

Refuerzo de estructuras con morteros de ultra-alta resistencia, reforzados con fibras, en capa delgada

Reinforcement of structures with ultra-high strength mortars, reinforced with fibers, in a thin layer

Pedro Ángel Madera Arroyo^a

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Mapei Spain, S.A. Product Specialist Construction Line. pedromadera@mapei.es

RESUMEN

Se presenta un sistema innovador para el refuerzo de elementos de hormigón en capa delgada con morteros de ultra-alta resistencia armados en masa con fibras metálicas estructurales. El sistema permite reforzar pilares, vigas y forjados de losa maciza, reticulares y unidireccionales de vigueta-bovedilla, mediante el recrecido, de bajo espesor, con morteros con alta resistencia a la tracción y elevadísima resistencia a la compresión, de forma que se obtiene una sección reforzada de mayor capacidad resistente. Se expone el sistema y los ensayos realizados que demuestran su idoneidad técnica para el fin perseguido.

ABSTRACT

An innovative system for the reinforcement of thin-layer concrete elements with ultra-high-strength mortars reinforced with structural metal fibers is presented. The system makes it possible to reinforce columns, beams and slabs, solid, reticular and unidirectional, by means of re-shaping, of low thickness, with mortars with high tensile strength and very high compression resistance, so that a reinforced section of greater resistant capacity. The system and the tests carried out that demonstrate its technical suitability for the purpose pursued are exposed.

PALABRAS CLAVE: rehabilitación, reparación, refuerzo, alta resistencia, HPC, fibra estructural

KEYWORDS: rehabilitation, repair, reinforcement, high strength mortar, HPC, structural fibers

1. Introducción

Los hormigones reforzados con fibras estructurales de acero son materiales que llevan usándose durante décadas y que actualmente se recogen en el Anejo 14 Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras de la Instrucción del Hormigón Estructural EHE [1]. Estos hormigones son realmente materiales compuestos con unas propiedades muy concretas. La adición de fibras de acero estructural a un hormigón de alta resistencia a

compresión proporciona un material con grandes ventajas, aparte de aumentar en gran medida la resistencia a tracción y controlar la fisuración, aporta una gran ductilidad al material.

En esta comunicación se presentan una serie de materiales realmente innovadores, fruto de la investigación en los Laboratorios de I+D+i de Mapei, y sus campos de aplicación más habituales.

2. Propiedades tecnológicas de los materiales y usos previstos

La gama Planitop HPC son morteros fluidos cementosos reforzados con fibras estructurales de acero distribuidas de manera homogénea dentro de una matriz cementosa con elevadísimas prestaciones mecánicas.

Lo que distingue a estos materiales, clasificables como HPRCC (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Concrete), de los morteros tradicionales es su elevadísima resistencia mecánica, ductilidad y tenacidad, lo que le confiere una mayor capacidad de resistencia en la fase plástica (post-fisuración), con un comportamiento que permite sustituir completamente la armadura tradicional. Una vez endurecidos, poseen las siguientes cualidades:

- Altísima resistencia mecánica a la compresión
- Elevada ductilidad
- Elevada resistencia a las cargas cíclicas, al desgaste por abrasión y a los impactos.
- Impermeables al agua
- Óptima adherencia, tanto al hormigón como a las armaduras de acero

Su uso principal es el refuerzo estructural de elementos de hormigón frente a solicitaciones gravitatorias, sísmicas, impactos y vibraciones: Intervenciones de refuerzo de forjados existentes mediante la aplicación por vertido de recrecidos de bajo espesor, entre 10 mm y 40 mm; refuerzo de pilares mediante encamisado para aumentar la capacidad portante (acción axial, momento flector y cortante). Mediante el confinamiento del hormigón se incrementa la capacidad en términos de desplazamiento, así como la ductilidad de la sección. El alto contenido en fibras permite utilizar el producto con una armadura tradicional extremadamente reducida o, incluso, sin armadura con un espesor de aplicación entre 20 y 40 mm.

Los ensayos más significativos realizados sobre los materiales fueron los de resistencia a compresión, resistencia a la tracción por flexión

con resistencia residual y resistencia al corte por rasante.

