



Mejora de la sostenibilidad y el comportamiento en servicio de estructuras de hormigón mediante el uso de fibras metálicas recicladas

Improvement in sustainability and performance in service of concrete structures by using recycled metal fibres

Giancarlo Groli^{a,*} y Alejandro Pérez Caldentey^b

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Iberdrola Ingeniería y Construcción, Ingeniería Offshore, Madrid, España

^b Dr. Ingeniero de Caminos, FHECOR Consulting Engineers, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Director del Departamento de I+D+i, Madrid, España

Recibido el 9 de mayo de 2017; aceptado el 7 de julio de 2017

Disponible en Internet el 30 de agosto de 2017

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio teórico y experimental relativo a la mejora del comportamiento en servicio del hormigón estructural mediante la adición de fibras metálicas recicladas obtenidas a partir de neumáticos usados. Este trabajo recopila tres series de ensayos: una sobre elementos de tamaño reducido, otra sobre vigas de gran tamaño sometidas a dos cargas puntuales, con una amplia zona de momento constante, y una última campaña relativa a soportes sometidos a desplazamientos impuestos en cabeza. En el caso de las vigas isostáticas de gran tamaño, se dispone de una serie de ensayos gemelos realizados con un hormigón convencional.

Se examinan los resultados experimentales incidiendo en la influencia de la adición de fibras en el comportamiento en servicio. Los resultados experimentales se comparan con resultados teóricos obtenidos, incorporando a la ecuación constitutiva del hormigón la rama de ablandamiento en tracción a la que contribuyen las fibras, además del efecto de contribución entre fisuras propio del hormigón estructural convencional. Estos resultados se comparan también con los obtenidos mediante aplicación del modelo propuesto por el MC2010.

Finalmente, se introducen estudios que se están llevando a cabo en el marco del proyecto de investigación Anagennisi (renacimiento), que busca reciclar en aplicaciones relativas al hormigón estructural todos los componentes de los neumáticos. Estos estudios se centran en cómo se puede mejorar la sostenibilidad de las estructuras de hormigón mediante el uso de fibras metálicas recicladas, buscando aplicaciones concretas en las que su influencia puede resultar determinante, tanto a efectos de reducir los costes de construcción como de reducir el impacto medioambiental (huella de CO₂ y consumo de energía). Estos estudios se centran en el proyecto de estructuras de contención de aguas y en aumentar la esbeltez de losas en estructuras de edificación.

© 2017 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Hormigón reforzado con fibras recicladas; Fisuración; Flechas; Experimentación; Estado límite de servicio

Abstract

In this work, a theoretical and experimental study is presented as regards the improvement in the performance in service of concrete structures by adding recycled metal fibres obtained from used tyres. This work compiles three series of tests: one on reduced size elements, another on large beams subjected to two particular loads, with a wide constant moment area, and lastly a series on supports subjected to imposed head movements. In the case of large-sized isostatic beams, a series of twin trials carried out with conventional concrete is presented.

An analysis is made of the experimental results that have a bearing on the influence of adding fibres on the in-service performance. The experimental results are compared with the theoretical results obtained, incorporating into the constitutive equation of the concrete the tension softening branch to which the fibres contribute, as well as the effect of the contribution between cracks of the conventional structural concrete itself. These results are also compared with those obtained by applying the model proposed by MC2010.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: ggroli@iberdrola.es (G. Groli).

Finally, studies are presented that are being conducted within the framework of the Anagennisi (Re-Birth) Research, which looks to recycle all the components of tyres in applications relative to structural concrete. These studies are focused on how the sustainability of concrete structures can be improved with the use of recycled metal fibres, as well as looking for particular applications in which their influence could be a determining factor, both as regards reducing construction costs, as well as reducing the environmental impact (CO₂ footprint and energy consumption). These studies are focused on the project of water containment structures and in increasing the slenderness of the flagstones in building structures. © 2017 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords: Concrete reinforced with recycled fibres; Cracking; Arrows; Experiments; Serviceability limit state

1. Introducción

Los elementos de hormigón armado (HA) tienen que ser proyectados para cumplir con criterios de Estados Límite Últimos (ELU) y de Servicio (ELS). Entre estos últimos, ha de comprobarse la fisuración: en ocasiones, el armado puede ser determinado por esta limitación, en especial en ambientes agresivos, en estructuras estancas (p. ej., depósitos) o en estructuras con grandes recubrimientos (pantallas).

Añadir fibras al hormigón en contenidos bajos a moderados (0,4-1%) según [1] mejora la ductilidad y la energía de fractura, pero tiene una influencia muy pequeña en la resistencia a tracción. En consecuencia, el armado convencional no puede ser reemplazado por completo por las fibras para el ELU, aunque se puede lograr un mejor control de la fisuración por la acción combinada de fibras y barras. Este hecho ha sido demostrado experimentalmente con fibras metálicas industriales [2–5]. El Código Modelo 2010 (MC2010) [6] es la primera norma que implementa formulaciones para el cálculo de fisuración en elementos armados y fibrorreforzados.

Otra alternativa interesante desde el punto de vista económico y medioambiental es el uso de fibras recicladas de neumáticos fuera de uso. Investigaciones anteriores sobre este tipo de fibras han puesto de manifiesto la viabilidad y ventajas de su uso [7], aunque su naturaleza heterogénea e irregular debido a las técnicas de reciclaje actuales hace que se puedan usar solo en cuantías pequeñas para garantizar la trabajabilidad del hormigón.

Para comprobar que las fibras recicladas son efectivas a la hora de controlar la fisuración en elementos de HA, se ha llevado a cabo una campaña experimental primeramente sobre vigas de tamaño reducido para comparar el comportamiento de la fibra reciclada con la fibra industrial. Luego, se han ensayado vigas a escala real tomando como referencia vigas no fibrorreforzadas ensayadas con anterioridad [8], siendo los parámetros a investigar la cuantía de fibra, el cociente $\phi_s/\rho_{s,eff}$ (ϕ_s = diámetro de la armadura traccionada, $\rho_{s,eff}$ = cuantía efectiva de armadura) y el recubrimiento c de la armadura [9,10]. Finalmente, se describe una campaña sobre soportes sometidos a desplazamientos impuestos en cabeza [9,11,12], orientada al estudio de estructuras integrales. Los resultados son comparados con las predicciones de MC2010 [6]. También se presentan los estudios que se están llevando a cabo en el marco del proyecto de investigación Anagennisi (renacimiento), que busca reciclar en aplicaciones relativas al hormigón estructural todos los componentes de los neumáticos.

El objetivo de esta investigación es promover el uso de las fibras recicladas para alcanzar, por un lado, un mejor control de la fisuración (y por tanto mayor durabilidad en las estructuras de HA), y por el otro, contribuir a la sostenibilidad de la construcción al utilizar materiales reciclados de forma eficiente y racional.

2. Marco teórico

2.1. La fisuración en elementos armados y fibrorreforzados

Las fisuras se forman en HA debido al deslizamiento entre hormigón y acero de armar. La integral de este deslizamiento diferencial entre dos puntos de deslizamiento nulo da lugar a la abertura de fisura, tal y como se muestra en la figura 1.

El área entre las dos curvas (deformación del acero y deformación del hormigón) es la abertura de fisura. En la fisura, el alargamiento del hormigón es cero, mientras que el del acero alcanza su valor pico. Después de una longitud l , la compatibilidad entre hormigón y acero se ve restablecida. En términos matemáticos:

$$w = \int_{-l}^l (\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)) dx = (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \cdot s_m \quad (1)$$

donde w = abertura de fisura; ε_{sm} = alargamiento medio del acero; ε_{cm} = alargamiento medio del hormigón; s_m = separación media entre fisuras.

