

# Estudio experimental sobre el efecto de la forma de la sección en el confinamiento de pilares de hormigón con FRP

*Experimental study on the effect of cross-section shape on the confinement of concrete columns with FRP*

José Pedro Gutiérrez Jiménez <sup>a</sup>, Sonia Martínez de Mingo <sup>b</sup>, Viviana Castro Quispe <sup>c</sup>,  
Luis Echevarría Giménez <sup>d</sup>, Ana de Diego Villalón <sup>e</sup>

<sup>a</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja IETcc, CSIC ([jpgutierrez@ietcc.csic.es](mailto:jpgutierrez@ietcc.csic.es))

<sup>b</sup> Dra. Arquitecto, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja IETcc, CSIC

<sup>c</sup> Ingeniero Civil, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja IETcc, CSIC

<sup>d</sup> Ingeniero de Caminos, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja IETcc, CSIC

<sup>e</sup> Dra. Ingeniero de Caminos, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja IETcc, CSIC

## RESUMEN

Se presentan los primeros resultados de un programa experimental cuyo fin es investigar el efecto de la forma de la sección en el confinamiento de soportes de hormigón con polímeros reforzados con fibras (FRP). Se han ensayado probetas de 600 mm de altura de sección cuadrada y rectangular con relación entre lados (b/d) igual a 1,5 y 2, reforzadas con diferentes cuantías de FRP. Se estudia la pérdida de eficacia del confinamiento al incrementar la relación entre lados de la sección. La deformación última efectiva del refuerzo es bastante inferior a la obtenida en ensayos de tracción del material FRP, siendo éste un aspecto clave sobre el que aún no se ha alcanzado un consenso en las guías de cálculo publicadas.

## ABSTRACT

The first results of an experimental program are presented. The aim of the program is to investigate the effect of the section shape on the confinement of concrete columns with fibre-reinforced polymers (FRP). Specimens of 600 mm height of square and rectangular section have been tested with an aspect ratio (b/d) equal to 1,5 and 2, strengthened with different amounts of FRP. The loss of effectiveness of confinement due to increasing the relationship between sides of the section is studied. The ultimate effective FRP strain is considerably lower than that obtained in FRP tensile tests, this is a key issue on which consensus has not yet been reached in the published calculation guides.

**PALABRAS CLAVE:** refuerzo, pilar, FRP, confinamiento, ensayos

**KEYWORDS:** strengthening, column, FRP, confinement, tests

## 1. Introducción

Es conocido que el confinamiento con camisas de FRP (polímeros reforzados con fibras) es una técnica de refuerzo que permite mejorar la

resistencia y ductilidad de soportes de hormigón sometidos a compresión centrada, especialmente en aquellos cuya sección transversal es circular.

Hoy en día, este método de refuerzo por confinamiento con materiales compuestos avanzados es una opción viable, entre otras posibles técnicas, para el refuerzo de soportes de hormigón armado [1], existiendo desde hace años aplicaciones reales de estos productos para recuperar o aumentar la capacidad portante de soportes, por ejemplo, cuando se detecta una bajada resistencia del hormigón o cuando se precisa hacer frente a solicitaciones mayores que las inicialmente previstas. La Figura 1, extraída de la guía técnica británica TR55, muestra una imagen de un caso real de aplicación de este tipo de refuerzo.



Se cuenta ya con numerosos estudios experimentales sobre el comportamiento de elementos de hormigón confinado con FRP [2-3] y se han propuesto modelos teóricos [4-5], si bien la mayoría de los trabajos se centran en el refuerzo de soportes de sección circular. En el caso de que la sección transversal del elemento reforzado sea cuadrada o rectangular, como es habitual en estructuras de edificación, la eficacia del refuerzo es menor, hecho que se ha comprobado en diversos estudios [6-7]. Ello es

debido a que la camisa ejerce una presión uniforme sobre todo el perímetro del elemento si su sección es circular, pero si es cuadrada o rectangular, el confinamiento se concentra, fundamentalmente, en las esquinas.

