

# Hormigón reforzado con fibras sintéticas como armado de muros de edificación

## *Macro-synthetic fibre-reinforced concrete for building secondary walls*

Alejandro Nogales Arroyo<sup>a</sup>, Miguel Fernández Ruiz<sup>b</sup>, Andrea Monserrat López<sup>c</sup>,  
Dario Redaelli<sup>d</sup> y Albert de la Fuente Antequera<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Catalunya. Investigador postdoctoral.  
alejandro.nogales@upc.edu

<sup>b</sup> Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Catedrático. miguel.fernandezruiz@upm.edu

<sup>c</sup> Doctora Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Catalunya. Investigadora postdoctoral.  
andrea.monserrat@upc.edu

<sup>d</sup> PhD Civil Engineer. University of Applied Sciences of Western Switzerland. Associate Professor. dario.redaelli@hefr.ch

<sup>e</sup> Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Catalunya. Catedrático. albert.de.la.fuente@upc.edu

### RESUMEN

Los muros son elementos fundamentales para la construcción de edificios, transmitiendo cargas verticales y horizontales y permitiendo separar espacios. Los muros divisorios son elementos estructurales secundarios y están habitualmente armados con la cuantía mínima. En este sentido, el uso de fibras como alternativa al armado convencional se postula como una solución interesante desde el punto de vista de la sostenibilidad (económica, ambiental y social). Este artículo recoge las experiencias de una campaña experimental en la que se fabricó un muro prototipo y posteriormente tres muros de un edificio en construcción con hormigón reforzado con macro-fibra sintética (4 kg/m<sup>3</sup>). En el proyecto se estudió y evaluó la idoneidad del uso de esta tecnología con el fin de acelerar los procesos de construcción.

### ABSTRACT

Walls are fundamental elements in building construction, transferring vertical and horizontal loads and partitioning the space. Partition walls are secondary elements and they are typically reinforced with minimum reinforcement. Thus, the use of fibres as an alternative to conventional reinforcement is proposed as a potential solution to enhance sustainability performance (economic, environmental and social). This research presents the experiences of an experimental programme in which a prototype wall was cast, followed by three walls of a building under construction using macro-synthetic fibre-reinforced concrete (4 kg/m<sup>3</sup>). The project investigated and assessed the suitability of this technology to enhance construction processes.

**PALABRAS CLAVE:** fibra macro-sintética, muros divisorios, campaña experimental.

**KEYWORDS:** macro-synthetic fibres, secondary walls, experimental campaign

## 1. Introducción

En el sector de la construcción y en el de la ingeniería civil, una construcción eficiente es de gran importancia para asegurar la competitividad en términos de tiempo y coste. En edificación existen varios tipos de muros

dependiendo de su capacidad portante, conocidos como: muros primarios, muros secundarios y tabiquería (o muros no estructurales).

Los primeros son los que sustentan el edificio, transfiriendo cargas verticales desde los pisos superiores a niveles inferiores o bien funcionando como núcleos frente a cargas horizontales, y suelen ser de hormigón armado. Al contrario, la tabiquería se utiliza para distribuir espacios interiores y se ejecuta con ladrillo o pladur, sin ninguna capacidad portante. Una categoría intermedia son los conocidos como muros secundarios, que se utilizan para dividir el espacio, pero asegurando una mínima capacidad de transferencia de cargas, compuestos por ladrillos u hormigón armado. Estos últimos aseguran la capacidad portante, controlan la fisuración del muro (si está convenientemente armado) además de proporcionar otros beneficios como el aislamiento acústico y térmico.

En estos muros, típicamente, el armado consiste en el mínimo requerido por las distintas normativas y se dispone principalmente para controlar la fisuración del hormigón debido a la retracción, gradientes de temperatura y/o interacciones con forjados superiores e inferiores (fuerzas de fricción generadas por la retracción diferencial entre ambos elementos). Esta solución arquitectónica tiene sin embargo una desventaja consistente en que los muros deben estar contruidos antes del hormigonado del forjado superior. A este respecto, y con tal de mejorar la eficiencia en el proceso constructivo, el hormigón reforzado con fibras (HRF) se presenta como una alternativa atractiva frente al refuerzo convencional. El uso de este refuerzo acelera el proceso de construcción, pues se evita la tarea de colocar el armado (ahorrando material, mano de obra y tiempo). Asimismo, el uso de macrofibra sintética se ve como una solución adecuada, pues no se corroe y su uso está asociado a una menor generación de CO<sub>2</sub> con respecto a otros tipos de fibras; además, se en la dosificación del hormigón se pueden emplear cementos con menor contenido de clínker ya que no es necesaria la pasivación del armado [1,2]. Asimismo, el uso de este tipo de

fibras permite la construcción de elementos con menor espesor (sin necesidad de recubrimiento), determinado normalmente por condiciones de aislante acústico. En este contexto, el uso de hormigón reforzado con macrofibra sintética (HRMFS) ya ha sido probado como una solución factible para una variedad de elementos estructurales [1-4].

