

# Caracterización de las propiedades en estado fresco y endurecido de hormigones autocompactantes reforzados con altas cuantías de macrofibras metálicas.

*Fresh and hardened characterization of self-compacting fibre reinforced concretes with high amounts of steel macrofibres.*

Stanislav Aidarov <sup>a</sup>, Francisco Mena <sup>b</sup>, Albert de la Fuente <sup>c</sup>

<sup>a</sup> PhD Candidate. Polytechnic University of Catalonia. Researcher. stanislav.aidarov@upc.edu

<sup>b</sup> PhD in Civil Engineering. Polytechnic University of Catalonia. Researcher. francisco.mena@upc.edu

<sup>c</sup> PhD in Civil Engineering. Polytechnic University of Catalonia Associate Professor. albert.de.la.fuente.upc.edu

## RESUMEN

El uso de HRF con responsabilidad estructural ha experimentado una creciente demanda en el sector de la construcción proporcionando beneficios económicos, tecnológicos y estructurales. Sin embargo, este material relativamente nuevo no ha mostrado su potencial pleno hasta el momento; lo que conduce al desarrollo continuo en términos de diseño y caracterización de HRF. Teniendo esto en cuenta, se realizaron 15 dosificaciones de hormigón autocompactante reforzado con fibras de mayores prestaciones mecánicas, utilizando diferentes tipos y contenidos de fibra con el objetivo de estimar propiedades mecánicas y reológicas del material; los resultados se presentan y analizan en esta comunicación.

## ABSTRACT

FRC with structural responsibility is increasingly being used in the construction industry providing structural, technological and economic benefits. However, this relatively new material has not demonstrated its full potential so far what leads to the continuous development in terms of design and HRF characterization. Bearing this in mind, 15 self-compacting concrete mixes were performed using different types and contents of fibre in order to estimate both mechanical and rheological properties of the material; the results of extensive experimental program are presented and discussed herein.

**PALABRAS CLAVE:** fibras de acero, hormigón autocompactante, caracterización de material

**KEYWORDS:** steel fibres, self-compacting concrete, material characterization

## 1. Introducción

Aplicación de hormigones reforzado con fibras de acero (HRFA) en elementos con alta responsabilidad estructural, tales como forjados sobre apoyos aislados [1–3], es un reto esencial para el material en cuestión. La necesidad de mantener integridad estructural bajo altas magnitudes de carga requiere elevado contenido

de fibra en la masa de hormigón para proporcionar suficiente resistencia residual a tracción. Por otra parte, se exige la autocompactabilidad del material con capacidad de bombeo que puede ser perjudicado por la presencia de fibra en la composición del material [4]. Con el fin de evaluar la posibilidad de

cumplir las condiciones descritas y comprobar la viabilidad técnica del hormigón autocompactante con altas cuantías de fibra de acero (HACRFA), se llevó a cabo una extensa campaña experimental de caracterización del material.

Durante esta campaña experimental se fabricaron y posteriormente caracterizaron 292 probetas de 15 hormigones diferentes. Los resultados obtenidos permitieron realizar un análisis exhaustivo para determinar la influencia de tipo de fibra, contenido de fibra, tamaño máximo de árido y contenido de aditivo sobre las propiedades físicas y mecánicas del material. La presente comunicación tiene como objetivo presentar la metodología y los resultados obtenidos tras el análisis descrito.

## 2. Descripción de la campaña experimental

La campaña experimental se llevó a cabo en tres fases, tal y como se detalla en la Tabla 1. Durante la primera fase se caracterizaron hormigones con dos tipos de fibra variando el contenido de 60 a 120 kg/m<sup>3</sup>. La siguiente etapa fue analizar la influencia de tamaño máximo de árido (TM) a las propiedades mecánicas y reológicas del material. Considerando el mejor rendimiento de la fibra B, se amentó el TM manteniendo los mismos contenidos de esta fibra. Los resultados obtenidos permitieron continuar la campaña experimental con las dosificaciones de la fase 2 añadiendo al estudio dos nuevos tipos de fibra – C y D.

**Tabla 1. Descripción de Campaña Experimental**

Campaña	Amasadas	Objetivos
1ª Fase	6	Caracterizar HRFA con fibra A y B
2ª Fase	3	Analizar influencia de tamaño máximo de árido (fibra B)
3ª Fase	6	Caracterizar HRFA con fibra C y D

## 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) fue 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 993-1 [5] y UNE-EN 933-2 [6] cumplen con las condiciones exigidas en la Instrucción EHE-08 [7].