Las guías de diseño publicadas por diversos organismos internacionales para este tipo de refuerzos reconocen esta circunstancia por lo que muchas incorporan coeficientes reductores por el efecto de la forma de la sección a formulaciones desarrolladas inicialmente para secciones circulares [8-10]. El coeficiente de forma más aceptado es el basado en el efecto arco, utilizado en el confinamiento con acero, pero algunos autores proponen coeficientes de forma más reducidos para el confinamiento con FRP. Además de la falta de consenso, estas formulaciones de tipo empírico se elaboran de acuerdo con una base de datos experimental que aún no es lo suficientemente amplia, sobre todo respecto a ensayos de probetas de sección no circular y ensayos de tamaño medio y escala real.

Los ensayos descritos en este trabajo tienen por objetivo estudiar la incidencia de la forma de la sección transversal del elemento reforzado en la efectividad del refuerzo. Las principales variables estudiadas son: la relación entre lados de la sección ( $b/d$ ) y el radio de curvatura de las esquinas ( $R_c$ ).

## 2. Programa de ensayos

Los ensayos forman parte de la investigación teórico y experimental planteada en el Proyecto BIA 2016-80310-P “Estudio del refuerzo de pilares rectangulares de hormigón armado con FRP basado en ensayos a escala real y propuesta de un nuevo modelo de cálculo”, que contempla la realización de un programa experimental a desarrollar en dos fases:

1) Ensayos sobre probetas de tamaño intermedio de sección cuadrada y rectangular.

2) Ensayos sobre prototipos a escala real de sección circular, cuadrada y rectangular.

El presente trabajo corresponde a la primera fase del programa, en la que se inicia el estudio experimental de las principales variables del sistema aplicado a elementos con secciones cuadradas y rectangulares.

## 2.1 Descripción de las probetas

Se presentan los resultados de 24 ensayos a compresión simple de probetas prismáticas de hormigón en masa (sin armadura interna) con sección cuadrada y rectangular, una de las cuales se ensayó sin refuerzo (probeta patrón) y el resto reforzadas con camisas de CFRP (polímeros reforzados con fibras de carbono).

Las probetas se fabricaron con las esquinas redondeadas, variando su radio de curvatura. Para ello, se emplearon unos moldes de madera fabricados “ex profeso” como encofrado, cuyas esquinas fueron torneadas para ajustarse al radio de redondeo buscado. En la Figura 2 se muestra una imagen de varios de estos encofrados.



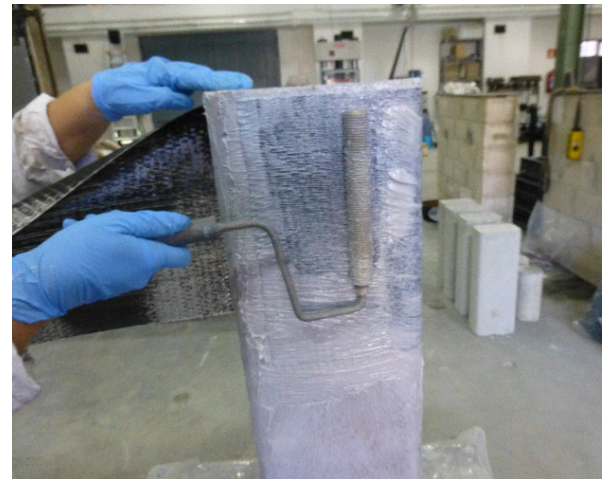
Una vez desmoldadas y transcurridos 28 días del hormigonado, las esquinas de las probetas se repasaron y se limpiaron con aire comprimido para que no quedase polvo sobre su superficie.

Salvo la probeta patrón que se ensayó sin refuerzo, el resto se reforzaron transcurridos 28 días de su fabricación. El método utilizado para

su ejecución es el más habitual para este tipo de refuerzos y consiste en aplicar manualmente las fibras de carbono unidireccionales y la resina sobre el sustrato de hormigón. La fibra de carbono se dispuso envolviendo al soporte, orientada en la dirección perpendicular al eje del mismo, en lo que se denomina orientación a 0°, que es la más favorable para el confinamiento.