Además de los anteriores, se realizaron los ensayos que establece la norma EN 1504 Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Definiciones, requisitos, control de calidad y evaluación de la conformidad, en sus partes 3, Reparación estructural y no estructural, y 6, Anclaje de armaduras de acero, ensayos de adherencia al hormigón (EN 1542) tanto en condiciones normales como tras envejecimiento acelerado, Dureza Shore (ISO 868), retracción endógena, retracción impedida, Resistencia a hielo-deshielo con presencia de sales (EN 12390-9), resistencia a la carbonatación (EN 13295), impermeabilidad al agua (EN 12390-8), Resistencia al deslizamiento de barras de acero (EN 1881) entre otros. A continuación se exponen los más significativos.

2.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión de los distintos materiales se evaluó en base a dos normas: la norma EN 12190 Determinación de la resistencia a compresión de los morteros para reparación [2], en el que se utiliza probeta de dimensiones 40x40x160 mm, adecuada para morteros que van a ser aplicados en capas de pequeño espesor; y la norma EN 12390-3 Determinación de la resistencia a compresión [3], en la que se utilizan probetas cúbicas de 150 mm de lado, más adecuada para el caso de hormigones.

En el caso de los ensayos realizados de acuerdo a la norma EN 12190, los resultados de rotura media fueron de 130 MPa, mientras que utilizando la norma EN 12390-3 los resultados de rotura medios fueron superiores a 118 MPa. Tras analizar los valores obtenidos en los ensayos, se estableció como valor característico de resistencia a compresión para los morteros el de 90 MPa, que es el que se utiliza para la realización de los cálculos.

2.2 Resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)

Uno de los valores más importantes en estos morteros es la resistencia residual a la tracción por flexión, ya que en su uso se considera su contribución en zona traccionada, ya que son capaces de soportar tracciones mantenidas con deformación creciente. Para obtener el valor se sometió a ensayo según norma EN 14651:2007+A1:2008 Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas [4]. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).

El método de ensayo consiste en someter a una serie probetas biapoyadas, de dimensiones 150x150x550 mm, a una carga en el centro creciente para evaluar la resistencia a flexotracción a 3 puntos (Fig.1). A las probetas se les practica una entalla de 25 mm en el centro de las mismas en la que se colocan captadores de desplazamiento para medir la abertura de fisura creciente al aumentar la carga F. De esta manera se establece el diagrama de carga-apertura de fisura y se extraen los valores de tensión en la fibra inferior para los escalones de apertura de fisura establecidos en la norma: 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm y 3,5 mm.

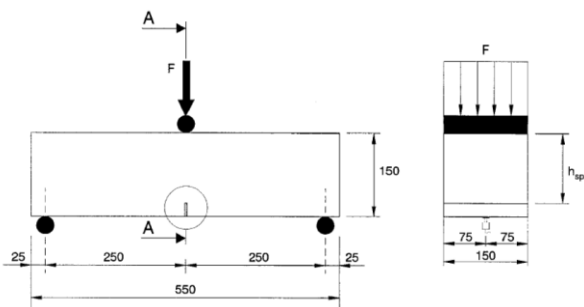


Figura 1. Ensayo de flexotracción según EN 14651

Se realizaron ensayos tanto sobre especímenes en condiciones normales como sobre especímenes a los que se sometió a ciclos de hielo-deshielo.

Los resultados medios y característicos obtenidos para Planitop HPC y Planitop HPC

Floor se recogen en las Tablas 1 y 2 respectivamente.

Tabla 1. Resultados del ensayo Planitop HPC.

ID	$f_{ct,L}$ (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
f_m	8,61	10,96	8,64	7,14	5,85
f_k	7,19	8,03	6,11	5,06	4,09
$f_{m,ciclos}$	9,03	11,67	11,19	9,55	7,62

Sobre la base del valor característico se obtienen los siguientes ratios:

$$\frac{f_{R1k}}{f_{ct,Lk}} = 1,12 > 0,4; \quad \frac{f_{R3k}}{f_{ct,Lk}} = 0,63 > 0,5$$

El comportamiento post-fisuración se clasifica como 8a.

Tabla 2. Resultados del ensayo Planitop HPC Floor.

ID	$f_{ct,L}$ (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
f_m	7,34	12,55	12,70	11,46	9,91
f_k	6,11	9,70	10,48	9,33	8,03
$f_{m,ciclos}$	7,73	13,73	13,52	12,04	10,28

Sobre la base del valor característico se obtienen los siguientes ratios:

$$\frac{f_{R1k}}{f_{ct,Lk}} = 1,59 > 0,4; \quad \frac{f_{R3k}}{f_{ct,Lk}} = 0,96 > 0,5$$

El comportamiento post-fisuración se clasifica como 8c. En la Figura 2 se muestra el diagrama del ensayo carga-apertura de fisura.