### 2.1.3. Aditivos químicos

Para cumplir los requerimientos de autocompactabilidad se utilizaron dos aditivos comerciales, un plastificante y un superplastificante. Por otra parte, con el objetivo de mejorar la cohesión de la mezcla y disminuir el riesgo de segregación entre las diferentes fases de hormigón, se aplicó un aditivo modulador de viscosidad.

### 2.1.3. Fibras metálicas

Las fibras utilizadas fueron de distintas casas con propiedades muy similares. La diferencia más notable entre las fibras se encontraba en el valor de la resistencia a tracción (Tabla 2), lo que puede tener el efecto considerable al comportamiento post-fisuración del hormigón.

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

Fibra	A	B	C	D
R <sub>m,nom</sub> [MPa]	1800	1900	1500	2300
Longitud [mm]	50±3	60±3	60	60
Dámetro [mm]	1	0.9	0.9	0.9
Esbeltez, λ	50	67	65	65

Tabla 3. Dosificaciones realizadas

Variable	Amasadas														
	1ª Fase					2ª Fase					3ª Fase				
	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6	Nº7	Nº8	Nº9	Nº10	Nº11	Nº12	Nº13	Nº14	Nº15
Tipo de 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

## 2.2 Dosificaciones y fabricación del HACRFA

Tras el estudio de recomendaciones dadas por la bibliografía especializada sobre consistencias autocompactantes [8–10] y las curvas granulométricas de los áridos, se definió el esqueleto granular para las dosificaciones de HARFA. En total se realizaron 15 hormigones distintos variando 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”. La Tabla 3 detalla los valores de cada una de las variables para cada dosificación.

Los hormigones en cuestión se fabricaron mediante una amasadora de eje vertical con una capacidad de 200 litros. Para garantizar igualdad de condiciones, el procedimiento de fabricación, descrito a continuación, fue idéntico 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 durante 5 minutos.

Una vez amasado el hormigón, se verificaba la consistencia del mismo mediante de extensión de flujo, la densidad en estado fresco y el % de aire ocluido de acuerdo con las normas correspondientes [11–13]. Con el hormigón restante, se rellenaban las probetas necesarias para la caracterización del hormigón en estado endurecido. Por último, las probetas se desmoldaban transcurridas entre 24 y 48 horas desde su fabricación y se almacenaban en cámara húmeda, en condiciones controladas de humedad (95%) y temperatura (20°C).

## 2.3 Plan de ensayos

Para caracterización correcta del material se planteó un plan de ensayos con el objetivo de evaluar las propiedades esenciales en estado fresco y endurecido. La Tabla 4 presenta las propiedades evaluadas del hormigón, la normativa utilizada, 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.

Para determinar la resistencia de compresión y el módulo de elasticidad, de acuerdo con normas existentes [14,15], se utilizó la máquina de ensayos de compresión IBERTEST tras el pulido de las irregularidades superficiales en las probetas.



para cada dosificación, adoptando el formato X(Y), donde X: tipo de fibra (A, B, C, D); (Y): tamaño máximo de árido (10, 20).

La influencia del tamaño de árido sobre la consistencia del hormigón puede analizarse comparando los valores obtenidos en las 6 dosificaciones con fibra B. El incremento del tamaño máximo de árido (pasando de 10 mm a 20 mm) redujo 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. También, cabe destacar que analizando la trabajabilidad de las dosificaciones realizadas, no se detectó la formación de erizos de fibras, ni segregación del hormigón.

En paralelo con el ensayo de extensión de flujo, se estimaron el % de aire ocluido en el material y su densidad. La densidad del hormigón en estado fresco se situó entre los 2.16 y 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 11.0 % (Figura 2).