Observando la ecuación (1), resulta evidente que existen al menos dos maneras de reducir la abertura de fisura:

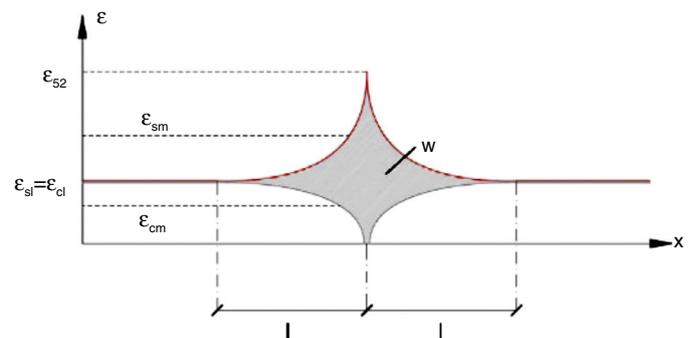


Figura 1. Representación del concepto de adherencia/deslizamiento para HA.

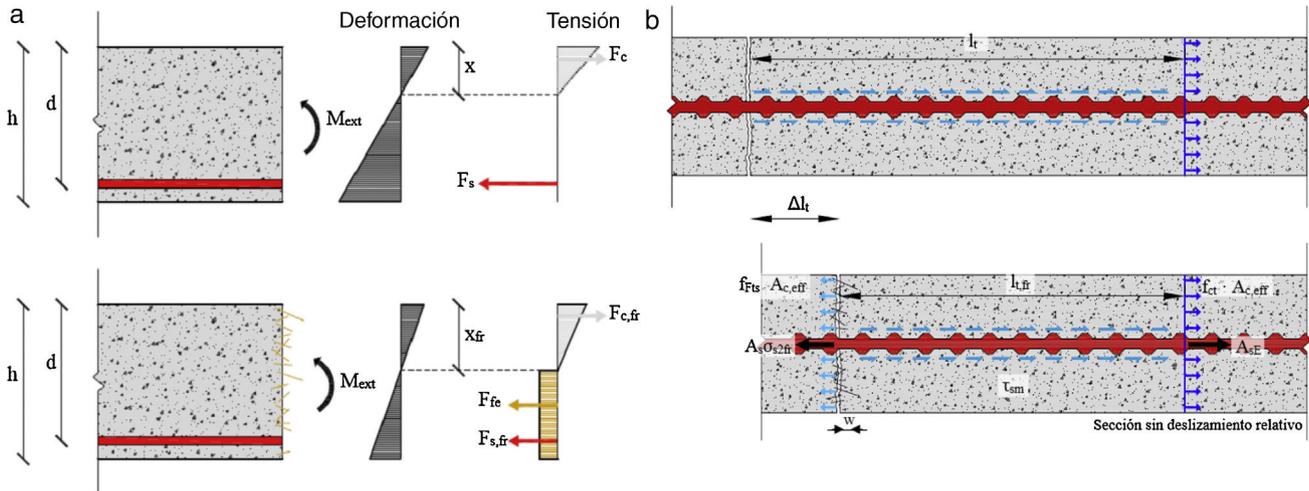


Figura 2. Efecto de las fibras en la reducción del alargamiento de las armaduras en HA y HFR (a) y en la reducción de la longitud de transferencia (b).

- Reducir el alargamiento medio del acero.
- Reducir la separación media entre fisuras.

Añadir fibras al hormigón da lugar precisamente a estos dos fenómenos. Como se muestra en la figura 2a, puesto que parte de la fuerza de tracción es resistida por las fibras, la tensión (y por tanto en régimen elástico el alargamiento) del acero disminuye. Para cuantificar este efecto en elementos de hormigón fibrorreforzado (en adelante, HFR) se tendrá que emplear análisis seccional no lineal puesto que la ley constitutiva del hormigón en tracción no permite resolver el equilibrio interno en forma cerrada.

Por otro lado, tal y como se muestra en la figura 2b y se declara explícitamente en MC2010, la separación entre fisuras disminuye puesto que la fuerza que tiene que ser reintroducida por adherencia acero/hormigón disminuye, dado que en la fisura la fuerza de tracción en el hormigón no es nula.

Sumando estos efectos, la formulación para la abertura de fisuras propuesta por MC2010 es la siguiente:

$$w_d = 2 \left(c + \frac{(f_{cm} - f_{Fism}) \cdot \Phi_s}{4\tau_{bm} \cdot \rho_{s,eff}} \right) \cdot \frac{1}{E_s} \cdot (\sigma_{s2} - \beta \cdot \sigma_s + \eta_r \cdot \epsilon_r \cdot E_s) \quad (2)$$

donde c = recubrimiento geométrico, f_{cm} = resistencia media a tracción del hormigón, f_{Fism} = resistencia residual media del HFR en servicio, τ_{bm} = tensión media de adherencia, Φ_s = diámetro de las barras en tracción, $\rho_{s,eff}$ = cuantía efectiva de armadura, σ_{s2} = tensión del acero en la fisura, σ_{sr} = tensión del acero en el instante de la fisuración, β = factor de integración empírico para considerar el alargamiento medio a lo largo de $l_{s,max}$, η_r = coeficiente relativo a la magnitud de la influencia de la retracción y ϵ_r = retracción considerada.

3. Ley constitutiva del hormigón fibrorreforzado

En la figura 3 se muestra la ley constitutiva del HFR proporcionada por MC2010 y derivada del ensayo de flexotracción en

tres puntos según EN14651 [13], de donde se obtienen las tensiones correspondientes a la abertura de los labios de la fisura en servicio ($CMOD_1 = 0,5$ mm) y en ELU ($CMOD_3 = 2,5$ mm). Se introduce la longitud característica l_{cs} para poder transformar un diagrama fuerza/abertura de fisura en uno de tensión/deformación. De acuerdo con MC2010, l_{cs} se toma como el valor mínimo entre la altura de la zona en tracción (y) y la separación media entre fisuras s_{rm} . El hormigón se puede considerar lineal hasta alcanzar la resistencia a tracción.

La separación media entre fisuras puede ser evaluada mediante la siguiente fórmula:

$$s_{rm} = \frac{2}{1.7} \cdot l_{s,max} = 1.17 \left(c + \frac{(f_{cm} - f_{Fism}) \cdot \Phi_s}{4\tau_{bm} \cdot \rho_{s,eff}} \right) \quad (3)$$

donde $l_{s,max}$ = longitud de transferencia; $f_{Fism} = 0,45 \cdot f_{R1}$; $\tau_{bm} = 1,8 \cdot f_{cm}$

Una vez obtenida la ley constitutiva del hormigón, se debe llevar a cabo un análisis seccional no lineal para obtener la tensión en la armadura. El programa PIEM [14] puede ser utilizado a estos efectos.

