

# HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES REFORZADOS CON FIBRAS PARA APLICACIONES CON ALTA RESPONSABILIDAD ESTRUCTURAL. CAMPAÑA EXPERIMENTAL EN LABORATORIO

## **Francisco Mena Sebastia**

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Universidad Politécnic de Catalunya  
Investigador Post-doctoral. Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental  
[francisco.mena@upc.edu](mailto:francisco.mena@upc.edu)

## **Stanislav Aidarov**

Estudiante de Doctorado. Ingeniero Civil  
Universidad Politécnic de Catalunya  
Estudiante de Doctorado. Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental  
[stanislav.aidarov@upc.edu](mailto:stanislav.aidarov@upc.edu)

## **Albert de la Fuente Antequera**

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Universidad Politécnic de Catalunya  
Profesor Agregado. Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental  
[albert.de.la.fuente@upc.edu](mailto:albert.de.la.fuente@upc.edu)

## **RESUMEN**

El desarrollo de fibras de acero con mayores prestaciones mecánicas ha abierto la posibilidad de sustituir total o parcialmente el armado tradicional en elementos estructurales con elevadas sollicitaciones, tales como los forjados de edificación. En este caso, se requiere de un hormigón con alta resistencia post-fisuración (lo que puede conseguirse con elevados contenidos de fibra), y consistencia autocompactante, a fin de poder ser puesto en obra mediante bombeo.

Para comprobar la viabilidad técnica del Hormigón AutoCompactante Reforzado con altas cuantías de Fibras de Acero (HACRFA), se ha llevado a cabo una extensa campaña experimental de caracterización del material. En total, se han realizado 15 dosificaciones de HACRFA, utilizando diferentes tipos y contenidos de fibra (60, 90 y 120 kg/m<sup>3</sup>). Para cada amasada se ha caracterizado el hormigón en estado fresco y en estado endurecido.

Los resultados obtenidos han sido satisfactorios, poniendo de manifiesto que el material diseñado tiene propiedades adecuadas como para ser usado como material estructural en forjados de edificación.

**PALABRAS CLAVE:** hormigón reforzado con fibras, autocompactante, campaña experimental, forjado edificación

## **1. Introducción**

El uso de fibras en el hormigón se ha centrado en el control de la fisuración por aspectos termohigrométricos y/o por acciones directas, persiguiendo la eliminación/reducción de armadura pasiva en elementos sujetos a esfuerzos de reducida-moderada magnitud (ej., dovelas para el

## **Nuevos hormigones**

revestimiento de túneles, pavimentos, tuberías o cimentaciones) [1-4]. Sin embargo, el desarrollo de fibras de acero con mayores prestaciones mecánicas ha abierto la posibilidad de sustituir total o parcialmente el armado tradicional en elementos estructurales con altas sollicitaciones; tales como forjados de edificación. En este caso, se conjugan dos retos: (1) la necesidad de alcanzar altas resistencias residuales del hormigón con fibras, lo que se puede conseguir con cuantías elevadas de las fibras adecuadas y (2) el uso de hormigones autocompactantes con capacidad de bombeo.

Para comprobar la viabilidad técnica del hormigón autocompactante con altas cuantías de fibras de acero (HACRFA), se ha llevado a cabo una extensa campaña experimental de caracterización del material.

La presente comunicación tiene como objetivo presentar la metodología seguida y los resultados obtenidos durante la campaña experimental en laboratorio, considerando la fabricación y posterior caracterización de las probetas moldeadas con los diferentes hormigones. A partir de los resultados obtenidos, se realiza un análisis exhaustivo para tratar de determinar la influencia que ejercen las diferentes variables involucradas en cada una de las dosificaciones: tipo de fibra, contenido de fibra, tamaño máximo de árido y contenido de aditivo, sobre las propiedades físicas y mecánicas del material.

## 2. Descripción de la campaña experimental

La campaña experimental se ha dividido en tres fases, tal y como se detalla en la Tabla 1. En dicha tabla, se especifican los objetivos marcados para cada fase, así como el número de amasadas fabricadas y la fecha en la que se realizaron.

