

REFORÇO DE COLUNAS DE CONCRETO ARMADO COM REFORÇO DE ESTRIBO DEFICIENTE COM PRFC

Viviana Rougier¹

rougierv@frcu.utn.edu.ar

Mario Escalante²

mrescalante@frcu.utn.edu.ar

Federico Gonzalez³

gonzalezf@frcu.utn.edu.ar

Miqueas Denardi⁴

denardim@frcu.utn.edu.ar

ÁREA: (PATOLOGIAS ESTRUTURAIS)

Resumo

Existem inúmeras situações em que é necessário aumentar a capacidade de carga de elementos submetidos a compressão, como colunas e pilares de pontes. Essas situações podem incluir mudanças de uso e aumento de carga, deficiências no preenchimento dos moldes, erros de projeto e todos os casos nos quais às estruturas foram danificadas (terremoto, impactos, cargas explosivas). O reforço externo de colunas de concreto armado com polímeros reforçados com fibras (PRF) é uma solução que deu bons resultados, conseguindo melhorias na ductilidade e resistência máxima de colunas com diferentes danos. Neste trabalho, avalia-se experimentalmente, a eficiência do reforço externo com bandas de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC), na melhoria da resistência e ductilidade de colunas de concreto armado, de seção quadrada, com reforço de estribo deficiente. Avalia-se a resposta tensão-deformação axial e os modos de falha de colunas com duas separações diferentes de estribos. Os níveis de resistência e ductilidade alcançados pelos elementos reforçados sugerem que o reforço externo PRF melhora o comportamento quando há deficiências no reforço convencional de estribos de aço. A comparação entre valores experimentais de resistência máxima e estimativas realizadas a partir de modelos empíricos de outros autores mostra resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Colunas de concreto armado

Confinamento

PRFC

¹ Dr. Ingeniero, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional C. del Uruguay, Facultad Regional Concordia, Grupo de Investigación de Mecánica Computacional y de Estructuras (GIMCE)

² Dr. Ingeniero, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional C. del Uruguay, GIMCE

³ Ingeniero Civil, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional C. del Uruguay, GIMCE

⁴ Ingeniero Civil, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional C. del Uruguay, Fac. Reg.

Concordia, GIMCE

REFUERZO DE COLUMNAS DE H° A° CON ARMADURA DE ESTRIBOS DEFICIENTE UTILIZANDO PRFC

Viviana Rougier¹
rougierv@frcu.utn.edu.ar

Mario Escalante²
mrescalante@frcu.utn.edu.ar

Federico Gonzalez³
gonzalezf@frcu.utn.edu.ar

Miqueas Denardi⁴
denardim@frcu.utn.edu.ar

AREA: (PATOLOGIAS ESTRUCTURALES)

Resumen

Existen numerosas situaciones en las que es necesario incrementar la capacidad portante de elementos sometidos a sollicitaciones de compresión, como columnas y pilas de puentes. Dichas situaciones pueden comprender cambios de uso y aumentos de carga, deficiencias de llenado en moldes, errores de proyecto y todos aquellos casos en que las estructuras han resultado dañadas (sismos, impactos, cargas explosivas). El refuerzo externo de columnas de hormigón armado con polímeros reforzados con fibras (PRF) es una solución que ha dado muy buenos resultados, lográndose mejoras en la ductilidad y resistencia última de columnas con diferentes tipos de daño. En este trabajo se evalúa experimentalmente la eficiencia del refuerzo externo con bandas de polímeros reforzados con fibras de carbono (PRFC) en la mejora de resistencia y ductilidad de columnas de hormigón armado, de sección cuadrada, con armadura de estribos deficiente. Se analiza la respuesta tensión-deformación axial y modos de falla de columnas con dos separaciones de estribos. Los niveles de resistencia y ductilidad alcanzados por los elementos reforzados sugieren que el refuerzo externo de PRF, mejora el comportamiento cuando existen deficiencias en el refuerzo convencional de estribos de acero. La comparación entre valores experimentales de resistencia máxima a compresión y estimaciones realizadas a partir de modelos empíricos de otros autores, muestra resultados satisfactorios.