Se reforzó toda la longitud de las probetas, variando el número de capas, si bien, en los primeros 100 mm de los extremos, para forzar la rotura en la zona central y evitar fallos locales, se colocaron 2 capas adicionales.

En la Figura 3 se muestra una imagen del proceso de aplicación del refuerzo sobre las probetas que se realiza siguiendo los siguientes pasos: aplicación de resina epoxi sobre el soporte de hormigón, aplicación del tejido unidireccional de carbono envolviendo la probeta con una longitud de solape de 100 mm en la dirección de la fibra y, finalmente, aplicación de otra capa de resina. Es importante pasar un rodillo ranurado después de colocar el tejido para que la resina lo atraviese y la fibra quede bien embebida. No obstante, el procedimiento de aplicación puede variar ligeramente según el fabricante.



Los materiales empleados en el refuerzo son tejido unidireccional de fibra carbono y resina epoxi. De acuerdo con los datos del fabricante, el tejido en seco tiene un espesor neto de fibra igual a 0,129 mm por cada capa de tejido, un módulo elástico igual a 230.000 N/mm<sup>2</sup>

(valor mínimo), una resistencia a tracción de  $4000 \text{ N/mm}^2$  (valor mínimo) y una deformación de rotura media de 0,017.

Los principales parámetros estudiados en estos ensayos son:

- La relación  $b/d$  entre los lados de la sección de hormigón. Se han ensayado probetas de sección cuadrada ( $b/d=1$ ) y de sección rectangular con  $b/d= 1,5$  y 2.

- El radio de curvatura de redondeo de las esquinas ( $R_c$ ): 20, 25 y 30 mm.

- El número de capas de refuerzo CFRP aplicado.

Las probetas se han denominado indicando, en primer lugar, la relación entre lados de la sección ( $b/d$ ), seguido del radio de curvatura de las esquinas expresado en milímetros ( $R_c$ ) y el número de capas de refuerzo de FRP. Cuando se ensayan varias probetas con las mismas características, se indica colocando, al final del nombre, las letras “a”, “b”, etc.

## 2.2 Instrumentación y procedimiento de ensayo

Los ensayos se han realizado a compresión centrada una vez transcurrido al menos una semana desde la aplicación del refuerzo.

Las probetas se monitorizaron con el fin de medir su deformación axial y su deformación transversal.

En la sección central se adhirieron dos bandas extensométricas en cada una de las cuatro caras, una en el sentido longitudinal y la otra en el sentido transversal. Se utilizaron también cuatro transductores de desplazamiento que medían el acortamiento del elemento.

La Figura 4 muestra la disposición general de uno de los ensayos. Las lecturas de los transductores y las bandas, así como de la carga aplicada, se grabaron de manera continua durante los ensayos.



Figura 4. Disposición general del ensayo

## 3. Resultados obtenidos

Los principales resultados obtenidos se recogen en la Tabla 1, indicando para cada ensayo: la resistencia a compresión del hormigón sin confinar obtenida de probetas normalizadas ( $f_{co}$ ), la carga máxima alcanzada en el ensayo ( $Q_{m\acute{a}x}$ ), la resistencia a compresión del hormigón confinado ( $f_{cc}$ ), el incremento de resistencia respecto al hormigón sin confinar ( $f_{cc}/f_{co}$ ) y la deformación última de tracción en el FRP ( $\epsilon_{f,eff}$ ).

Los ensayos realizados tienen por objeto, fundamentalmente, el refuerzo de elementos con hormigones de baja resistencia (entre 20 y 30 MPa), por ser, en principio, los susceptibles de precisar refuerzo en obras de rehabilitación u obra nueva, en caso de no haberse alcanzado una resistencia adecuada. No obstante, otras probetas se fabricaron con una resistencia mayor.