4. La fibra reciclada

La fibra reciclada se obtiene como subproducto del reciclaje de neumáticos fuera de uso. El material de mayor valor obtenido en este proceso es el granulado de caucho, que se usa en múltiples aplicaciones. Actualmente existen en el mercado al menos cuatro métodos de reciclaje (véase [7]). El más difundido, y además el que se ha utilizado para obtener las fibras utilizadas en este estudio, es el desgarre de los neumáticos, que prevé el corte de los neumáticos en cuadrados de dimensiones predefinidas. Por tanto, aunque la longitud de las fibras es estocástica, la longitud máxima está limitada. Otra consecuencia del proceso de obtención es que, si la longitud máxima es demasiado grande, las fibras obtenidas están entrelazadas entre sí y por tanto no se pueden introducir sin más tratamientos en el hormigón. En la figura 4 se puede observar el aspecto de las fibras tras su obtención.

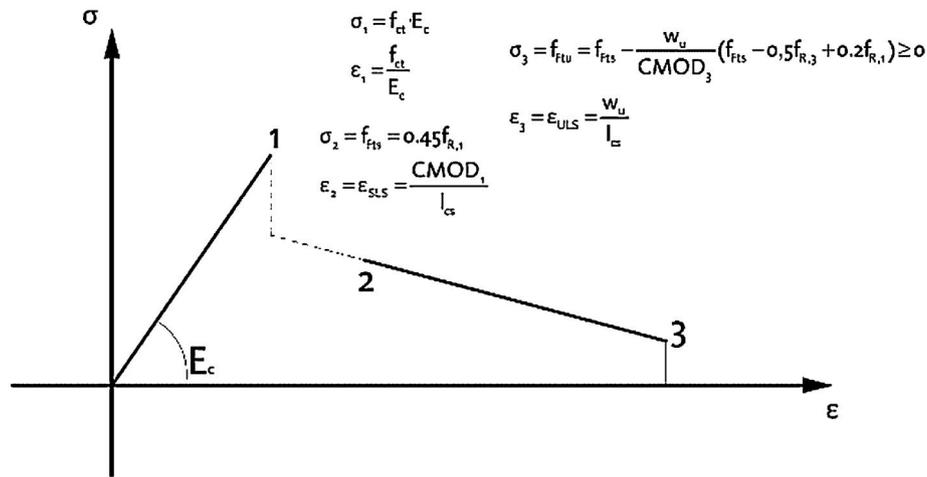


Figura 3. Ley constitutiva del HFR propuesta por MC2010. w_u se toma igual a 3,5 mm.



Figura 4. Fibras recicladas de neumático fuera de uso. Fuente: elaboración propia.

Habitualmente, las fibras son tratadas como chatarra y enviadas a fundición, para obtener nuevo acero. Este proceso implica consumo de energía, puesto que, si se quieren obtener fibras comerciales, hay que transportar las fibras al horno, fundir el acero, extruirlo, cortarlo y darle forma. Por lo que se refiere a la fibra reciclada, el único proceso que implica gasto de energía para obtener fibras aptas para el uso en el hormigón es el desmarañado mediante vibración y tamizado. Se ha llevado a cabo un análisis de ciclo de vida que contabiliza los ahorros

en términos de CO₂ emitido a la atmósfera. La comparación se muestra en la figura 5.

5. Campaña experimental

5.1. Campaña previa: vigas a escala

La campaña previa tenía como objetivo evaluar la eficacia de la fibra reciclada en la mejora del comportamiento a fisuración de elementos en HA. El esquema del ensayo se puede apreciar en la figura 6.

Se trata de vigas sometidas a flexión sin cercos en la zona de momento constante. Las diferencias entre las distintas vigas ensayadas están en el tipo de fibra (reciclada o comercial) y la dosificación (desde 0,5 a 1,3% en volumen), mientras que la cuantía de acero ($\rho = 1,57\%$) y el recubrimiento ($c = 20$ mm) se mantienen constantes. Las fibras utilizadas son las siguientes:

- Reciclada corta ($l/\Phi \approx 50$)-serie TR (Twincon Recycled, debido al nombre de la empresa que ha proporcionado las fibras).
- Reciclada larga ($l/\Phi \approx 150$)-serie R (Recycled).
- Industrial corta ($l/\Phi = 81$)-serie C (Commercial).

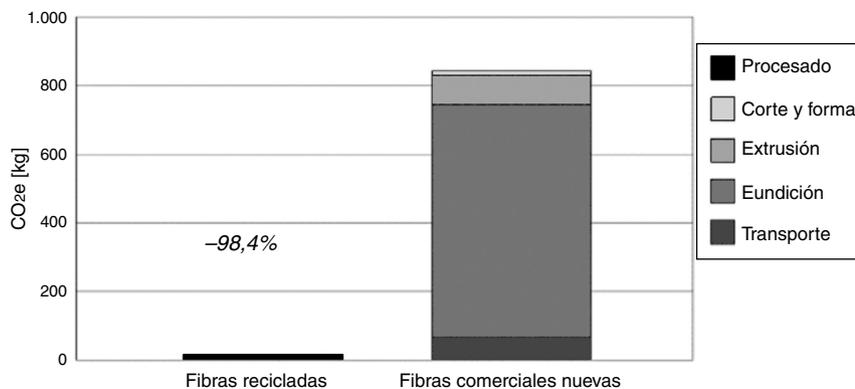


Figura 5. Comparación entre el CO₂ emitido para obtener una tonelada de fibra nueva vs. procesamiento de la misma fibra para uso en hormigón. Fuentes: WWF España, Universidad de Bath, SPRILUR.

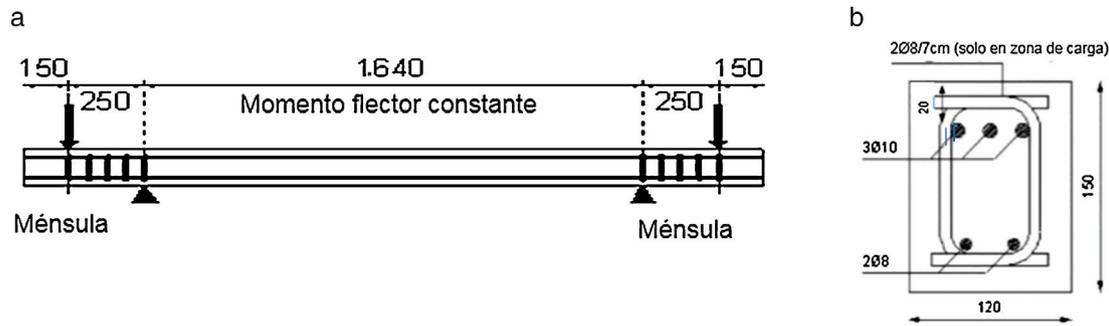


Figura 6. Esquema del ensayo de la campaña previa (a) y sección transversal de las vigas. Dimensiones en mm (b).

Tabla 1
Resumen de las vigas ensayadas en la campaña previa y características mecánicas del hormigón

Viga	Cuantía en fibras (V_f/V_c) (-)	f_{cm}^a (MPa)	f_{ctm} (MPa)	f_{R1m}^b (MPa)
H-10-20-0%	0	33,1	3,1	–
R-10-20-0.5% ^c	0,50%	34,7	5,5	5,6
R-10-20-0.86%	0,86%	48,1	6,4	8,4
C-10-20-0.86%	0,86%	32,7	5,5	3
C-10-20-1.3%	1,30%	25,4	4,6	3,2
CH-10-20-0.7%	0,70%	39	4,7	5,5
TR-10-20-0.86%	0,86%	43,1	6,2	3,8
TR-10-20-1.2%	1,20%	39,3	6,1	3,3

^a f_{cm} ensayo de compresión en cilindros de FRC.

^b Ensayo de flexotracción EN14651.