Palabras clave: Columnas de hormigón armado
Confinamiento
PRFC

Introducción

Los elementos sometidos a solicitaciones preponderantes de compresión, como columnas de hormigón armado y pilas de puentes, resultan de fundamental importancia para la seguridad de una estructura. Muchas veces, con el objetivo de lograr incrementos de la capacidad de carga de columnas, motivados ya sea por cambios en el destino de la estructura, errores de proyecto, armadura transversal mínima o debido al daño producido en las mismas por cargas excepcionales, se requiere mejorar la resistencia a flexión, la resistencia a corte, la capacidad de resistir cargas axiales o varias de ellas simultáneamente.

Entre los diversos métodos empleados para el refuerzo de elementos comprimidos, el confinamiento lateral con encamisados de polímeros reforzados con fibras (PRF), ha demostrado ser muy eficiente por cuanto incrementa la resistencia y ductilidad de las columnas. Los FRP poseen ciertas características especiales y sus cualidades resultan totalmente diferentes a aquellas de los materiales isótropos normalmente utilizados con fines estructurales. Presentan una elevada relación resistencia-peso y rigidez-peso, son resistentes a la corrosión y su bajo peso y flexibilidad facilitan el transporte y la colocación. A todo ello se debe agregar que, como consecuencia de su anisotropía, la respuesta estructural puede ser fácilmente optimizada. Dicho refuerzo generalmente se hace envolviendo el elemento estructural con capas de compuesto y adhiriéndolas mediante un sistema epoxy como se ilustra en la **Figura 1a**. Se puede reforzar la columna en toda su longitud con una o varias capas de PRF, o bien reforzarla parcialmente mediante bandas dispuestas en espiral o en forma anular (**Figura 1b**) (Teng *et al.*, 2002) (1). La primera aplicación de esta tecnología se realizó en Japón en chimeneas de hormigón (1987) y luego la técnica se extendió al refuerzo de columnas de hormigón (M. Mirmiran *et al.*, 2000) (2). Desde entonces, el método ha sido estudiado experimentalmente utilizando una gran variedad de fibras (carbono, vidrio, aramida) y diversidad de técnicas de fabricación (placas prefabricadas, placas petensadas, tejidos uni y bidireccionales, barras) (Rousakis *et al.*, 2007 (3), Al-Salloum, 2007 (4), Wei *et al.*, 2009 (5), Rousakis y Karabinis, 2012 (6), Mostofinejad y Iliá, 2014 (7), Guo *et al.*, 2016 (8)). Por otro lado, se ha demostrado que la efectividad del refuerzo con FRP depende de la forma de la columna y la rigidez del PRF. Las secciones rectangulares y cuadradas experimentan un incremento menor en resistencia y ductilidad que las secciones circulares. Ello se debe a que en secciones circulares la distribución de la presión lateral de confinamiento es uniforme, contrariamente a lo que ocurre en secciones cuadradas y rectangulares, donde dicha presión varía de un máximo en las esquinas a un mínimo entre ellas (**Figura 2**) (Maalej *et al.*, 2003) (9).

El objetivo de este trabajo es estudiar la eficiencia de refuerzo parcial de columnas de sección cuadrada con armadura de estribos deficiente, utilizando bandas de polímeros reforzados con fibras de carbono (PRFC) de alto modulo y alta resistencia.

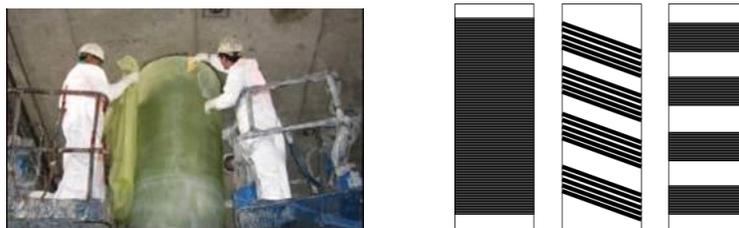


Figura 1: Técnica y diferentes esquemas de refuerzo con FRP (Teng *et al.*, 2002)