Por ese motivo y como es bien conocido que la resistencia a compresión del hormigón sin confinar ( $f_{co}$ ) es un parámetro que determina el grado de mejora que puede obtenerse con el refuerzo, en la Tabla 1 se recogen las probetas ensayadas para las distintas secciones ( $b/d$  igual a 1, 1,5 y 2) agrupadas en función de la resistencia a compresión del hormigón sin confinar.

**Tabla 1. Resultados ensayos**

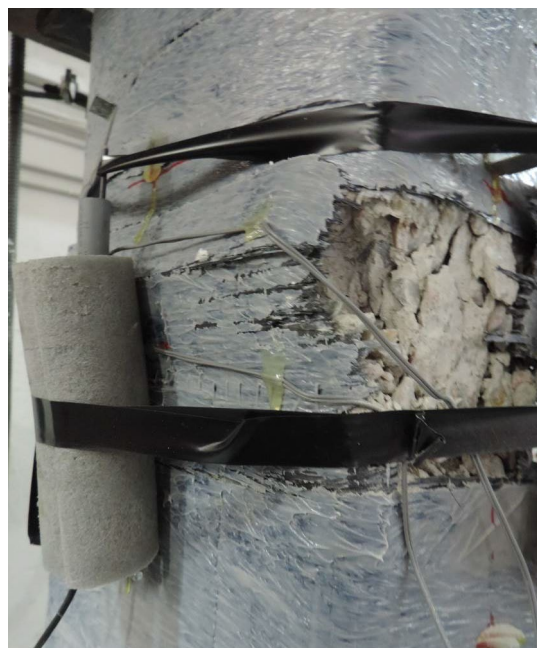
Probeta	$f_{co}$ (MPa)	$Q_{max}$ (kN)	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{cc}/f_{co}$	$\epsilon_{r,eff}$ (%)
Patrón	35,3	730,9	33,0	0,93	
1_20_2b	25,1	1102,1	49,7	1,98	1,16
1_25_2a	25,1	1209,3	55,1	2,19	1,31
1_25_2b	25,1	1231,6	56,1	2,23	1,12
1_20_1a	35,3	803,6	36,3	1,03	1,11
1_20_2a	35,3	1071,7	48,4	1,37	0,95
1_25_3a	34,4	1593,6	72,6	2,11	1,15
1_30_3a	34,4	1731,1	78,1	2,27	1,26
1,5_20_2b	20,6	1238,6	37,1	1,80	0,92
1,5_25_2a	20,6	1242,9	37,4	1,81	1,13
1,5_30_2b	20,6	1154,7	35,0	1,70	0,89
1,5_20_2c	27,1	1307,1	39,1	1,44	0,91
1,5_25_2b	27,1	1256,7	37,8	1,40	1,12
1,5_20_2a	35,3	1212,6	36,3	1,03	0,69
1,5_30_2a	35,3	1221,0	37,0	1,05	0,78
1,5_20_3a	34,4	1497,5	44,8	1,30	0,98
1,5_25_3a	34,4	1640,1	49,4	1,44	0,98
1,5_30_3a	34,4	1726,6	52,4	1,52	1,01
2_20_3a	22,8	1138,1	25,5	1,12	0,59
2_25_3a	22,8	1202,5	27,0	1,19	0,85
2_30_3b	22,8	1266,9	28,6	1,26	0,80
2_30_3a	29,8	1533,7	34,7	1,16	0,66
2_20_4a	29,8	1745,3	39,1	1,31	0,56
2_25_4a	29,8	1803,8	40,6	1,36	0,65

Respecto al modo de fallo observado en los ensayos, éste habitualmente se produce de forma súbita por rotura a tracción de las fibras de la camisa de FRP cerca de las esquinas (Figura 5). En la probeta 1,5\_30\_2c se produjo un fallo por despegue del solape.

A partir de las lecturas de la carga, de los cuatro transductores de desplazamiento y de las bandas extensométricas, se ha representado la curva tensión axial-deformación axial y tensión axial-deformación lateral de cada ensayo.