^c Este ensayo no pudo procesarse debido a que se produjo una rotura prematura por presencia de un erizo que impidió la penetración del hormigón en una zona de la probeta.

- Industrial con gancho ($l/\Phi = 86$)-series CH (Commercial Hooked).

Las vigas se nombran XX-YY-ZZ-WW, donde XX se refiere al tipo de fibra, YY al diámetro de las barras de armadura en tracción (10 mm), ZZ al recubrimiento (20 mm) y WW al contenido en fibras. Se llevaron a cabo dos ensayos de flexotracción según EN14651, cuyos resultados se pueden apreciar en la tabla 1.

En la figura 7a se pueden apreciar los resultados de los ensayos de flexotracción, y en la figura 7b el detalle de la zona 0-0,5 mm, de interés para el control de fisuración.

A la vista de estos resultados, se puede concluir que las fibras recicladas largas tienen un comportamiento posfisuración mejor que las cortas, incluso en el caso de R-0.86% mejor que la fibra

industrial con gancho CH-0.7%. Sin embargo, el hormigonado R-0.86% ha presentado grandes problemas por la formación de erizos de fibras. Por tanto, queda claro que se tiene que buscar el óptimo entre características mecánicas y trabajabilidad del hormigón fresco.

Las vigas se ensayaron según el esquema de la figura 6a midiendo el alargamiento del hormigón a lo largo de la zona de momento constante a la altura de las armaduras superiores e inferiores, y el número de fisuras en cada escalón de carga. En la tabla 2 se pueden apreciar los principales resultados obtenidos, de acuerdo con la metodología descrita en [8] y la comparación con las predicciones de MC2010.

Tal y como se puede observar en la tabla 2, el fibrorrefuerzo mejora en todos los casos la abertura de fisura respecto de la probeta de HA. Las predicciones de MC2010 son en general

Tabla 2
Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos preliminares de fisuración

Viga	s_m medida (mm)	f_{fism} (MPa)	MC2010 s_m (mm)	Error ^a (-)	w_m medida ^b (μ m)	Mejora ^c (-)	w_m MC2010 (μ m)	Error ^a (-)
H-10-20-0%	68	–	111	39%	113	–	162	30%
R-10-20-0.86%	48	3,8	72	33%	77	32%	24	-214%
C-10-20-0.86%	67	1,4	95	30%	76	33%	57	-33%
C-10-20-1.3%	67	1,4	91	26%	86	23%	68	-27%
CH-10-20-0.7%	55	2,5	76	28%	37	67%	42	12%
TR-10-20-0.86%	55	1,7	93	41%	39	65%	55	29%
TR-10-20-1.2%	59	1,5	95	38%	42	63%	61	31%

^a El error se evalúa como $(1-s_{m,medido}/s_{m,MC2010})$ y $(1-w_{m,medido}/w_{m,MC2010})$.

^b Medida para un momento flector de 6,25 kNm.

^c La mejora se evalúa como $(1-w_{HFR}/w_{HA})$.

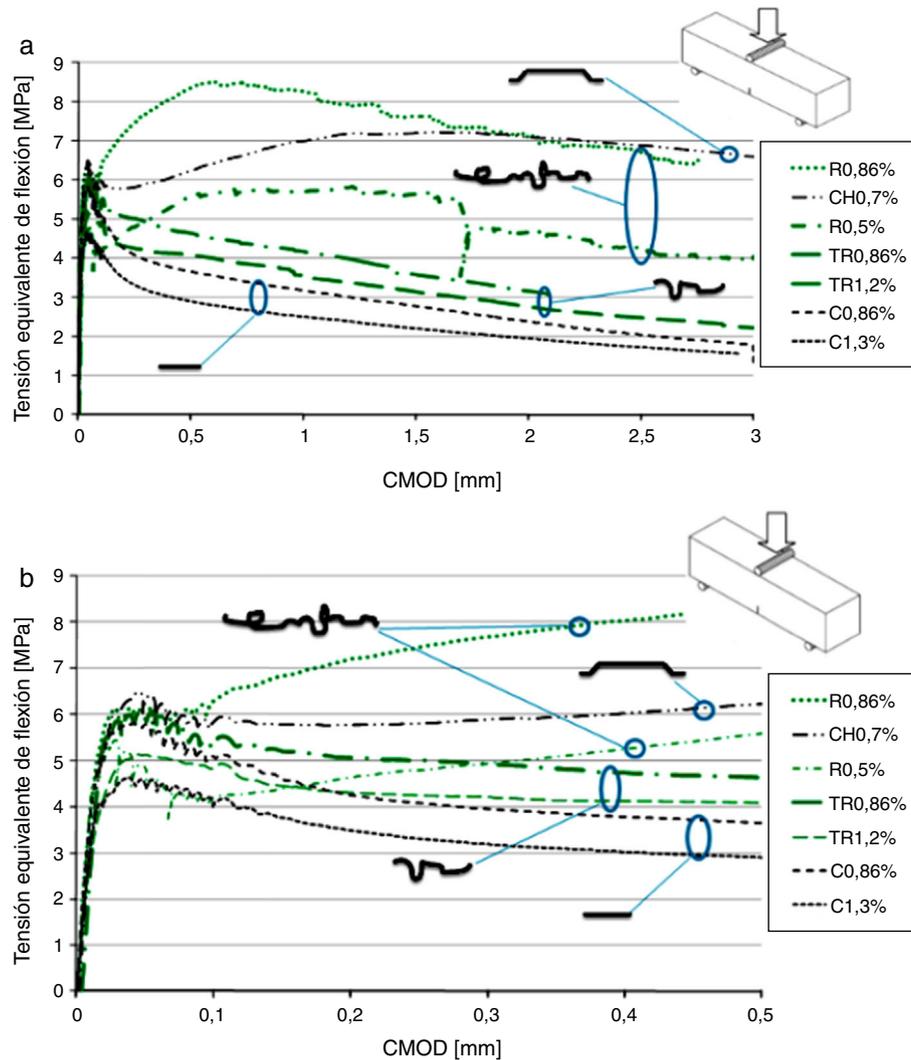


Figura 7. Resultados de flexotracción de la campaña preliminar (a) y detalle de la zona 0-0,5 mm (b).

cercanas a los resultados experimentales teniendo en cuenta la aleatoriedad de los procesos de fisuración. Existe un gran error para el caso de la viga R-10-20-0.86% que puede ser explicado por el hecho de que se obtuvo en el ensayo según EN14651 una resistencia residual anormalmente alta y, a la vista de estos resultados, quizás no realista. Ello apunta a la necesidad de aumentar el número de estos ensayos con objeto de poder descartar resultados anómalos y obtener valores estadísticamente más representativos.

5.2. Fibras recicladas y hormigón utilizados en la campaña principal

El aspecto de las fibras puede ser observado en la figura 8a. La longitud de las fibras es estocástica. Por ello, se ha llevado a cabo un análisis de distribución de las longitudes, tal y como se puede apreciar en la figura 8b. Ello permite una mejor caracterización de la fibra y facilitaría, en su caso, la replicación de los ensayos.

Las fibras han sido introducidas junto con los demás componentes del hormigón en el camión en el siguiente orden: áridos, fibras, cemento, agua y aditivos. Cada hormigonado de

5 m³ se ha subdividido en tres mezclas de 1,7 m³. El tiempo de mezcla en fábrica ha sido de 15 min. Otros 15 min han sido necesarios en concepto de tiempo de desplazamiento entre la fábrica y la obra.