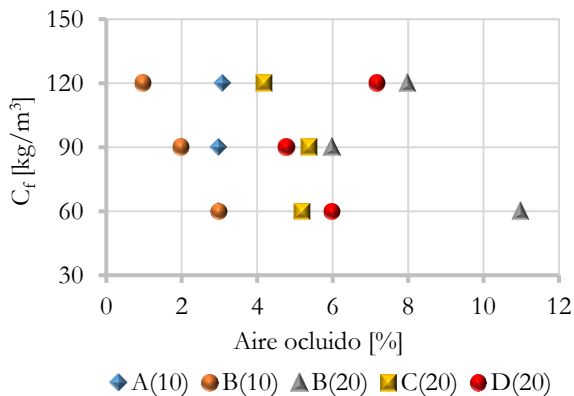


Figura 2. Aire ocluido de HRFA

Por último, debe mencionarse que el valor elevado de % de aire ocluido (11%) en la dosificación B(20) con contenido de fibra igual a 60 kg/m<sup>3</sup>, puede deberse a una anomalía de uno de los dos aditivos empleados. Teniendo esto en cuenta, los resultados posteriores para dicha dosificación en estado endurecido no pueden ser de referencia en los futuros estudios y se descartan del análisis en esta comunicación también.

### 3.2 Resultados hormigón en estado endurecido

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

La resistencia a compresión se evaluó a partir de ensayo de 6 probetas cilíndricas de 100x200 mm por cada dosificación: tres de ellas ensayadas a 7 días y las tres restantes – a 28 días. Los valores medios de resistencia a compresión a 7 días se encontraron entre 38.3 y 52.8 MPa, tal y como demuestra la Figura 3.

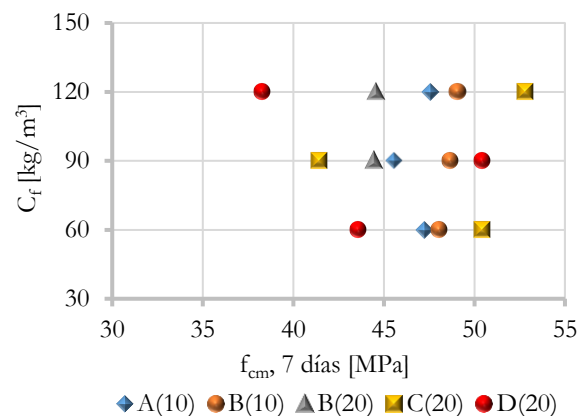


Figura 3. Resistencia a compresión a 7 días

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. Figura 4 presenta la información más detallada respecto al rango de  $f_{cm,28}$  en todas las dosificaciones realizadas que es de 50.2 a 67.9 MPa.

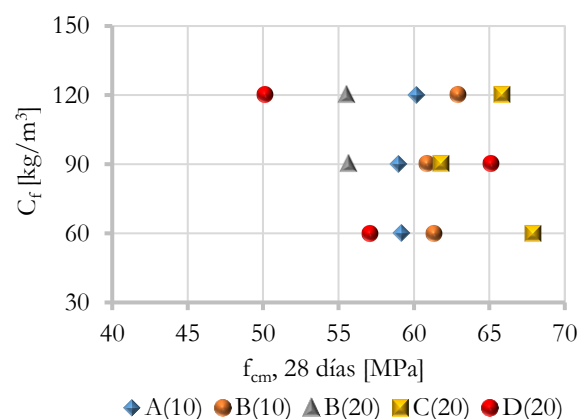


Figura 4. Resistencia a compresión a 28 días

Analizando los valores obtenidos, se puede concluir que el contenido o tipo de fibra

no afecta a 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 encontraron entre los 30.0 y 38.1 GPa, obteniendo una baja dispersión de los resultados experimentales (CV inferior al 5,8 %). Estos resultados demuestran que los hormigones fabricados pueden ser aptos para numerosas aplicaciones estructurales, incluso para estructuras con exigentes limitaciones relativas a ELS.

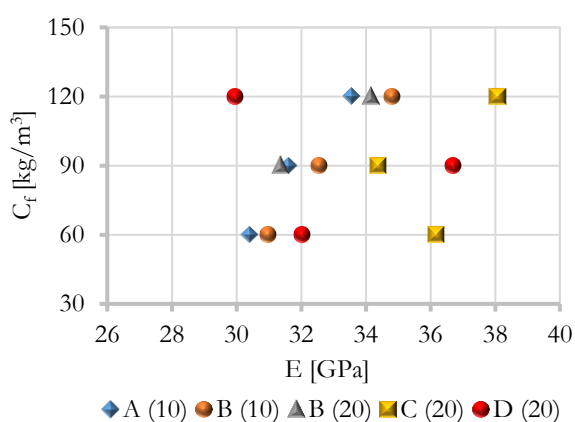


Figura 5. Módulo de Elasticidad de HRFA

No obstante, se ha notado que los valores experimentales de los módulos de elasticidad se situaron ligeramente por debajo de lo teóricamente esperado según la formulación dada por Recomendación Final del Comité TC-162 de la RILEM, detallada en la Ecuación 1.

$$E_{cm} = 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (1)$$

$$E_{cm} = 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (2)$$

De hecho, dichos valores se ajustan más a los que vienen de acuerdo con norma española EHE-08 para los hormigones convencionales (Ecuación 2). Esta observación se muestra en la Figura 6 donde se presentan las relaciones entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad según RILEM TC 162-TDF (línea roja), EHE-08 (línea verde) y los valores obtenidos durante la campaña experimental.