Antes de implementar el uso de esta tecnología pionera para el armado de muros secundarios, surgen ciertos interrogantes respecto a: el proceso de vertido, la distribución de las fibras, la fluencia y la retracción, el control de la fisuración, entre otras. Con el fin de dar respuesta a estas preguntas, esta comunicación presenta los resultados de un prototipo a escala real de un muro de HRMFS de  $b/b/t = 2,8/1,2/0,15$  m. Tras el hormigonado, el muro se cortó en prismas rectangulares para ensayarlos y caracterizar la resistencia a flexotracción en distintas zonas del material ya colocado, lo que proporcionó información sobre la orientación de las fibras y su orientación. Igualmente, se moldearon probetas de referencia para caracterizar las resistencias a compresión y flexotracción así como otras probetas para caracterizar las propiedades reológicas (fluencia y retracción) del hormigón diseñado.

Posteriormente, la misma mezcla de hormigón y dosificación de fibras (4 kg/m<sup>3</sup>) fue utilizada para el hormigonado de 3 muros de un edificio residencial construido en Crissier, Suiza. Los muros eran de 2,8 y 13,6 m de longitud, con 0,24 m de espesor y 2,56 metros de altura. Los muros sólo dispusieron de una mínima cantidad de armado convencional en las juntas con los muros perpendiculares. Tras el hormigonado se ejecutó un protocolo de detección y evolución de la fisuración en los mismos.

El análisis de los resultados experimentales sugiere concluir que el uso de macrofibras sintéticas en sustitución de la armadura convencional es técnicamente factible, seguro a nivel estructural, y conduce a ventajas desde el punto de vista de la sostenibilidad.

## 2. Campaña experimental del muro prototipo.

La campaña preliminar a la construcción de los muros consistió en la fabricación de un prototipo de muro, con dimensiones (2,8×1,2×0,15 m), junto con probetas prismáticas estándar, como se presenta en la Figura 1. La mezcla fue de hormigón autocompactante de clase C30/37 ( $f_{ck} = 30$  MPa a 28 días) diseñada para un clase de exposición XC4-XF1 según la norma EN 1992-1-1:2011 [5]. La relación agua/cemento fue de 0,45 y el tamaño máximo del árido de 16 mm (25% árido reciclado 4-22 mm y 75% árido no reciclado 0-16 mm). La cantidad de macrofibras sintéticas fue de 4 kg/m<sup>3</sup>; las fibras tenían una longitud de 48 mm y un diámetro equivalente de 0,70 mm, con una resistencia a tracción de 500 MPa y un módulo de elasticidad declarado de 8,0 GPa. Tanto el muro como los especímenes prismáticos se moldearon con hormigón de la misma amasada con la que fabricó el prototipo.

El encofrado del muro se llenó vertiendo el hormigón de forma continua con un tubo de vertido. Tras el vertido, los especímenes para la caracterización del material se cubrieron con láminas de plástico y se transportaron al laboratorio de ensayos a los tres días. En el laboratorio, los prismas para la caracterización de la retracción se desencofraron al llegar y se dispuso inmediatamente la instrumentación para la ejecución del ensayo. Los demás especímenes se almacenaron en una cámara climática (HR = 50% ± 5%, T = 22 °C ± 2 °C), se desencofraron a los 7 días de edad y se mantuvieron en cámara climática hasta sus respectivas fechas de ensayo.

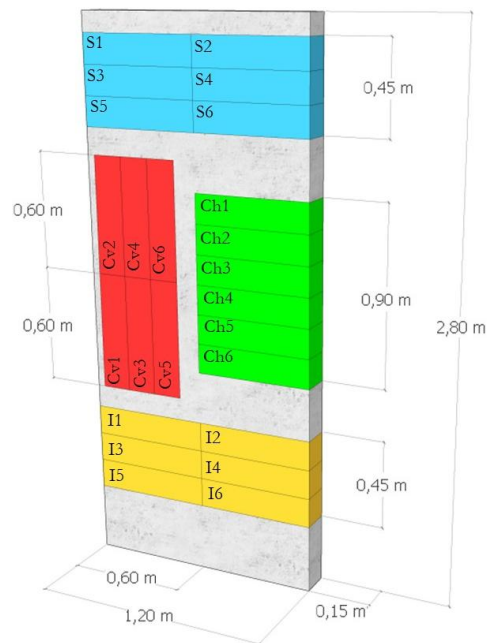


Figura 1. Muro prototipo y probetas obtenidas.