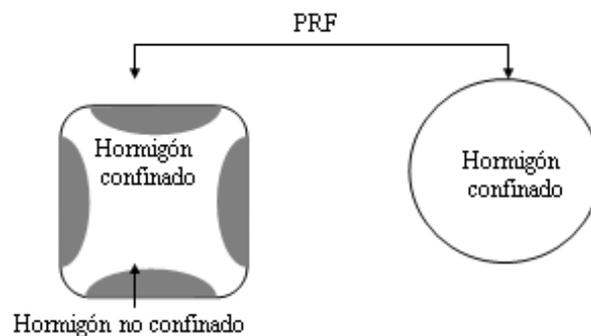


Figura 2: Efectividad del confinamiento con PRF: columnas de sección cuadrada y columnas de sección circular (Al-Salloum, 2007)

Programa experimental

El programa experimental que se presenta en este trabajo forma parte de un proyecto de investigación en desarrollo. Uno de los objetivos del mismo es evaluar la eficiencia del sistema de refuerzo y/o reparación de columnas de sección cuadrada y circular con armadura de estribos deficiente, sometidas a compresión uniaxial, utilizando bandas de PRFC. Con tal fin, se construyeron en una primera etapa, 10 columnas de hormigón armado de sección cuadrada. Cuatro especímenes se diseñaron siguiendo los lineamientos del CIRSOC 201-05 (10) en cuanto a separación máxima de estribos verticales, mientras que los otros seis fueron construidos con dos separaciones diferentes de estribos, mayores que la separación máxima establecida por dicho reglamento. A los efectos de subsanar la deficiencia de armadura transversal, cuatro columnas fueron reforzadas con bandas de PRFC, dispuestas en forma anular, mediante el proceso denominado húmedo. Las cuatro columnas restantes se tomaron como especímenes de referencia o control. Todos los especímenes se ensayaron a compresión uniaxial hasta la rotura.

En la Tabla 1 se presentan los detalles del programa experimental. Luego se describen los especímenes ensayados, propiedades de los materiales y procedimiento de ensayo e instrumentación.

Tabla 1: Detalle de los especímenes ensayados con su denominación y características

Denominación	Características	Armadura Longitudinal	Armadura de estribos	Separación de estribos (mm)	Refuerzo
C110	Referencia	4 ϕ 10	ϕ 4.2	100	-
C210	Referencia			100	-
C120	Referencia			200	-
C220	Referencia			200	-
C1R20	Reforzada			200	Tejido de fibra de carbono y resina epoxi
C2R20	Reforzada			200	Tejido de fibra de carbono y resina epoxi
C130	Referencia			300	-
C230	Referencia			300	-
C1R30	Reforzada			300	Tejido de fibra de carbono y resina epoxi
C2R30	Reforzada			300	Tejido de fibra de carbono y resina epoxi

Especímenes ensayados

Todas las columnas se diseñaron con la misma sección transversal: 150 mm x 150 mm, y 900 mm de longitud total y la misma sección de armadura longitudinal: cuatro barras ϕ de 10 mm. Para la armadura transversal, se adoptaron barras ϕ de 4.2 mm y tres separaciones verticales de estribos, 100 mm, 200 mm y 300 mm. La separación máxima establecida por el reglamento CIRSOC 201-05 (10) resulto, para este caso, de 120 mm. En la **Figura 3** se muestran las dimensiones y detalle de armado de los diferentes especímenes.

