilidad de la mezcla y su fluidez decrece de forma considerable (figura 1).

En la figura 2 se muestra una torta de FRSCC, hay que apuntar que en estos materiales, aunque las diferencias en los tamaños de las tortas no son significativas (se pasa de una torta de 70 cm en el SCC a unas tortas de 66 y 65 centímetros en los FRSCC), se detectó que a mayor cantidad de fibra menor fue el grado de autocompactación.

En cuanto a los ECC, se aprecia en la figura 3 que también presentan capacidad de autocompactación, a pesar de su elevado porcentaje de fibras en fracción volumétrica (un 2%). Sin embargo se encontraron diferencias en las distintas fibras utilizadas para la creación de este material. Las fibras de 12 mm se dispersaron bastante mejor en la

mezcla, y su torta fue bastante mayor que cuando se incorporaron fibras de 19 mm. Esto hace que la pasta presente mayor homogeneidad y mejor mezcla de sus componentes. En los ECC de fibras de PP. de 19 mm las fibras tardaron más tiempo en dispersarse y, además, se formaban pequeños grumos o bolas de cemento no hidratado en la mezcla.



Fig. 1-Cono FRC



Fig. 2- Torta FRSCC



Fig. 3-Torta ECC

En la figura 4 se puede apreciar que a mayor porcentaje de fibras más seca es la mezcla en los FRC, y esto afecta proporcionalmente a su trabajabilidad, pues a mayor número de fibras en el FRC menor es su trabajabilidad y mayor vibración necesita la mezcla para ser compactada. En los SCC, FRSCC y los ECC los resultados son muy distintos con relación al hormigón de control y a los FRC, ya que se observa que se pasa de unos hormigones con consistencia blanda (HC) y seca (o incluso muy seca FRC 0,8% PP. 40mm.) a unos materiales cementicios autocompactos.

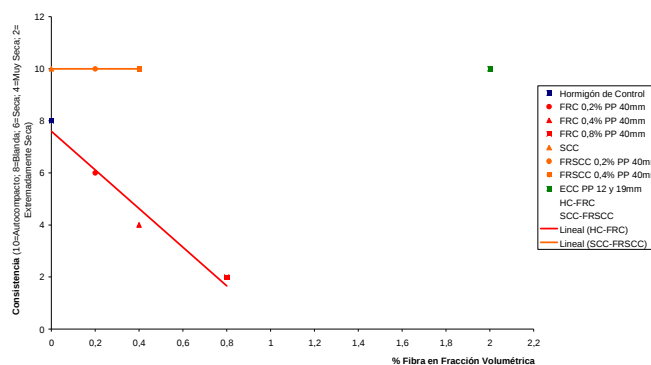


Fig. 4- Relación % de fibra/consistencia del HC, FRC, SCC, FRSCC y ECC

6.2 Ultrasonidos y densidad

Si analizamos los resultados de ultrasonidos de forma independiente en cada tipo de material podemos ver que a mayor número de fibras el módulo ultrasónico es menor. En lo referente a la densidad, también se puede afirmar que descende en los distintos materiales cuanto mayor sea la cantidad de fibra.

En la figura 5 se hace una relación de estos dos parámetros para todos los materiales creados. En la gráfica se puede ver claramente cómo nos encontramos con tres materiales de propiedades distintas. Se observa que los SCC y FRSCC poseen un módulo de ultrasonido y una densidad más elevada que los FRC, ECC y el hormigón de control. No obstante, el módulo de los ECC puzolánicos es inferior, al igual que la densidad. Que la densidad sea menor es muy importante de cara a las aplicaciones, puesto que nos encontramos con un material menos pesado que el resto de materiales

cementicios creados. Otra relación importante que se puede encontrar es que a mayor módulo de ultrasonidos mayor densidad, y a menor módulo menor densidad. De esto podríamos deducir que nos encontramos con materiales cementicios canarios que a menor densidad presentan menor rigidez, y a mayor densidad mayor rigidez.