Se han utilizado dos cuantías de fibras, 0,5 y 1,0% en volumen. Durante el hormigonado no se han formado erizos. Ello se asocia con el uso de hormigón autocompactante. Las propiedades del hormigón utilizado en la campaña principal se detallan en la tabla 3, mientras que en la figura 9 se muestran los resultados de los ensayos de flexotracción según EN14651.

5.3. Vigas a escala 1:1

El esquema de ensayo de las vigas es similar al de los ensayos preliminares, y se muestra en la figura 10a. Asimismo, las secciones de las vigas ensayadas se muestran en la figura 10b.

Los resultados de los ensayos en términos de abertura de fisura y mejora debida al uso de fibra reciclada se detallan en la tabla 4. Para cada serie, se detallan los resultados correspondientes al momento de servicio, que se toma como aquel que genera en la viga sin fibrorreforzada una tensión teórica (sobre

Tabla 3
Características mecánicas del hormigón utilizado en la campaña principal

Serie	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	LOP (MPa)	$f_{R,1m}$ (MPa)	$f_{R,2m}$ (MPa)	$f_{R,3m}$ (MPa)
0%	37,5	4,2	–	–	–	–
0,50%	36,4	3,1	3,1	1,53	1,08	0,51
1,00%	37,5	3,3	3,53	2,21	1,72	1,26

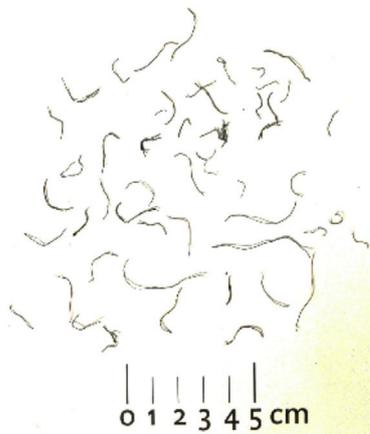
Tabla 4
Resultados en términos de fisuración para las vigas de la campaña principal

Viga	M_k (kNm)	w_{max} MC2010 (μm)	w_{max} medida (μm)	Mejora ^a (–)	Error ^b (–)
12-20-0%	50	272	310	–	–14%
12-20-0.5%	50	150	150	107%	0%
12-20-1%	50	135	120	158%	11%
12-70-0%	46	456	420	–	8%
12-70-0.5%	46	209	210	100%	0%
12-70-1%	46	141	130	223%	8%
25-20-0%	180	199	340	–	–71%
25-20-0.5%	180	148	200	70%	–35%
25-20-1%	180	131	250	36%	–91%
25-70-0%	157	327	610	–	–87%
25-70-0.5%	157	246	320	91%	–30%
25-70-1%	157	220	400	53%	–82%

^a La mejora se evalúa con respecto a las vigas en HA como $(1-w_{FRC}/w_{RC})$.

^b El error se evalúa como $(1-w_{max,medida}/w_{max,MC2010})$.

a



b

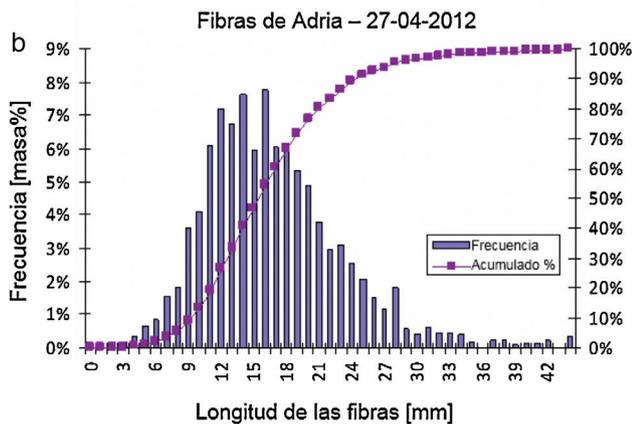


Figura 8. Aspecto de la fibra reciclada (a) y distribución estadística de las fibras recicladas utilizadas en la campaña principal (cortesía de Twincon Ltd.) (b).

sección fisurada) de 250 MPa en la armadura. Los resultados de las vigas sin fibra se toman de la referencia [8].

Tal y como se puede apreciar en la tabla, la adición de fibra reciclada conlleva siempre una mejora en el comportamiento a fisuración, a pesar de que las características mecánicas del fibrorrefuerzo son modestas. Ello es especialmente cierto en el caso de escasa armadura y grandes recubrimientos como es el caso de la viga 12-70-1%, en la cual se ha medido una mejora de más del doble en la abertura de fisura.

Se nota también que las predicciones de acuerdo con MC2010 se ajustan de forma satisfactoria a las mediciones experimentales, teniendo siempre en cuenta la aleatoriedad del fenómeno. El error es menos para vigas con cuantías menores, mientras que para las vigas armadas con barras de 25 mm la formulación tiende a infravalorar los valores experimentales.

5.4. Soportes con desplazamiento impuesto

Otro tipo de estructuras cuyo proyecto se ve condicionado por la abertura de fisura son los soportes de las estructuras integrales, es decir, aquellas construcciones en las que los desplazamientos impuestos son absorbidos mediante flexión de las columnas (fig. 11).

También se ha llevado a cabo una campaña experimental para estudiar este tipo de problema. Las columnas ensayadas están sometidas a un axil constante (mediante una barra postensada) y un desplazamiento impuesto en cabeza. Los parámetros estudiados son: diámetro de las armaduras en tracción (12 y 25 mm), contenido en fibras V_f y axil reducido ν . El esquema del ensayo se puede apreciar en la figura 12.

Los ensayos se llevan a cabo en control de desplazamiento hasta la rotura de la probeta. En la figura 13 se pueden apreciar las

