







Ensayo a escala real hasta rotura de una losa maciza de hormigón reforzado con fibras soportada por pilares

Real scale test up to a failure of elevated steel fibre reinforced concrete slab

Stanislav Aidarov^a, Francisco Mena^b, Albert de la Fuente ^c

^a PhD Candidate. Polytechnic University of Catalonia. Researcher. <u>stanislav.aidarov@upc.edu</u> ^b PhD in Civil Engineering. Polytechnic University of Catalonia. Researcher. francisco.mena@upc.edu ^c PhD in Civil Engineering. Polytechnic University of Catalonia Associate Professor. albert.de.la.fuente@upc.edu

RESUMEN

La aplicación del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) para losas macizas puede traer varios beneficios en términos de reducción de costes, plazos de ejecución, impacto ambiental y necesidad de recursos. No obstante, el uso de esta tecnología todavía no se ha generalizado como alternativa en la ejecución de forjados de edificación, debido principalmente a ciertos aspectos del diseño que aún quedan por cubrir, desconocimiento asociado al diseño de dosificaciones del HRFA o una estimación minuciosa de los beneficios económicos que puede aportar esta tecnología. Teniendo esto en cuenta, se llevó a cabo el proyecto eFIB cuyo objetivo fue dar la luz a unos aspectos anteriormente mencionados.

ABSTRACT

An application of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) in pile supported flat slabs could be beneficial in economic terms, construction time, environmental impacts and required resources. Nevertheless, the technology in question has not expanded yet as an alternative solution to the traditionally reinforced elevated slabs due to existence of certain aspects related to structural design and design of concrete mix which are not suitably covered. Also, a thorough analysis of economic component of this technological approach should be elaborated. In this context, an industrial-oriented project eFIB was carried out in order to bring the light to some of aforementioned aspects.

PALABRAS CLAVE: fibras de acero, hormigón autocompactante, ensayo a escala real, forjados bidireccionales **KEYWORDS:** steel fibres, self-compacting concrete, real scale test, elevated flat slabs

1. Introducción

La aceptación de hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) como material estructural en varias normativas, tanto a nivel nacional e internacional [1–3], ha impulsado en los últimos años el empleo de este material en la construcción de varios forjados de losa maciza soportados por pilares, pudiéndose eliminar prácticamente la totalidad de la armadura pasiva [4-9]. La Tabla 1 presenta varios ejemplos de

edificios y prototipos a escala real en los que se utilizaron macrofibras metalicas como refuerzo principal del hormigón (Lmax: luz máxima del paño, h: canto de la losa, C_f: contenido de fibras, en kg/ m^3).

Las experiencias mostradas en la Tabla 1 ponen de manifiesto que con la utilización de HRFA en forjados de losa maciza pueden alcanzarse esbelteces notables sin refuerzo tradicional (esbeltez = luz/canto).

Tabla 1. Experiencias de forjados de losa maciza de HRF a nivel mundial

País	$rac{C_{ m f}}{[{ m kg/m^3}]}$	L_{max}/h [m/m]	Armadura Pasiva
Luxemburgo	100	30	Sí ¹
Portugal	90	16	Sí ¹
Estonia	100	28	Sí ¹
Lituania	100	24	Sí ¹
Estonia	100	27	Sí ¹
España	100	27	Sí ²

NB: Sí ¹ – solo presencia de la armadura contra colapso progresivo (APC); Sí ² – Armadura APC + refuerzo tradicional en las zonas más solicitadas

En cualquier caso, por motivos de seguridad (de acuerdo con normativas norteamericanas), se recomienda mantener una cierta armadura longitudinal tradicional en la alineación entre pilares (armadura anti-colapso progresivo, APC, por sus siglas en inglés), garantizando un mecanismo resistente secundario [10]. Este mecanismo adicional, en caso de colapso estructural, soportaría el peso propio de la estructura y un porcentaje de la sobrecarga, evitando el derrumbe total del forjado.

Uno de los primeros edificios construidos con sustitución total de la armadura pasiva (instalando solo APC armadura) en forjados es el Rocca Al-Mare Tower en Tallin. Esta total sustitución de la armadura tradicional por fibras de acero permitió reducir el plazo de ejecución a 9 semanas, lo que a su vez, redujo drásticamente los costes directos e indirectos del proyecto. A nivel nacional, el primer caso del edificio pionero realizado en España con forjados de HRFA [9], la experiencia se completó con la realización de un estudio económico para evaluar la viabilidad de dicha tecnología frente a la solución tradicional de hormigón armado con barras. En comparación con el refuerzo tradicional, el estudio realizado mostró un posible ahorro de costes de ejecución de los forjados de hasta el 12

% o 16 % en el caso de incluir o no incluir la armadura APC, respectivamente.

