

Refuerzo de pilares con encamisado de mortero HPRFM. Estudio experimental

HPRFM jacketing for structural strengthening of RC columns. Experimental study.

M. Dolores Criado Fernández^a, Sonia Martínez de Mingo^b, Ana Almerich-Chulia^c,
Ana de Diego Villalón^d, Luis Echevarría Giménez^e, Viviana J. Castro Quispe^f

^a Arquitecto. Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja (IETcc, CSIC). Titulado Superior.

Doctoranda en “Arquitectura, edificación, patrimonio y ciudad”. E.T.S. Arquitectura, Universitat Politècnica de Valencia (UPV).

mariadolores.criado@ietcc.csic.es

^b Dra. Arquitecto. Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja (IETcc, CSIC). Titulado Superior.

soniamdm@ietcc.csic.es

^c Dra. Ingeniero Industrial. Universitat Politècnica de Valencia. Profesora Contratado Doctor.

analchu@mes.upv.es

^d Dra. Ingeniero de Caminos. Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja (IETcc, CSIC). Científico Titular.

adediego@ietcc.csic.es

^e Ingeniero de Caminos. Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja (IETcc, CSIC). Titulado Superior.

lechevarria@ietcc.csic.es

^f Dra. Ingeniero de Caminos. Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja (IETcc, CSIC). Titulado Superior.

viviana.castro@ietcc.csic.es

RESUMEN

Se presenta un estudio experimental sobre encamisados de mortero de altas prestaciones reforzado con fibras de acero (HPRFM) aplicados a soportes de hormigón sometidos a compresión centrada. Las probetas tienen una altura de 1200 mm y diferente sección transversal (circular y cuadrada) y el espesor del encamisado es menor de 30 mm (sin armadura suplementaria). Se estudian refuerzos en toda la altura del soporte y sin llegar al extremo superior. Los resultados obtenidos apuntan a que estos encamisados de HPRFM permiten, con un espesor pequeño, incrementos notables en la capacidad de carga del elemento, tanto si es circular como si es cuadrado.

ABSTRACT

An experimental study is presented on High Performance Steel Fibre Reinforced Mortar (HPRFM) jacketing applied to concrete columns subjected to centred compression. The specimens have 1200 mm height and different cross-sections (circular and square) and the thickness of the mortar jacketed are less than 30 mm, without additional reinforcement. Jacketing along the entire height of the element and without reaching the upper end are studied. The results obtained suggest that these HPRFM jacketing allow, with a small thickness, significant increases in the load-bearing capacity of the element, whether it is circular or square.

PALABRAS CLAVE: refuerzo estructural, pilar hormigón armado, encamisado, HPRFM, ensayos.

KEYWORDS: structural strengthening, reinforced concrete column, jacketing, HPRFM, tests.

1. Introducción

El uso de morteros de altas prestaciones reforzados con fibras de acero (High Performance steel Fibre Reinforced Mortar - HPFRM) para el refuerzo estructural de elementos de hormigón armado es un campo de aplicación interesante y aún no suficientemente estudiado. Estos materiales presentan excelentes propiedades mecánicas (buena resistencia a compresión) y durabilidad (poca permeabilidad), unido a una resistencia a flexo-tracción mejor que los morteros convencionales gracias a la adición de fibras de acero [1, 2].

En este trabajo se presentan los resultados experimentales de siete probetas que forman parte de un estudio más amplio sobre encamisados de pequeño espesor de HPFRM, sin armadura adicional, para el refuerzo de soportes de hormigón. El programa tiene como objetivo investigar cómo afecta la forma transversal de la sección a la eficacia del refuerzo. Se busca comprobar si para elementos de sección no circular (cuadrada o rectangular) este tipo de refuerzo puede ser una alternativa a otros sistemas ya conocidos, como el zunchado con materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras, FRP. Como es sabido, los refuerzos de soportes con FRP se ven afectados por la forma rectangular de la sección del elemento, unido a la necesidad, para determinados usos, de ser protegidos frente a impacto.

Las investigaciones publicadas hasta el momento sobre encamisados de HPFRM en soportes de hormigón son aún escasas y/o están hechas sobre probetas de pequeño tamaño o en un número reducido de muestras. Algunos trabajos resultan de interés por contemplar variables como la forma de la sección transversal del elemento [3, 4] o la distinta técnica de preparación del soporte para mejorar la acción del refuerzo [5], si bien tienen el inconveniente de utilizar probetas pequeñas (altura 500 mm).