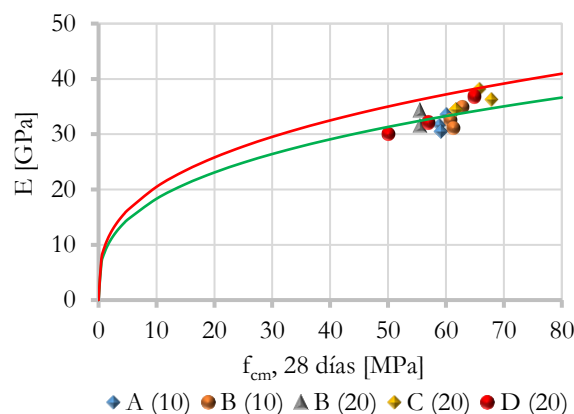


Figura 6. Los valores obtenidos de módulo E con las curvas propuestas por RILEM y EHE

El fenómeno observado puede deberse a una dosificación con un esqueleto granular con una elevada presencia de finos, orientada a satisfacer los requisitos de trabajabilidad en estado fresco, pero que ha repercutido negativamente sobre el módulo de elasticidad.

En cuanto a la densidad, los valores medios se situaron entre los 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.

### 3.2.2. Contenido y orientación de fibras

La Tabla 5 presenta los contenidos (en kg/m<sup>3</sup>) y orientación de fibra obtenidos mediante el método inductivo sobre probetas cúbicas de 150 mm. Adicionalmente, se evalúa la diferencia en valores absolutos (en %) entre el contenido real de fibra, respecto al contenido teórico: 60, 90, 120 kg/m<sup>3</sup>. Dicha evaluación nos proporciona una “idea” sobre el grado de distribución homogénea o heterogénea de las fibras en el hormigón. Cabe destacar que la diferencia elevada de 21.3 % entre el contenido real y teórico para 1ª amasada vino de insuficiente cantidad de probetas cúbicas a ensayar.

La orientación de fibras estimada en las probetas es independiente del contenido de fibra, obteniendo valores medios en el plano horizontal de 72.7 %. Cabe destacar que, debido a la base cuadrada de moldes, no se ha detectado el eje predominante entre ejes X y Y. Estos valores se encuentran en línea con los obtenidos previamente en los estudios de HRFA [20,21].

Tabla 5. Resultados método inductivo

Amasada	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4	Nº5	Nº6	Nº7	Nº8	Nº9	Nº10	Nº11	Nº12	Nº13	Nº14	Nº15
Tipo de Fibra	A	A	A	B	B	B	B	B	B	C	C	C	D	D	D
$C_f$ , teórico [kg/m <sup>3</sup> ]	120	90	60	120	90	60	120	90	60	120	90	60	120	90	60
$C_f$ , real [kg/m <sup>3</sup> ]	145	78	54	110	91	52	113	93	52	120	81	61	102	84	62
Dif. [%]	20.8	13.3	10.0	8.3	1.1	13.3	5.8	3.3	13.3	0.0	10.0	1.7	15.0	6.7	3.3
% Eje X	37.2	35.8	34.4	35.8	36.7	36.5	36.9	36.4	36.0	37.2	34.7	36.2	35.9	35.7	35.6
% Eje Y	35.5	35.0	36.9	34.3	35.3	35.0	35.0	35.9	37.6	36.9	33.5	33.6	35.9	36.2	36.2
% Eje Z	27.3	29.2	28.7	29.9	28.0	28.5	28.1	27.7	26.4	25.9	31.8	30.2	28.2	28.1	28.2

### 3.2.3. Resistencia residual a flexotracción

El ensayo UNE-EN 14651 permitió estimar la resistencia a flexotracción ( $f_{LOP}$ ) junto con las resistencias residuales ( $f_{R,i}$ ) entre cuales, los valores esenciales para el diseño son  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$  que correspondan a las aberturas de fisura en la viga ensayada igual a 0.5 y 2.5 mm, respectivamente.