Estos casos han comprobado las ventajas de aplicación de HRFA en los forjados de losa maciza. Sin embargo, cabe destacar que la tecnología en cuestión aún no ha logrado expandirse y considerarse como una alternativa a las soluciones tradicionales debido a varios aspectos que todavía requieren de un estudio detallado. Uno de ellos es el efecto de las cargas de larga duración y alta magnitud sobre el comportamiento de los forjados de HRFA, tanto a nivel de fisuración como de deformaciones. Por otra parte, el empleo de elevados contenidos de fibra influye (negativamente) sobre la trabajabilidad del hormigón, debiendo ajustar la dosificación, a fin de mantener unas prestaciones adecuadas en estado fresco.

Con el fin de dar respuesta a los aspectos mencionados, el consorcio SACYR Ingeniería e Infraestructuras y un grupo de investigadores del Departamento Civil y Ambiental de la UPC, expertos en la tecnología del HRF, plantearon la realización del proyecto de investigación eFIB. El objetivo de esta comunicación es presentar los avances alcanzados en dicho proyecto y, en particular, los resultados obtenidos durante la prueba piloto de ejecución de un forjado de HRF, sin armadura tradicional.

2. Forjado de HRFA a escala real bajo carga uniformemente distribuida

2.1 Descripción de la geometría y de las cargas aplicadas

Se planteó la ejecución de una losa maciza de 0.2 metros de canto, apoyada en una retícula ortogonal de 9 pilares con vanos de 5.0 metros en dirección X y 6.0 metros en dirección Y (Figura 1). Los pilares tuvieron la sección cuadrada de 0.25 metros.

La carga de diseño (mayorada) para la cual fue diseñado el forjado fue de 14.0 kN/m². Para su deducción se consideró, además del peso

propio (4.8 kN/m²), una carga muerta de 2.0 kN/m² y una sobrecarga de uso de 3 kN/m². Se asumieron coeficientes parciales de seguridad de 1.35 y 1.5 para las cargas permanentes y sobrecargas de uso, respectivamente.

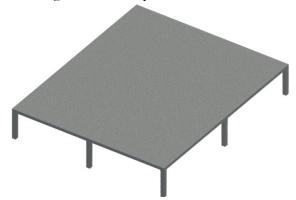


Figura 1. Prototipo del forjado de HRFA

Para alcanzar estas magnitudes de carga aplicada sobre el forjado, el proceso consistió en cuatro fases de carga de 1.2 kN/m² por fase, mediante la colocación de cubos de hormigón (Figura 2). Entre cada una de las fases de carga, trascurrieron entre 15 y 25 días para permitir la estabilización de las deformaciones diferidas. Acabado este proceso de carga por etapas, se alcanzó una carga total de 9.6 kN/m² (Peso propio forjado + cubos de hormigón).

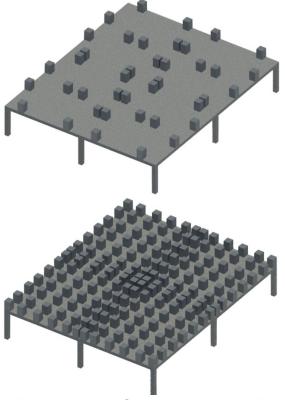


Figura 2. Fases de Carga: a) fase I b) fase IV

Si bien esta carga es algo superior a la carga permanente de diseño (4.8 + 2.0 = 6.8 kN/m²), se consideró adecuado aumentar la intensidad de la carga aplicada con el fin de detectar posibles efectos de una potencial fluencia no lineal del material y su influencia sobre las flechas diferidas. Finalmente, la última fase de ensayo consistió en llevar el forjado a rotura mediante el llenado de depósitos de agua (tal y como se muestra en la Figura 3).



Figura 3. Situación de Estado Límite Último

2.2 Caracterización mecánica de HRFA

De forma previa a la ejecución del forjado, se llevó a cabo una extensa campaña experimental de caracterización de hormigones autocompactantes reforzados con distintos tipos y contenidos de fibra (entre 60 y 120 kg/m³) [11]. Este estudio permitió determinar las resistencias residuales a flexotracción (f_{R1}, f_{R3}) en función de diferentes tipos y cuantías de fibra.