Es característico de elementos de hormigón confinado con materiales compuestos que las curvas tensión-deformación presenten una forma aproximadamente bilineal, con dos tramos cuasi-lineales y una pequeña zona de transición entre ellos que se produce para un valor de tensión similar a la resistencia del hormigón sin confinar. El comportamiento en el primer tramo es muy parecido al del elemento de hormigón sin confinar (en este caso, probeta patrón). La segunda rama es ascendente cuando el nivel de confinamiento es suficiente, siendo su

pendiente mayor cuanto mayor es la cuantía de refuerzo, de no ser así el segundo tramo es horizontal o incluso descendente. Como se expone en el siguiente apartado, las gráficas tensión-deformación obtenidas de los ensayos han seguido, en líneas generales, estos patrones.



**Figura 5. Fallo por rotura a tracción de las fibras cerca de las esquinas**

### 3.1 Probetas de sección cuadrada

Se observa que en las probetas cuadradas fabricadas con un hormigón de resistencia de 25 MPa, aproximadamente, el confinamiento debido al encamisado con dos capas de fibra de carbono ha permitido duplicar la resistencia respecto al hormigón sin confinar.

En probetas con esta misma sección cuadrada elaboradas con un hormigón de mayor resistencia (alrededor de 35 MPa) apenas hay mejora cuando se refuerzan con una sola capa de CFRP. En cambio, con dos capas de refuerzo y esta misma resistencia del hormigón (35 MPa) se ha obtenido una mejora de la capacidad resistente del 37% y con tres capas de hasta el 127%. En general, se ha visto que el incremento es mayor cuando el radio de curvatura de redondeo de la esquina es mayor.

En la Figura 6 se ha representado la gráfica tensión normalizada – deformación longitudinal y transversal de cuatro probetas cuadradas ( $b/d=1$ ) con resistencia del hormigón sin confinar de 35 MPa, aproximadamente (una es la probeta patrón y las otras tres están reforzadas con distinto número de capas de CFRP).

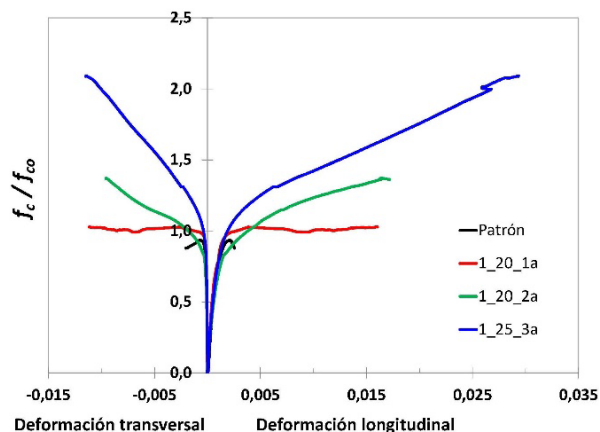


Figura 6. Gráfico tensión normalizada-deformación de probetas de sección cuadrada

El confinamiento obtenido con el refuerzo ha sido eficaz cuando se aplican 2 y 3 capas de refuerzo de CFRP, pudiendo observarse que la segunda rama de la gráfica tensión-deformación es ascendente. Sin embargo, con esta resistencia (35 MPa) y sólo una capa de refuerzo la segunda rama de la gráfica es prácticamente horizontal.

### 3.2 Probetas de sección rectangular con $b/d=1,5$

En elementos de sección transversal rectangular con una relación de aspecto entre los lados de la sección ( $b/d$ ) igual a 1,5, la eficiencia del refuerzo es menor que en aquellos que tienen sección cuadrada. Las probetas ensayadas se fabricaron con hormigones cuya resistencia a compresión sin confinar varió entre 20,6 MPa y 35,3 MPa.

En la Figura 7 se ha representado la gráfica tensión normalizada – deformación longitudinal y transversal de siete probetas con sección rectangular con relación entre lados  $b/d$  igual a 1,5. Cinco de ellas se fabricaron con un

hormigón de 35 MPa de resistencia y las otras dos con hormigón de 21 MPa, aproximadamente (ver Tabla 1). Todas se ensayaron reforzadas, aunque con distinto número de capas de refuerzo de CFRP.