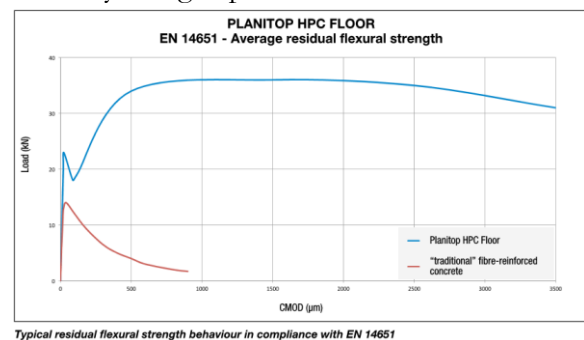


Figura 2. Diagrama del ensayo según EN 14651

2.3 Resistencia al corte por rasante

El sistema de refuerzo, mediante recrecido con morteros de alta resistencia en capa delgada, se basa principalmente en la unión monolítica de

las dos interfaces, hormigón antiguo y mortero de refuerzo, por lo que es fundamental analizar el comportamiento en la situación de rasante entre materiales, ya que del buen comportamiento de este valor depende el poder garantizar que se cumplen las hipótesis de Navier sin la necesidad de realizar acciones adicionales como sería el uso de puentes de unión o conexiones entre superficies con cosido de barras. Si el valor obtenido es superior al de cohesión del hormigón se pueden realizar los cálculos con las normativas vigentes. Para comprobar la idoneidad del sistema de refuerzo se llevaron a cabo ensayos de adherencia por rasante [5]. Se fabricaron probetas de hormigón de 200x100x100 mm con diferentes tipos de resistencias: C12/15, C16/20 y C20/25; y se prepararon áreas de 100x100 mm en cada una de ellas con diferentes grados de preparación de superficies según se recoge en el Model Code 2010: superficie lisa, rugosa y muy rugosa, que se recoge en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de rugosidad superficial

Clasificación de rugosidad	Rugosidad media R_t (mm)
Liso (a)	< 1,5
Rugoso (b)	1,5 – 3,0
Muy rugoso (c)	> 3,0

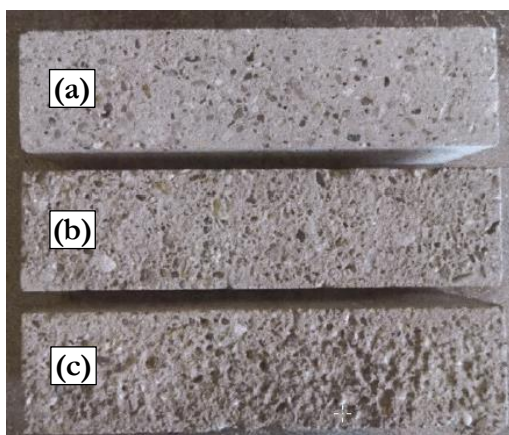


Figura 3. Rugosidad de las probetas de hormigón

El principal objetivo de los ensayos era comprobar el efecto que tiene la rugosidad de la superficie en la adherencia de los morteros de refuerzo para diferentes calidades de hormigón.

Sobre las probetas de hormigón, adecuadamente preparadas como se explicó anteriormente, se procedió a aplicar prismas de los morteros de refuerzo Planitop HPC y Planitop HPC Floor con dimensiones de 100x100x300 mm en parejas (Figura 4), y se procedió al ensayo realizando la curva tensión rasante – desplazamiento (Figura 5).