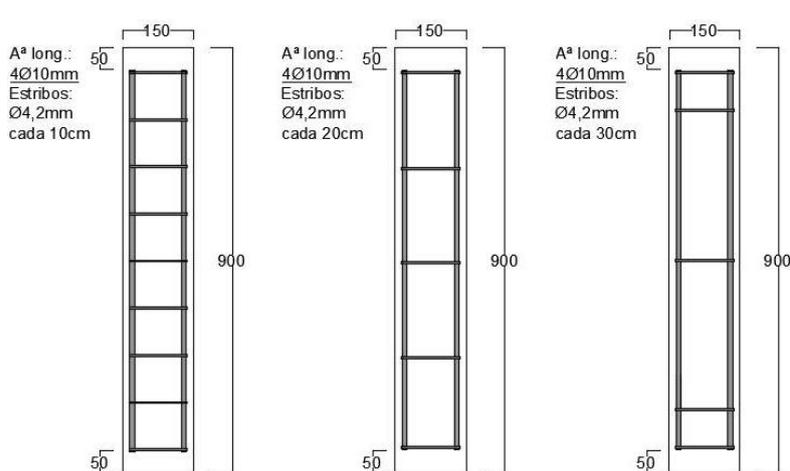


Figura 3: Detalle de armaduras longitudinal y transversal de columnas

Materiales

A continuación, se describen las características y propiedades mecánicas de los materiales usados en la fabricación y refuerzo de las columnas objeto de estudio.

Hormigón

En la ejecución de las columnas se utilizó hormigón de resistencia media a compresión a los 28 días de 21.30 MPa y un módulo elástico promedio, de 25.91 GPa. Se trabajó con agregados de la zona y cemento Portland normal.

La resistencia a compresión y el módulo elástico se determinaron mediante ensayos de compresión uniaxial sobre probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm, según normas IRAM 1534 (11) y 1865 (12), respectivamente.

Acero y FRP

Para la armadura longitudinal de las columnas se empleó acero de Dureza Natural Acindar denominado comercialmente DN A-420. Para los estribos se usó acero de diámetro nominal 4.2 mm.

El refuerzo de las columnas se realizó con tejido unidireccional de fibra de carbono de 1 mm de espesor, de alto módulo y alta resistencia, saturado con resina epoxi, preparado in situ mediante el proceso denominado húmedo. En la Tabla 2 se muestran las características mecánicas de la lámina curada y de la fibra de carbono, proporcionadas por el fabricante.

Tabla 2: Propiedades del PRFC (lamina curada) y de las fibras de carbono

Propiedades	Lamina curada	Fibra
Módulo de Elasticidad E (MPa)	73100	-
Resistencia a tracción, σ_t (MPa)	960	3450
Alargamiento a la rotura (%)	1.33	1.5
Espesor (mm)	1	-
Peso por m ² (gr)	610	-

Preparación de especímenes y técnicas de refuerzo

La técnica de refuerzo se realizó envolviendo la superficie de las columnas en las zonas con deficiencia de armadura de estribos, previamente imprimadas con resina epoxi, con bandas de 50 mm de tejido unidireccional de fibra de carbono embebido en resina epoxi. En todos los casos se aseguró un solape de 20 cm para evitar el despegue prematuro del laminado. Antes de la colocación del material de refuerzo, las superficies de los especímenes fueron cuidadosamente pulidas con cepillo de cerdas de acero a los efectos de eliminar polvo y cualquier imperfección superficial. Finalmente, y para dejarlos perfectamente limpios, se aplicó aire con un compresor. Se colocaron tres capas de refuerzo de 1 mm de espesor con las fibras orientadas en la dirección circunferencial. En la **Figura 4** se muestra un dibujo detallado de la ubicación y dimensiones de las bandas de PRFC para dos columnas con separación de estribos verticales de 200 mm y 300 mm. De este modo se cumplió con las disposiciones del Reglamento CIRSOC 201-05 (10) que exige para este caso, una separación mínima de 120 mm.