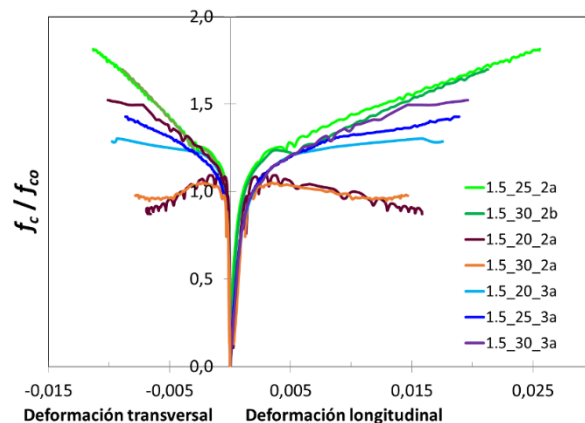


Figura 7. Gráfico tensión normalizada-deformación de probetas de sección rectangular con  $b/d=1,5$

En los ensayos de las probetas con una resistencia del hormigón en torno a 21 MPa reforzadas con 2 capas de CFRP se obtuvieron mejoras de resistencia comprendidas entre el 70% y el 81%, presentando una segunda rama ascendente en su gráfica tensión-deformación, característica del hormigón bien confinado (probetas 1,5\_25\_2a y 1,5\_30\_2b).

En los ensayos de las probetas con hormigón de 35 MPa el refuerzo con 2 capas no resultó suficiente para obtener una mejora en la capacidad resistente del elemento reforzado, registrándose una segunda rama de la gráfica descendente (probetas 1,5\_20\_2a y 1,5\_30\_2a).

Sin embargo, con esta misma resistencia y 3 capas de CFRP (probetas 1,5\_20\_3a, 1,5\_25\_3a, 1,5\_30\_3a) se obtuvieron incrementos entre el 30% y el 52% y la segunda rama de la gráfica tensión-deformación es ascendente, siendo mayor cuanto mayor era el radio de curvatura empleado en el redondeo de las esquinas, Figura 8.

Como puede verse en la Tabla 1, en las probetas con una relación entre lados ( $b/d$ ) igual a 1,5, con resistencia sin confinar de 27 MPa y dos capas de CFRP se obtuvieron mejoras de resistencia en torno al 40%.

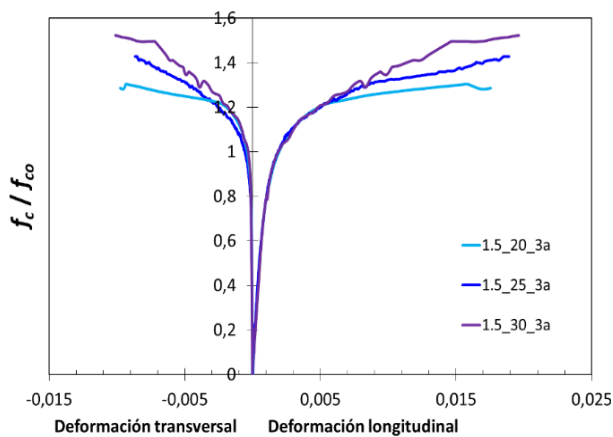


Figura 8. Gráfico tensión normalizada-deformación de probetas de sección rectangular con  $b/d=1,5$

### 3.3 Probetas de sección rectangular con $b/d=2$

En las probetas con sección rectangular y relación entre lados de la sección ( $b/d$ ) igual a 2 la efectividad del refuerzo es claramente menor, especialmente, para aquellas fabricadas con un hormigón de mayor resistencia.

En probetas con resistencia a compresión del hormigón sin confinar de 23 MPa, aproximadamente, ha sido necesario aplicar 3 capas de refuerzo de CFRP y que el radio de redondeo de las esquinas fuera el mayor de los estudiados (probeta 2\_30\_3b), para obtener una mejora del 26%.