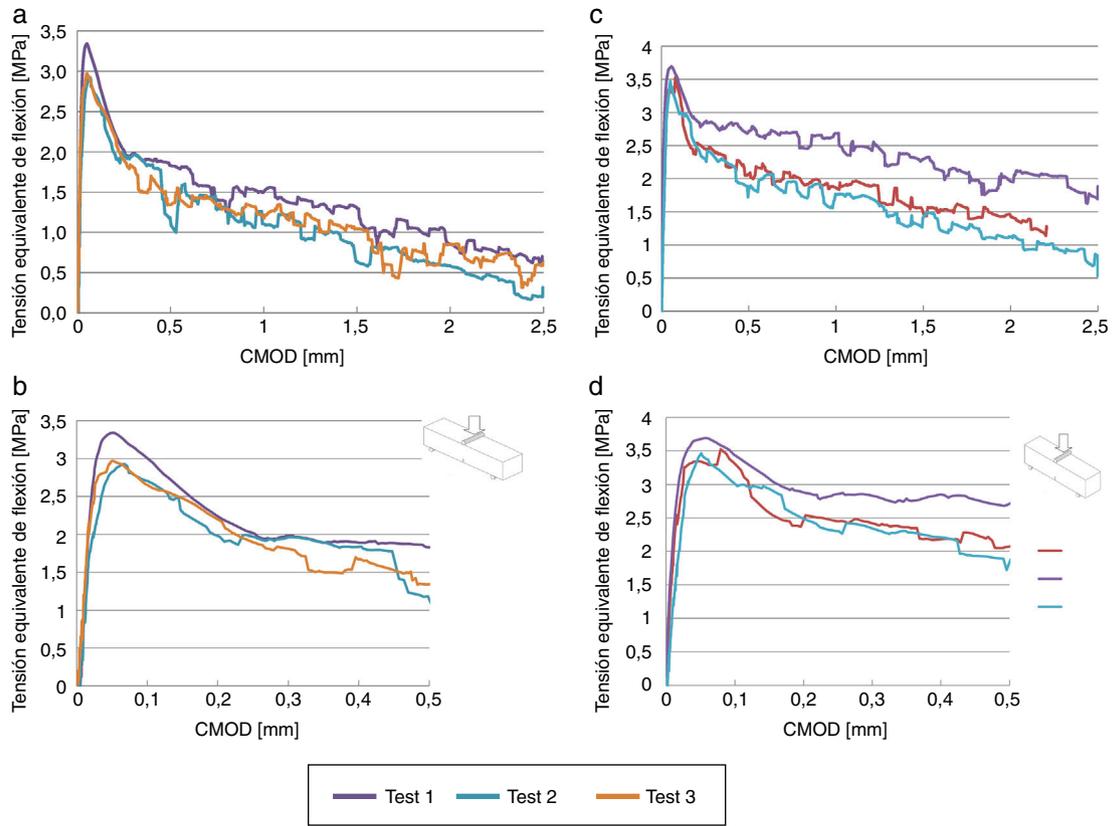


Figura 9. Ensayos de flexotracción: $V_f = 0,5\%$ ensayo completo (a) y detalle de la zona 0-0,5 mm (b); $V_f = 1,0\%$ ensayo completo (c) y detalle de la zona 0-0,5 mm (d).

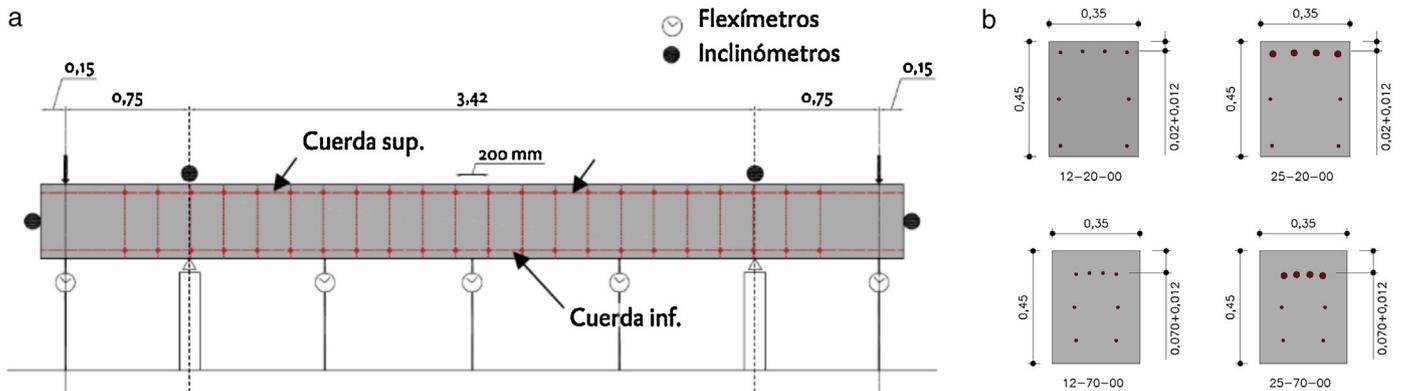


Figura 10. Esquema de los ensayos en vigas a tamaño real (a) y secciones (b).

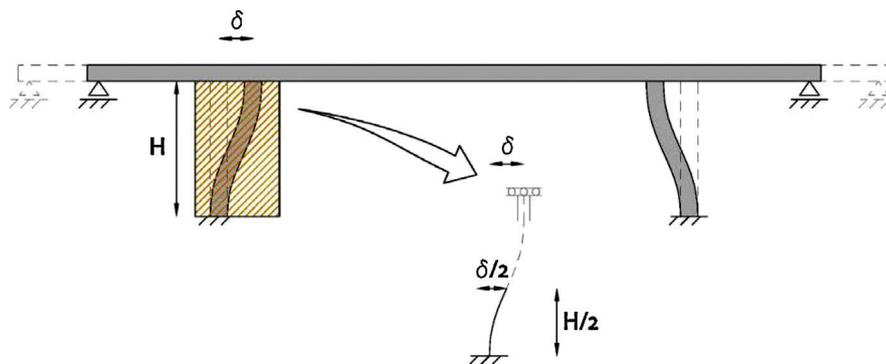


Figura 11. Concepto de los ensayos de soportes y su relación con estructuras reales.

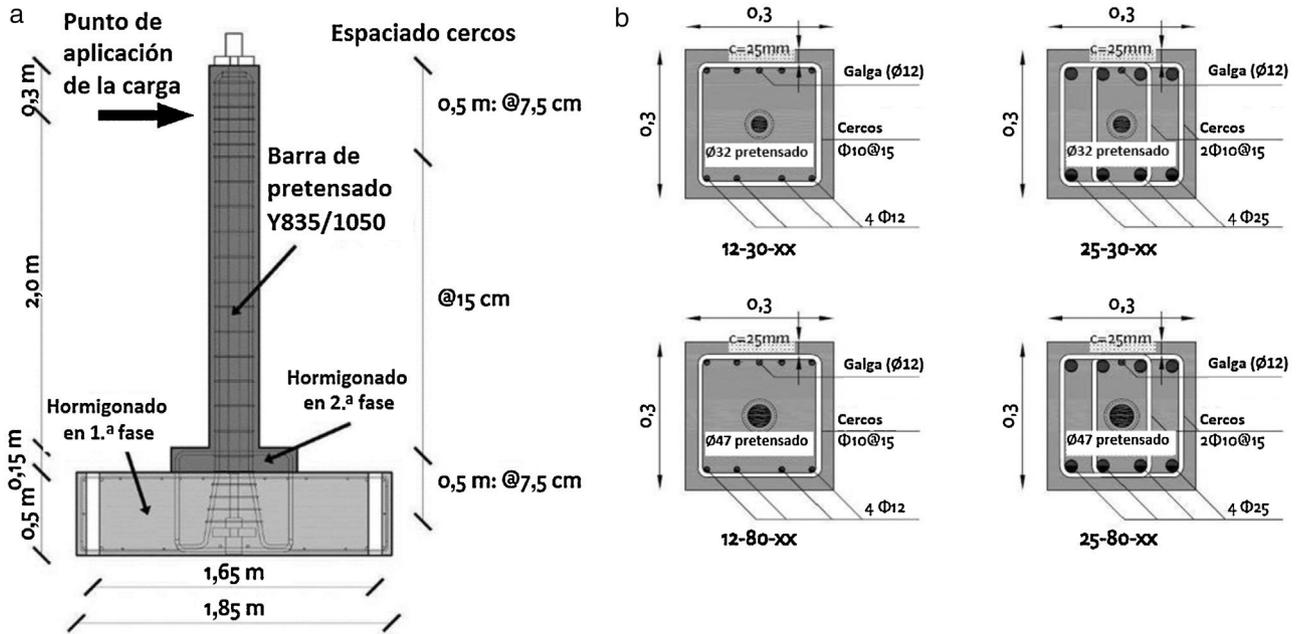


Figura 12. Esquema del ensayo de soportes (a) y secciones de las probetas (b).