Junto con los resultados obtenidos experimentalmente, se llevaron a cabo diseños

analíticos y simulaciones numéricas por el método de elementos finitos (MEF), con la finalidad de establecer el contenido de fibras mínimo necesario para la losa en cuestión. Para la estimación analítica se siguió la guía norteamericana para el diseño de forjados de HRF [12], basada en el método de las líneas de rotura [13–15]. Por otra parte, las simulaciones numéricas se realizaron con el programa de software "ABAQUS" [16], utilizando distintos modelos constitutivos proporcionados por la RILEM [3] y el fib Model Code 2010 [1].

Considerando los resultados de diseño y los datos obtenidos durante la campaña experimental en laboratorio, se decidió reducir el contenido de fibras a 30 % en comparación con las experiencias previas, manteniendo una elevada esbeltez (L_{max}/h), igual a 30.

Una vez definido la dosificación del material, se realizó la prueba piloto del forjado de HRFA. Durante la ejecución, se moldearon probetas cilíndricas, cúbicas y prismáticas con el fin de llevar a cabo la caracterización mecánica del hormigón con el que se ejecutó la losa experimental. Las probetas realizadas se ensayaron en las instalaciones del Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales "Lluis Agulló" de la Universidad Politécnica de Catalunya.

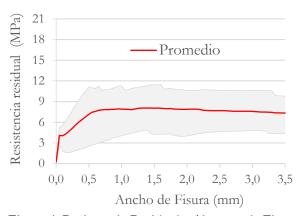


Figura 4. Resistencia Residual - Abertura de Fisura

Para la ejecución del forjado, se emplearon 24m³ de hormigón, transportadas en 4 cubas de 6m³ cada una. Con el objetivo de evaluar la variación de propiedades entre las cuatro amasadas, para cada cuba se moldearon 5

probetas cilíndricas Ø150x300 mm, 4 prismáticas 150x150x600 mm y 4 cúbicas 150 mm.

La resistencia media a compresión a 28 días resultó ser de 44 MPa, mientras que las resistencias residuales a flexotracción para anchos de fisura 0.5 mm (f_{R1m}) y 2.5 mm (f_{R3m}) fueron iguales a 7.2 y 7.7 MPa, respectivamente. La Figura 4 proporciona el rango y valor medio de las curvas f_{Ri} – CMOD obtenidas en la caracterización del material.

2.3 Ejecución del forjado y proceso de carga

Basándose en las experiencias previas (Tabla 1) y la normativa canadiense [17], finalmente se decidió colocar la armadura APC, consistente en tres barras Ø12 en las alineaciones de pilares. Aparte de este refuerzo, en la Figura 5 puede observarse la ausencia total del refuerzo tradicional en el forjado estudiado – los cálculos también confirmaron la resistencia tangencial de HRFA suficiente para evitar la necesidad en armadura de punzonamiento.



Figura 5. Armadura APC en las alineaciones de los pilares

Habiendo instalado la armadura APC, se llevó a cabo el hormigonado del prototipo. Durante el proceso, realizado por bombeo, la trabajabilidad del material fue adecuada, sin detectar segregación de áridos o formación de erizos, de acuerdo con lo previsto tras las campañas experimentales realizadas en laboratorio.

Dos semanas después de la ejecución del forjado de HRFA, se procedió a la retirada de los puntales y desencofrado, realizando una inspección visual del forjado para evaluar la respuesta de la estructura. Como resultado de esta evaluación, se detectaron algunas fisuras estructurales de ancho de fisura (w) < 0.2 mm. Dichas fisuras, debidas principalmente al peso propio del forjado, eran previsibles según los resultados del modelo numérico.

La siguiente tarea del ensayo fue el proceso de colocación de la sobrecarga descrito en el apartado anterior. Las fases 1, 2, 3 y 4 se llevaron a cabo en un mes y medio; la Figura 6 distribución de la. muestra carga correspondiente a la cuarta fase (168 cubos de hormigón de 350 kg cada uno). Cabe destacar que las deformaciones instantáneas y diferidas se registraban periódicamente por topográficos, mediante 4 dianas colocadas en la cara inferior del forjado, concretamente en los centros de cada paño.



