

## Cuantías mínimas de refuerzo para dovelas de hormigón reforzado con fibras para anillos túnel. Campaña experimental

*Minimum reinforcement in fibre reinforced concrete for segments in tunnel linings.  
Experimental program*

### Eduardo GALEOTE MORENO

Ingeniero Civil  
Universidad Politécnica de Cataluña  
Doctorando  
[eduardo.galeote@upc.edu](mailto:eduardo.galeote@upc.edu)

### Ana BLANCO ÁLVAREZ

Dra. Ingeniera de Caminos  
Universidad Politécnica de Cataluña  
Investigadora postdoctoral  
[ana.blanco@upc.edu](mailto:ana.blanco@upc.edu)

### Albert DE LA FUENTE ANTEQUERA

Dr. Ingeniero de Caminos  
Universidad Politécnica de Cataluña  
Profesor lector  
[albert.de.la.fuente@upc.edu](mailto:albert.de.la.fuente@upc.edu)

### Nadia QUIJANO ARTEAGA

Ingeniera Civil  
Universidad Politécnica de Cataluña  
MSC  
[nadiaquijano23@gmail.com](mailto:nadiaquijano23@gmail.com)

### Luis-Manuel PINILLOS LORENZANA

Dr. Ingeniero de Caminos  
Acciona-Ghella Joint Venture  
Jefe de proyectos de túneles  
[luis.pinillos@agiv.no](mailto:luis.pinillos@agiv.no)

## RESUMEN

Para establecer la cuantía mínima de refuerzo y asegurar la respuesta dúctil de una estructura ante una eventual fisura, el *fib* Model Code 2010 establece unos requisitos resistentes y deformacionales. En elementos isostáticos como dovelas en fases de carga transitorias, estos requisitos pueden no ser representativos debiendo plantearse otros más adecuados para optimizar la cuantía de fibras. Para ello se planteó ensayar 15 losas con distintas combinaciones de armadura, cuantía y tipo de fibras. Los resultados muestran el comportamiento hasta rotura de las diferentes configuraciones de refuerzo, demostrando la posibilidad de una sustitución parcial de armadura por fibras.

## ABSTRACT

In order to determine the minimum reinforcement in tunnel segments and ensure its ductile failure in the event of a hypothetical rupture, the *fib* Model Code 2010 specifies some resistant and deformational requirements. In isostatic elements as tunnel linings, these requirements might not be representative and other options should be set out so the content of fibres may be optimized. For this reason, 15 slabs with different combinations of rebars, contents and types of fibres were tested. The results show the influence of the reinforcement configurations in the post-cracking regime, thus proving the feasibility of a partial replacement of traditional reinforcement by fibres.

**PALABRAS CLAVE:** Escala real, hormigón con fibras, resistencia post-rotura, rotura dúctil.

**KEYWORDS:** Full-scale test, fibre reinforced concrete, post-cracking strength, ductile failure.

## 1. Introducción

El uso de fibras es un recurso cada vez más utilizado como refuerzo en la fabricación de dovelas de hormigón para túneles [1,2]. Este tipo de estructuras se encuentran sometidas en estado de servicio a esfuerzos de compresión, por lo que las etapas de desencofrado, transporte, manipulación e instalación resultan las más críticas a nivel de flexión. Debido a que la utilización puede conducir a beneficios tanto técnicos como económicos respecto la armadura pasiva tradicional en estos elementos, cabe la posibilidad de plantear una sustitución parcial o total de la armadura tradicional por fibras [3–6] para mejorar la eficiencia y reducir los costes de producción.

El objetivo principal de este documento es plantear la optimización del refuerzo para dovelas de túneles determinando la cuantía mínima siguiendo el criterio de ductilidad parecido al planteado en el *fib* Model Code 2010 [7], si bien con alguna matización para adecuarlo a estructuras isostáticas. Para alcanzar este objetivo, se plantea la ejecución de una campaña experimental para caracterizar un hormigón reforzado con distintos tipos y cuantías de fibras. Asimismo, se plantea la ejecución de 15 ensayos a escala real de losas de grandes dimensiones con las que determinar el grado de ductilidad asociado a diferentes configuraciones de diseño.