Los valores medios de  $f_{R1}$ , obtenidos durante los ensayos, oscilan entre 3.94 y 14.0 MPa en función del contenido y tipo de fibra.

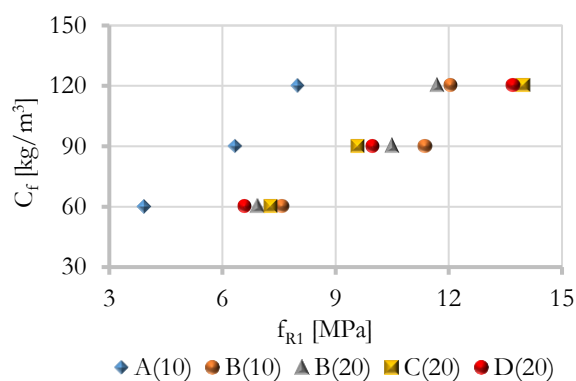


Figura 7. Valores medios de  $f_{R1}$

Como se aprecia en la Figura 7, las fibras B, C y D mostraron rendimiento parecido con contenidos de hasta 90 kg/m<sup>3</sup>. Para contenidos superiores, las fibras C y D proporcionaron una resistencia residual  $f_{R1}$  más significativa. Cabe destacar que todas las dosificaciones satisficieron ampliamente los parámetros de diseño  $f_{R1k}/f_{LOPk} \geq 0.4$  y  $f_{R3k}/f_{R1k} > 0.5$  que es necesario para

poder considerar las fibras utilizadas como refuerzo estructural.

En cuanto a las resistencias residuales  $f_{R3}$  que, principalmente, se utilizan en análisis de estructuras en los Estados Límite Último, los valores obtenidos se encontraron en un rango de 4.14 y 14.3 MPa, tal y como detalla la Figura 8:

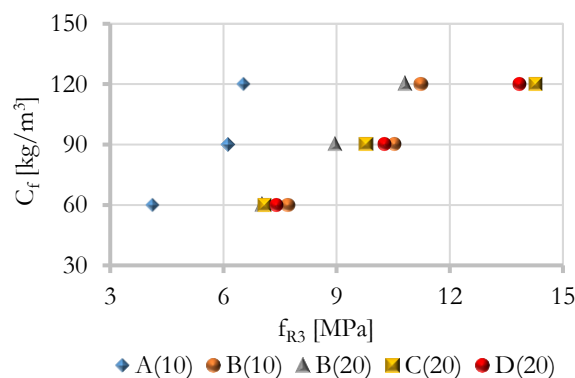


Figura 8. Valores medios de  $f_{R3}$

Observaciones correspondientes a las magnitudes de  $f_{R1}$  también pueden ser asignadas a los resultados de  $f_{R3}$  – la diferencia más notable en las fibras B, C y D se encuentra en el contenido de 120 kg/m<sup>3</sup>.

Por último, la influencia del tamaño máximo de árido en la dosificación al comportamiento post-fisuración se presenta en la Figura 9. Tal y como se ha mencionado anteriormente, considerando la diferencia mínima en los resultados obtenidos se decidió aumentar el dicho tamaño máximo a los 20 mm.

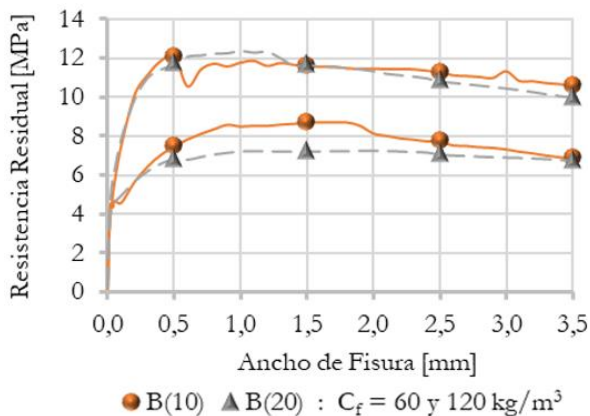


Figura 9. Curvas Resistencia Residual – Abertura de Fisura para dosificaciones con Fibra B