También se ha comenzado a estudiar su empleo como refuerzo sísmico en uniones soporte-viga [6]; la reparación y refuerzo de soportes con corrosión previa en su armado [7]; el comportamiento para carga de compresión excéntrica [8]; o la posibilidad de que el recrecido no se aplique en todas las caras del soporte [9]. No obstante, el alcance de estos trabajos es aún limitado, y es preciso abordar investigaciones más extensas.

El presente estudio busca contribuir a ampliar el conocimiento sobre el refuerzo de soportes de hormigón mediante encamisados de HPFRM.

2. Programa de ensayos

En este apartado se presenta el procedimiento llevado a cabo durante la campaña experimental sobre pilares de sección circular y cuadrada reforzados mediante encamisado de HPFRM.

En primer lugar, se describen las probetas y materiales empleados. En segundo lugar, se exponen los procedimientos de ensayo y la instrumentación empleada en cada uno de ellos.

2.1 Descripción de las probetas y materiales de refuerzo

La campaña experimental consta de siete pilares de 1200 mm de altura. Tres son de sección circular (indicado con letra C en el nombre de la probeta) y cuatro de sección cuadrada (letra S).

Los pilares tienen un área trasversal semejante y están armados con acero B500S, como puede verse en la Figura 1. El hormigón tiene una resistencia a compresión en el momento de realización del ensayo en torno a 25 MPa, si bien en algunos pilares se obtuvo una resistencia mayor (ver Tabla 1).

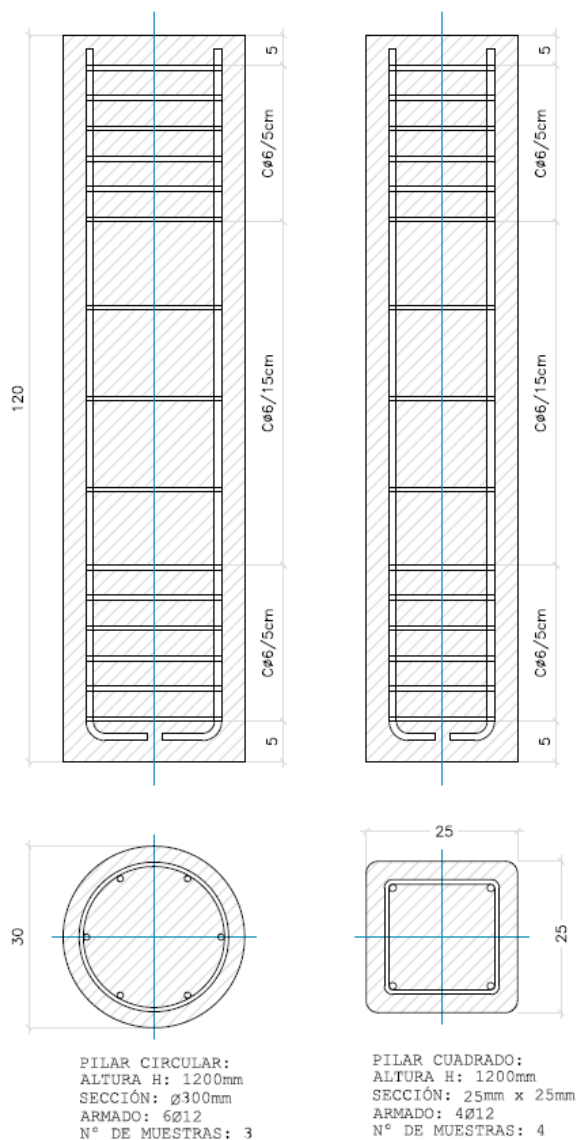


Figura 1. Sección de los pilares antes del refuerzo.

Un pilar de cada tipo de sección se ensaya como referencia (C0 y S0), mientras que el resto se refuerzan con una camisa externa de HPFRM con una altura de refuerzo igual a 1200 mm ó 1150 mm (este dato se indica en el nombre de la probeta, h_1200 o h_1150). El encamisado de mortero tiene un espesor medio de 28 mm.

Antes de proceder a la ejecución del refuerzo, se practica a los pilares un chorreado de arena para garantizar una buena adherencia. Posteriormente, mediante un encofrado de mayores dimensiones que los pilares, se ejecuta el refuerzo.

El producto empleado para el refuerzo es un mortero bicomponente cementoso,

compuesto por cementos de alta resistencia, áridos seleccionados y aditivos especiales, que está fibroreforzado con fibras metálicas (Planitop HPC, Mapei). Por sus elevadas prestaciones mecánicas se emplea para el refuerzo estructural de pilares y muros de hormigón mediante el recrecio de su sección, sin armadura adicional. Según el fabricante, las características mecánicas que presenta el mortero después de 28 días es una resistencia a compresión de 130 MPa y a flexión de 32 MPa.

Para facilitar su puesta en obra se emplea un superfluidificante (Mapecure Sra), que según indica el fabricante hace disminuir ligeramente sus características mecánicas entre un 5% y 6%.

El refuerzo se ejecuta siguiendo la dosificación e indicaciones de la ficha técnica. Se emplea el mortero en seco pre-dosificado al que se le añade agua de amasado y fibras rígidas de acero conformadas a partir de alambre trefilado en frío (Figura 2). Para la preparación del mortero en primer lugar se mezcla el polvo de mortero con el agua de amasado, a la que se añade el superfluidificante. Transcurrido el tiempo de mezcla en amasadora indicado, se añaden las fibras de acero de manera manual mientras se continua con el amasado hasta finalizar el proceso en el tiempo requerido.



Figura 2. Mortero de altas prestaciones: Polvo de mortero y fibras de acero.

Durante el proceso de mezcla del mortero, los pilares de hormigón chorreados con arena previamente, se limpiaron de polvo con aire comprimido, se humedecieron y se colocaron en el nuevo encofrado.

Finalizada la mezcla, se vierte hasta una altura inicial de 1150 mm (Figura 3). El curado se realiza en condiciones de laboratorio, cubriendo las probetas y los pilares con paños húmedos hasta transcurridas 72 horas, tras las que se procede al desmoldado.



Figura 3. Ejecución del refuerzo hasta una altura inicial de 1150 mm.

La altura de 1150 mm reproduce las condiciones de obra, ya que es difícil realizar el refuerzo de una vez con la altura de planta completa. Parte de las probetas se ensaya con esta altura de mortero y el resto se remata con un mortero de características similares, pero diferente trabajabilidad (Planitop HPC Tixo), hasta enrasar el refuerzo con la cara superior de la probeta.

2.2 Procedimiento de ensayo e instrumentación

Transcurridos al menos 28 días desde la ejecución del refuerzo, los pilares se ensayan a compresión axial centrada. Para ello, se emplea una prensa Icon de 10.000 kN - clase 2.

Las probetas se instrumentan en el perímetro con el objeto de estudiar su comportamiento mecánico. En concreto, las

instrumentaciones empleadas son: transductores de desplazamiento para medir deformaciones axiales y galgas extensométricas para medir tanto deformaciones axiales como laterales. En la Figura 4 se muestra la disposición general del ensayo de uno de los pilares.



Figura 4. Disposición general del ensayo.

Para medir la deformación axial se han utilizado captadores de desplazamiento que miden el acortamiento del pilar sobre una longitud de referencia de 1000 mm. En los pilares circulares se sitúan 3 captadores, colocados a 120°, y en los pilares cuadrados 4 captadores, uno en el centro de cada cara.

La deformación lateral se ha medido mediante galgas pegadas en la sección central de cada pilar (3 bandas a 120° en los circulares y 4 bandas en los cuadrados).

La disposición general de la instrumentación empleada en los ensayos, tanto de los pilares circulares como de los cuadrados, se muestra en la Figura 5.

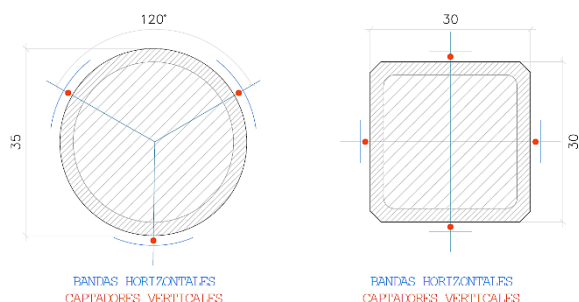


Figura 5. Disposición general de la instrumentación.

Todos los pilares se ensayan hasta su rotura. Durante los ensayos, se registraron de manera continua las lecturas de los transductores y de las galgas, así como de la carga aplicada.

3. Resultados obtenidos

3.1 Forma de fallo

En la Figura 6 se muestran fotografías de la rotura de los pilares circulares ensayados y en la Figura 7 la rotura de los pilares cuadrados ensayados.

En los pilares de referencia C0 y S0, sin refuerzo externo, se produce el modo de fallo habitual del hormigón sometido a compresión, con fisuras aproximadamente verticales que se aprecian cuando se alcanzan valores de carga próximos a la de rotura.

El modo de fallo que se observa en general en los ensayos de los pilares reforzados es la apertura de fisuras verticales en la parte superior del pilar que progresan hacia la parte inferior. Al inicio de este proceso son fisuras de pequeño espesor y longitud, de forma que el elemento mantiene la capacidad de resistir carga. Al final del ensayo las fisuras se abren hasta formar grietas de varios centímetros de abertura y se produce la rotura (Figuras 6 y 7).

Este tipo de fallo parece indicar que el refuerzo con una camisa externa de HPFRM a diferencia de otros, no colapsa de forma explosiva, sino que progresa paulatinamente hasta la rotura.



Figura 6. Rotura de los pilares circulares tras el ensayo: de izquierda a derecha C0, C1, C2.



Figura 7. Rotura de los pilares cuadrados tras el ensayo: de izquierda a derecha S0, S1, S2 y S3.

3.2 Resumen de los resultados

Los principales resultados de los ensayos se recogen en la Tabla 1. Se indica:

- La resistencia a compresión del hormigón obtenido mediante rotura de probetas normalizadas en la fecha de realización del ensayo (f_c).
- La carga máxima obtenida del ensayo (P_{max}).
- La tensión media en la sección central (f_c) estimada suponiendo que toda la sección soportase la misma tensión (es un parámetro simplificado que se utiliza para comparar la mejora resistente obtenida con el refuerzo). Para su cálculo se ha tenido en cuenta el área total de la sección (incluyendo la camisa en los pilares reforzados), restándole además la contribución de la armadura de acero del pilar original.
- La relación entre dicha tensión media y la resistencia del hormigón a fecha del ensayo (f_c/f_c).
- La deformación axial del ensayo para la carga máxima (ϵ'_c).

Tabla 1. Resultados obtenidos

Probeta	f_c [MPa]	P_{max} [kN]	f_c [MPa]	$\frac{f'_c}{f_c}$	ϵ'_c [%]
C0	24,1	1649,1	21,1	0,87	0,13
C1_h1150	25,4	2163,8	21,2	0,83	0,11
C2_h1200	26,7	3473,5	34,0	1,27	0,17
S0	35,0	2247,0	33,8	0,97	0,19
S1_h1150	24,1	2293,8	24,5	1,02	0,09
S2_h1200	27,4	3690,9	39,2	1,43	0,18
S3_h1200	28,4	3531,2	37,3	1,31	0,18

Las gráficas de las Figuras 8 y 9 representan el comportamiento carga frente a deformación axial y deformación lateral registradas en los pilares de sección circular y cuadrada, respectivamente.

En la Figura 10 se comparan las curvas obtenidas en los pilares cuadrados y circulares en los que se ha ejecutado el refuerzo con mortero en toda la altura del pilar.

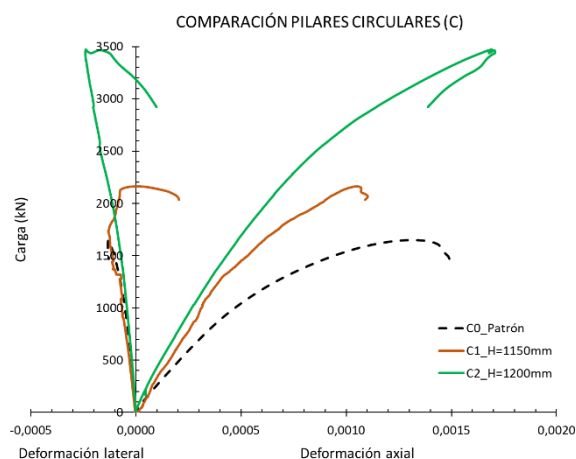


Figura 8. Gráfico de carga - deformación de los pilares circulares.

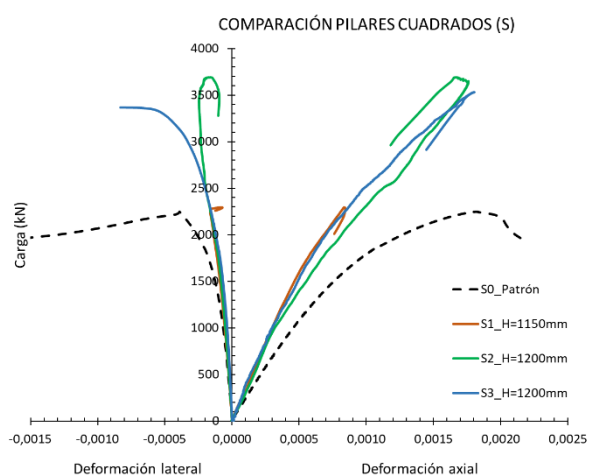


Figura 9. Gráfico de carga - deformación de los pilares cuadrados.

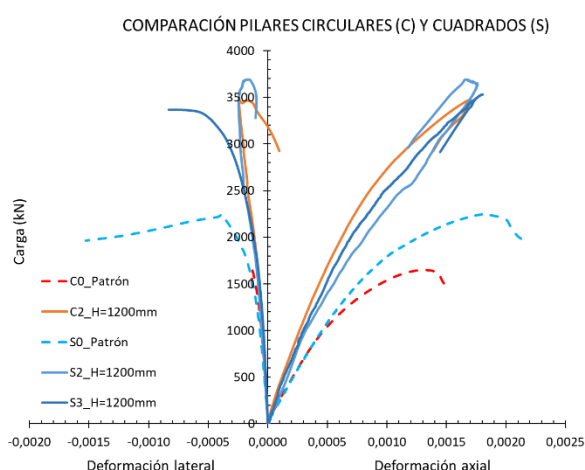


Figura 10. Gráfico de carga - deformación de la comparación entre pilares circulares y cuadrados.

4. Análisis de los resultados

Analizando los resultados de los ensayos de las probetas de sección circular se observa que en la probeta C1, en la que el refuerzo no alcanza la cara superior, prácticamente no se consigue incrementar la resistencia, mientras que en la probeta C2, con refuerzo de mortero en toda su longitud, se alcanza un incremento de resistencia, estimado en función de la relación (P_c/f_c), de un 27 %.

Un comportamiento similar se observa en las probetas de sección cuadrada. Con el refuerzo de 1150 mm (pilar S1) no se consigue incremento de resistencia, mientras que en los dos pilares con refuerzo en toda su longitud (S2 y S3) la relación (P_c/f_c) indica una mejora de 43 % y 31 % respectivamente.

Cuando el refuerzo se ejecuta en toda su longitud, se observa que tanto para las probetas de sección circular como cuadrada, se obtiene un porcentaje de incremento de resistencia parecido.

Por otro lado, en la Figura 10, en la que se comparan las probetas de sección circular y cuadrada con refuerzo en toda su longitud, se observa un comportamiento carga-deformación similar para todos los pilares reforzados, independientemente de la forma de la sección.

En esta misma Figura 10 puede verse que no se han registrado valores altos de la deformación axial máxima (en torno a 0,18%). Sin embargo, en la bibliografía sobre el tema a menudo se indica que este tipo de refuerzos incrementan la capacidad de deformación axial, con el consiguiente incremento de ductilidad [3]. Esta diferencia puede deberse a que las muestras de los otros trabajos son de pequeño tamaño (por ejemplo, altura de 300 mm y ancho 150 mm en [3]) y están hechas de hormigón en masa. De ahí la importancia de realizar campañas experimentales sobre elementos más parecidos a la realidad constructiva.

Como aspecto positivo, comentar que a pesar de no alcanzar grandes deformaciones axiales que

impliquen una mayor ductilidad, las probetas reforzadas no fallaron de forma explosiva, sino tras un proceso de fisuración progresivo, lo que constituye una forma de preaviso de la rotura.

Dicho lo anterior, y a falta de realizar un mayor número de ensayos con distintas tipologías, los resultados obtenidos parecen indicar que este tipo de refuerzo de camisa externa, cuando se ejecuta en toda su longitud, es un sistema de refuerzo eficaz, ya que con una intervención mínima sobre pilares existentes (menos de 3 cm de recrecio con un mortero que no lleva armadura de acero longitudinal ni transversal adicional, sólo las fibras del mortero HPFRM) incrementa considerablemente la resistencia del pilar, independientemente del tipo de sección que se tenga.

Esto representa una ventaja frente a otros métodos de refuerzo como puedan ser por ejemplo las camisas de FRP, en que las que la eficiencia sí varía mucho en función de la forma de la sección.

5. Conclusiones

Se ha llevado a cabo un estudio experimental sobre el refuerzo de soportes de hormigón armado con encamisados de HPFRM.

A continuación, se recogen las principales conclusiones obtenidas del estudio:

- Los refuerzos ejecutados con un encamisado que no llegan a la altura completa del pilar, no permiten mejorar significativamente la capacidad resistente.

- Los refuerzos ejecutados con un encamisado completo, permiten mejorar notablemente la capacidad resistente de los pilares.

- La mejora de la capacidad de carga axial obtenida permite suponer que el espesor de la camisa utilizado (menor de 3 cm) es válido, sin necesidad de refuerzos adicionales.

- A falta de ser corroborado con un mayor número de ensayos, la forma de la sección no

influye de manera significativa en la eficacia del refuerzo.

- Los pilares reforzados no fallan de forma explosiva, sino tras un proceso de fisuración progresivo, lo que constituye una forma de preaviso de la rotura.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Mapei Spain S.A.U. por su colaboración facilitando los productos para la ejecución de los encamisados de mortero.

El trabajo ha sido financiado por el Proyecto Intramural PIE 202260E060 “Metodología para mejorar la calidad en el proceso de edificación y vida útil en Edificios de la Administración Pública” del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Referencias

- [1] American Concrete Insitute, ACI. PRC-239-18: Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Technology Report ACI 239, 2018.
- [2] Hung, C. C., El-Tawil, S., & Chao, S. H. A review of developments and challenges for UHPC in structural engineering: Behavior, analysis, and design. *Journal of Structural Engineering* (2021), 147(9), 03121001.
- [3] J. Xie, Q. Fu, J. B. Yan. Compressive behaviour of stub concrete column strengthened with ultra-high performance concrete jacket. *Construction and Building Materials* (2019), Vol.204, 643–658.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.220>
- [4] S. Wang, C. Liu, Y. Tian, X. Wang, T. Tong, S. Zhuo. Experimental, Numerical, and Analytical Studies of Uniaxial Compressive Behavior of Concrete Confined by Ultra-High-Performance Concrete. *Advances in Civil Engineering* (2023).
<https://doi.org/10.1155/2023/1408320>
- [5] Dadvar, S. A., Mostofinejad, D., & Bahmani, H. Strengthening of RC columns by ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) jacketing. *Construction and*

- Building Materials (2020), 235, 117485.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117485>
- [6] C. Beschi, A. Meda, P. Riva. Column and joint retrofitting with high performance fiber reinforced concrete jacketing. Journal of Earthquake Engineering (2011), Vol. 15, No. 7, 989–1014, 2011.
<https://doi.org/10.1080/13632469.2011.552167>
- [7] A. Meda, S. Mostosi, Z. Rinaldi, P. Riva. Corroded RC columns repair and strengthening with high performance fiber reinforced concrete jacket. Materials and Structures/Materiaux et Constructions (2016), Vol.49, No.5, 1967–1978.
<https://doi.org/10.1617/s11527-015-0627-1>
- [8] Cassese, P., Menna, C., Occhiuzzi, A., & Asprone, D. Experimental behavior of existing RC columns strengthened with HPFRC jacket under concentric and eccentric compressive load. Buildings (2021), 11(11), 521.
<https://doi.org/10.3390/buildings11110521>
- [9] Shehab, H., Eisa, A., Wahba, A. M., Sabol, P., & Katunský, D. Strengthening of reinforced concrete columns using ultra-high performance fiber-reinforced concrete jacket. Buildings (2023), 13(8), 2036.
<https://doi.org/10.3390/buildings13082036>