## 2. Campaña experimental



### 2.1. Dosificaciones y caracterización del material

Para la fabricación de los elementos de la campaña experimental se utilizó una única dosificación en la que se varió el contenido y tipo de fibra. Se utilizó una relación agua-cemento (a/c) de 0.36 y superplastificante en un contenido del 1.5% sobre el peso de cemento (s.p.c.). Se incorporó un aditivo aireante cuyo contenido varió entre el 0.03% y el 0.1% s.p.c. Las diferencias en el contenido de agente aireante son debidos a ajustes como consecuencia de la incorporación de aire introducido por la propia energía de amasado. La dosificación también incorpora fibras de polipropileno de 12 mm de longitud (L) en un contenido de 1.5 kg/m<sup>3</sup>. Los detalles de la dosificación se muestran en la Tabla 1.

Dos tipos de fibra de acero se utilizaron en la fabricación y producción de las losas, cuyas propiedades se muestran en la Tabla 2. Las fibras 3D presentan extremos conformados, mientras que las fibras 4D presentan un doble conformado en sus extremos para mejorar la adherencia y anclaje al hormigón.

Material	Contenido [kg/m <sup>3</sup> ]
Cemento II B-M 42.5R	400
Microsílice	16
Agua	143
Arena natural 0/8	387
Arena 0/8	461
Árido grueso 8/16	352
Árido grueso 16/22	652
Superplastificante	1.5% s.p.c.
Aditivo aireante	0.03 – 0.1% s.p.c.
Fibra de polipropileno - $\Phi$ 0.18 mm / L = 12 mm	1.5

**Tabla 1. Composición de las dosificaciones.**

Características	Fibras 3D		Fibras 4D	
Longitud [mm]	35		35	
Diámetro [mm]	0.55		0.55	
Relación de aspecto [-]	64		64	
Resistencia a tracción [MPa]	1325		1850	
Módulo de elasticidad [GPa]	200		200	

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

Los resultados de caracterización del hormigón se muestran en la Tabla 3. Para determinar sus propiedades se ejecutaron ensayos de compresión sobre probetas cúbicas de 150x150 mm. El módulo de elasticidad se determinó sobre probetas cilíndricas de  $\Phi 150 \times 300$  mm y las cuatro dosificaciones de hormigón con fibras en su mezcla se ensayaron mediante el método de flexotracción en vigas de 150x150x600 mm para determinar su resistencia de fisuración y residual.

Propiedades [MPa]	0SF	3D_25kg	3D_30kg	4D_20kg	4D_25kg
$f_{cm}$	65.8	81.5	96.8	60.6	73.6
$E_{cm}$	37442	35510	39760	28627	33359
$f_{LOP}$	-	5.48	6.03	4.94	6.48
$f_{R1}$	-	3.33	3.87	3.22	6.24
$f_{R2}$	-	1.84	2.14	2.65	5.64
$f_{R3}$	-	0.91	1.39	2.41	4.76
$f_{R4}$	-	0.65	1.02	2.09	3.64

**Tabla 3. Resultados de caracterización de las dosificaciones.**

## 2.2. Fabricación de las losas

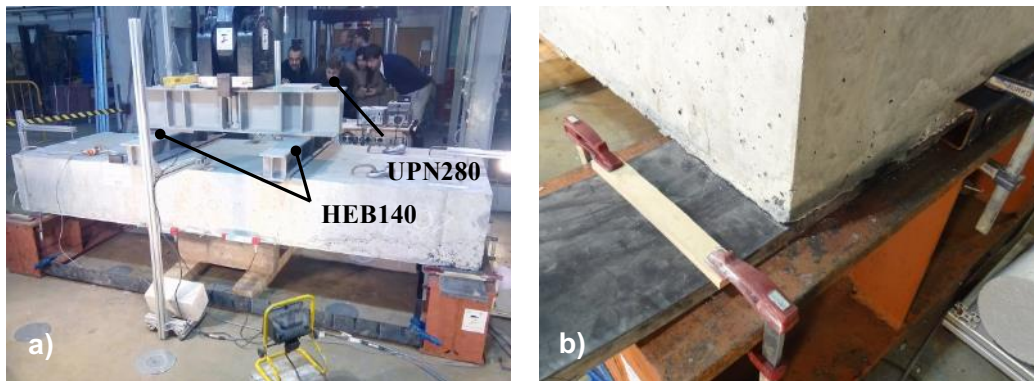
Un total de 15 losas con dimensiones de 3.0 m de longitud, 1.0 m de ancho y 0.4 m de espesor fueron fabricadas. Se plantearon 13 combinaciones de refuerzo de armado y fibras (Tabla 4), entre las que se utilizó dos configuraciones de armado distintas. El refuerzo de barras  $R_1$  consiste en  $5\Phi 8-2\Phi 10+2\Phi 8$  en la cara superior y  $8\Phi 8+2\Phi 8$  ( $502 \text{ mm}^2$ ) en la cara inferior. Por otro lado, la combinación de armado  $R_2$  estaba formada por  $3\Phi 8-2\Phi 10+2\Phi 8$  en la cara superior y  $6\Phi 8+2\Phi 8$  ( $402 \text{ mm}^2$ ) en la cara inferior de la losa.