Campaña	Fecha	Amasadas	Objetivos
1ª Fase	Abril 2017	6	Analizar propiedades HRFA con Fibra A y Fibra B
2ª Fase	Julio 2017	3	Analizar influencia tamaño máximo árido
3ª Fase	Diciembre 2017	6	Analizar propiedades HRFA con Fibra C y Fibra D

Tabla 1.- Características de las fibras empleadas

### 2.1. Materiales y dosificaciones

#### 2.1.1. Cemento

El cemento utilizado para la realización de las amasadas fue un cemento Portland con caliza, CEM II/A-L 42,5 R, con una superficie Blaine de 3900 cm<sup>2</sup>/g. Según el análisis químico realizado, el contenido de sulfatos (SO<sub>3</sub>) y de cloruros (Cl<sup>-</sup>) es del 3,3 y del 0,01 %, respectivamente.

#### 2.1.2. Áridos

Se emplearon 5 tipos de áridos naturales de diferentes granulometrías: arena 0/2, arena 0/4, gravilla 4/10, grava 10/20 y un filler calizo. Las curvas granulométricas de los áridos, obtenidas de acuerdo con las normas UNE-EN 933-1 [5] y UNE 933-2 [6] cumplen con las condiciones exigidas en el artículo 28.3 de la Instrucción EHE-08 [7].

#### 2.1.3. Fibras metálicas

Se utilizaron 4 tipos de fibras metálicas. Las principales características geométricas y mecánicas de las mismas se muestran en la Tabla 2

## Nuevos hormigones

Propiedad	Fibra A	Fibra B	Fibra C	Fibra D
Material	Acero	Acero	Acero	Acero
Res. tracción (N/mm <sup>2</sup> )	1800	1900	1500	2300
Longitud (mm)	50 ± 3	60 ± 3	60	60
Diámetro (mm)	1,00 ± 0,04	0,90 ± 0,04	0,9	0,9
Esbeltez, $\lambda$	50	67	65	65
Forma	Hooked-end	Hooked-end	Hooked-end	Hooked-end

**Tabla 2.- Características de las fibras empleadas**

Para facilitar el análisis posterior, las fibras pre-seleccionadas presentan propiedades muy similares: fabricadas de acero con longitudes comprendidas entre los 50 y los 60 mm. La diferencia más notable entre las fibras radica en el valor de la resistencia a tracción, lo que puede tener incidencia sobre el comportamiento post-fisuración del hormigón.

#### 2.1.4. Aditivos químicos

Para la fabricación de los hormigones se han utilizado tres aditivos. Por un lado, se emplearon dos aditivos comerciales, un plastificante, y un superplastificante, y por otro, un aditivo modulador de viscosidad, que mejora la cohesión de la mezcla y disminuye el riesgo de segregación entre las diferentes fases del hormigón.

## 2.2. Dosificaciones y fabricación del HACRFA

Se realizaron 15 dosificaciones de HACRFA. El esqueleto granular se definió a partir de las curvas granulométricas de los áridos, y de las recomendaciones dadas por la bibliografía especializada a fin de alcanzar consistencias autocompactantes [8,9]. Las variables a analizar durante la campaña experimental son: tipo de fibra (A, B, C y D); contenido de fibra, " $C_F$ ", (60, 90 y 120 kg/m<sup>3</sup>), tamaño máximo de árido, " $\varnothing_{MAX}$ " (10 y 20 mm) y contenido de aditivo superplastificante, "SP". En la Tabla 3, se detallan los valores de cada una de las 4 variables para cada dosificación.

Variable	1ª Fase					2ª Fase					3ª Fase				
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15
Tipo fibra	A	A	A	B	B	B	B	B	B	C	C	C	D	D	D
$C_F$ (kg/m <sup>3</sup> )	120	90	60	120	90	60	120	90	60	120	90	60	120	90	60
SP (%s.p.c)	1,9	1,6	1,4	1,9	1,6	1,4	1,9	1,6	1,4	1,9	1,6	1,4	1,9	1,6	1,4
$\varnothing_{MAX}$ (mm)	10	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20	20	20	20

**Tabla 3.- Dosificaciones realizadas**

Para la fabricación de los hormigones se empleó una amasadora de eje vertical, con una capacidad de 150 litros. El procedimiento de fabricación seguido, descrito a continuación, fue el mismo en todas las amasadas.

En primer lugar, se introducían los áridos junto con el cemento, y se mezclaban en seco durante 1 minuto. A continuación, se incorporaban manualmente las fibras de acero, con la amasadora en marcha. Una vez introducidas las fibras, se añadía el 95 % del agua total. Finalmente, se añadían los aditivos junto con el agua restante. Y se amasaba el hormigón alta intensidad durante 5 minutos.

Una vez amasado el hormigón se verificaba la consistencia del mismo, mediante el ensayo de extensión de flujo (Figura 1a); la densidad en estado fresco y el % de aire ocluido (Figura 2b), de acuerdo con las normas UNE-EN12350-8: 2011 [10], UNE-EN12350-6: 2011 [11] y UNE-EN 12350-

## Nuevos hormigones

7: 2011 [12], respectivamente. Con el hormigón restante, se rellenaban las probetas necesarias para la caracterización del hormigón en estado endurecido (Figura 1c). El número total de probetas moldeadas durante la campaña experimental asciende a 292.



Figura 1.- a) Extensión de flujo; b) % de aire ocluido; c) Probetas moldeadas

Por último, las probetas se desmoldaban transcurridas entre 24 y 48 horas desde su fabricación, y eran almacenadas en cámara húmeda, en condiciones controladas de humedad (95 %) y temperatura (20°C).

### 2.3. Plan de ensayos

En la Tabla 4 se muestran las propiedades analizadas del hormigón, la normativa utilizada, así como la edad del hormigón en el momento de los ensayos y el tipo de probetas empleadas. En el caso de no haber seguido una normativa, se detalla la referencia que presenta el método correspondiente.

Propiedades	Norma	Tipo probeta	Edad ensayo
Densidad fresco	UNE-EN 12350-6	-	Fresco
% Aire ocluido	UNE-EN 12350-7	-	Fresco
Consistencia	UNE-EN 12350-8	-	Fresco
Densidad	UNE-EN 12390-7 [13]	Cilíndrica 100x200	7 - 28
Resistencia a compresión	UNE-EN 12390-3	Cilíndrica 100x200	7 - 28
Res. a tracción por flexión	UNE-EN 14651	Prism. 150x150x600	28
Módulo de elasticidad	UNE-EN 12390-13	Cilíndrica 100x200	28
Orientación - contenido fibras	Método inductivo [14]	Cúbica 150	7

Tabla 4.- Plan de ensayos

Para determinar la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad, de acuerdo con las normas UNE-EN 12390-3 [15] y UNE-EN 12390-13 [16] se utilizó la máquina de ensayos de compresión IBERTEST de 3000 kN de capacidad de carga (Figura 2a), que permite tanto el control del ensayo por carga o por desplazamiento. Para eliminar la irregularidad superficial en las probetas, se ha utilizado la pulidora mostrada en la Figura 2b.

El ensayo más extendido para caracterización del comportamiento post-fisuración del HRF es el de tres puntos en probeta prismática 150x150x600 mm, con entalla en la sección centro luz, tal y como especifica la norma UNE-EN 14651 [17]. Para el ensayo se ha empleado la máquina de ensayos INSTRON 8505 (Figura 2c), dotada con una célula de carga de 100 kN.

Por último, investigadores de la UPC han desarrollado un método para obtener el contenido y la orientación de las fibras metálicas en el hormigón [14]. En dicho estudio, se concluyó que el contenido de fibras metálicas presentes en el hormigón, altera de forma proporcional el campo

### Nuevos hormigones

magnético existente alrededor de la probeta. Esta variación del campo magnético se manifiesta a partir de un incremento de la inductancia ( $\Delta L$ ), que puede ser cuantificado por medio de un analizador de impedancias HP-4192A, con un error inferior al 5 %.

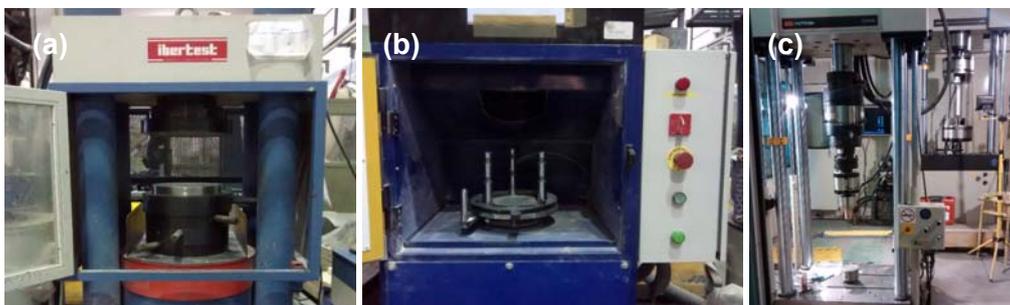


Figura 2.- a) Prensa IBERTEST, b) Pulidora, c) Maquina INSTRUM 8505

### 3. Análisis de resultados

#### 3.1. Resultados hormigón en estado fresco

En la Tabla 5 se presentan los resultados de la caracterización del hormigón en estado fresco, concretamente de su densidad, % de aire ocluido y consistencia. Para mejorar la comprensión del análisis, en la tabla se detalla el código empelado para cada dosificación, adoptando el siguiente formato (X-Y-Z); donde X: tipo de fibra (A, B, C, D); Y: tamaño máximo de árido (10, 20); Z: contenido de fibra (060, 090, 120).