### 2.1 Propiedades mecánicas y reológicas

La resistencia a compresión se caracterizó a distintas edades (3, 7 y 28 días) en cubos de 150 mm y en cilindros de 150×300 mm ( $f_{cm,cube}$  y  $f_{cm,cyl}$ , respectivamente), según la norma EN 12390-3:2019 [6]. El módulo elástico ( $E_{cm}$ ) se determinó a los 28 días en cilindros de 150×300 mm, según la norma EN 12390-13:2021 [7]. Los valores de las propiedades mecánicas están recogidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Resistencia a compresión y módulo elástico en probetas moldeadas

Edad [días]	3	7	28
$f_{cm,cube}$ [MPa]	44,8	-	-
$f_{cm,cyl}$ [MPa]	-	46,7	54,3
$E_{cm}$ [GPa]	-	-	33,2

Los especímenes de 120×120×360 mm utilizados para las pruebas de reología se almacenaron en el laboratorio con temperatura y humedad relativa monitoreadas continuamente, con valores promedio de  $T_{media} = 22$  °C y  $HR_{media} = 50\%$ , respectivamente. Los ensayos de fluencia, realizados de acuerdo con la norma EN 12390-17:2019 [8], se llevaron a cabo en tres especímenes sometidos a un nivel constante de 8 MPa y se acompañaron de tres prismas

adicionales sin tensiones externas, almacenados en las mismas condiciones para caracterizar la retracción en condiciones equivalente de secado. Los ensayos de retracción se realizaron en cuatro probetas, cumpliendo con la norma EN 12390-16:2019 [9], comenzando a una edad del hormigón de 3 días y continuando hasta los 122 días.

Los gráficos de la Figura 2 presentan los valores promedio de la deformaciones totales (componentes autógena y de secado) asociadas a la retracción y el coeficiente de fluencia, presentando unos promedios del coeficiente de variación (CoV) del 5% y del 7,5%, respectivamente.

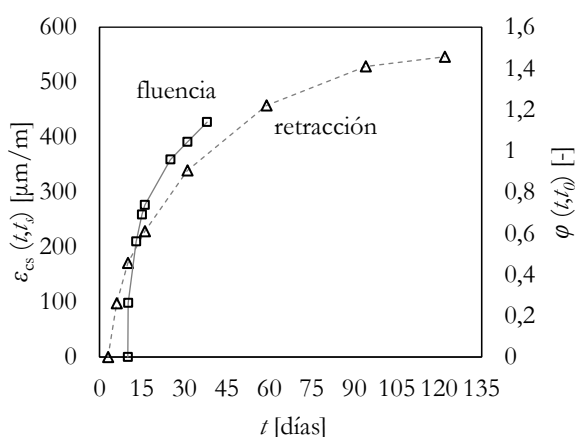


Figura 2. Resultados de los ensayos reológicos: retracción y fluencia

## 2.2 Distribución de fibras, orientación y resistencia residual del prototipo

Para la evaluación de la distribución y orientación de las fibras, se extrajeron probetas prismáticas de 150×150×500 mm del muro prototipo (ver Figura 1). La nomenclatura utilizada hace referencia a su ubicación: “S” corresponde a los prismas de la parte de la parte superior, “C” a los del centro (seguidos por “v” o “h” si el corte fue vertical u horizontal) y finalmente los “I” de la parte inferior.

Los prismas extraídos, así como los fabricados previamente de la misma amasada de hormigón utilizada para el prototipo se ensayaron acorde a la norma EN 14651:2005 [10]. Los valores promedio de las resistencias  $f_{R1}$ ,

$f_{R2}$ ,  $f_{R3}$  y  $f_{R4}$ , que corresponden a resistencias residuales a flexotracción para anchos de fisura (CMOD, por sus siglas en inglés) de 0,5, 1,5, 2,5 y 3,5 mm, respectivamente, están recogidos en la Tabla 2. Las curvas  $f_R$  – CMOD para las distintas series se muestran en la Figura 3.