Losa	Armadura	Fibras
T01	NO	NO
T02	NO	25 kg/m <sup>3</sup> 65/35 3D
T03	NO	20 kg/m <sup>3</sup> 65/35 4D
T04	NO	30 kg/m <sup>3</sup> 65/35 3D
T05	$R_1$	NO
T06	$R_2$	NO
T07 (1-2)	$R_1$	25 kg/m <sup>3</sup> 65/35 3D
T08 (1-2)	$R_1$	20 kg/m <sup>3</sup> 65/35 4D
T09 (1-2)	$R_1$	30 kg/m <sup>3</sup> 65/35 3D
T10	$R_2$	25 kg/m <sup>3</sup> 65/35 3D
T11	$R_1$	25 kg/m <sup>3</sup> 65/35 4D
T12	$R_2$	20 kg/m <sup>3</sup> 65/35 4D

**Tabla 4. Combinaciones de armadura y fibras de las losas.**

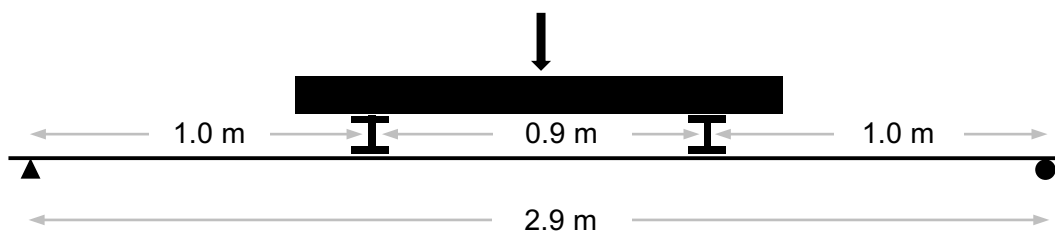
### 2.3. Configuración de ensayos sobre losas

Los ensayos se realizaron utilizando una prensa MTS con una capacidad de 1000 kN y un desplazamiento total del pistón de 500 mm. La carga se transmite desde la prensa a una viga de acero rigidizada fabricada con dos perfiles UPN 280. Esta viga transmite la carga a la losa a través de dos perfiles HEB 140 colocados transversalmente sobre la losa (Figura 1). Bajo cada uno de dichos perfiles, y en contacto con la losa, se colocó una lámina de neopreno de 10 mm de espesor y 100 mm de ancho para asegurar un contacto completo con la superficie de la losa. Como también se muestra en la Figura 1, para los apoyos de los extremos de la losa se utilizaron láminas de neopreno de un espesor de 20 mm y un ancho de 200 mm.



**Figura 1. a) Configuración general del ensayo y b) apoyo de neopreno.**

Los ensayos sobre las losas se diseñaron considerando una configuración isostática similar al ensayo de flexión a cuatro puntos. Para ello, se definió una distancia entre apoyos de 2.9 m y una distancia entre puntos de carga de 0.9 m (Figura 2).



**Figura 2. Configuración isostática del ensayo y distancias entre apoyos y puntos de carga.**

El ensayo se ejecutó mediante control por desplazamiento por aspectos de seguridad y, en particular, para poder medir toda la respuesta completa post-fisuración y detectar posibles caídas instantáneas de rigidez. El ensayo se ejecutó a una velocidad del pistón de 0.4 mm/min hasta la aparición de la primera fisura en la losa, tras lo que dicha velocidad se incrementó a 1.0 mm/min durante la etapa post-fisuración.

La flecha en el centro de luz se registró utilizando un láser a cada lado de la losa colocado a 50 mm del borde. La abertura de fisura fue medida en ambos laterales de la losa mediante dos MTS Temposonics que cubren la distancia comprendida entre los dos puntos de carga definidos por los perfiles HEB. Además, un LVDT con un recorrido de  $\pm 5$  mm en contacto con la superficie de la losa se situó en cada extremo de la losa para medir el desplazamiento vertical en el apoyo. La disposición de la instrumentación se detalla en la Figura 3.

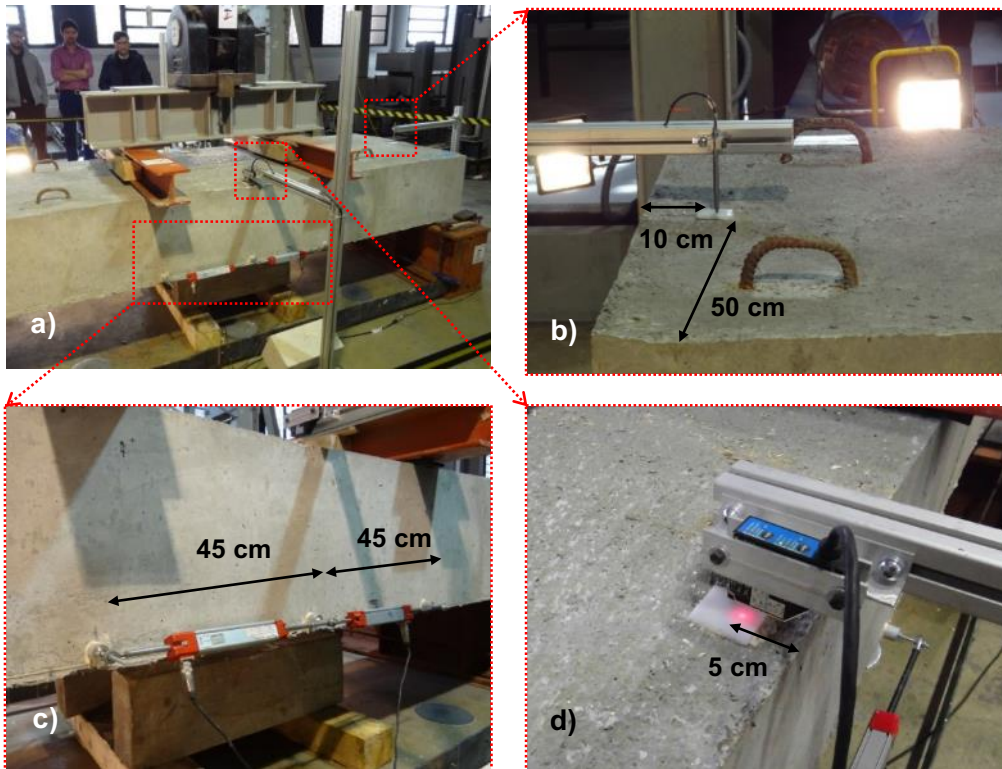


Figura 3. a) Vista general del ensayo, b) dispositivo LVDT, c) MTS Temposonics y d) láser.

### 3. Resultados

Los resultados arrojados por la campaña experimental para la optimización de cuantía mínima se analizan mediante los criterios de ductilidad propuestos [8,9]. Dicho criterio consiste en verificar que la carga máxima en fase fisurada ( $P_{max}$ ) es mayor o igual que la carga de fisuración ( $P_{cr}$ ). De este modo, se establece un índice de ductilidad tal que  $DI = P_{max}/P_{cr} \geq 1.0$ , que responde al esquema mostrado en la Figura 4. Este criterio resulta suficiente para garantizar la ductilidad en el caso de producirse una eventual fisura en el elemento por flexión en elementos isostáticos [8,10–12].

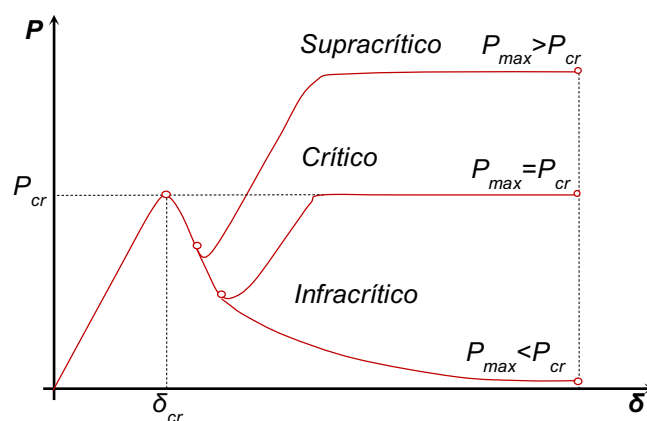
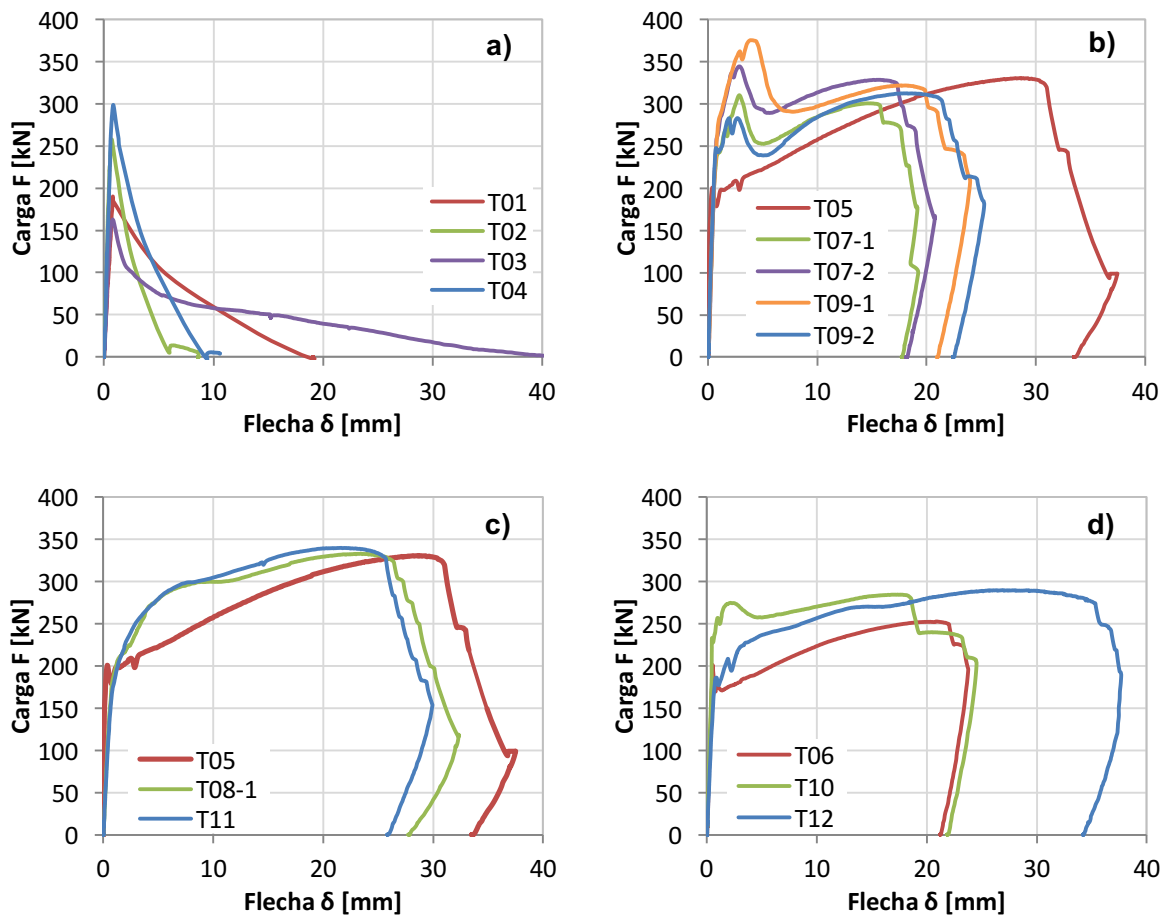


Figura 4. Criterio de ductilidad para refuerzo mínimo.

Las curvas obtenidas tras la ejecución de los ensayos se muestran en la Figura 5. Estas curvas aparecen agrupadas según la combinación de refuerzo utilizada en cada losa. En la figura a) aparece la losa de control T01 junto con las losas reforzadas únicamente con fibras (T02, T03 y T04). La figura b) representa la combinación de refuerzo de armadura  $R_1$  sin fibras (T05) y con 25 y 30  $\text{kg/m}^3$  de fibra 3D (T07 y T09, respectivamente). La configuración  $R_1$  sin fibras (T05) se muestra

en la figura c) junto a las losas con armado tipo  $R_1$  combinadas con 20 y 25  $\text{kg/m}^3$  de fibra 4D (T08 y T11). Finalmente, aparecen las losas con la configuración de armado  $R_2$  sin fibras (T06) y con 25  $\text{kg/m}^3$  de fibra 3D (T10) y 20  $\text{kg/m}^3$  de fibra 4D (T12).



**Figura 5. Curvas de resultados de ensayos de las losas.**

En la Tabla 5 se presenta un resumen en el que se recogen los datos con los que determinar los requisitos de ductilidad. El índice de ductilidad ( $DI$ ) aparece definido como el cociente entre la carga máxima ( $P_{max}$ ) y la carga de fisuración ( $P_{cr}$ ). Asimismo, se muestra la flecha obtenida para  $P_{cr}$  ( $\delta_{cr}$ ), la flecha para  $P_{max}$  ( $\delta_{max}$ ) y la relación  $\delta_{max}/\delta_{cr=0.5mm}$ .

La carga de fisuración  $P_{cr}$  varía desde un mínimo de 180 kN en la losa T11 hasta un valor máximo de 297 kN alcanzado en la losa T04, tomando un valor promedio de 219 kN con un coeficiente de variación de 16.6%. Esta dispersión en los resultados es propia de los resultados de flexión y se debe principalmente a la variabilidad de la propia resistencia a flexotracción del hormigón, no del tipo y cuantía de fibras. No obstante, es posible que las diferentes edades en las que se ensayaron los elementos hayan supuesto diferentes grados de hidratación del cemento, influyendo así en la resistencia del material.

La losa de control T01 sin refuerzo y las tres losas con refuerzo compuesto únicamente por fibras (T02, T03 y T04) presentaron un comportamiento frágil ( $DI \leq 1.00$ ) tras la fisuración, apareciendo una única fisura a ambos lados de la losa. La losa T03 fue la única que presentó una resistencia inferior a la losa T01, posiblemente debido a un efecto combinado de la resistencia del material y la adherencia y anclaje de la fibra 4D. Por otra parte, la losa T04 alcanzó un valor  $P_{cr}$  de 297 kN,

provocando una repentina liberación de energía incapaz de ser absorbida por las fibras; por lo que la cuantía de fibras era inferior a la mínima puesto que este tipo de roturas se considera frágil.

LOSA	Refuerzo	Edad (días)	$P_{cr}$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$P_{max}/P_{cr}$	$\delta_{cr}$ (mm)	$\delta_{max}$ (mm)	$\delta_{max}/\delta_{cr=0.5mm}$
T01	-	34	190	-	< 1.00	0.80	-	-
T02	25 kg/m <sup>3</sup> 3D	34	256	-	< 1.00	0.76	-	-
T03	20 kg/m <sup>3</sup> 4D	35	164	-	< 1.00	0.71	-	-
T04	30 kg/m <sup>3</sup> 3D	47	297	-	< 1.00	0.89	-	-
T05	R <sub>1</sub>	34	201	330	1.65	0.33	29.33	59
T06	R <sub>2</sub>	18	200	252	1.26	0.51	21.07	42
T07-1	R <sub>1</sub> +25 kg/m <sup>3</sup> 3D	34	232	301	1.30	0.61	14.88	30
T07-2		34	249	328	1.32	0.72	16.37	33
T08-1	R <sub>1</sub> +20 kg/m <sup>3</sup> 4D	34	204	333	1.64	1,15	24.93	50
T08-2		55	189	328	1.73	0.57	23.78	48
T09-1	R <sub>1</sub> +30 kg/m <sup>3</sup> 3D	34	237	322	1.35	0.66	18.73	38
T09-2		35	246	312	1.22	0.68	18.56	37
T10	R <sub>2</sub> +25 kg/m <sup>3</sup> 3D	19	228	284	1.25	0.42	17.49	35
T11	R <sub>1</sub> +25 kg/m <sup>3</sup> 4D	35	180	340	1.88	0.88	22.49	26
T12	R <sub>2</sub> +20 kg/m <sup>3</sup> 4D	47	184	290	1.57	0.76	28.71	57

**Tabla 5. Resultados generales de los ensayos sobre losas.**

Las losas T05 (R<sub>1</sub>) y T06 (R<sub>2</sub>), reforzadas únicamente con armadura, presentaron en ambas una carga de fisuración  $P_{cr}$  de 200 kN. Además, las dos configuraciones de armado mostraron un comportamiento supracrítico ( $P_{max} > P_{cr}$ ) con índices de ductilidad de 1.65 y 1.26, respectivamente. El índice de ductilidad de la losa T05 es un 23.6% superior al de la losa T06, resultando esto esperable debido a que el refuerzo R<sub>1</sub> ( $A_s = 502 \text{ mm}^2$ ) es un 20% superior al refuerzo R<sub>2</sub> ( $A_s = 402 \text{ mm}^2$ ). También la relación  $\delta_{max}/\delta_{cr=0.5mm}$  para la losa T06 es de 42, viéndose este parámetro incrementado en un 28.8% en la losa T05, alcanzando un valor de 59 presentando este último elemento una mayor ductilidad. Durante el ensayo, se pudo observar que el mecanismo de rotura estuvo dominado por la deformabilidad de las barras que conformaban el armado y que colapsaron de forma secuencial tras alcanzarse la carga máxima  $P_{max}$ . Dicho comportamiento es debido a tres factores principales: la resistencia a compresión del hormigón  $f_{cm} > 50 \text{ MPa}$ , las dimensiones de la sección transversal y la baja cuantía relativa de armadura colocada.

Los elementos con un refuerzo combinado R<sub>1</sub> y fibras 3D (losas T07 y T09) también presentaron un comportamiento dúctil supracrítico con índices de ductilidad comprendidos entre 1.22 (T09-2) y 1.35 (T09-1). Por otra parte, las cargas máximas en estas losas alcanzaron en valor promedio 315 kN en T07 y 317 kN en T09. Por tanto, el incremento de un 20% del contenido de fibras no supuso un aumento significativo de la resistencia. De hecho, analizando los elementos de forma separada, la losa T07-2 muestra una carga máxima  $P_{max} = 328 \text{ kN}$  superior a las dos losas T09 que tienen una mayor cuantía de fibras. Incluso la losa T05, sin fibras y con una configuración de armadura R<sub>1</sub>, muestra una resistencia  $P_{max} = 330 \text{ kN}$  superior a cualquiera de las cuatro losas T07 y T09. Este comportamiento puede ser atribuido en parte a la dispersión en la cuantía y orientación de las fibras

y, adicionalmente, al hecho de que son las barras las que principalmente han actuado en régimen fisurado mientras que las fibras cosen y activan fisuras secundarias.

El comportamiento de las losas con configuración de armado  $R_1$  y fibras 4D (T08 y T11) tampoco mostró una mejora significativa de la resistencia en términos de carga máxima respecto a la losa T05. No obstante, se observó la aparición de al menos cuatro fisuras en cada cara lateral de la losa. Por tanto, se produce un efecto debido a la incorporación de las fibras que puede resultar beneficioso en términos de durabilidad como consecuencia de una reducción del ancho de fisura. Por otra parte, el valor medio del índice de ductilidad de las losas T08 (1-2) obtenido fue  $DI = 1.69$  y el de la losa T11  $DI = 1.88$ . En consecuencia, ambas configuraciones de refuerzo muestran un comportamiento supracrítico según el criterio de ductilidad establecido.

Las dos losas de hormigón con combinación de refuerzo  $R_2$  y fibras (T10: 25 kg/m<sup>3</sup> 3D y T12: 20 kg/m<sup>3</sup> 4D) presentaron en ambos casos una respuesta dúctil supracrítica, tomando valores del índice de ductilidad  $DI_{T10} = 1.25$  y  $DI_{T12} = 1.57$ . Los valores de la carga máxima  $P_{max}$  alcanzada por la losa T10 (284 kN) y la losa T12 (290 kN) son un 12.7% y un 15.1% superiores al valor  $P_{max} = 252$  kN alcanzado por la losa de referencia T06 reforzada únicamente con armadura en configuración tipo  $R_2$ . Resulta interesante destacar que, a diferencia de lo ocurrido para las losas con configuración de armado  $R_1$ , en este caso la incorporación de fibras sí ha supuesto una mejora de la capacidad de carga de los elementos. Este efecto puede verse producido debido a una menor cuantía de armadura ( $A_s = 402$  mm<sup>2</sup>) colocada en estos elementos y a la contribución combinada de las fibras en régimen fisurado.

#### 4. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en la campaña experimental y el análisis realizado en base a los criterios de ductilidad y resistencia, se derivan las siguientes conclusiones:

- La losa de hormigón en masa y las que incorporaron únicamente refuerzo con fibras presentaron un comportamiento frágil, siendo su índice de ductilidad  $DI \leq 1.00$ . En este aspecto, únicamente la losa con una cantidad de 20 kg/m<sup>3</sup> de fibras 4D presenta una contribución efectiva en el régimen postfisuración; si bien, insuficiente para garantizar el comportamiento dúctil del elemento.
- Las losas T05 y T06 con una configuración de armadura  $R_1$  y  $R_2$  mostraron un comportamiento dúctil supracrítico. Este mecanismo de rotura vino controlado por la propia deformabilidad de las barras.
- Las losas con combinación de refuerzo  $R_1$  y fibras 3D (25 y 30 kg/m<sup>3</sup>) o 4D (20 y 25 kg/m<sup>3</sup>) presentaron un comportamiento supracrítico con índices de ductilidad comprendidos entre 1.22 (30 kg/m<sup>3</sup> 3D) y 1.88 (25 kg/m<sup>3</sup> 4D). No se observó un incremento de la resistencia  $P_{max}$  en las losas con la configuración de armado  $R_1$  al aumentar el contenido de fibras de 25 a 30 kg/m<sup>3</sup>. Esto puede ser debido a la propia dispersión del hormigón con fibras y al hecho de que sean las barras las que absorben la mayor parte de las tensiones de tracción en estado fisurado. La aparición de al menos cuatro fisuras en cada cara lateral de las losas reforzadas con fibras hace que se reduzca el ancho de fisura medio. Esto puede comportar beneficios en términos de durabilidad respecto a las losas reforzadas únicamente con armaduras, en las que se observaron no más de dos fisuras.



- Las losas reforzadas con la configuración de armado  $R_2$  y fibras 3D ( $25 \text{ kg/m}^3$ ) o 4D ( $20 \text{ kg/m}^3$ ) presentaron un comportamiento supracrítico con índices de ductilidad comprendidos entre 1.25 ( $25 \text{ kg/m}^3$  3D) y 1.57 ( $20 \text{ kg/m}^3$  4D). Se produjo un ligero incremento de la carga  $P_{max}$  del 12.7% ( $25 \text{ kg/m}^3$  3D) y del 15.1% ( $20 \text{ kg/m}^3$  4D) respecto a la losa sin fibras con refuerzo  $R_2$ . Esto se atribuye a la menor cuantía de armado y a la contribución de las fibras en régimen fisurado.

### Agradecimientos

El primer autor agradece al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España el apoyo prestado a través del programa de becas FPU. Los autores también desean agradecer a Acciona-Ghella Joint Venture el apoyo y participación prestado para la ejecución de la campaña experimental.

### Referencias

- [1] P. Pujadas, A. Blanco, S. Cavalaro, A. de la Fuente, A. Aguado, New Analytical Model To Generalize the Barcelona Test Using Axial Displacement, *J. Civ. Eng. Manag.* 19 (2013) 259–271.
- [2] G. Tiberti, F. Minelli, G. Plizzari, Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels, *Compos. Part B Eng.* 58 (2014) 199–207.
- [3] A. Caratelli, A. Meda, Z. Rinaldi, P. Romualdi, Structural behaviour of precast tunnel segments in fiber reinforced concrete, *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 26 (2011) 284–291.
- [4] G. Meng, B. Gao, J. Zhou, G. Cao, Q. Zhang, Experimental investigation of the mechanical behaviour of the steel fiber reinforced concrete tunnel segment, *Constr. Build. Mater.* 126 (2016) 98–107.
- [5] A. Conforti, G. Tiberti, G.A. Plizzari, A. Caratelli, A. Meda, Precast tunnel segments reinforced by macro-synthetic fibers, *Tunnelling Undergr. Sp. Technol.* 63 (2017) 1–11.
- [6] A. Caratelli, A. Meda, Z. Rinaldi, Design according to MC2010 of a fibre-reinforced concrete tunnel in Monte Lirio, Panama, *Struct. Concr.* 13 (2012) 166–173.
- [7] International Federation for Structural Concrete, fib Model Code for Concrete Structures 2010, 2010. [www.fib-international.org](http://www.fib-international.org).
- [8] L. Liao, A. de la Fuente, S. Cavalaro, A. Aguado, Design of FRC tunnel segments considering the ductility requirements of the Model Code 2010, *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 47 (2015) 200–210.
- [9] L. Liao, A. de la Fuente, S. Cavalaro, A. Aguado, Design procedure and experimental study on fibre reinforced concrete segmental rings for vertical shafts, *Mater. Des.* 92 (2016) 590–601.
- [10] B. Chiaia, A.P. Fantilli, P. Vallini, Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings, *Eng. Struct.* 31 (2009) 1600–1606.
- [11] B. Chiaia, A.P. Fantilli, P. Vallini, Evaluation of crack width in FRC structures and application to tunnel linings, *Mater. Struct.* 42 (2009) 339–351.
- [12] A. de la Fuente, P. Pujadas, A. Blanco, A. Aguado, Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings, *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 27 (2012) 60–71.