## 4. Conclusiones

En base de los resultados obtenidos durante la campaña experimental descrita, se puede concluir que:

- Se consiguen las consistencias autocompactantes en hormigones con elevados contenidos de fibra (de hasta  $120 \text{ kg/m}^3$ ), aunque varios aspectos deben considerarse, tales como el tamaño máximo del árido o el contenido de aditivo superplastificante.
- La resistencia a compresión a 7 y 28 días supera los 38 y los 50 MPa, respectivamente, con relación entre resistencias a compresión a ambas edades ( $f_{cm,7}/f_{cm,28}$ ) entre 0.67 y 0.82, valores habituales para hormigones de media-alta resistencia.
- Los módulos de elasticidad se sitúan entre los 30 y los 38.1 GPa que es válido para numerosas aplicaciones estructurales, incluso aquellas estructuras donde se impongan estrictas condiciones relativas a Estados Límite de Servicio.
- La distribución de fibras metálicas en la masa de hormigón es independiente del tipo y contenido de las mismas. Según el análisis estadístico, un 27.3 % del total de fibras se quedan orientadas verticalmente (eje Z); mientras que el resto de las fibras se orientan según los ejes horizontales.

- Todas las dosificaciones obtuvieron los valores de resistencias residuales ( $f_{R,i}$ ) suficientes para considerar el material como estructural.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el apoyo económico del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad a través de la ayuda RTC-2016-5263-5 asociada al proyecto eFIB (optimización de procesos constructivos y de diseño de elementos estructurales empleando hormigones reforzados con fibras en sustitución de la armadura convencional), proyecto desarrollado conjuntamente con SACYR Ingeniería e Infraestructuras; en particular se agradece a Ángel Sánchez de Dios (ICCP); Patricia Díaz Martín (ICCP); Ramón Sánchez Fernández (ICCP); Antonio Ángel Ramírez Rodríguez (Dr. ICCP). El primer autor también da las gracias al apoyo del Plan de Doctorados Industriales de la Secretaría de Universidades e Investigación del Departamento de Empresa y Conocimiento de la Generalitat de Cataluña.

## Referencias

- [1] U. Gossia, Development of SFRC Free Suspended Elevated Flat Slabs, (2005).
- [2] A. Maturana Orellana, Estudio teórico-experimental de la aplicabilidad del hormigón reforzado con fibras de acero a losas de forjado multidireccionales, 2013.
- [3] J. Mandl, Flat Slabs Made of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC), (2008).
- [4] S. Grunewald, Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete, 2004.
- [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 del tamizado, (2012).
- [6] AENOR, UNE-EN 933-2 Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de



- la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas, (1996).
- [7] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [8] H. Okamura, M. Ouchi, Self-Compacting Concrete, *J. Adv. Concr. Technol.* 1 (2003) 5–15.
- [9] S. Grünewald, J.C. Walraven, Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 1793–1798.
- [10] H.-W. Chai, Design and testing of self-compacting concrete, n.d.
- [11] AENOR, UNE-EN 12350-8. Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento, (2011).
- [12] AENOR, UNE-EN 12350-6 Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad, (2009).
- [13] AENOR, UNE-EN 12350-7 Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire. Métodos de presión, (2010).
- [14] AENOR, UNE-EN 12390-3 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas, (2009).
- [15] AENOR, UNE-EN 12390-13 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión, (2014).
- [16] 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.
- [17] J.M. Torrents, A. Blanco, P. Pujadas, A. Aguado, P. Juan-García, M.Á. Sánchez-Moragues, Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete, *Mater. Struct. Constr.* 45 (2012) 1577–1592.
- [18] S.H.P. Cavalaro, R. López, J.M. Torrents, A. Aguado, Improved assessment of fibre content and orientation with inductive method in SFRC, *Mater. Struct. Constr.* 48 (2015) 1859–1873.
- [19] S.H.P. Cavalaro, R. López-Carreño, J.M. Torrents, A. Aguado, P. Juan-García, Assessment of fibre content and 3D profile in cylindrical SFRC specimens, *Mater. Struct. Constr.* 49 (2016) 577–595.
- [20] A. Blanco Álvarez, Characterization and modelling of SFRC elements, 2013.
- [21] A. Blanco, P. Pujadas, A. De Fuente, S.H.P. Cavalaro, A. Aguado, Assessment of the fibre orientation factor in SFRC slabs, *Compos. PART B.* 68 (2015) 343–354.