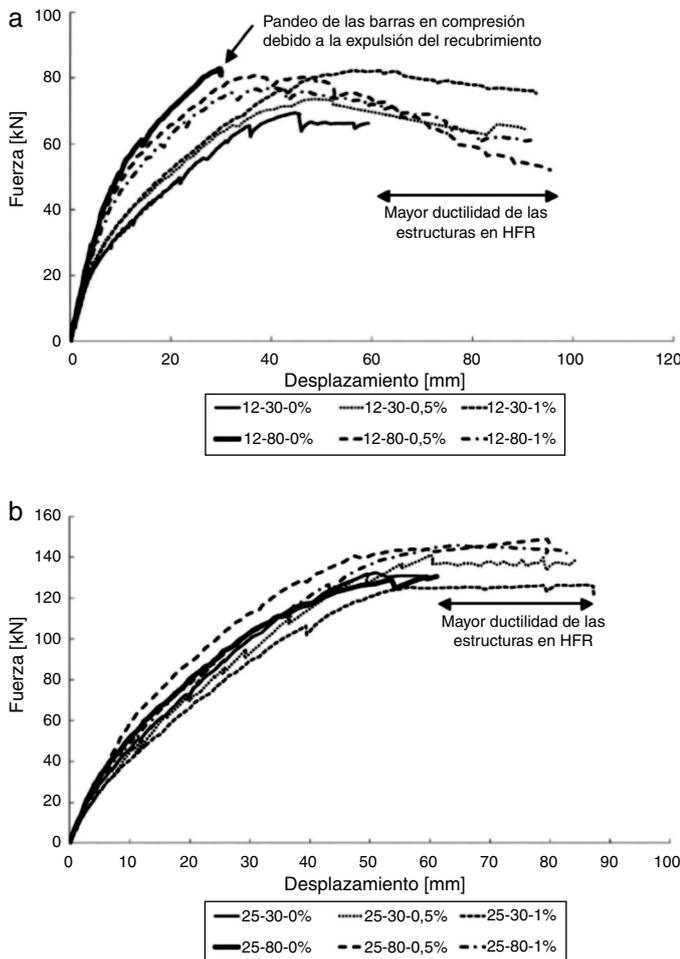


Figura 13. Diagramas F/δ para los ensayos de soporte con armadura Ø12 mm (a) y Ø25 mm (b).

gráficas fuerza/desplazamientos de los ensayos llevados a cabo. Una primera constatación es que la adición de fibras, al prevenir la expulsión del recubrimiento, evita el pandeo de las barras en compresión y por tanto aumenta la ductilidad de los soportes. Esta característica del fibrorrefuerzo resulta muy interesante para aquellas aplicaciones en las que se requiere mucha ductilidad a los elementos en HA, como por ejemplo las estructuras en zona sísmica.

Los resultados en términos de fisuración se presentan en la tabla 5, para dos niveles de tensión teórica en el acero en tracción (250 y 300 MPa) en una sección sin fibrorreforzar. En este caso, la mejora no es tan clara como en el caso de los ensayos de vigas. Asimismo, se nota una dispersión mayor entre los valores predichos y los medidos. Ambos efectos pueden estar relacionados con la presencia de los cercos, que influyen en la separación media entre fisuras, lo que en elementos sometidos a momento variable puede llevar a concentraciones de deformaciones en el acero y por tanto a aberturas de fisuras mayores de lo esperable. Aun así, a la vista de los resultados se puede decir que la adición de fibras mejora en general el comportamiento a fisuración.

6. El proyecto Anagennisi

En el marco del proyecto de investigación europeo (FP7) Anagennisi (renacimiento) [15], se están estudiando aplicaciones en las cuales las fibras recicladas suponen una clara mejora de cara a la sostenibilidad de las estructuras de hormigón.

Una primera aplicación con un gran potencial son las estructuras de contención de líquidos. En la referencia [16], se detalla el ejemplo de un depósito de agua circular de HA de 12.300 m³ de capacidad con un diámetro interno de 56,00 m y una altura máxima de agua de 5,25 m. Este estudio concluye que dependiendo de la limitación de la abertura de fisura, se puede ahorrar entre un 37 y un 32% en términos de coste, un

Tabla 5
Resultados en términos de fisuración para los ensayos de soportes

Soporte	$\sigma_{s2} = 250$ MPa				$\sigma_{s2} = 300$ MPa			
	w_{\max} MC2010 (μm)	w_{\max} medida (μm)	Mejora ^a (%)	Error ^b (%)	w_{\max} MC2010 (μm)	w_{\max} medida (μm)	Mejora ^a (%)	Error ^b (%)
12-30-0%	186	125	–	33%	295	175	–	41%
12-30-0.5%	155	152	–22%	2%	241	230	–31%	5%
12-30-1%	132	95	24%	28%	208	113	35%	46%
25-30-0%	154	232	–	–51%	217	377	–	–74%
25-30-0.5%	120	287	–24%	–139%	169	382	–1%	–126%
25-30-1%	108	50	78%	54%	152	111	71%	27%
12-80-0%	184	189	–	–3%	293	249	–	15%
12-80-0.5%	142	163	14%	–15%	214	238	4%	–11%
12-80-1%	123	219	–16%	–78%	185	165	34%	11%
25-80-0%	154	186	–	–21%	217	162	–	25%
25-80-0.5%	119	124	33%	–4%	169	173	–7%	–2%
25-80-1%	103	176	5%	–71%	149	182	–12%	–22%

^a La mejora se evalúa, en cada serie, con respecto al soporte en HA como $(1 - w_{\text{HFR}}/w_{\text{HA}})$.

^b El error se evalúa como $(1 - w_{\text{max,medida}}/w_{\text{max,MC2010}})$.

Tabla 6
Comparación del canto necesario para cumplir con el ELS de deformaciones para una cuantía geométrica del 0,5%, distintos valores de la relación carga permanente/carga total

			L (m)	d_{RC} (m)	d_{FRC} (m)	h_{RC} (m)	h_{FRC} (m)	$h_{\text{FRC}}/h_{\text{RC}}$
C30/37	$q_G/Q_{\text{Tot}} = 0,5$	Simplemente apoyado	6	0,29	0,21	0,34	0,26	78%
			8	0,38	0,29	0,43	0,34	78%
		Continuo	6	0,19	0,14	0,24	0,19	80%
			8	0,26	0,19	0,31	0,24	79%
	$q_G/Q_{\text{Tot}} = 0,75$	Simplemente apoyado	6	0,36	0,27	0,41	0,32	77%
			8	0,48	0,36	0,53	0,41	77%
		Continuo	6	0,24	0,18	0,29	0,23	79%
			8	0,32	0,24	0,37	0,29	78%
C60/75	$q_G/Q_{\text{Tot}} = 0,5$	Simplemente apoyado	6	0,2	0,11	0,25	0,16	66%
			8	0,27	0,15	0,32	0,20	64%
		Continuo	6	0,13	0,08	0,18	0,13	69%
			8	0,18	0,1	0,23	0,15	66%
	$q_G/Q_{\text{Tot}} = 0,75$	Simplemente apoyado	6	0,26	0,15	0,31	0,20	64%
			8	0,34	0,19	0,39	0,24	62%
		Continuo	6	0,17	0,1	0,22	0,15	66%
			8	0,23	0,13	0,28	0,18	64%

48% en términos de emisión de CO₂ y entre un 16 y un 21% en términos de consumo energético.