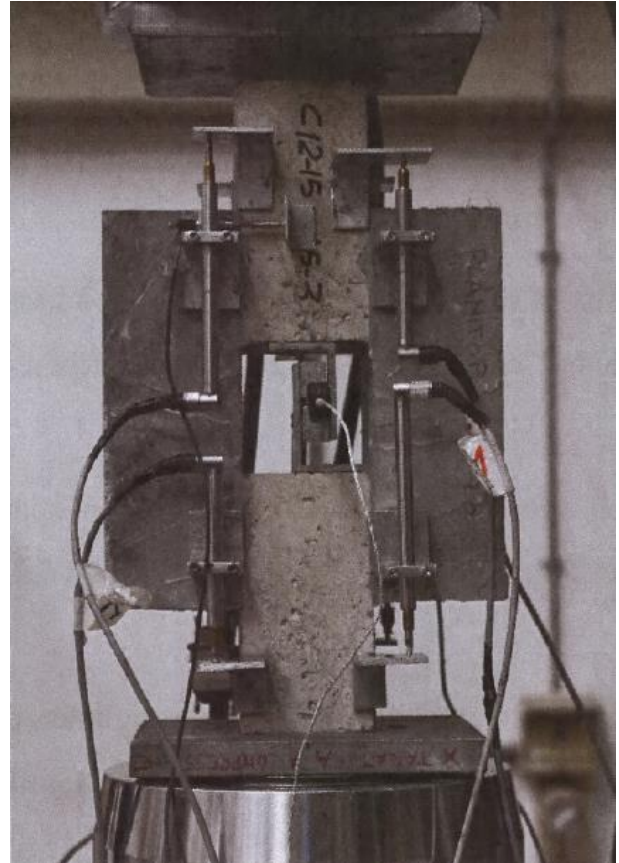


Figura 4. Ensayo de adherencia por rasante

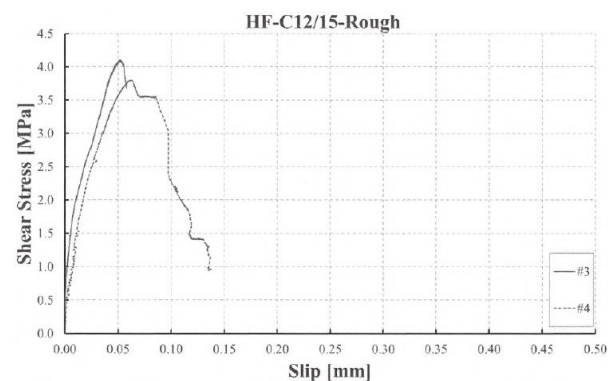


Figura 5. Diagrama tensión rasante - desplazamiento

Los valores registrados en los ensayos, en función del tipo de hormigón y la preparación del soporte, se recogen en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados del ensayo de rasante para Planitop HPC Floor y Planitop HPC.

	P. HPC Floor			P.HPC
	C12/15	C16/20	C20/25	C16/20
Liso	3,8 MPa	3,9 MPa	4,5 MPa	-
Rugoso	4,0 MPa	3,8 MPa	4,8 MPa	4,0 MPa
Muy rugoso	3,8 MPa	3,9 MPa	4,2 MPa	-

Por los datos obtenidos, que se reflejan en la tabla 4: las tensiones rasantes resistidas son más elevadas que la cohesión del hormigón a tracción; la rugosidad de la superficie influye en poca medida en los resultados, siendo recomendable más la limpieza exhaustiva de la misma más que la rugosidad; y los valores son similares para los hormigones de baja capacidad C12/15 y C16/20 y algo mayores en los hormigones C20/25 como cabía esperar, por lo que se valida su uso.

3. Ensayos de elementos a escala real

Para evaluar el comportamiento de los refuerzos ejecutados con los nuevos materiales, se realizaron ensayos sobre elementos a escala real dentro del Proyecto DPC-Reluis “Red de laboratorios universitarios de ingeniería sísmica”.

3.1 Pruebas experimentales en nudos viga-pilar de hormigón armado

Las actividades de ensayo se centraron en dos pilares extraídos de un edificio existente de hormigón armado construido en los años 60, en L'Aquila, y dañado por efecto del terremoto de 2009. La estructura de armazón se caracterizaba por la deficiente calidad del hormigón y por detalles de armadura típicos de los edificios existentes diseñados antes de los años 70.

El refuerzo se realizó mediante la eliminación del recubrimiento de la armadura, hasta una profundidad de unos 40 mm, y la posterior reparación con PLANITOP HPC armado con

fibras de acero estructural FIBRAS HPC (Figura 6).

Los resultados experimentales resaltan la eficacia del sistema de refuerzo para retrasar la rotura a compresión del pilar y obtener un aumento de resistencia aproximado del 37%. Además, el cuadro de fisuración final revela que el sistema de refuerzo ha logrado impedir el pandeo de las barras de la armadura longitudinal hacia el exterior [6].



Figura 6. Ensayo sobre pilares

3.2 Ensayos de forjados de bovedilla cerámica y viguetas de hormigón [7]

Se realizaron dos muestras de forjado gemelas adyacentes, de bovedilla cerámica y viguetas de hormigón, separadas por una junta adecuada, previstas para uso residencial, representativo de un forjado de los años 60 - 70 y dimensionadas según un método de las tensiones admisibles característico en la época de construcción. Los forjados presentaban un solo tramo con 5 m luz entre los apoyos y un espesor total de 200 mm (180 de los bloques de ladrillo y 20 mm de la capa de compresión), igual a 1/25 de la luz (Figura 7). Se sometió a ensayo uno de los forjados tras aplicar una capa colaborante, de 20 mm de espesor aproximado, de PLANITOP HPC FLOOR, sobre la superficie del forjado debidamente preparado (Figura 8). El otro forjado se sometió a ensayo sin refuerzo.

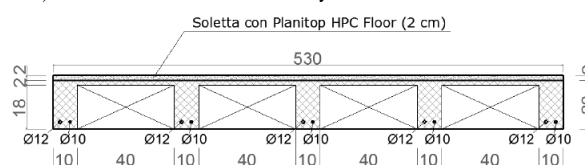


Figura 7. Sección del forjado con capa de refuerzo

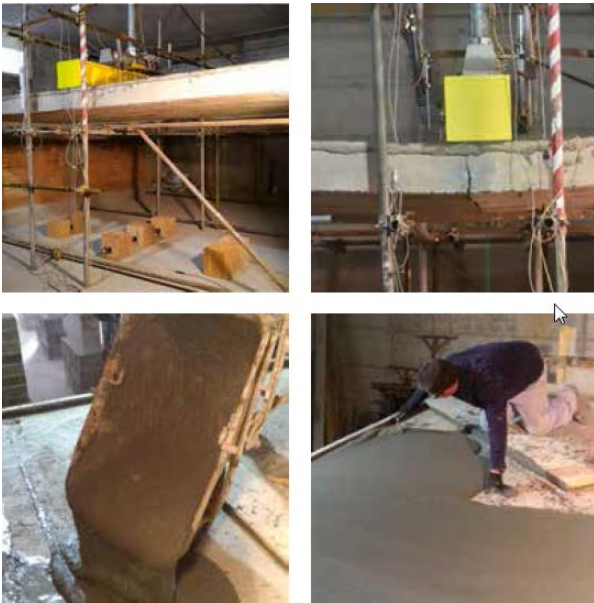


Figura 8. Ensayo sobre forjados

De la comparativa entre el forjado no reforzado (negro) y el forjado gemelo reforzado con PLANITOP HPC FLOOR (rojo), se infiere un incremento de la resistencia a flexión del forjado del 50%; un incremento de la rigidez inicial del 220%, con la consiguiente reducción de la fecha en la fase de servicio; y un incremento de la ductilidad del 125% con el consiguiente incremento de las deformaciones plásticas (Figura 9).

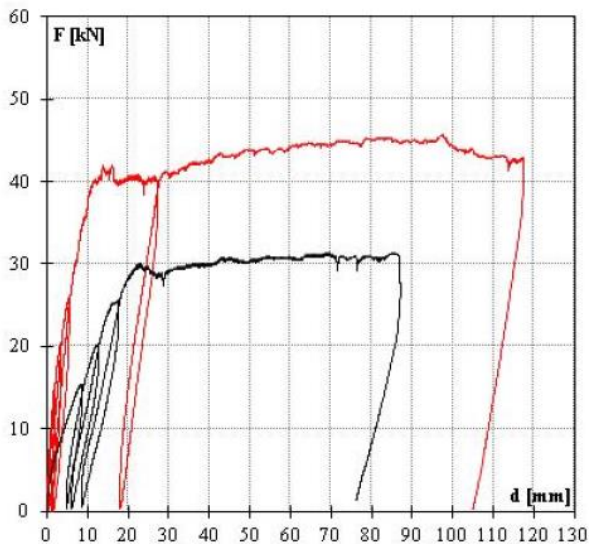


Figura 9. Curvas Carga-flecha central

4. Diseño del sistema de refuerzo

Para el diseño del refuerzo se utiliza la Instrucción del Hormigón Estructural EHE-08

[1] y el Anejo 14 Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras. Los cálculos están basados en las hipótesis siguientes:

- Hipótesis de Navier de las secciones planas.
- Las deformaciones son pequeñas.
- Perfecta adherencia entre acero y hormigón.
- Perfecta adherencia entre el hormigón y el mortero de refuerzo estructural HPC.
- Limitaciones de tensión – deformación según EHE-08.

5. Campos de aplicación y puesta en obra del refuerzo

A continuación se exponen las técnicas de puesta en obra de los morteros de refuerzo HPC.

5.1 Refuerzo de pilares y vigas mediante encamisado

Para aumentar la capacidad portante (acción axial, momento flector y cortante) de pilares de hormigón armado, la intervención se realiza mediante encamisado con microhormigón Planitop HPC.

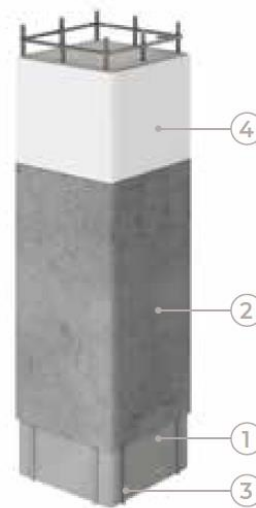


Figura 10. Esquema de refuerzo de pilares

El procedimiento es el siguiente (Figura 10):

- Desbastado de la superficie de los pilares mediante escarificación mecánica o hidro-escarificación, con el fin de obtener una rugosidad suficiente para garantizar la

adherencia entre el hormigón de base y el hormigón fibrorreforzado (1).

- Realización de conexiones (2) superiores e inferiores para la transmisión de esfuerzos al resto de elementos: cimentación, vigas, losas, capiteles, etc.

- Aspirado de las superficies a restaurar para eliminar por completo cualquier fragmento presente.

- En presencia de armaduras de acero a la vista, se procede a su cepillado y posterior pasivación.

- Realización de un encofrado estanco de los pilares y saturación con agua de la superficie.

- Amasado del mortero PLANITOP HPC en una hormigonera y vertido dentro del encofrado (3).

- Espera de 72 horas antes de proceder al desencofrado.

- Una vez endurecido el mortero proceder al revestimiento final.



Figura 11. Refuerzo de pilares de hormigón

La intervención de refuerzo a flexión de una viga de hormigón armado se realiza igualmente mediante encamisado. En este caso, el mortero inferior trabajaría a tracción, como una armadura adicional, y el mortero de los laterales ayudaría a resistir el esfuerzo cortante.

El procedimiento es el siguiente (Figura 12):

- Desbastado de la superficie de las vigas con el fin de obtener rugosidad suficiente y aspirado para eliminar polvo y partículas sueltas (1).

- Colocación de encofrado estanco y saturación con agua.

- Amasado del mortero en hormigonera y vertido dentro del encofrado (2).

- Espera de 72 horas antes de proceder al desencofrado.

- Una vez endurecido el mortero proceder al revestimiento final (3).



Figura 12. Esquema de refuerzo de vigas

También puede realizarse el refuerzo de nudos viga-pilar mediante este sistema con el objeto de hacer más dúctiles estos nudos para evitar el colapso frágil (Figura 13).

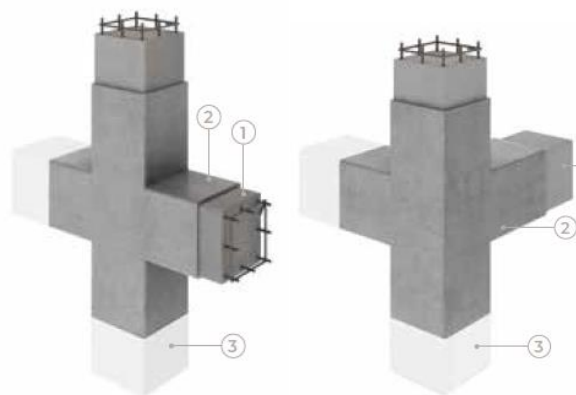


Figura 13. Esquema de refuerzo de nudos

5.2 Refuerzo de forjados a flexión mediante recrecido con mortero en capa delgada

Planitop HPC Floor permite el refuerzo de forjados de diversas tipologías: forjados de hormigón armado, ya sean de losa maciza, reticulares o unidireccionales de viguetas y bovedillas (Figura 14), forjados de vigas metálicas o de vigas de madera.

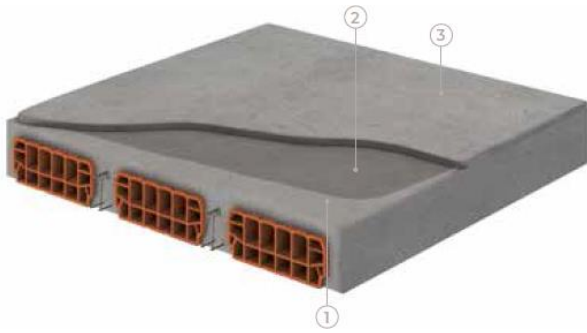


Figura 14. Esquema de refuerzo de forjados

5.2.1. Preparación de la superficie (2)

Antes de la aplicación del mortero, se debe preparar el soporte para obtener una rugosidad superficial media de al menos 2 mm, eliminar el hormigón deteriorado y no resistente, las lechadas y la suciedad, aspirando todo el polvo y material suelto (Figuras 15 y 16). A continuación, se procede a consolidar las áreas de intervención aplicando imprimación Primer 3296 diluido con agua.



Figura 15. Preparación del soporte

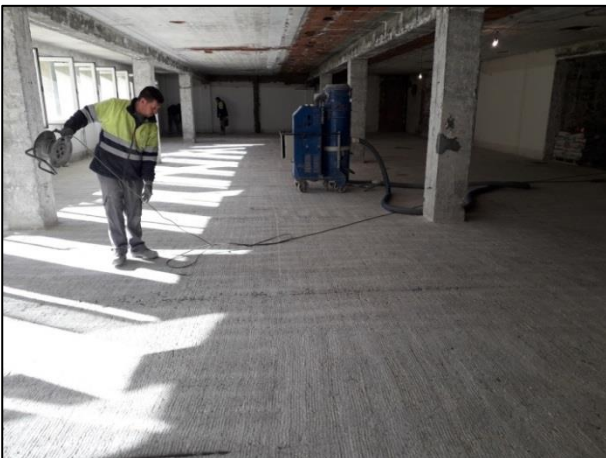


Figura 16. Estado final con la rugosidad requerida

5.2.2. Amasado de Planitop HPC Floor

El producto se amasa en hormigonera convencional. Se comienza añadiendo agua dentro de la hormigonera y a continuación se van añadiendo los sacos de Planitop HPC Floor. El amasado debe realizarse durante al menos 12 minutos hasta obtener una masa homogénea, fluida y sin grumos. Una vez amasado, el mortero permanece trabajable durante aproximadamente 1 hora, a +20°C.

5.2.3. Vertido del mortero y curado (3)

El vertido del mortero se realiza directamente sobre la superficie por medios manuales y se extiende con la ayuda de rastrillo controlando el espesor hasta obtener el establecido en proyecto (Figuras 17 y 18).



Figura 17. Extendido del mortero



Figura 18. Extendido y control de espesores

El mortero no precisa de un curado especial, salvo en periodos calurosos o días ventosos, en los que se recomienda una especial vigilancia en el curado para evitar que la evaporación rápida

del agua de la mezcla pueda causar fisuras superficiales. Simplemente se nebuliza agua cíclicamente sobre la superficie cada 3-4 horas durante las primeras 48 horas.

elevatissime fluidità e prestazioni meccaniche a ritiro compensato e ad elevata duttilità denominata Planitop HPC Floor (Mapei S.p.A.)

Referencias

- [1] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008. Anejo 14 Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras.
- [2] UNE-EN 12190:1999 Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia a compresión de los morteros para reparación.
- [3] UNE-EN 12390-3:2009 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- [4] UNE-EN 14651:2007+A1:2008 Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).
- [5] Chiwesa, M., Minelli, F., Reggia, A. & Plizzari, G. Evaluating the shear bond between old and new concrete through a new test method. Magazine of Concrete Research, 69(9), 425-435. 2017
- [6] Informe de ensayo UNINA - Experimental tests on existing RC members strengthened with thin jacketing of high performance fiber reinforced cement composite, shrinkage-free and high ductility, with stiff steel fibers, namely PLANITOP HPC (Mapei S.p.A.)
- [7] Informe de ensayo UNINA – Prova in scala reale su solaio laterocementizio gettato in opera rinforzato con getto integrativo all'estradosso della caldana realizzato con malta cementizia monocomponente ad