Figura 6. El forjado de HRFA solicitado con la carga permanente de 9.6 kN/m²

Tras mantener la sobrecarga durante 2 meses, una vez estabilizadas las defomaciones, se decidió analizar el comportamiento de la estructura en situación de rotura (Estados Límite Último, ELU). Dos paños adyacentes se llevaron a situación de rotura mediante la utilización de depósitos de agua de 1m³ de capacidad (Figura 7). En primer lugar, se rellenaron los tanques de un paño, hasta alcanzar una carga distribuida de

14 kN/m². Las inspecciones visuales pusieron de manifiesto que era seguro incrementar la carga, decidiéndose rellenar completamente los depósitos de agua. Bajo esta situación, la carga total alcanzada fue de 16 kN/m², sin que el forjado mostrase signos de agotamiento. A continuación, manteniendo la carga aplicada en el primer paño, se cargó el segundo hasta la misma carga de 16 kN/m².

Ambos paños del forjado se mantuvieron bajo el nivel de carga de 16 kN/m² durante 24 horas. El incremento de la flecha durante este periodo fue de 10 mm en el centro de los paños, sin que se detectara ningún fallo local. Posteriormente, se vaciaron los tanques de agua y se volvieron a rellenar en los dos paños restantes. Bajo esta configuración, y a pesar de que la otra mitad de la estructura se encontraba dañada por el proceso de carga anterior, los depósitos de agua se rellenaron por completo, alcanzando la carga de 16 kN/m², sin producirse el colapso estructural.



Figura 7. Dos paños en la situación de rotura

2.4 Respuesta del forjado y posterior análisis

Durante todo el ensayo se llevó a cabo un proceso de auscultación minucioso consistente en el registro de la evolución de los patrones de fisuración y de las flechas. Los resultados de evaluación de las flechas demuestran la homogeneidad significativa del material – los cuatros paños mostraron deformaciones similares, tal y como presenta la Figura 8:

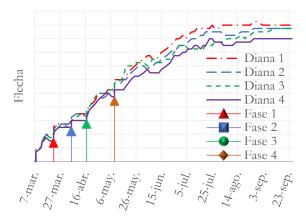


Figura 8. Evolución de la flecha máxima total

En cuanto a la fisuración, a partir de la fase III de carga, se realizaron varios mapas de fisuración en la cara inferior del forjado (Figura 9a). Las fisuras de diferentes colores muestran la propagación de fisuración tras el incremento de carga.

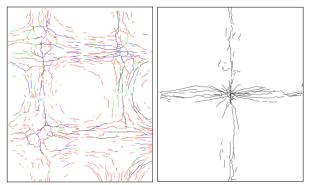


Figura 9. Patrones de fisuración a) Cara Inferior b)

Cara Superior

Tras la finalización del ensayo, se descargó completamente la estructura, permitiendo la evaluación de la fisuración de la cara superior (Figura 9b). Los resultados obtenidos coinciden tanto con los obtenidos por otros autores en estudios previos como con la preconizada por teoría de Johansen [14,15].

A pesar de alcanzar magnitudes de carga superiores a las de ELU, el forjado de HRFA no colapsó durante el ensayo, y por tanto, tuvo que derribarse por medios mecánicos a fin de completar el estudio. Éste incluyó la extracción de testigos a lo largo de las líneas de rotura, de cara a estimar la orientación y contenido de fibras en el hormigón en las zonas más solicitadas durante el ensayo — en total se

extrajeron 32 probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura (Figura 10).

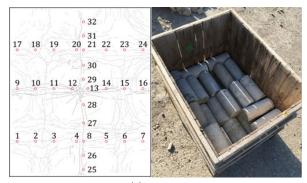


Figura 10. Testigos Extraídos

El análisis de orientación y contenido de fibras se llevó a cabo mediante el método inductivo desarrollado por investigadores de la UPC [18]. En dicho estudio, se concluyó que el contenido de fibras metálicas presentes en el hormigón altera de forma proporcional el campo magnético existente alrededor de la probeta. Esta variación del campo magnético se manifiesta a partir de un incremento de la inductancia (ΔL), que se puede ser cuantificado por medio de un analizador de impedancias HP-4192a, con un error inferior al 5%. Por otra parte, dicho incremento de la inductancia según cada eje principal, proporciona la información sobre orientación de fibras presente en el hormigón [19,20].



Figura 11. Método Inductivo

Cabe destacar que antes de llevar a cabo el método inductivo, se tuvieron que dividir los testigos extraídos en dos mitades debido a la geometría de bobina utilizada. Por tanto, finalmente se analizaron 64 probetas cilíndricas 100 x 100 mm. En base a los resultados

obtenidos, se confirmó la homogeneidad del material – el valor medio del contenido de fibras prácticamente coincidió con el contenido teórico, con un coeficiente de variación (CV) del 16 %. En cuanto a la orientación de fibras, los valores obtenidos se encontraron en los rangos habituales para este tipo de hormigón: un 25 % de fibras se quedan orientadas según el eje vertical mientras que el 75 % restante se orienta, de forma más o menos similar, en el plano horizontal.