Una segunda aplicación con gran potencial está en el aumento de la esbeltez en forjados de edificación. Para losas, que son elementos con baja cuantía de armadura (en torno al 0,5%), el uso de fibras permite esbelteces significativamente mayores, lo cual supone una reducción en el gasto de hormigón que, sin embargo, debe compensarse con la adición de fibras. A pesar de ello, dado que la huella medioambiental de la fibra reciclada es muy pequeña, su uso en este tipo de aplicación daría lugar a una clara mejora desde el punto de vista de la sostenibilidad de las estructuras de hormigón. En este caso, para evitar un aumento significativo de la cuantía de armadura, resulta necesario considerar el aporte de las fibras a la resistencia de las secciones en ELU, lo cual es viable siempre y cuando la resistencia residual para un $\text{CMOD} = 2,5$ mm sea, al menos, la mitad que la correspondiente a un $\text{CMOD} = 0,5$ mm. Se trata de un nivel que es alcanzable con fibras recicladas, con un adecuado control

de fabricación. En la referencia [17] se presenta un estudio de límites de esbeltez en el que se comparan los límites de esbeltez de vigas fibrorreforzadas, considerando una ley de ablandamiento muy modesta ($f_{\text{Rm1}} = 0,5f_{\text{ctm}}$, y $f_{\text{Rm3}} = 0,25f_{\text{ctm}}$) con los límites de esbeltez correspondientes a soluciones convencionales. En la tabla 6, se muestra un resumen del estudio en el que se puede ver que el canto de los forjados se podría reducir entre un 20 y un 38%, lo cual supone una mejora significativa.

7. Conclusiones

A la luz de lo expuesto anteriormente, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- La adición de fibras al HA con barras convencionales es una solución técnica y económicamente atractiva para aquellos problemas condicionados por limitaciones en el ancho de

fisura (p. ej., estructuras en ambientes agresivos, estancas, integrales).

- La fibra reciclada es una opción viable de fibrorrefuerzo. Los resultados obtenidos en este estudio muestran mejoras significativas a pesar de las modestas propiedades residuales de las fibras utilizadas. Al utilizar fibras con mejores propiedades es de esperar que la mejora en términos de abertura de fisura sea aún mayor.
- La metodología de análisis propuesta por MC2010 es de simple implementación en la práctica ingenieril de todos los días, siendo la única dificultad tener que llevar a cabo un análisis seccional no lineal.
- Dentro del proyecto Anagennisi, se están estudiando aplicaciones potenciales de las fibras recicladas habiendo identificado dos candidatos muy claros: las estructuras de contención de aguas y los forjados de edificación. Ambas aplicaciones se caracterizan por cuantías de armado bajas, para las cuales los efectos de contribución del hormigón entre fisuras son significativos y por venir condicionados por los estados límites de servicio.

Agradecimientos

Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras de la ETSICCP de la UPM en el marco del programa de investigación «Uso de hormigones con fibras recicladas de NFU en estructuras integrales» liderado por COMSA-EMTE, S.A. y financiado parcialmente por el Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), proyecto número IDI_2011480. El proyecto Anagennisi cuenta con financiación de la Unión europea dentro del Programa marco FP7.

Los autores querrían expresar su agradecimiento al Prof. Peter Waldron de la Universidad de Sheffield y Twincon Ltd. por haber proporcionado las fibras recicladas.

Bibliografía

- [1] R.F. Zollo, Fibre-reinforced concrete: An overview after 30 years of development, *Cem. Concr. Compos.* 19 (2) (1995) 107–122.
- [2] K.H. Tan, P. Paramasivam, K.C. Tan, Cracking characteristics of reinforced steel fiber concrete beams under short- and long-term loadings, *Adv. Cem. Based Mater.* 2 (1995) 127–137.
- [3] T. Leutbecher, E. Crack Fehling, Width control for combined reinforcement of rebars and fibres exemplified by ultra-high-performance concrete. En: *Fib Task Group 8.6, Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete*, Varenna, Italy, 2008.
- [4] E. Vasaneli, F. Micelli, M.A. Aiello, G.A. Plizzari, Mechanical and cracking behaviour of concrete beams with steel bars and short fibres, *Studies and Researches* 31, Graduate School Fratelli Pesenti, 2011.
- [5] GL Balázs, I. Kovács, Effect of steel fibres on the cracking behaviour of RC members. En: *6 th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Varenna, Italy, 2004.
- [6] Fédération Internationale du Béton, *fib Model Code 2010 - Final draft* (bulletins 65 and 66), 2012.
- [7] K. Pilakoutas, K. Neocleous, H. Tlemat, Reuse of steel fibres as concrete reinforcement, *Eng. Sustain.* 157 (2004) 131–138.
- [8] A. Pérez Caldentey, H. Corres Peiretti, A. Giraldo Soto, J. Peset Iribarren, Cracking of RC members revisited. Influence of cover, ϕ/ρ_s , eff and stirrup spacing. *An Experimental and Theoretical Study*, *Struct. Concrete.* 14 (2013) 69–78.
- [9] G. Groli, *Crack Width Control in RC Elements with Recycled Steel Fibres and Applications to Integral Structures: Theoretical and Experimental Study*, Tesis doctoral, ETSICCP UPM, Madrid, 2014.
- [10] G. Groli, A. Pérez Caldentey, A. Giraldo Soto, Cracking performance of SCC reinforced with recycled fibres – an experimental study, *Struct. Concrete.* 15 (2) (2014) 136–153.
- [11] G. Groli, A. Pérez Caldentey, A. Giraldo Soto, F. Marchetto, J. Ezeberry Parrotta, Simplified serviceability design of jointless structures. Experimental verification and application to typical bridge and building structures, *Eng. Struct.* 59 (2014) 469–483.
- [12] G. Groli, A. Pérez Caldentey, F. Marchetto, F. Arfíñez Fernández, Serviceability performance of FRC columns under imposed displacements: An experimental study, *Eng. Struct.* 101 (2015) 450–464.
- [13] EN14651, Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality [LOP], residual), 2007.
- [14] A. Pérez, I. Fernández-Espartero, PIEM - Prontuario Informático de Estructura Metálica y Mixta, APTA, 2012 [consultado 1 Abr 2014]. Disponible en: descargable en www.fhecorconocimiento.es
- [15] K. Pilakoutas, S. Raffoul, P. Papastergiou, R. Garcia, M. Guadagnini, I. Hajirasouliha, Proceedings of the International Conference on Sustainable Structural Concrete, 15-18 September 2015, La Plata, Argentina, en: *Innovative reuse of all tyre components in concrete: The Anagennisi project*, LEMIT (Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica), 2015.
- [16] A. Pérez Caldentey, J. Giménez Vila, J.M. Ortolano González, F. Rodríguez García, G. Groli, Contributing to sustainability of concrete by using steel fibres from recycled tyres in water retaining structures, en: J.C. Gálvez, A. Aguado de Cea, D. Fernández Ordóñez, K. Sakai, E. Reyes, M.J. Casati, et al. (Eds.), *II International Conference on Concrete Sustainability (ICCS16)*, 13-15 June 2016, Madrid, España. *Book of Abstracts*, International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), España, 2016, p. 87.
- [17] A. Pérez Caldentey, C. Mestre García, J. Mendoza Cembranos, A new way to sustainability: Designing more slender building structures by using recycled steel fibres, en: I. Banjad Pecur, A. Baricevic, N. Stirmer, D. Bjugovic (Eds.), *Construction Materials for Sustainable Future. Proceedings of the 1 st International Conference CoMs-2017*, 19-21 April 2017, Zadar, Croatia, University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Zagreb, Croatia, 2017, pp. 934–940.