Para una mayor resistencia del hormigón sin confinar, 30 MPa, la mejora obtenida con 3 capas de refuerzo fue del 16%, siendo necesario aplicar 4 capas para obtener incrementos del 36%.

En la Figura 9 se muestra la gráfica tensión normalizada– deformación longitudinal y transversal de cuatro probetas de sección con 3 capas de CFRP. Sólo en una de las probetas (2\_30\_3b) se ha podido observar una segunda rama ascendente en la gráfica tensión-deformación.

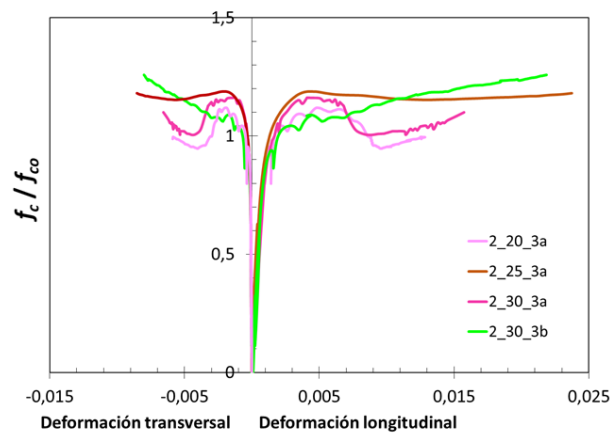


Figura 9. Gráfico tensión normalizada-deformación de probetas de sección rectangular con  $b/d=2$

### 3.4 Otros aspectos de los resultados obtenidos

Cabe destacar que en todos los casos se observa una mejora de la ductilidad, siendo la deformación última longitudinal registrada en las probetas reforzadas muy superior a la de la probeta patrón (sin refuerzo). Esto ocurre incluso en aquellos elementos en los que no se obtiene un incremento en la capacidad resistente por haber resultado insuficiente el número de capas de CFRP aplicadas.

En el momento de la rotura de las probetas las deformaciones registradas en el refuerzo (deformación circunferencial efectiva última en la camisa ó  $\epsilon_{f,eff}$ ) son significativamente inferiores al valor de la deformación última del CFRP obtenida en los ensayos de tracción normalizados del laminado ( $\epsilon_{fu}$ ). La relación entre ambos valores ( $\epsilon_{f,eff} / \epsilon_{fu}$ ), que suele denominarse factor de eficiencia de la deformación, es un parámetro importante para el cálculo de los refuerzos.

La guía ACI-440.2R-17 [10] propone un valor de 0,55 para este factor, en base a resultados experimentales obtenidos en probetas de sección circular, mientras que el TR55 [8] recomienda valores más reducidos para secciones rectangulares en función del radio de redondeo y el lado de la sección. En los ensayos

de este trabajo se ha obtenido un valor medio de  $\varepsilon_{f,eff} / \varepsilon_{fu}$  igual a 0,53, similar al propuesto en [10], pero sin embargo se observa que el valor disminuye al aumentar la relación b/d, siendo el valor medio 0,65 para las secciones cuadradas, 0,53 para las rectangulares con b/d igual a 1,5 y 0,39 para las rectangulares con b/d igual a 2. Dado el reducido número de ensayos no pueden extraerse conclusiones respecto a la dependencia del radio de redondeo, pero sí parece adecuado reducir el valor del coeficiente de eficiencia de la deformación en secciones rectangulares.

#### 4. Conclusiones

Las principales conclusiones del trabajo realizado son:

- El confinamiento mediante camisas de CFRP permite mejorar significativamente la capacidad resistente y ductilidad de soportes de hormigón de sección cuadrada cuyas esquinas se redondeen previo a la ejecución del refuerzo. En los ensayos realizados, el incremento de resistencia conseguido respecto al hormigón sin confinar ( $f_{cc}/f_{co}$ ) ha sido mayor para elementos fabricados con hormigón de resistencia a compresión baja, aumentando con el número de capas de refuerzo.