Dosificación	Código	Ext. flujo (cm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Aire ocluido (%)
#1	A-10-120	69 (E2)	2,39	3,1
#2	A-10-090	67 (E2)	2,33	3,0
#3	A-10-060	62 (E1)	2,23	3,0
#4	B-10-120	68 (E2)	2,39	4,2
#5	B-10-090	64 (E1)	2,30	3,4
#6	B-10-060	64 (E1)	2,29	-
#7	B-20-120	58 (E1)	2,29	8,0
#8	B-20-090	57 (E1)	2,31	6,0
#9*	B-20-060	54 (-)	2,16	11,0
#10	C-20-120	82 (E3)	2,40	4,2
#11	C-20-090	66 (E2)	2,22	5,4
#12	C-20-060	52 (-)	2,38	5,2
#13	D-20-120	67 (E2)	2,28	7,2
#14	D-20-090	66 (E2)	2,39	4,8
#15	D-20-060	69 (E2)	2,28	6,0

\* Se descartan todos los resultados de la dosificación #9, debido al elevado % de aire ocluido.

Tabla 5. Propiedades del hormigón en estado fresco

La densidad del hormigón en estado fresco se sitúa entre los 2,16 y los 2,40 g/cm<sup>3</sup>, valores habituales para un hormigón de consistencia autocompactante, mientras que el % de aire ocluido oscila entre el 3,0 y el 11 %. Nótese que, para el posterior análisis de resultados, se han descartado los resultados de la dosificación #9, debido al elevado % de aire ocluido registrado (11 %). Este resultado anormalmente elevado puede deberse a una anomalía de uno de los aditivos empleados.

### Nuevos hormigones

En trece de las quince dosificaciones se alcanza una extensión de flujo superior a los 55 cm mínimos exigidos a un hormigón autocompactante. Empleando la nomenclatura utilizada en la EHE-08, 5 amasadas se catalogan como "E1", 7 como "E2" y 1 como "E3". Estos resultados confirman que es factible conseguir consistencias autocompactantes en hormigones con elevados contenidos de fibra. Hasta la fecha no se conocía experiencia alguna, reportada, de hormigón autocompactante reforzado con más de 100 kg/m<sup>3</sup> de macrofibra metálica.

Únicamente las dosificaciones reforzadas con 60 kg/m<sup>3</sup> de fibras (B-20-060 y C-20-060) no alcanzan el valor mínimo, posiblemente debido a un contenido insuficiente de aditivo superplastificante para las fibras B y C. Debe destacarse que en ninguna de las amasadas se detectó la formación de erizos de fibras, ni segregación del hormigón.

La influencia del tamaño máximo del árido sobre la consistencia del hormigón se observa comparando los valores obtenidos en las 6 dosificaciones reforzadas con fibra B (#4 a #9). El hecho de aumentar el tamaño máximo de árido (pasando de 10 mm a 20 mm), reduce el diámetro de extensión de flujo en 10, 7 y 10 cm (para contenidos de fibra idénticos: 60-90-120 kg/m<sup>3</sup>), respectivamente.

Por último, según la bibliografía especializada, el incremento del contenido de fibras repercute negativamente en la trabajabilidad, restringiendo la capacidad de fluir del hormigón [18]. Sin embargo, queda demostrado que ese efecto puede contrarrestarse incrementándose el contenido de aditivo superplastificante. Nótese que las mayores extensiones de flujo se obtienen en las dosificaciones reforzadas con 120 kg/m<sup>3</sup> de fibra (SP: 1,9 % s. p. c); respecto a las de 90 kg/m<sup>3</sup> (SP: 1,6 % s. p. c) y 60 kg/m<sup>3</sup> (SP: 1,4 % s. p. c).

### 3.2. Resultados en estado endurecido

#### 3.2.1. Resistencia a compresión – Módulo de elasticidad – Densidad

En la Tabla 6 se detallan los resultados de densidad, la resistencia a compresión a 7 y 28 días (en MPa), así como del módulo de elasticidad a 28 días (en GPa). Para cada dosificación se muestra el valor medio, y el coeficiente de variación, CV en % (entre paréntesis). Dichos valores se han determinado a partir del ensayo de 6 probetas cilíndricas de 100x200 mm por dosificación; tres de ellas ensayadas a 7 días, y las tres restantes, a 28 días.

Los valores medios de densidad se encuentran entre 2,22 g/cm<sup>3</sup> y 2,42 g/cm<sup>3</sup>, con un coeficiente de variación, CV, inferior a 2,7 % en todos los casos. Por su parte, se alcanzan valores de resistencia a compresión a 7 días comprendidos entre 38 y 50 MPa, y entre 50 y 68 MPa a 28 días, La relación entre resistencias a compresión a ambas edades ( $f_{cm,7}/f_{cm,28}$ ) se sitúa entre 0,67 y 0,80, valores habituales para hormigones de media-alta resistencia.

Por otro lado, no se detecta que el contenido o tipo de fibra influya sobre la resistencia a compresión. Ello se debe a que esta propiedad viene dada principalmente por la matriz de hormigón y la interfase árido-pasta, y no de las fibras de acero (que únicamente actúan una vez el hormigón ha fisurado).

Los módulos de elasticidad se sitúan entre los 30,4 y los 38,1 GPa, obteniendo una baja dispersión de los resultados experimentales (CV inferior al 5,8 %). Dichos resultados demuestran que los hormigones fabricados pueden ser aptos para numerosas aplicaciones estructurales, incluso para estructuras con exigentes limitaciones relativas a E.L.S (p.e. deformaciones, flechas).

### Nuevos hormigones

Dosificación	Código	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	f <sub>cm,7</sub> (MPa)	f <sub>cm,28</sub> (MPa)	E <sub>cm,28</sub> (GPa)
#1	A-10-120	2,42 (0,9)	47.6 (1,9)	60,2 (1,7)	33,57 (5,7)
#2	A-10-090	2,36 (1,0)	45.6 (3,4)	59,0 (5,3)	31,62 (5,8)
#3	A-10-060	2,29 (1,2)	47.3 (1,5)	59,2 (3,5)	30,43 (3,2)
#4	B-10-120	2,40 (1,1)	49.1 (6,5)	63,0 (0,3)	34,82 (5,4)
#5	B-10-090	2,32 (1,3)	48.7 (2,6)	60,9 (1,4)	32,57 (3,8)
#6	B-10-060	2,30 (1,3)	48.1 (2,7)	61,4 (2,0)	31,00 (2,1)
#7	B-20-120	2,34 (1,6)	44.6 (-)	55,6 (2,4)	34,18 (0,7)
#8	B-20-090	2,26 (1,2)	44.5 (1,7)	55,7 (2,4)	31,38 (3,5)
#9*	B-20-060	2,17 (0,7)	33.8 (2,8)	42,5 (3,3)	27,60 (1,0)
#10	C-20-120	2,42 (1,4)	52.8 (12,8)	65,9 (9,1)	38,09 (2,7)
#11	C-20-090	2,35 (0,9)	41.5 (8,4)	61,9 (4,1)	34,40 (2,3)
#12	C-20-060	2,36 (0,8)	50.5 (2,4)	67,9 (5,0)	36,18 (1,3)
#13	D-20-120	2,26 (2,3)	38.3 (4,2)	50,2 (5,8)	29,97 (4,1)
#14	D-20-090	2,38 (1,3)	50.5 (2,2)	65,2 (5,7)	36,71 (0,8)
#15	D-20-060	2,29 (2,7)	43.6 (11,2)	57,2 (4,4)	32,05 (2,4)

Tabla 1. Propiedades del hormigón en estado endurecido. Valores medios y CV (en %) entre paréntesis

### 3.2.2. Contenido y orientación de fibras

En la Tabla 7 se detallan los contenidos (en kg/m<sup>3</sup>) y orientación de fibra obtenidos tras realizar el método inductivo sobre probetas cúbicas de 150 mm. De forma adicional, se detalla la diferencia (en %), entre el contenido real de fibra medido en las probetas, respecto al contenido teórico: 60, 90 o 120 kg/m<sup>3</sup>. Este valor nos proporciona una "idea" sobre el grado de distribución homogénea o heterogénea de las fibras en el hormigón.

Dosificación	Código	% Eje 1	% Eje 2	% Eje 3	C <sub>F</sub> real (kg/m <sup>3</sup> )	Error (%)
#1	A-10-120	27.3	37.2	35.5	145.6	+21,3
#2	A-10-090	29.3	35.8	35.0	77.9	-13,4
#3	A-10-060	28.7	34.4	36.9	54.2	-9,6
#4	B-10-120	29.8	35.8	34.3	109.6	-8,7
#5	B-10-090	28.0	36.7	35.3	90.5	+0,6
#6	B-10-060	28.5	36.5	35.0	52.0	-13,3
#7	B-20-120	28.1	36.9	35.0	112.9	-5,9
#8	B-20-090	27.7	36.4	35.9	93.2	+3,6
#9*	B-20-060	26.4	36.0	37.6	51.3	-14,5
#10	C-20-120	25.9	37.2	36.9	119.7	-0,3
#11	C-20-090	31.8	34.7	33.5	80.9	-10,1
#12	C-20-060	30.2	36.2	33.6	60.8	+1,3
#13	D-20-120	28.2	35.8	35.9	102.1	-14,9
#14	D-20-090	28.1	35.7	36.2	83.5	-7,2
#15	D-20-060	28.2	35.6	36.2	61.4	+2,3

Tabla 7. Resultados método inductivo (Probetas cúbicas moldeadas 15x15x15cm)

La orientación de fibras obtenida en las probetas es independiente del contenido de fibra, obteniendo valores medios del 27,3 % en el eje 1 (vertical), y del 37,7 y 35,0 % para los ejes 2 y 3 (plano horizontal). Estos valores se encuentran en línea con los obtenidos previamente por otros autores para HRFA [19, 20].

## Nuevos hormigones

En cuanto al contenido real de fibras en las muestras analizadas, se obtienen errores entre el -14,5 y el 21,3 %, lo que indica que el proceso de mezcla de las fibras ha sido adecuado, y éstas se han distribuido de forma homogénea en el hormigón.

3.2.3. Resistencia a flexotracción residual

En la Tabla 8 y Figura 3 se presentan los resultados de resistencia a flexotracción ( $f_{LOP}$ ) y resistencia residual ( $f_{R,i}$ ), obtenidos a partir del ensayo UNE-EN 14651. En dicha tabla, se especifican los valores medios y el coeficiente de variación, CV, (entre paréntesis), obtenidos del ensayo de 6 probetas prismáticas 150x600x600 mm por dosificación. Adicionalmente, se calculan los valores de  $A^*$  y  $B^*$  definidos como ( $A^*=f_{R1m}/F_{LOPm}$ ) y ( $B^*=f_{R3m}/f_{R1m}$ ).

Dosificación	Código	$f_{LOPm}$ (MPa)	$f_{R,1m}$ (MPa)	$f_{R,3m}$ (MPa)	$A^*$	$B^*$
#1	A-10-120	4,98 (14,6)	8,01 (26,5)	6,55 (19,7)	1,61	0,82
#2	A-10-090	4,06 (14,1)	6,35 (29,1)	6,14 (22,7)	1,56	0,97
#3	A-10-060	3,61 (7,8)	3,94 (13,0)	4,14 (22,7)	1,09	1,05
#4	B-10-120	5,63 (12,3)	12,07 (6,2)	11,26 (21,3)	2,14	0,93
#5	B-10-090	5,37 (14,6)	11,39 (19,0)	10,40 (13,7)	2,12	0,91
#6	B-10-060	4,71 (11,4)	7,50 (25,6)	7,73 (27,5)	1,59	1,03
#7	B-20-120	6,25 (7,9)	11,71 (12,1)	10,83 (17,3)	1,87	0,92
#8	B-20-090	5,52 (17,0)	10,51 (25,6)	8,97 (29,7)	1,90	0,85
#9*	B-20-060	4,62 (11,3)	6,82 (23,8)	7,05 (15,6)	1,48	1,03
#10	C-20-120	6,62 (14,1)	13,99 (12,9)	14,30 (15,3)	2,11	1,02
#11	C-20-090	5,23 (6,6)	9,61 (15,6)	9,80 (15,3)	1,84	1,02
#12	C-20-060	4,65 (2,2)	7,29 (14,8)	7,12 (16,6)	1,57	0,98
#13	D-20-120	5,93 (18,8)	13,73 (20,6)	13,87 (29,2)	2,32	1,01
#14	D-20-090	4,80 (9,0)	10,00 (12,9)	10,37 (11,7)	2,08	1,04
#15	D-20-060	4,24 (12,4)	6,62 (25,9)	7,44 (11,5)	1,56	1,12

Tabla 8. Resultados del ensayo de flexión en viga

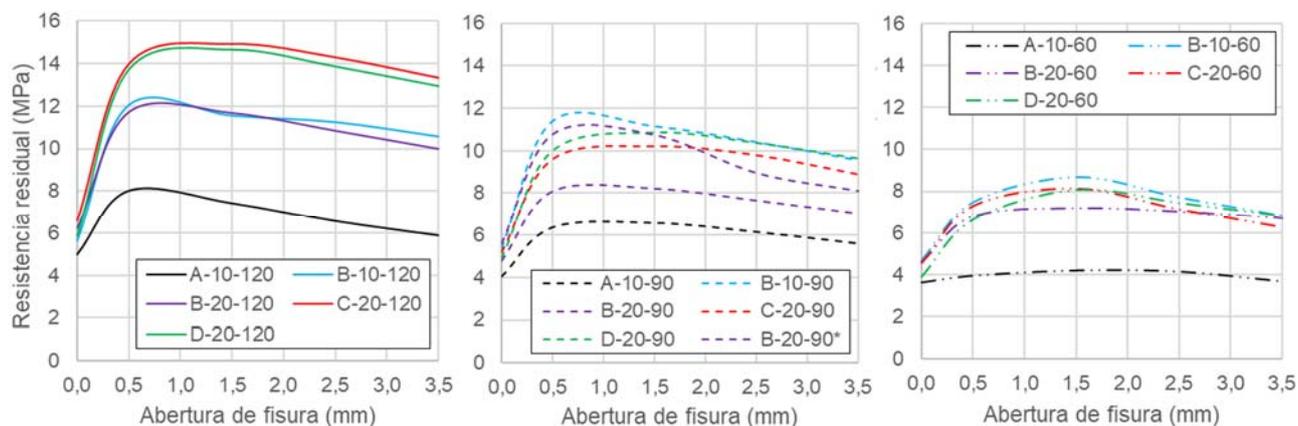


Figura 3. Curva Resistencia residual (N/mm<sup>2</sup>) – Abertura de fisura (mm). a) Cr: 120 kg/m<sup>3</sup>; b) 90 kg/m<sup>3</sup>; c) 60 kg/m<sup>3</sup>

Todas las dosificaciones desarrollan un comportamiento post-fisuración tipo “hardening”, con resistencias residuales mayores a las de fisuración, tanto para pequeñas como grandes aberturas de fisura. Por tanto, se satisface ampliamente con el parámetro de diseño  $f_{R1}/f_{LOP} \geq 0,40$ , necesario para poder considerar las fibras utilizadas como refuerzo estructural.

Nuevos hormigones

Las mayores resistencias residuales se alcanzan con las fibras C y D, independientemente del contenido de fibra añadido (60, 90 o 120 kg/m<sup>3</sup>), alcanzando valores medios de  $f_{R1m}$  de 13,99 y 13,73 MPa con refuerzos de 120 kg/m<sup>3</sup> de fibra, respectivamente. La fibra B, obtiene valores similares a las fibras C y D para contenidos de fibra de hasta 90 kg/m<sup>3</sup>. Para contenidos superiores, parece que se produce un efecto de saturación, con lo que incrementar el contenido de 90 a 120 kg/m<sup>3</sup> no se traduce en una mejora significativa de resistencia residual.

#### 4. Conclusiones

Las principales conclusiones derivadas de los resultados obtenidos en la campaña experimental realizada se enuncian a continuación:

- Es factible conseguir consistencias autocompactantes en hormigones con elevados contenidos de fibra (de hasta 120 kg/m<sup>3</sup>), si bien deben considerarse varios aspectos, como el tamaño máximo del árido o el contenido de aditivo superplastificante.
- La densidad de los HRFA se sitúa entre los 2,22 y los 2,42 g/cm<sup>3</sup>, con un coeficiente de variación (CV) inferior al 2,7 %.
- La distribución de las fibras de acero en el hormigón es independiente del tipo y contenido de éstas. Según el análisis estadístico, un 27,3 % del total de fibras quedan orientadas verticalmente (eje 1); mientras que un 35-38 % se orientan según los ejes horizontales.
- La resistencia a compresión a 7 y 28 días supera los 38 y los 50 MPa, respectivamente. La dispersión de resultados es baja, con CV inferiores al 13 %, poniéndose así de manifiesto la homogeneidad de los hormigones fabricados. La relación entre resistencias a compresión a ambas edades ( $f_{cm,7}/f_{cm,28}$ ) se sitúa entre 0,67 y 0,82, valores habituales para hormigones de media-alta resistencia.
- Los módulos de elasticidad se sitúan entre los 30,4 y los 38,1 GPa, obteniendo una baja dispersión (CV inferior al 5,8 %). Estos valores validan este tipo de hormigones para numerosas aplicaciones estructurales, incluso en aquellas estructuras donde se impongan estrictas condiciones relativas a estado límite de servicio (flechas, deformaciones)
- Todas las dosificaciones obtienen un comportamiento post-fisuración tipo “hardening”, con valores medios de resistencia residual ( $f_{Ri,m}$ ) superiores al límite de proporcionalidad ( $f_{LOPm}$ ). El parámetro de diseño ( $f_{R1}/f_{LOP}$ ) aumenta con el contenido de fibra, En todos los casos se supera el valor umbral ( $f_{R1}/f_{LOP} = 0,40$ ) exigido para considerar las fibras de acero en elementos estructurales.

#### 5. Referencias

- [1] DE LA FUENTE A., PUJADAS P., BLANCO A., AGUADO, A., “Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings”. *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol.27, 2012, pp. 60-71.
- [2] ORTIZ J.A., DE LA FUENTE A., MENA SEBASTIA F., SEGURA I., AGUADO., “Steel-fibre-reinforced self-compacting concrete with 100 % recycled mixed aggregates suitable for structural applications”. *Construction and Building Materials*. Vol. 156, 2017, pp. 230-241.

- [3] DE LA FUENTE A., ESCARIZ R., DE FIGUEIREDO A., MOLINS C., AGUADO A., "A new design method for steel fibre reinforced concrete pipes". *Construction and Building Materials*. Vol. 30, 2012, pp. 547-555.
- [4] PUJADAS P., BLANCO A., CAVALARO S., AGUADO A., "Plastic fibres as the only reinforcement for flat suspended slabs: experimental investigation and numerical simulations". *Construction and Building Materials*. Vol. 57, pp. 92-104.
- [5] AENOR. UNE-EN 933-1. "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método de tamizado". 1998.
- [6] AENOR. UNE-EN 933-2. "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas". 1996.
- [7] COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. "Instrucción de hormigón estructural EHE-08". *Ministerio de Fomento. Gobierno de España*. Madrid. 2008.
- [8] SKARENHDAHL A., PETERSSON O., "Self-compacting concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC". *RILEM Publications*, 2000.
- [9] OKAMURA H., OUCHI M., "Self-Compacting Concrete", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 1, 2003, pp. 5-15.
- [10] AENOR. UNE-EN 12350-8. "Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo de escurrimiento". 2011.
- [11] AENOR. UNE-EN 12350-6. "Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad". 2009.
- [12] AENOR. UNE-EN 12350-7. "Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire. Métodos de presión". 2010.
- [13] AENOR. UNE-EN 12390-7. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido. 2009.
- [14] TORRENTS J.M., BLANCO A., PUJADAS P., AGUADO A., JUAN-GARCIA P., SÁNCHEZ-MORAGUES M.A., "Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete". *Materials and Structures*, Vol. 45, No. 10, 2012, pp. 1-16.
- [15] AENOR. UNE-EN 12390-3. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de las probetas". 2009.
- [16] AENOR. UNE-EN 12390-13. "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión". 2014.
- [17] AENOR. UNE-EN 14651. "Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)". 2007.
- [18] GRÜNEWALD S., WALRAVEN J.C., "Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse content on the fresh properties of self-compacting concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp.1793-1798.
- [19] BLANCO A., PUJADAS P., DE LA FUENTE A., CAVALARO S.H.P., AGUADO A., "Assessment of the orientation factor in SFRC slabs". *Composites Part B: Engineering*. Vol. 68, 2015, pp. 343-354.
- [20] BLANCO A., "Characterization and modelling of SFRC elements". *Tesis Doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.

### Nuevos hormigones