3. Losas de HRFA bajo carga puntual

3.1 Configuración y procedimiento del ensayo

Durante el hormigonado del forjado a escala real, se decidió fabricar 3 losas de 3.0x3.0x0.1 metros con el fin de conocer la respuesta del elemento tipo losa de HRFA bajo carga puntual. Las losas se ejecutaron con el mismo hormigón empleado durante la prueba piloto, utilizando las cubas 1, 3 y 4. Estos elementos (ejecutados en obra) fueron posteriormente trasladados al Laboratorio de Tecnología de Estructuras y Materiales "Lluis Agulló" para llevar a cabo el ensayo planteado.

Dicho ensayo consistió en la aplicación de la carga puntual sobre las losas apoyadas sobre 4 caballetes metálicos a lo largo de la parte central de cada lado (las 2/4 centrales). Debe mencionarse que sobre cada caballete se puso un neopreno de 200 mm de ancho y 20 mm de espesor para limitar el área de contacto entre la losa y el apoyo, garantizando además que carga se transmita uniformemente (Figura 12)

La carga se aplicó con un servo-actuador pseudo-dinámico MTS de 1000 kN a compresión y 500 mm de recorrido de pistón acoplado en un extremo a un pórtico de carga mediante una rótula tridimensional. El control de la aplicación de la carga de ensayo se realizó por desplazamiento vertical del pistón.





Figura 12. Configuración de apoyo e instrumentación de las losas

El proceso de carga se dividió en dos etapas, en cada una de las cuales se había definido la velocidad de la carga adecuada para el objetivo establecido: en la primera etapa se estableció una velocidad baja (0,25 mm/min) para permitir la aparición y propagación de fisuras principales. Una vez el patrón de estas fisuras se había estabilizado, se imponía una mayor velocidad de carga (comprendida entre 0,5 y 2,0 mm/min) a fin de alcanzar altos valores del desplazamiento vertical de la losa, reduciendo el tiempo total del ensayo. Debe mencionarse que la aplicación de la carga se realizó sobre una superficie de neopreno de 200 x 200 mm en el centro de las losas.

La variable principal a medir durante el ensayo (además de la carga y el desplazamiento del pistón) fue la flecha en varios puntos. Para ello, se dispusieron un total de 12 transductores magnetoestrictivos de desplazamiento (MTS Temposonic LP Magnetostriction). Éstos se colocaban sobre la superficie de las losas (midiendo la flecha en la cara superior), de acuerdo con la Figura 12.

Como se observa en dicha Figura, los transductores utilizados se fijaron a una estructura auxiliar reticular fabricada con perfilería de aluminio. Estos transductores se dispusieron a lo largo de los ejes de simetría de las losas, formando una cruz. De estos 12 transductores, 4 se encontraban en los ejes de apoyos para medir las deformaciones del neopreno, con el objetivo de descontarlas en el posterior análisis de resultados.

3.2 Tratamiento de los resultados

Analizando los datos obtenidos mediante los 12 temposonics (Figura 12), se obtuvo una imagen completa y precisa de las deformaciones producidas durante el ensayo de las losas.

La falta de medidas en el centro de cada losa (debido a la aplicación de la carga en esta zona), no trajo problemas en estimar la flecha en la misma, dada la fuerte relación lineal (con $R^2 \approx 1$) en todos los temposonics, tanto en un eje de simetría como en el otro (Figura 13). Ello permitió obtener la flecha en cada eje como la intersección de las regresiones lineales. La flecha utilizada se estimó como la media entre las flechas obtenidas según cada eje.