- En soportes de sección rectangular con una relación de aspecto entre los lados de la sección (b/d) igual a 1,5, la eficiencia del refuerzo es menor que en los de sección cuadrada, siendo necesario aplicar más cantidad de refuerzo. Con esta relación entre los lados de la sección (b/d) igual a 1,5, dos capas de refuerzo y una resistencia a compresión del hormigón sin confinar de 35 MPa, no se ha obtenido un incremento de la capacidad resistente del elemento. En cambio, con dos capas de refuerzo aplicadas a probetas fabricadas con hormigones de resistencia menor (21 MPa y 27 MPa) sí se obtuvieron mejoras.

- En las probetas con sección rectangular y relación entre lados de la sección (b/d) igual a 2 la efectividad del refuerzo es claramente

menor, especialmente, para aquéllas fabricadas con un hormigón de mayor resistencia. No obstante, se observa una mejora de la ductilidad, siendo la deformación última longitudinal registrada en las probetas reforzadas muy superior a la del hormigón sin confinar.

- La eficiencia del refuerzo (interpretada a partir de la relación  $f_{cc}/f_{co}$ ) es mayor cuando aumenta el número de capas de CFRP y, en general, cuando el radio de curvatura del redondeo de las esquinas es mayor.

- En las probetas con las esquinas redondeadas y suficiente cantidad de refuerzo de CFRP aplicado, el segundo tramo de la gráfica tensión-deformación es una línea ascendente. Cuando la cantidad de refuerzo resulta insuficiente, el segundo tramo de la gráfica es horizontal o, incluso, descendente.

- El fallo se produce de forma súbita, generalmente por rotura a tracción de las fibras de la camisa de FRP cerca de las esquinas para valores de deformación del refuerzo muy inferiores de los obtenidos en los ensayos de tracción normalizados del material.

No obstante, las conclusiones anteriores deben considerarse dentro del ámbito de los parámetros estudiados con las limitaciones derivadas del número de ensayos realizados.

#### *Agradecimientos*

Los autores agradecen la financiación del proyecto BIA 2016-80310-P y la ayuda FPI BES-2017-080647 por parte de la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). También agradecen a las empresas SIKA y BETAZUL el suministro del material FRP y la asesoría, así como su colaboración en el proyecto de investigación.

#### *Referencias*

[1] Monografía M-29. Refuerzo de pilares de hormigón armado. Grupo de trabajo 5/7, "Refuerzo de pilares", Comisión 5. ACHE,



Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural, 2018.

Farmington Hills, Michigan, 2017.

- [2] Y. Xiao and H. Wu, “Compressive behavior of concrete confined by various types of FRP composite jackets,” *J. Reinf Plast Compos.*, vol. 22, no. 13, pp. 1187-1201, 2003.
- [3] T. M. Pham, M. N. S. Hadi and J. Youssef, “Optimized FRP wrapping schemes for circular concrete columns under axial compression,” *J Compos Constr.*, 04015015, 2015.
- [4] J. G. Teng, T. Jiang, L. Lam and Y. Z. Luo, “Refinement of a design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete,” *J Compos Constr.*, vol. 13, pp. 269-278, 2009.
- [5] R. Realfonzo and A. Napoli, “Concrete confined by FRP systems: confinement efficiency and design strength models,” *Compos B Eng.* Vol. 42, pp. 736-755, 2011.
- [6] O. Chaallal, M. Shahawy and M. Hassan, “Performance of axially loaded short rectangular columns strengthened with carbon fiber-reinforced polymer wrapping,” *J Compos Constr.*, vol. 7, no. 3, pp. 200-208, 2003.
- [7] A. de Diego, A. Arteaga and J. Fernández, “Strengthening of square columns with composite materials. Investigation on the FRP jacket ultimate strain”, *Composites Part B* Vol. 162, 454-460, 2019.
- [8] Concrete Society, TR55. Technical Report Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials, 3rd edition. UK, 2012.
- [9] National Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, CNR-DT200\_R1. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Italy, 2013.
- [10] American Concrete Institute ACI-440.2R-17. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures,