

REFUERZO DE PILARES CON TEJIDOS DE F.C.

Alcaraz, V^{1*}, Mas, M², García, E¹, Luizaga, A¹,

(1) *Departamento de Ing. Civil: Servicios Urbanos, EUITOP, UPM, Madrid, España*

(2) *Departamento de Ing. Civil: Tecnología de la Construcción, EUITOP, UPM, Madrid, España*

RESUMEN:

Los pilares son los elementos estructurales más sensibles de una estructura, por lo que resulta muy frecuente su refuerzo. En el presente trabajo se realiza una campaña de ensayos de pilares en modelo reducido, para este fin. Se construyeron 30 pilares en modelo reducido, 15 de ellos de sección cuadrada y 15 de sección circular. En cada caso se formaron 3 lotes, 5 pilares sin refuerzo (pilares testigo), 5 pilares con una capa de refuerzo y 5 pilares con dos capas de refuerzo. Los ensayos se realizaron en las instalaciones de GEOCISA.

El trabajo comprende un estudio teórico-experimental del comportamiento mecánico de pilares de hormigón armado reforzados por confinamiento mediante la técnica de adhesión de tejidos de fibra de carbono, sometidos a una carga axial. Se describen los modos de fallo de forma comparativa entre los distintos lotes, para plantear finalmente una serie de conclusiones y recomendaciones.

Palabras clave: Pilar, Estructura, Refuerzo, Material, Fibra de carbono.

COLUMNS REINFORCEMENT WITH C.F.

ABSTRACT:

Columns are a structure's most sensitive element, and thus they are very often reinforced. In this paper, a test campaign of reduced model columns was carried out. Batches were prepared with square and circular columns, reinforced and unreinforced. The tests were conducted on GEOCISA's facilities.

The work includes a theoretical and experimental study on the mechanical behaviour of concrete columns reinforced by confinement, subjected to an axial load. The reinforcements were done adding to the columns surface carbon fibre fabrics. A comparison of failure modes across batches is provided, in order to finally achieve a number of conclusions and recommendations.

Key Words: Columns, Structure, Reinforcement, Materials, C.F.

*vicente.alcaraz@upm.es

1. Introducción.

Una estructura de hormigón armado se proyecta y construye con unos determinados materiales, para soportar una serie de acciones de distintas características y magnitudes, e incluso de carácter accidental, y para que llegue al final de su vida útil dentro de unas condiciones aceptables de servicio sin tener que haber realizado un desembolso importante de mantenimiento o reparaciones. Las causas de intervención o refuerzo de una estructura de hormigón armado son diversas, entre las que figuran: catástrofes naturales, errores de proyecto, calidad defectuosa de los materiales utilizados, mala ejecución, modificaciones de uso o un mantenimiento incorrecto.[5].

El elemento estructural más sensible que define la vida útil de una estructura o puente, resulta ser el pilar o columna (pieza vertical de sección transversal reducida respecto de su longitud), considerada como el elemento transmisor de tensiones y cargas básicamente verticales.

El refuerzo de pilares ha supuesto una evolución acorde con la aparición de nuevos materiales, desde recrecidos de hormigón armado, encamisados metálicos, refuerzos con angulares y presillas metálicas o últimamente el pegado de tejidos de fibra de carbono con compuestos de resina epoxídica.

Estos últimos materiales resultan ser los idóneos para el refuerzo de pilares. Sus principales ventajas son su ligereza (lo que facilita su montaje), gran capacidad resistente a tracción (10 veces superior al acero, lo cual hace imperceptible el cambio de sección transversal del pilar), la resistencia a la corrosión, y su baja fluencia. Como principales inconvenientes están su elevado precio y su vulnerabilidad al fuego. Globalmente las ventajas son superiores a los inconvenientes, lo que ha motivado la incorporación de estos materiales en el mundo de la construcción, particularmente en el refuerzo de estructuras.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento mecánico de los pilares reforzados a confinamiento con tejidos de fibra de carbono. Para ello se construyeron y ensayaron tres tipologías de pilares para cada tipo de sección, a escala, cuyo factor de reducción es 2,1 teniendo en cuenta que los extremos de los pilares están restringidos a movimientos (doble empotramiento, $kl=l/2=1,50$ m)

Para caracterizar estadísticamente de manera eficiente cada tipología de probetas se utilizaron lotes de 5 probetas, lo cual permitió ajustar la serie a una distribución normal. Por lo tanto se construyeron un total de 15 pilares de sección cuadrada y 15 pilares de sección circular.

2. Plan experimental

Para el desarrollo del plan experimental, se han utilizado los modelos reseñados en la tabla nº1

Tabla nº1. Plan experimental

TIPO DE MODELO	DIMENSIONES	REFUERZO LONGITUDINAL	REFUERZO TRANSVERSAL	REFUERZO CFRP	Nº PROBETAS
Cilíndricos	Diámetro: 12cm Longitud: 72cm	4 barras de Φ 8mm	Barras Φ 4mm c/ 7 cm	Sin	5
				Con una capa	5
				Con dos capas	5
Prismáticos	Lado: 12cm Longitud: 72cm	4 barras de Φ 8mm	Barras Φ 4mm c/ 7cm	Sin	5
				Con una capa	5
				Con dos capas	5

2.1 Materiales

Todos los materiales utilizados en la construcción de pilares fueron ensayados y caracterizados en el laboratorio de Materiales de Construcción de la EUITOP (UPM).

Se usaron barras corrugadas longitudinales de acero B-500SD y cercos o armaduras transversales de hierro dulce 140 N/mm². Se decidió usar un hormigón de características no sobresalientes, para una resistencia de proyecto de menos de 20 N/mm², con un tamaño máximo del árido de 12,5 mm.

Los materiales utilizados para el refuerzo fueron: Tejido de FC WRAP HM (MRK-M5-30) de alto módulo elástico, resina epoxi MAXEPOX-CS.

Evidentemente estos dos materiales poseen distintas propiedades mecánicas, dado que ambos de forma conjunta absorben tensiones de tracción en la camisa de refuerzo. Se han ensayado a tracción probetas de tejidos FC impregnadas en resina de un espesor de 0,89 mm. Los resultados y características de estos materiales se muestran en la tabla nº2

Tabla nº2. Materiales de refuerzo

COMPUESTO FIBRA-RESINA				
Material	FIBRA		RESINA	COMPUESTO
Modelo	D.WRAP 300	D.WRAP HM	MAXEPOX-CS	
Espesor (mm)	0,167		0,727	0,894
Resistencia a tracción (N/mm ²)	3400		29	635
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	2,3 x 10 ⁵		0,015 x 10 ⁵	0,43 x 10 ⁵
Espesor (mm)		0,163	0,727	0,890
Resistencia a tracción (N/mm ²)		2400	29	444
Módulo de elasticidad (N/mm ²)		4,4 x 10 ⁵	0,015 x 10 ⁵	0,81 x 10 ⁵



2.2 Fabricación de pilares

En la construcción de los 15 pilares probetas de sección cuadrada, se utilizaron 5 encofrados de madera especialmente diseñados de tal manera que permitieran un desencofrado fácil, para ser reutilizados. Para la fabricación de los 15 pilares de sección circular, se recurrió a la utilización de 15 tubos de saneamiento de PVC de 12 centímetros de diámetro interior y 72 centímetros de longitud, se fijó un extremo a un soporte de madera, vertiéndose el hormigón verticalmente. Para el desencofrado, simplemente se da un corte longitudinal con la radial tal como se ve en la figura nº 1 Procediéndose al curado en una cámara húmeda del laboratorio de materiales.



Figura nº1. Proceso constructivo de probetas-pilar.

2.3 Refuerzo de pilares

Reforzar una pieza estructural significa mejorar su capacidad resistente a lo largo de la vida útil de la estructura, dotar de una ductilidad a la pieza para evitar posibles accidentes, etc. Por lo tanto el punto de partida, es conocer la carga axial que provoca la rotura del pilar usando la expresión:

$$P_u = 0,85 f_{ck} A_c + f_y A_s \quad 1$$

La carga teórica de rotura del pilar probeta de sección circular es de 263 kN, y del pilar de sección cuadrada es 308 kN. Todo incremento de estas cargas axiales, se debe a la acción del refuerzo. La rotura del pilar se produce para una deformación unitaria axial en torno al 2 por mil [8]

Se reforzaron 10 pilares-probeta de sección circular, utilizando tejido FC de alto módulo de elasticidad, a lo largo de toda la longitud, 5 de ellos con una capa y los otros 5 con doble capa. Además, se reforzaron los tercios extremos con una capa adicional con el propósito de inducir la

rotura de la camisa de refuerzo en el tercio central, para medir mejor las deformaciones. El proceso de pegado del tejido FC, se realizó previa limpieza e imprimación de la superficie de hormigón. Se distribuyó una película uniforme de resina epoxídica, sobre la que se fue presionando e impregnando el tejido con un rodillo estriado, evitando en todo momento la aparición de bolsas de aire, como se puede apreciar en la figura nº 2

En el caso de los pilares de sección cuadrada, el proceso fue el mismo, pero durante el desencofrado, las aristas fueron redondeadas, para evitar la aparición de concentración de tensiones debido al efecto confinamiento en el tejido FC.



Figura nº2. Proceso de refuerzo

2.4 Ensayos a compresión axial e Instrumentación

Todos los pilares-probeta fueron equipados con dos galgas extensométricas en el tercio central. La primera en sentido longitudinal, para medir deformaciones y tensiones axiales. La segunda galga se colocó en sentido transversal para obtener deformaciones y tensiones transversales. La lectura de datos se realizó de forma continua durante todo el ensayo.



Figura nº 3. Instrumentalización de probetas

Los ensayos se efectuaron en las instalaciones de la empresa GEOCISA. Se utilizó un pórtico de ensayos, dotado de una prensa con una capacidad de 2000 kN. Inicialmente se ensayaron los 2 primeros lotes correspondientes a los pilares-probeta sin refuerzo, a continuación los 2 lotes con una capa de refuerzo y finalmente 2 lotes con dos capas de refuerzo. Los ensayos fueron de carácter destructivo hasta la rotura, con una velocidad de carga 1 mm por minuto. Previamente se dio una precarga para asegurar la verticalidad del mecanismo, tal como se puede apreciar en la figura nº 3

3. Resultados

3.1 Sección circular sin refuerzo. El resultado de los ensayos de los pilares-testigo fueron los esperados, La carga de rotura en los pilares de sección circular está en torno a 263 kN, con una deformación axial $\epsilon_u=0,002$. Para esta deformación el recubrimiento salta; el núcleo de hormigón se disgrega y la armadura longitudinal padea hacia el exterior. La tensión de rotura aproximada, se calcula sobre una sección transformada antes de la rotura, siendo el valor de esta $f_u= 18,6 \text{ N/mm}^2$ que es ligeramente superior a $f_{ck}=17,3 \text{ N/mm}^2$. Esto se debe a la velocidad de carga. La deformación transversal, fue bastante significativa: Se midió una deformación de $\epsilon_H=0,005$ en el instante de rotura del pilar, hasta una tensión axial de $f_i=2 \text{ N/mm}^2$. La deformación transversal fue imperceptible. A partir de este punto, ésta se fue incrementando de forma parabólica creciente.

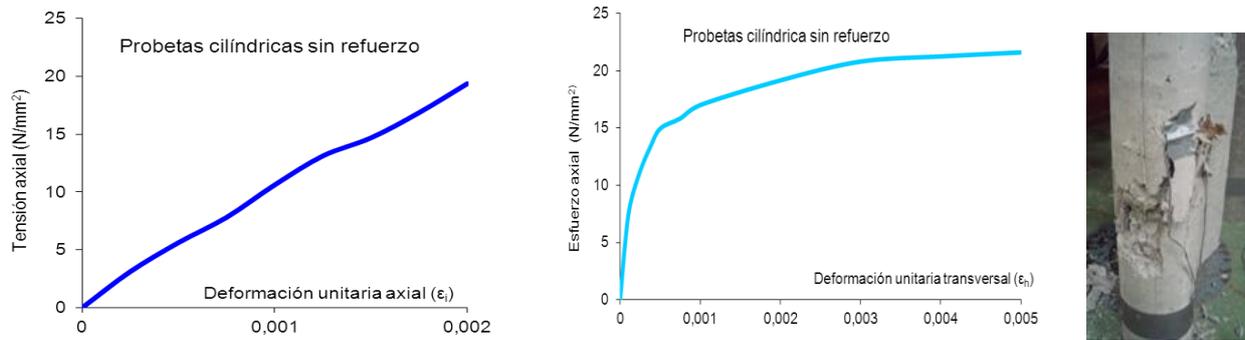


Figura nº 4. Gráficas tensión-deformación de probetas cilíndricas sin refuerzo

3.2 Sección circular con una capa de refuerzo. Con la referencia de los resultados anteriores, al realizar los ensayos de los pilares con una capa de refuerzo, destaca rápidamente el incremento de la capacidad resistente del pilar que llega a 400 kN y una deformación axial $\epsilon_u=0,005$, con lo cual la tensión media en la sección del pilar, es de $f_u=32 \text{ N/mm}^2$ muy superior a 18 N/mm^2 . Como puede apreciarse en la figura nº 5. A partir de una deformación axial de $\epsilon_i=0,002$ el acero se plastifica, deja de asumir incrementos de carga y cede todo el protagonismo al efecto confinamiento del refuerzo de FC. La deformación transversal llegó a $\epsilon_{Hu}=0,006$, valor cercano a la deformación sin refuerzo en el instante de rotura.

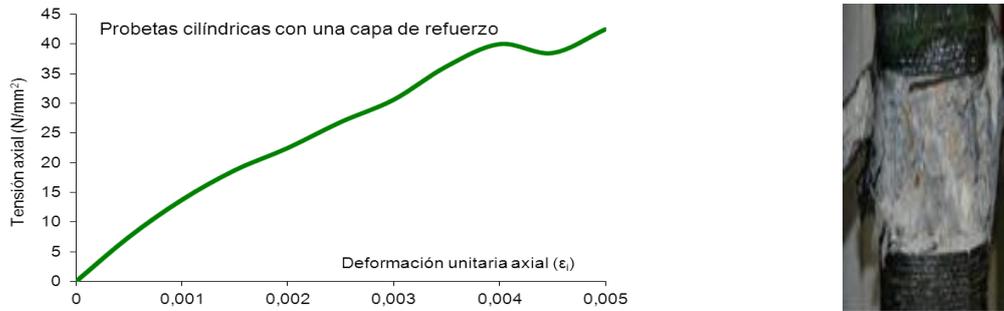


Figura nº5. Gráfica tensión-deformación probetas cilíndricas con una capa de refuerzo.

3.3 Sección circular con dos capas de refuerzo. Los pilares reforzados con doble capa de refuerzo tuvieron un comportamiento similar a los reforzados con una capa. Deformación axial $\epsilon_u=0,0055$, deformación transversal $\epsilon_{Hu}=0,006$. La capacidad resistente fue de aproximadamente de 400 kN.

3.4 Sección cuadrada sin refuerzo El comportamiento de estos pilares en los ensayos fue como se esperaba con una carga de rotura de 280 kN, deformación axial $\epsilon_u=0,002$. La deformación transversal escasamente llegó a $\epsilon_{Hu}=0,0004$, esto se debe a que la deformación transversal no es uniforme a lo largo del perímetro de la sección, como ocurre con un pilar de sección circular. Antes de la rotura el recubrimiento del tercio central se fragmentó y la armadura longitudinal se pandeó hacia el exterior. (figura nº 6)



Figura nº 6. Gráfica tensión-deformación de probetas prismáticas sin refuerzo.

3.5 Sección cuadrada con una capa de refuerzo La carga de rotura media fue de 430 kN. La evolución tensión-deformación es de tipo lineal hasta $\epsilon_i=0,0015$ a partir de la cual el incremento de tensiones se reduce de forma suave hasta la rotura, llegando a una deformación axial de $\epsilon_u=0,0044$ (figura nº 7).

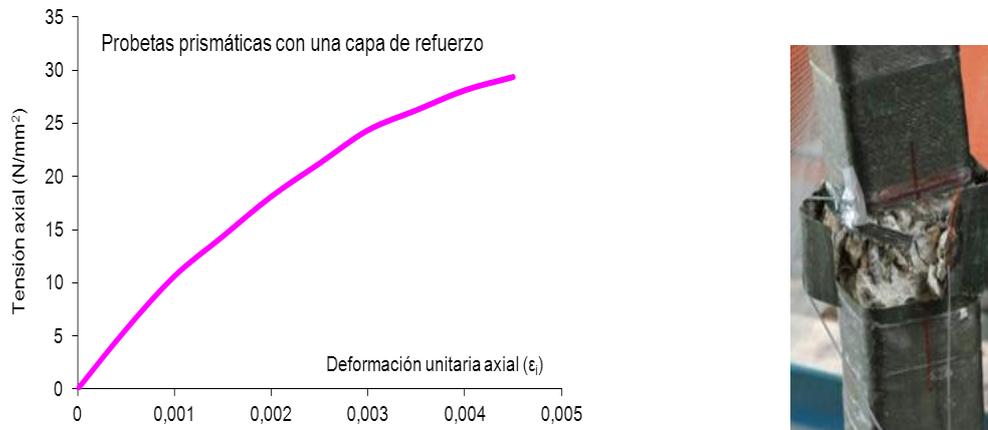


Figura nº 7. Gráfica tensión deformación de probetas prismáticas con una capa de refuerzo

3.5 Comparación con los modelos teóricos Los modelos de confinamiento con tejidos FC para hormigón de sección transversal circular encontrados en la bibliografía son varios entre los cuales existen modelos antiguos y otros recientemente publicados. Algunos de ellos son Mander J.B. et al (1988), Toutanji H. A. (1999), Spolestra M. R. y Monti G. (1999), Teng J. L. et al (2009) ó Wu y Zhou (2010)

En este trabajo se ha utilizado el modelo teórico desarrollado por C. Aire, R. Gettu, J. R. Casas y D. Marques [2]. Se trata de un proceso iterativo para determinar la curva tensión-deformación del pilar reforzado. De forma comparativa se muestra el resultado del modelo teórico y el resultado experimental obtenido.

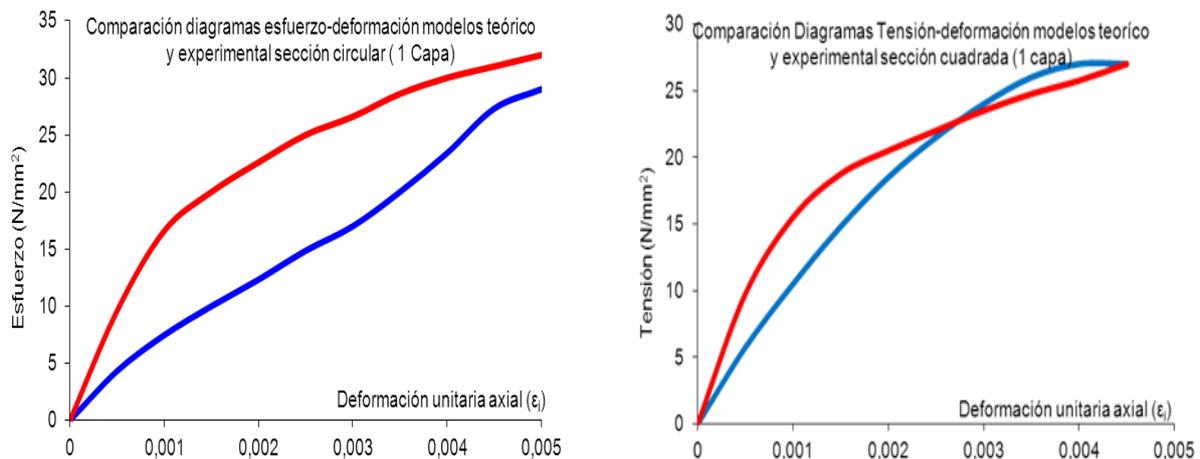


Figura nº 8. Comparación diagramas esfuerzo-deformación modelos teórico y experimental

Los modelos de confinamiento con tejidos FC para hormigón de sección transversal cuadrada son diferente del modelo circular, porque la sección de hormigón confinado es menor que en el anterior caso. Pero se puede utilizar un círculo equivalente aplicando un factor de reducción. El coeficiente utilizado es del FIB Bulletin 14[4], y adaptado por Ana de Diego [3]. Con el mismo proceso iterativo se trazó la curva tensión deformación del pilar-probeta prismático. En la figura nº 8 se muestra las dos curvas comparativas.

3. Conclusiones

Se exponen las conclusiones más importantes como consecuencia de los ensayos realizados.

Los resultados del modelo teórico y el experimental difieren especialmente en los pilares de sección circular. Esto se debe a que los modelos teóricos no tienen en cuenta la presencia de armadura longitudinal ni la velocidad de carga.

Las curvas de los modelos teóricos (línea roja) tienen un cambio de pendiente (E_i) para una deformación cercana a $\varepsilon_i=0,001$. En cambio las curvas experimentales tienen una tendencia elástica lineal, hasta un valor cercano a $\varepsilon_i=0,0035$.

La tensión de rotura de la camisa de refuerzo FC-resina es menor a la determinada en los ensayos de tracción previos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI 440.2R-08. 2008. "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures". ACI Committee 440.
2. Aire, C.; Gettu, R.; et. al. 2010. "Estudio experimental y modelo teórico del hormigón confinado lateralmente con polímeros reforzados con fibras (FRP)". Materiales de construcción. Vol. 60. UPC.
3. De Diego Villalón; A.; Arteaga Iriarte, A. 2007. "Confinamiento con FRP de pilares de hormigón armado sometidos a compresión simple". Instituto Torroja, CSIC. CEMCO XVII.
4. FIB Bulletin 14. 2001. "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures". Technical report.
5. Luizaga, A. M. 2005. *Comportamiento Mecánico de Vigas de Hormigón Reforzadas con Bandas Encoladas con Resinas Epoxídicas. Tesis Doctoral*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
6. Mander, J.B.; M.J.N. Priestley; R. Park. 1988. "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete". Journal of Structural Engineering,
7. Teng, J.G., et al. 2002. "FRP-strengthened RC structures". Ed. Baffin Lane, Chichester: John Wiley & Sons limited.
8. Winter, G; Nilson, A.H. 1977. Proyecto de estructuras de hormigón (Design of concrete structures, ed. McGraw-Hill). Ed. Reverté, Barcelona.