Tabla 2. Valores promedio de  $f_{R,i}$  en los prismas de referencia y en los extraídos del muro prototipo.

	$f_{R1}[MPa]$	$f_{R2}[MPa]$	$f_{R3}[MPa]$	$f_{R4}[MPa]$
Ref.	1,36	1,70	1,95	2,05
S	0,46	0,36	0,39	0,43
Cv	1,02	1,15	1,32	1,40
Ch	1,12	1,41	1,67	1,79
I	0,93	1,15	1,37	1,47

Los valores de  $f_{R,i}$  presentaron una dispersión significativa dependiendo del tipo de probeta (moldeada o cortada) y de la ubicación de los prismas en el prototipo. Todos los prismas cortados mostraron una menor  $f_R$  con respecto a la serie de referencia (moldeada) debido a la técnica de vertido y a las condiciones de contorno que imponen los encofrados y geometría del muro prototipo. Los prismas de referencia tenían una orientación de fibras más favorable (mayor número de fibras con alineación preferente perpendicular a la sección fisurada), pues el flujo del hormigón durante el vertido era paralelo a la dirección longitudinal y, por tanto, ortogonal a la entalla y a la fisura generada.

Por otro lado, en los especímenes cortados, cuando el hormigón se bombeaba desde el centro del muro, las fibras fluían y potencialmente se concentraban en los bordes (ceranos a las paredes del encofrado) y en la región central, lo cual no correspondía con la ubicación de las entallas. Los resultados demostraron que la orientación de las fibras estaba fuertemente influenciada por la dirección del flujo del hormigón fresco durante el vertido. La esbeltez del muro prototipo (más alto que ancho) podría haber inducido un componente predominante de flujo vertical del hormigón dentro del encofrado, mientras que en muros más largos podría esperarse un flujo y

orientación de fibras predominantemente horizontales.

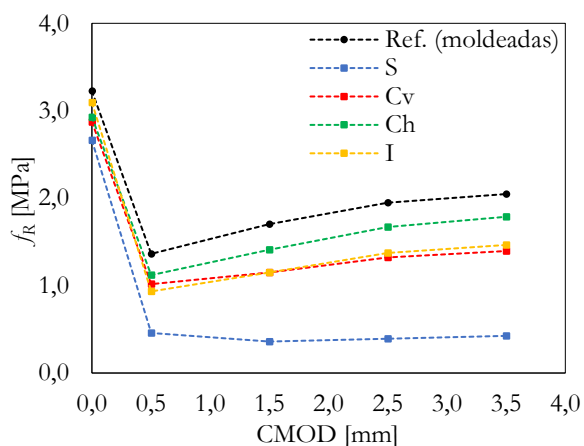


Figura 3. Resultados de los ensayos de caracterización de la resistencia a flexotracción.

### 3. Caso de estudio real

#### 3.1 Descripción de edificio y los muros del caso de estudio

Para el caso de estudio en un edificio real, se seleccionó un edificio de viviendas en construcción por parte de la empresa Losinger-Marazzi SA, en Crissier, Suiza. El edificio tenía unas dimensiones en planta de 42×12 m y cuatro pisos de 2,7 m de altura cada uno (ver Figura 4). Se eligieron tres muros para ser hormigonados con HRMFS: dos de 2,8 m de longitud (muros cortos) y uno de 13,6 m (muro largo), representados en la Figura 4b y Figura 4c, respectivamente. Los muros tenían una altura de aproximadamente 2,5 m y un espesor de 24 cm. La localización de los muros puede verse señalada en la Figura 4a; en el cuarto piso se encontraban el muro largo y uno corto, debajo de éste se encontraba el otro muro corto, en el tercer piso. Cabe destacar algunas de las irregularidades geométricas del muro largo, como el canto variable del forjado superior o los dos huecos para la instalación de servicios de 80 mm de profundidad cada uno.

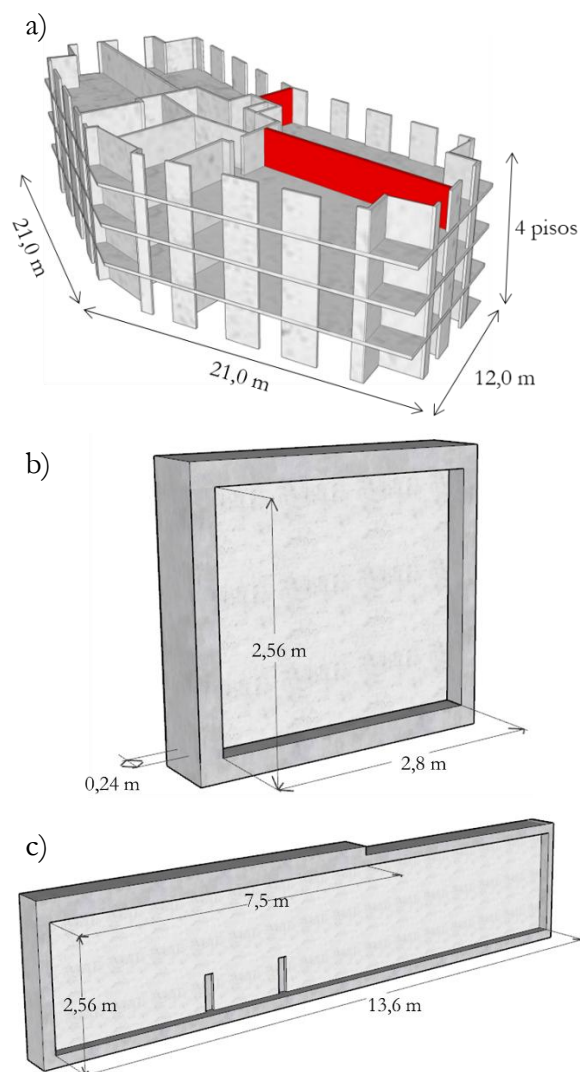
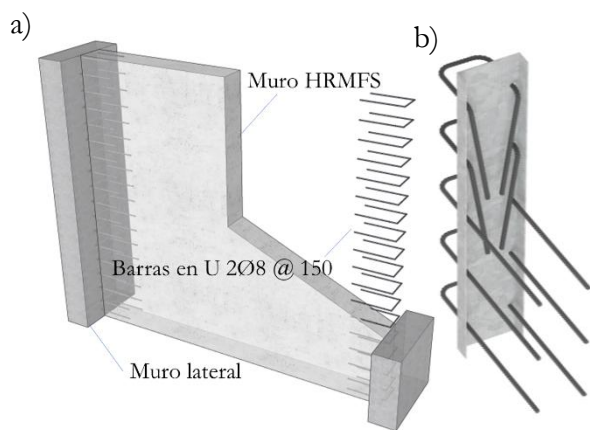


Figura 4. Edificio residencial donde se hormigonaron los muros de HRMFS (a) vista general (b) muro corto y (c) muro largo.

Además de las macrofibras sintéticas, se dispuso una cuantía mínima de armadura convencional en las juntas de los muros con otros muros perpendiculares para controlar la el ancho de fisura en esas zonas, potencialmente propensas a la fisuración. La armadura consistía en 2Ø8 (en forma de “U”) cada 150 mm, dispuestos horizontalmente, como puede apreciarse en la Figura 5a. Con el fin de acelerar el proceso de colocación de las armaduras, se dispuso de un sistema de “cajas de conexión” en las que las armaduras estaban preinstaladas y sólo era necesario levantar las barras (ver Figura 5b).



**Figura 5. Armadura convencional en los muros cortos (a) disposición en los muros cortos y (b) representación gráfica de las “cajas de conexión”.**

### 3.2 Proceso de hormigonado y propiedades mecánicas del hormigón

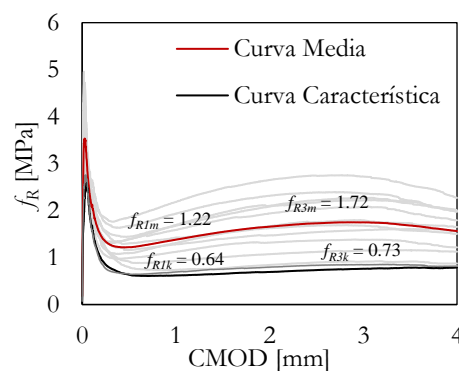
El hormigonado de los muros se realizó el mismo día, usando dos lotes consecutivos de hormigón distintos para los tres muros. La composición de la mezcla fue la misma que la descrita para el prototipo, con  $4 \text{ kg/m}^3$  de fibra macro-sintética.

Los muros se fabricaron vertiendo el hormigón con la ayuda de un tubo de vertido. Para el muro largo, el tubo plástico se colocó alternativamente en dos ubicaciones (Figura 7a) con el fin de proporcionar un flujo continuo del hormigón a lo largo del encofrado. En general, el vertido del HRMFS se realizó sin ninguna diferencia significativa con respecto a un hormigón autocompactante convencional. Un solo trabajador sobre el encofrado fue suficiente para llevar a cabo el vertido, manteniendo el tubo de vertido en el ángulo correcto. El HRMFS llenó rápidamente el encofrado gracias a su alta trabajabilidad y a la ausencia de armado interno. Excepto en las regiones cercanas al tubo de vertido, el flujo del hormigón era claramente horizontal.

No obstante, cabe señalar que la ausencia de armado fue un problema para la colocación de los componentes técnicos en los muros (como paquetes de cables y cajas plásticas para

equipamiento eléctrico), ya que estos se movieron durante el hormigonado al no poderse fijar. Esto requirió la presencia de un trabajador adicional para mantenerlos en la posición correcta durante el hormigonado. Las losas superiores se hormigonaron 15 días después.

Para el control de las propiedades del hormigón, se fabricaron 12 probetas prismáticas de  $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}$  para la caracterización de la resistencia residual a flexotracción del material, cuyos resultados (mostrando las curvas de valores medios y característicos, así como los valores más relevantes) están representados en la Figura 6.



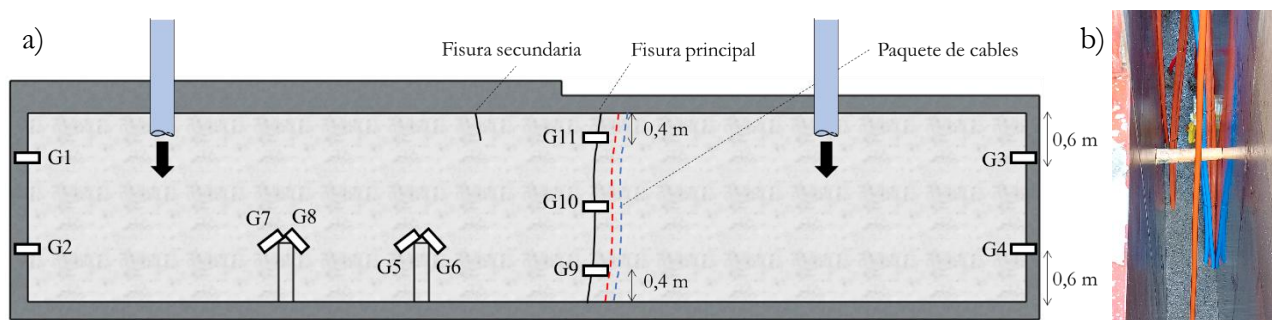
**Figura 6. Resultados de los ensayos de caracterización de la resistencia a flexotracción del hormigón de los muros.**

### 3.3 Observación in situ y monitorización de la fisuración

Para la monitorización de la fisuración, en los muros se colocó instrumentación (galgas extensiométricas) en las zonas potencialmente sensibles al desarrollo de la fisuración, en las juntas con los muros perpendiculares, a 60 cm de los forjados superior e inferior (ver Figura 7a). Asimismo, en el caso del muro largo, se instalaron galgas en las esquinas de los huecos dispuestos para la instalación de los servicios, ya que en estas zonas con discontinuidades geométricas son más propensas a fisurar.

En cuanto al protocolo de monitorización de la fisuración, para aquellas fisuras que aparecieran en zonas distintas a las cubiertas por





**Figura 7. (a) Esquema de la instrumentación usada en el muro de 13 m y (b) imagen del paquete de cables cruzando el encofrado.**

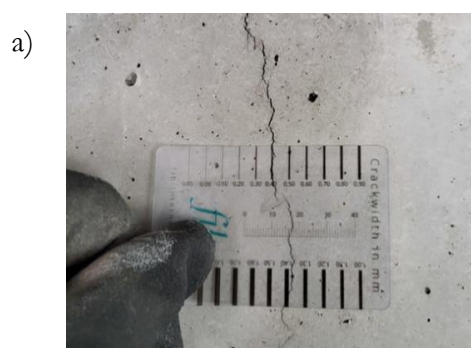
las galgas ya instaladas, consistió en: (1) Observación visual de los muros para la detección de las fisuras (efectuado semanalmente) y (2) en presencia de fisuras, la apertura inicial fue medida manualmente (Figura 8a) y se instalaron galgas unidireccionales para medir la evolución de las mismas (Figura 8b), con una precisión de  $\pm 0,05$  mm. El período de observación/monitorización duró 120 días, tras los cuales se taparon los muros para los detalles de acabado del edificio.

Durante el período de observación, no se detectaron fisuras en los dos muros cortos. Sin embargo, en el muro de 13,6 m no se observaron fisuras en las ubicaciones donde se colocó la instrumentación, pero sí aparecieron dos fisuras en otras ubicaciones (ver Figura 7). La primera fisura detectada, en el centro del muro donde se encontraban los paquetes de cables, se identificó inmediatamente después de retirar el encofrado (indicada en la Figura 7a), 5 días después. Esto podría deberse a una importante reducción de la sección transversal. La fisura podía observarse desde ambos lados del muro y cubría toda la altura del muro. Tras detectar la fisura, se instalaron tres galgas en la parte superior, media e inferior para monitorizar el ancho de fisura — G11, G10 y G9, respectivamente—. Las galgas superiores e inferiores se colocaron a 40 cm de sus respectivos forjados.

La evolución de la abertura de fisura a lo largo del tiempo en las diferentes posiciones está representada en la Figura 9. La fisura era más ancha en la parte superior del muro (0,3 – 0,5 mm) que en la parte inferior (0,1 – 0,3 mm).

Como puede observarse, la grieta presentó una evolución similar en el tiempo independientemente de su ubicación; el ancho de fisura se mantuvo constante durante los primeros 15 días, observándose un incremento de 0,2 mm en un período de aproximadamente 45 días y, finalmente, permaneciendo constante durante hasta el fin del periodo. La abertura de fisura a los 120 días de edad era de 0,5 mm en las mediciones de la parte superior y media y de 0,3 mm en la parte inferior.

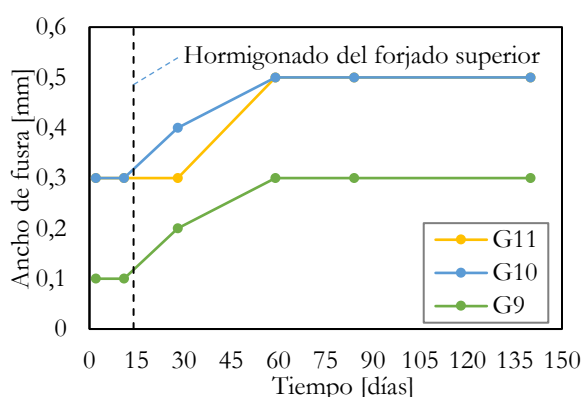
La segunda fisura se detectó aproximadamente a los 80 días después hormigonado, en la ubicación mostrada en la Figura 7a. Esta fisura también atravesó todo el espesor del muro, pero se limitó a una altura de 25 cm desde la parte superior del muro, con una apertura de 0,4 mm que se mantuvo constante hasta el final del período de observación. La aparición de ambas fisuras puede estar influida por el cambio de canto del forjado, generando una discontinuidad geométrica.



b)



**Figura 8. Fisuras en el muro de 13,6 m (a) medida de la fisura al inicio de la monitorización (b) galga uniaxial para medir la evolución del ancho de fisura.**



**Figura 9. Evolución del ancho de fisura, a lo largo del tiempo, de la fisura principal del muro de 13 m.**

## 4. Conclusiones

En esta contribución científica se ha evaluado el uso de hormigón reforzado con macrofibra sintética como alternativa al armado convencional en muros secundarios para edificación. Para ello, se fabricó un prototipo de muro a escala real ( $2,8 \times 1,2 \times 0,15 \text{ m}^3$ ) con el fin de caracterizar el material, evaluar las técnicas de vertido y estudiar la orientación, distribución y la resistencia residual en distintas zonas del muro. Posteriormente, la misma mezcla con la misma cuantía de fibras,  $4 \text{ kg/m}^3$ , se utilizó para el hormigonado de tres muros de un edificio residencial en construcción: dos de 2,5 m de largo y uno de más de 13,0 m. Los muros contaban con una pequeña cantidad de armado convencional en las juntas con los muros laterales. Se monitorizaron los muros

monitorizados durante 120 días para la detección y medición de fisuras.

A la vista de los resultados obtenidos de esta campaña experimental, se concluye :

- En cuanto al muro prototipo, la orientación de las fibras es un aspecto clave en la resistencia del HRFMS y es muy sensible a las condiciones geométricas y de vertido.
- Independientemente de la ubicación y posición, las probetas cortadas del prototipo mostraron menores resistencias residuales ( $f_R$ ) que en las vigas de referencia. Este resultado se atribuye a las condiciones de borde del encofrado del muro (que no permitían un flujo horizontal constante favorable para la orientación de las fibras).
- En los muros reales, el uso del HRFMS proporcionó un control satisfactorio de la fisuración en el muro de 13,6 m, utilizando una cuantía de  $4 \text{ kg/m}^3$  de macrofibras sintéticas, complementada con un mínimo refuerzo de armado convencional dispuesto en las juntas con los muros laterales. En los muros cortos no se detectó fisuración alguna.
- En relación al muro largo (13,6 m), las dos fisuras observadas aparecieron en áreas con discontinuidades geométricas. La primera cruzó toda la altura y apareció donde había un grupo de cables. Se monitorizó la fisura durante 120 días. La fisura era más ancha en la parte media y superior que en la inferior, y su valor máximo fue de 0,5 mm al finalizar el período de observación.
- El uso de HRFMS demostró ser una solución atractiva en cuanto al ahorro de tiempo en la construcción, pues sólo se necesitó un trabajador para realizar el vertido del hormigón. Además, el uso de “cajas de conexión” en las juntas con los muros laterales adyacentes resultó ser



una implementación sencilla para fines prácticos. En general, el proceso se mostró eficiente, con ahorros de tiempo y costes, hecho que podría orientar a la industria hacia una construcción más sostenible.

Aunque está fuera del alcance de este artículo de congreso, se considera relevante informar que se llevaron a cabo simulaciones numéricas de los muros prototipo y reales mediante el MEF. Una descripción más amplia de los modelos y de los resultados obtenidos puede encontrarse en [11].

### ***Agradecimientos***

Los autores desean agradecer la contribución y el apoyo de las diferentes empresas implicadas en el proyecto, cuya cooperación fue fundamental durante la investigación. En particular, agradecen a Losinger-Marazzi (Alexandre Perquin, Guillaume Caudron, Grégoire Bianchi), MBCC (Julien Bizzozero, Laurent Barras), Holcim (Yoan Thomas, Stéphane Cuchet) y MP-ing (Corentin Clot, Benoît Beer), así como a Jonathan Moix y Marco Mongillo de HES-SO Friburgo por su contribución a las campañas experimentales. Además, se reconoce el apoyo financiero proporcionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España (MCIN) por el apoyo financiero recibido en el marco del proyecto HEAT (PID2023-149321OB-C32), código de proyecto J-03243.

### ***Referencias***

[1] Trabucchi, I.; Conforti, A.; Tiberti, G.; Mudadu, A.; Plizzari, G.A.; Winterberg, R. Flexural behavior of precast tunnel segments reinforced by macro-synthetic fibers. *Tunnels Undergr. Cities Eng. Innov. meet Archaeol. Archit. Art* 2020, 3245–3253, doi:10.1201/9781003031635-73.

[2] de la Fuente, A.; Escariz, R.C.; de Figueiredo, A.D.; Aguado, A. Design of Macro-Synthetic

Fibre Reinforced Concrete Pipes. *Constr Build Mater* 2013, 43, 523–532.

- [3] Bernard, E.S.; Thomas, A.H. Fibre Reinforced Sprayed Concrete for Ground Support. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 2020, 99, 103302.
- [4] Pujadas, P.; Blanco, A.; Cavalaro, S.; De La Fuente, A.; Aguado, A. Fibre Distribution in Macro-Plastic Fibre Reinforced Concrete Slab-Panels. *Constr. Build. Mater.* 2014, 64, 496–503, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.067.
- [5] EN 1992-1-1:2023 Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Building; 2023
- [6] UNE EN-12390-3:2009 “Ensayos de Hormigón Endurecido. Parte 3: Determinación de La Resistencia a Compresión Del Hormigón Endurecido” 2009.
- [7] EN 12390-13:2021 Testing Hardened Concrete - Part 13: Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression 2021.
- [8] EN 12390-17:2019 Testing Hardened Concrete - Part 17: Determination of Creep of Concrete in Compression 2019.
- [9] EN 12390-16:2019 Testing Hardened Concrete - Part 16: Determination of the Shrinkage of Concrete 2019
- [10] EN 14651:2005 Test Method for Metallic Fibered Concrete - Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual) 2005.
- [11] Fernández Ruiz, M.; Redaelli, D.; Nogales, A.; Monserrat-López, A.; Bourqui, D.; de la Fuente, A. Macrosynthetic fibres as replacement of conventional steel reinforcement for concrete of partition walls. *Struct. Concr.* 2024, 1–21, doi:10.1002/suco.202300879.