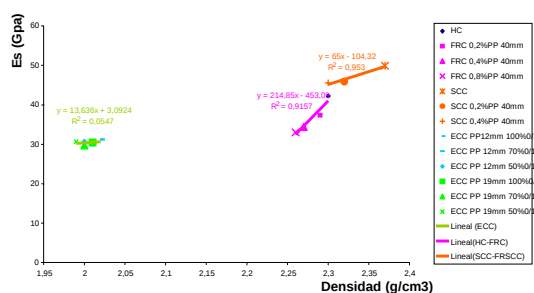


Fig. 5- Relación módulo de ultrasonidos (Es)/densidad

6.3 Ensayos mecánicos estáticos a compresión

El hormigón de control presenta unas resistencias características a compresión bastante buenas, que alcanzan a los 7 días una media de 19 MPa y de 29 MPa a los 28 días. Las resistencias a compresión varían muy poco con respecto al hormigón de referencia al introducir fibras y crear FRC con nuestros compuestos canarios; tanto a 7 como a 28 días, las resistencias descienden según aumenta el porcentaje de fibras. Esto puede ser debido a que el aumento de fibras produce mayor número de huecos.

La resistencia a compresión del SCC supera en 10,4 MPa a la del hormigón de control, con lo que se obtiene una resistencia final de compresión a 28 días de 39,4 MPa. De los resultados se deduce que en los FRSCC sucede lo mismo, las resistencias son mejores tanto en comparación con el HC como con los FRC. Sin embargo, ocurre lo mismo que con sus homólogos los FRC: a mayor cantidad de fibra la resistencia a compresión disminuye ligeramente.

Se realizaron ensayos a 1, 7, 14 y 28 días de los ECC puzolánicos para poder controlar mejor las mejoras mecánicas de estos nuevos materiales. Se puede ver que entre 1 y 14 días este material presenta un aumento importante de resistencias, y es entre 14 y 28 días cuando esta resistencia aumenta de forma más reducida. Si se analizan y comparan los resultados entre los ECC con fibras de 12 mm y los de 19 mm, podemos ver en las figuras antes señaladas que los reforzados con fibras de 12 mm presentan un mejor comportamiento a compresión. Esto puede ser debido a que al ser las fibras más pequeñas producen menor número de huecos; además estas fibras se dispersan bastante mejor que las de 19 mm. Otro dato importante es que aunque todas las resistencias a compresión se encuentran entre 42,3 MPa (para el ECC PP. 12 mm 100% arena del Sáhara) y 33,1 MPa (para el ECC PP. 12 mm 50% arena del Sáhara), las resistencias - tanto para los ECC de fibras de 12 mm y los de 19 mm- bajan según desciende la cantidad de arena en la mezcla.

6.4 Mecánicos estáticos a flexión

Si analizamos los ensayos de carga estática a flexión a 3 y 4 puntos nos encontramos ante bastante resultados. En la figura 7 podemos observar cómo el hormigón de control

(en azul) y el SCC (en naranja) muestra una resistencia punta superior a los FRC y a los FRSCC, sin embargo esta rotura frágil pierde la totalidad de su resistencia una vez que se ha producido la fisura, ya que la interfase del puente de tensiones del material ha sido rota. En cambio en los FRC y los FRSCC la resistencia de rotura es menor que en el HC y SCC respectivamente, pero esta rotura tiene la capacidad, una vez iniciada, de presentar una resistencia mientras se deforma y aumenta la fisura. En la figura podemos observar cómo los SCC y FRSCC poseen una mayor deformación antes de fracturarse la matriz cementicia que el HC y los FRC, y que la matriz posee mayor capacidad mecánica, como sucedió en el ensayo a compresión. Sin embargo, si analizamos la capacidad mecánica residual que es capaz de soportar la probeta una vez rota para unos mismos porcentajes de fibras, vemos que los FRC poseen mayor capacidad mecánica que los FRSCC, lo que se traduce en una mayor tenacidad. Como se trata de la misma fibra, esto podría ser debido a que la unión fibra-matriz del FRC es mejor que la del FRSCC y, por lo tanto, se produciría menores roturas por pull-out o descohesión fibra-matriz. Lo más curioso de este dato es que una vez realizado los ensayos de compresión y habiendo comprobado unas resistencias significativamente más altas en los FRSCC que en los FRC se esperaban unas uniones fibra-matriz mejores en los primeros con respecto a los segundos.

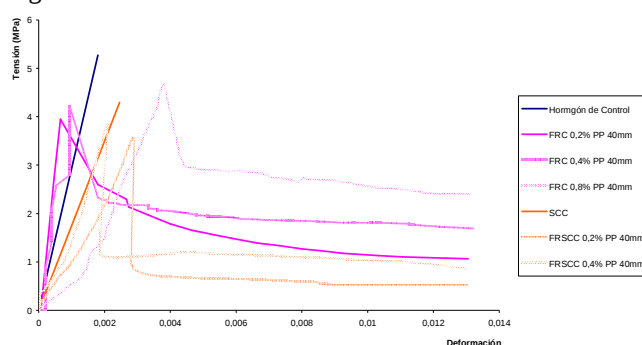


Fig. 7- Gráficas tensión-deformación de probetas prismáticas de 10 x 10 x 40 cm por rotura a flexión a 3 y 4 puntos a 28 días del HC, los FRC, el SCC y los FRSCC

En la figura 8 se superponen las distintas gráficas de tensión-deformación de los ECC puzolánicos. En ella se puede apreciar cómo la gráfica de mejor comportamiento y mayor resistencia es la del ECC PP. 12 mm 100% 0/1. En esta gráfica se observa en la parte izquierda que se produce un menor número de fisuras en las proporciones de 100% de arena del Sahara 0/1., de momento podemos afirmar que a menor número de fisuras, el comportamiento de tensión-deformación del material y la resistencia máxima son peores. Otro dato destacable de esta figura es que se obtienen mejores capacidades mecánicas en los ECC con refuerzo de PP. de 12 mm que en los de 19 mm.

Para terminar de discutir los resultados de este apartado hay que analizar la figura 9, que superpone las gráficas de los distintos materiales realizados y ensayados. En esta gráfica podemos ver perfectamente cómo el hormigón de control y el hormigón autocompacto sin refuerzo de fibras presentan un mismo comportamiento frágil y sin resistencia post rotura. Con los FRC y los FRSCC sucede algo diferente, ya que se comportan de manera similar y presentan resistencia post rotura en comparación con el HC y SCC. Sin embargo, si comparamos éstos con los ECC nos encontramos con un comportamiento

totalmente diferente, ya que cuando se produce la primera fisura en el ECC, la resistencia no baja de manera importante hasta una resistencia determinada (como sucedía en los FRC y FRSCC), sino que sigue subiendo -incluso con múltiples fisuras- hasta que llega a un punto en que la resistencia empieza a descender. Este descenso no es pronunciado sin apenas producirse deformación (como en los FRC y FRSCC), sino paulatino, deformándose el material poco a poco.

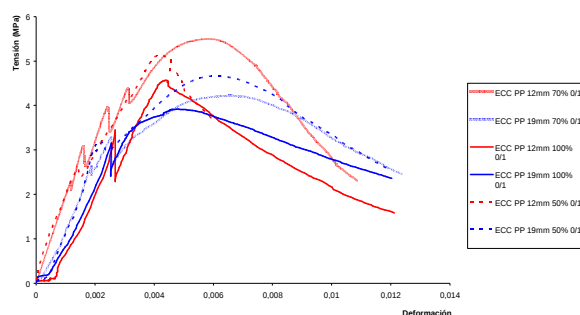


Fig. 8- Gráficas tensión-deformación ECC

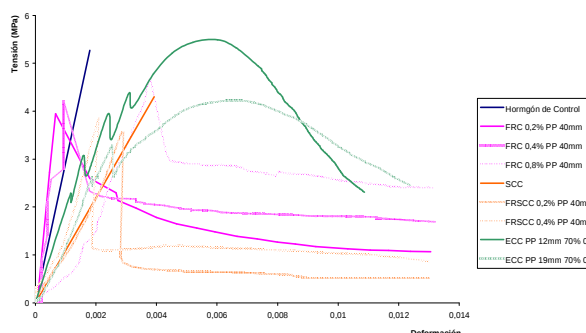


Fig. 9- Gráficas tensión-deformación HC, FRC, SCC, FRSCC y ECC.

6.5 Estudio de la tenacidad de los materiales

Los datos de la figura 10 indican que el HC y el SCC no presentan tenacidad alguna (sin embargo hay que tener en cuenta que las normas citadas especifican que el ensayo es únicamente para hormigones reforzados con fibras, pues para hormigones sin fibras al no observarse comportamiento pos-fisuración o pos-pico no sería posible el cálculo). Pero los FRC y los FRSCC presentan unos índices de tenacidad que crecen de forma paulatina entre el índice I5 y el I30. Hay que señalar también que los índices de tenacidad son mayores según el aumento del porcentaje de fibras. Esto se debe a que a mayor número de fibras mayor es el refuerzo. Al comparar los índices del FRC y FRSCC se puede apreciar que son mayores para los FRC que para los FRSCC. Esto guarda especial relación con lo apuntado en el apartado anterior, ya que al estar utilizando como refuerzo el mismo tipo de fibra en las dos muestras, la explicación podría ser que la unión fibra-matriz es de peor calidad en los FRSCC que en los FRC como se comentó en el apartado anterior.

También en la figura podemos ver cómo los índices I5, I10 e I20 de los ECC son superiores a los de los FRC y FRSCC, aunque si analizamos el índice I30 vemos que el índice del FRC 0,8% PP. 40 mm es superior a los del ECC PP. 19 mm 100% 0/1, ECC PP. 19 mm 50% 0/1 y ECC 12 mm 100% 0/1. Por esto mismo se puede afirmar que la tenacidad, una vez fisurado el material, es muy superior en los ECC mientras se está deformando, pero cuando dicha deformación es superior a la deformación correspondiente al I20, los ECC presentan una peor tenacidad. Esto podría ser debido a que en este caso lo importante no es la matriz sino la longitud de las fibras, por lo que parece ser esperable que fibras más largas permitan alcanzar mayor resistencia residual a mayores aperturas de fisura. Cabe apuntar también que todos los ECC presentan índices de tenacidad superiores que los FRSCC. El material que mayor índice de tenacidad posee (por tanto, el que más ductilidad tiene) es el ECC PP. 12 mm 70% 0/1, como indica la gráfica.

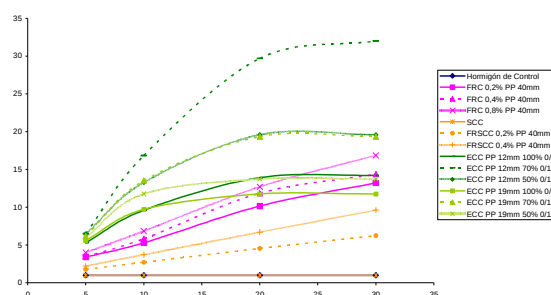


Fig. 10- Comparación índices de tenacidad (I5, I10, I20 e I30)

7. CONCLUSIONES

Una vez que se han discutido todos los distintos resultados de los materiales elaborados, se puede afirmar que con los materiales que se realizan los hormigones comunes en las islas canarias se pueden realizar materiales cementicios avanzados de diferentes características.

En relación a la consistencia y trabajabilidad, cada material muestra unos comportamientos diferentes. Partiendo de un hormigón de control con una consistencia blanda se obtuvieron unos FRC de consistencia seca. Por otro lado se pudo realizar un hormigón autocompacto de muy buena autocompactación, al que se le pudieron introducir fibras para conseguir un hormigón con fibras con capacidad autocompactante. Por último, los ECC puzolánicos también presentaron una muy buena trabajabilidad y un buen comportamiento autocompactante. Además la densidad de los distintos materiales es totalmente distinta, y no varía sólo en relación al material realizado, sino también a la cantidad de fibra introducida. Además, la densidad guarda una relación importante con cada uno de los resultados del módulo de ultrasonidos del material, de forma que a menor densidad menor es el módulo de ultrasonidos del material cementicio realizado. Esto muestra cómo se consiguen materiales como el ECC, el FRSCC y el FRC con poca densidad y poca rigidez en relación al HC y los SCC (en este caso habría que hacer la comparación de los FRC con los HC, de los FRSCC con los SCC y los ECC de forma independiente.).

Aunque las resistencias máximas a flexión varían de un material a otro, lo más destacable de los resultados que se han obtenido es el diferente comportamiento en tensión deformación de cada uno de los materiales. Se puede ver claramente cómo se ha conseguido un material de matriz cementicia puzolánica de comportamiento dúctil, frente al comportamiento frágil del hormigón de control o el comportamiento tenaz de los FRC y FRSCC. Este material es el ECC puzolánico. En relación con los comportamientos a flexión están los índices de tenacidad. Se puede constatar que los índices de cada material son totalmente diferentes, y que los ECC son los que mejor índices de tenacidad poseen. Los FRC y los FRSCC también tienen unos buenos índices de tenacidad en relación al hormigón de control y al hormigón autocompacto de referencia.

REFERENCIAS

- C. GUIGOU (1990). Influencia de las características petrográficas de los áridos canarios en las propiedades de los hormigones. Tesis doctoral.
- J. M. PÉREZ LUZARDO (1991) Color y textura en el hormigón estructural. Intemac, nº 4.
- R. SANTANA RODRÍGUEZ (2004). Características y propiedades de los hormigones autocompactables y su aplicación en Canarias. I Curso de Tecnología del Hormigón en la Edificación y la Obra Pública, IECA Canarias. Las Palmas de Gran Canaria.
- B.E. BARRAGAN, R. GETTU, M.A. MARTIN Y R.L. ZERBINO (2003). Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete - a parametric study. *Cement and Concrete Composites*, nº 25 (7), pp. 767-777.
- R. GETTU, D.R. GARDNER, H. SALDIVAR Y B.E. BARRAGAN (2005). Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens. *Materials and Structures*, nº 38 (275), pp 31-37.
- B.E. BARRAGAN, R. GETTU, L. AGULLO Y R.L. ZERBINO (2006). Shear failure of steel fiber-reinforced concrete based on push-off tests. *ACI Materials Journal*, nº 103 (4), pp. 251-257.
- F. HERNÁNDEZ-OLIVARES, G. BARLUENGA, M. BOLLATI Y B. WITOSZEK (2002). Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. *Cement and Concrete Research*, nº 32, pp. 1587-1596.
- G. BARLUENGA, F. HERNÁNDEZ-OLIVARES Y R. T. LEÓN (2003). Seismic response of a new design for vertical joints in architectural panels. *Engineering structures*, nº 25, 2003, pp. 1655-1664.
- F. HERNÁNDEZ-OLIVARES Y G. BARLUENGA (2004). Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*, nº 34, pp. 109-117.
- M. FERNÁNDEZ CÁNOVAS (2003). Hormigones con fibras: Tecnología y propiedades generales. *Hormigón y acero*, nº 228-229, pp. 167-176.
- M. FERNÁNDEZ CÁNOVAS (2004). Hormigón con fibras: Componentes, dosificación, fabricación, propiedades y aplicaciones. I Curso de Tecnología del Hormigón en la Edificación y la Obra Pública, IECA Canarias. Las Palmas de Gran Canaria.
- V.C. LI, D.K. MISHRA, A.E. NAAMAN, J.K. WIGHT, H.C. WU, Y Y. INADA (1994). On the Shear Behavior of Engineering Cementitious Composites. *J. of Advanced Cement Based Materials*. Nº3 Vol. 1, pp. 142-149.

-
- S. PEERAPONG (2003). Fracture Mechanics Based Fatigue Life Analysis of RC Bridge Slab Repair By Fiber Cementitious Materials. Tesis Doctoral. Departament of Civil Engineering. The University of Tokyo.
 - V. C. LI Y H. C. WU (1992). Conditions for Pseudos Strain Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matriz Composites. Aplied Mechanics Review.
 - Y. Y. KIM, G. FISCHER Y V. C. LI (2004). Performance of Bridge Deck Link Slabs Designed with Ductile Engineered Cementitious Composite. Aci Structural Journal, Technical Paper. N° 101, pp792-801.
 - V. C. LI (2004). High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites as Durable Material for Concrete Structure Repair. International Journal for Restoration, Vol. 10, N° 2, 163-180.
 - Y. Y. KIM, H. J. KONG Y V. C. LI (2000). Design of Engineered Cementitious Composite Suitable for Wet-Mixture Shotcreting. Aci Structural Journal, Technical Paper. N° 100-M59.