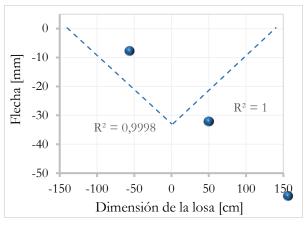


Figura 13. Deformaciones de la losa de HRFA

Habiendo calculado la flecha en el centro de la losa, mediante el método descrito, se obtuvieron las curvas "Carga – Desplazamiento en el centro de la losa" para cada elemento ensayado, tal y como muestra la Figura 14:

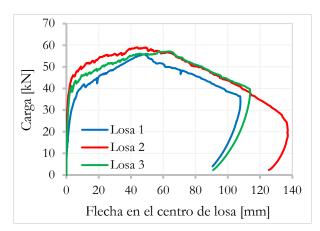


Figura 14. Curvas carga - desplazamiento en el centro de las losas

La carga máxima evaluada para tres losas durante el ensayo fue prácticamente idéntica, obteniendo un coeficiente de variación (CV) inferior al 3 %. La Figura 14 también permite apreciar la ductilidad de los elementos estudiados. Tras alcanzar una flecha de 100 mm, la carga soportada por las losas 1, 2 y 3 se mantenía en valores considerables e iguales al 69, 74 y 79 % (respectivamente) de la carga máxima.

4. Conclusiones

En base de los resultados obtenidos hasta esta fase del proyecto, se puede concluir que:

- El desarrollo de nuevas fibras metálicas de altas prestaciones mecánicas junto con el diseño analítico/simulación numérica ha permitido reducir el contenido de fibras en comparación con experiencias previas, alcanzando la resistencia residual necesaria para las losas macizas de HRFA sobre apoyos aislados con unas esbelteces notables (L_{max}/h = 30)
- El forjado de HRFA ha mostrado una elevada ductilidad bajo cargas incluso superiores para las que había sido diseñado (14 kN/m², ya mayorada)
- Los patrones de fisuración han confirmado la posibilidad de aplicar la teoría de las líneas de rotura para el diseño analítico de los forjados de HRFA para una situación de ELU.

- Las pruebas de dosificación y control sobre la puesta en obra (incluyendo el curado) han demostrado ser aspectos de gran relevancia para el desarrollo de esta tecnología en condiciones industriales
- Los datos y análisis derivados de la auscultación ponen de manifiesto que el estado límite de fisuración y de deformaciones son los que gobiernan el diseño y que es necesario ahondar más en estos aspectos.

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 Ramirez 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] International Federation for Structural Concrete (fib), fib Model Code for Concrete Structures, Paris, 2010.
- [2] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [3] RILEM TC162-TDF, RILEM TC162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Tensión-Deformation design method. Final Recomendation, Mater. Struct. 36 (2003)

- 560-567.
- [4] J. Mandl, Flat Slabs Made of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC), (2008).
- [5] U. Gossla, Development of SFRC Free Suspended Elevated Flat Slabs, (2005).
- [6] L. Facconi, F. Minelli, G. Plizzari, Steel fiber reinforced self-compacting concrete thin slabs Experimental study and verification against Model Code 2010 provisions, Eng. Struct. 122 (2016) 226–237.
- [7] X. Destrée, J. Mandl, Steel fibre only reinforced concrete in free suspended elevated slabs: Case studies, design assisted by testing route, comparison to the latest SFRC standard documents, Tailor Made Concr. Struct. (2008) 437–443.
- [8] J. Michels, D. Waldmann, S. Maas, A. Zürbes, Steel fibers as only reinforcement for flat slab construction Experimental investigation and design, Constr. Build. Mater. 26 (2012) 145–155.
- [9] A. Maturana Orellana, Estudio teóricoexperimental de la aplicabilidad del hormigón reforzado con fibras de acero a losas de forjado multidireccionales, 2013.
- [10] D. Mitchell, W.D. Cook, Preventing Progressive Collapse of Slab Structures, J. Struct. Eng. 110 (1984) 1513–1532.
- [11] F. Mena, S. Aidarov, A. de la Fuente, Hormigones autocompactantes reforzados con fibras para aplicaciones con alta responsabilidad estructural. Campaña experimental en laboratorio, in: III Congr. Consult. Estructuras, 2019: pp. 1–10.
- [12] ACI Committee 544., American Concrete Institute., Report on the Design and Construction of Steel Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs, American Concrete Institute, 2015.
- [13] K.W. Johansen, Yield-line theory, Cement and Concrete Association, 1962.
- [14] K.W. Johansen, Yield-line formulae for slabs, Cement and Concrete Association, 1972.

- [15] G. Kennedy, C.H. Goodchild, Practical Yield Line Design: An introduction to the practical use of Yield Line Theory in the design of flat slabs, raft foundations and refurbishment, 2004.
- [16] A. Nogales, A. de la Fuente, Simulación numérica de forjado de hormigón reforzado con fibras, in: III Congr. Consult. Estructuras, 2019: pp. 1–8.
- [17] Canadian Standards Association, Design of Concrete Structures CSA A23.3-04, 2004.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.