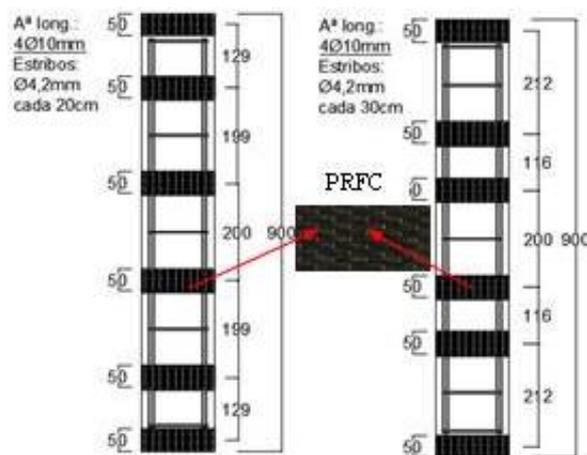


Figura 4: Refuerzo con tejido de PRFC: ubicación y dimensiones de las bandas

Esquema de ensayo e instrumentación

Todos los ensayos realizados consistieron en la aplicación de cargas de compresión uniaxial, cuasi-estáticas monótonas crecientes, con control de desplazamientos a una velocidad de 1mm/min. Se midieron cargas y desplazamientos axiales a partir de los cuales se construyeron luego diagramas tensión-deformación. La carga fue aplicada usando una prensa Shimatzu con sistema hidráulico con posibilidad de desarrollar una carga vertical nominal máxima de 1000 kN. Para medir el desplazamiento axial promedio de las

columnas, se colocaron dos comparadores digitales en dos lados opuestos de las mismas a los efectos de eliminar de las lecturas posibles rotaciones y se utilizaron relojes comparadores digitales con una sensibilidad de 0.001mm. En la **Figura 5** se presenta el esquema de ensayo e instrumentación utilizado.

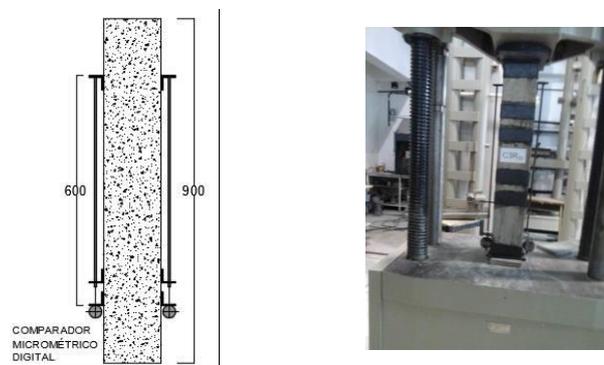


Figura 5: Ensayo de compresión uniaxial. Esquema de ensayo e instrumentación

Resultados experimentales

A continuación, se presentan los resultados obtenidos experimentalmente. Se analizan modos de falla y cargas últimas, y respuesta tensión deformación.

Modos de fallas y cargas últimas

En la Tabla 3 se presentan los valores de carga máxima ($P_{m\acute{a}x.}$), tensión máxima ($\sigma_{m\acute{a}x.}$) y deformación axial correspondiente a la tensión máxima ($\epsilon_{Pm\acute{a}x.}$), alcanzados en el ensayo de compresión uniaxial por los especímenes de hormigón armado sin refuerzo y reforzados con PRFC. También se muestra el incremento en resistencia a compresión uniaxial de las columnas reforzadas con PRFC, el cual se define como la relación entre la resistencia máxima alcanzada por dichas columnas y la correspondiente a los especímenes de referencia. Se puede ver un incremento en resistencia y deformación axial de las columnas reforzadas con respecto aquellas sin refuerzo, para las dos separaciones de estribos (200 y 300 mm). Dicho incremento es de 89 % y 100 % para los especímenes C1R20 y C2R20 (separación de estribos de 200 mm) y de 32 y 22 % para C1R30 y C2R30 (separación de estribos de 300 mm).

Tabla 3: Resultados experimentales

Especímen	$P_{max.}$ (kN)	$\sigma_{max.}$ (MPa)	$\epsilon_{Pm\acute{a}x.}$	Incremento en resistencia (%)
C110	320.00	14.22	0.00126	-
C210	350.00	15.55	0.00128	-
Resistencia a compresión promedio (C110-C210)= 14.89 MPa				
C120	244.00	10.84	0.002	-
C220*	261.36	11.61	-	-
Resistencia a compresión promedio (C120-C220)= 11.23 MPa				
C1R20	478.71	21.27	0.00371	89
C2R20	505.79	22.48	0.00521	100
Resistencia a compresión promedio (C1R20-C2R20) = 21.88 MPa				

Espécimen	P _{max.} (kN)	σ _{max.} (MPa)	ε _{Pmáx.}	Incremento en resistencia (%)
C130	367.82	16.35	0.00057	-
C230	371.80	16.52	0.00068	-
Resistencia a compresión promedio (C130-C230) = 16.44 MPa				
C1R30	487.10	21.65	0.00278	32
C2R30	451.05	20.05	0.00370	22
Resistencia a compresión promedio (C1R30-C2R30) = 20.85 MPa				

* Problemas con el sistema de medición de desplazamientos impidieron registrar los mismos hasta el final del ensayo.

Todas las columnas de referencia (sin refuerzo externo de PRFC), independientemente de la separación de estribos, fallaron por aplastamiento del hormigón en la zona de apoyos, con desarrollo de fisura longitudinal en algunos casos (**Figura 6 a**). Con respecto a las columnas reforzadas, se observó un único tipo de falla: rotura del hormigón entre bandas de PRFC (**Figura 6b**). No se produjo despegue ni rotura del laminado de PRFC.

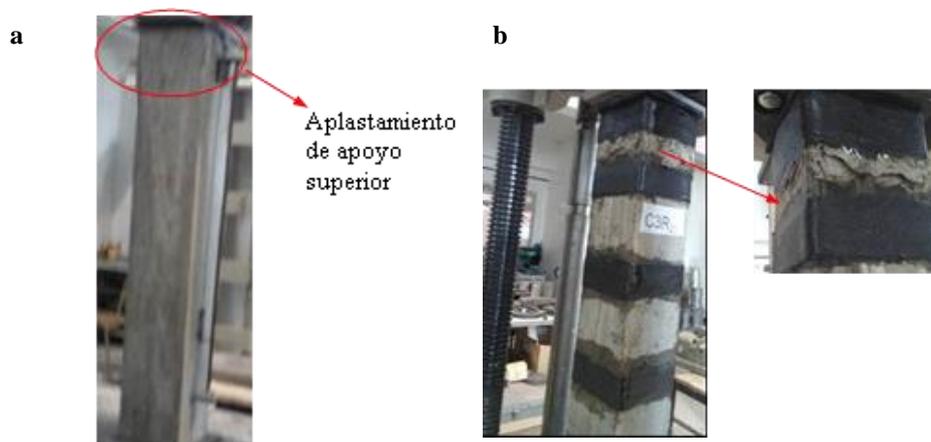


Figura 6: Modos de falla: a) de columna de referencia; b) columna reforzada con PRFC

Respuesta tensión-deformación

En la **Figura 7** se reproduce el diagrama tensión-deformación axial (σ - ϵ) de columnas sin refuerzo y columnas reforzadas con PRFC, para las dos separaciones de estribos analizadas. Se puede ver un incremento significativo de la resistencia última y de la capacidad de deformación de los especímenes reforzados. También se observa que las curvas de las columnas reforzadas son bilineales. En los primeros pasos de carga la pendiente de la curva carga-desplazamiento de las columnas reforzadas es prácticamente la misma que aquella de las columnas sin refuerzo. La segunda parte de dichas curvas es afectada por las bandas de PRFC y muestra un comportamiento con ablandamiento. Ello se debe a que la concentración de tensiones en las esquinas de los especímenes reforzados produce una distribución no uniforme de la presión de confinamiento y como consecuencia se reduce la eficiencia de las bandas de PRFC.

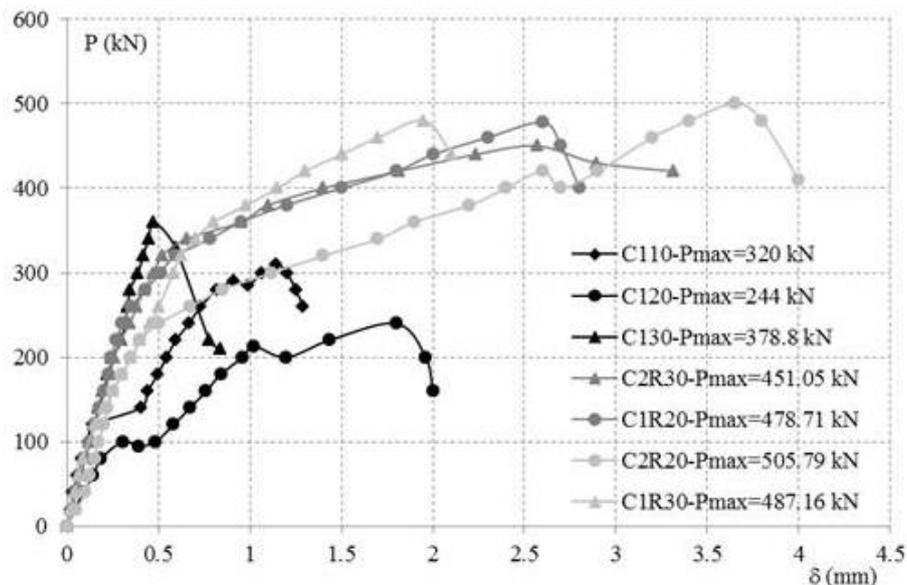


Figura 7: Curvas tensión-deformación axial (σ - ϵ)

Correlación entre resultados experimentales y teóricos

A continuación, en la Tabla 5 se presentan los valores de resistencia a compresión de las columnas reforzadas (hormigón confinado: f'_{cc}), utilizando el modelo de Saadatmanesh et al. 1994 (13) y también la capacidad de carga axial computada según la norma 440.2R-08 (14). Dicha norma considera confinamiento total, es decir en toda la longitud de la columna, razón por la cual se calcula la resistencia a compresión del hormigón confinado utilizando el modelo propuesto por Saadatmanesh et al. 1994 (13), que además tiene cuenta el caso de secciones de columna no circulares.

Tabla 5: Comparación de resultados

Especímen	f'_{cc} Exp. (MPa)	Pu Exp. (kN)	f'_{cc} Saadatmanesh et al. 1994 (MPa)	Pu ACI 440.2R-08- (kN)	Diferencia (PuExp/PuACI) (%)
Promedio (C1R20-C2R20)	21.88	492.25	22.39	288.22	71
Promedio (C1R30-C2R30)	20.85	469.08			63

Conclusiones

Del análisis y la comparación de los resultados se puede concluir lo siguiente:

El confinamiento lateral parcial, utilizando bandas PRFC, ha demostrado ser muy eficiente en columnas de sección cuadrada con deficiencia de armadura transversal. Se lograron incrementos significativos en la resistencia última y ductilidad.

La falla de las columnas reforzadas se produjo entre bandas de refuerzo, por rotura del hormigón. Los especímenes conservaron el monolitismo y no se produjo despegue ni rotura del PRFC.

La resistencia a compresión axial del hormigón confinado obtenido a partir del modelo de Saadatmanesh et al. 1994 (13) ajusta razonablemente los valores experimentales, con diferencias del 3% para las columnas reforzadas con separación de estribos de 200 mm y



del 7% para los especímenes con separación de 300 mm. Por otro lado, el valor de carga última calculado con la fórmula de la norma ACI es significativamente menor que los obtenidos experimentalmente para las columnas reforzadas.

Agradecimientos

Los autores del presente trabajo agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional por el apoyo económico brindado, al Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay y en particular al Ingeniero Ricardo Gómez.

Bibliografía

- (1) TENG, J.; CHEN, J.; SMITH, S.; LAM, L. *FRP strengthened RC structures*. UK, John Wiley & Sons, 2002.
- (2) MIRMIRAN, A.; ZAGERS, K.; YUAN, W. *Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber composites*. Finite Elements in Analysis and Design 35, 2000, pp.79-96.
- (3) ROUSAKIS, T.; KARABINIS, A.; KIOUSIS, P. *FRP-confined concrete members: Axial compression experiments and plasticity modeling*. Engineering Structures 29, 2007, pp. 1343-1353.
- (4) AL-SALLOUM, Y. *Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composites laminates*. Composites: Part B 38, 2007, pp. 640-650.
- (5) WEI, H.; Wu, Z.; Guo. X.; Yi, F. *Experimental study on partially deteriorated strength concrete columns confined with CFRP*. Engineering Structures 31, 2009, pp. 2495-2505.
- (6) ROUSAKIS, T.; KARABINIS, A. *Adequately FRP confined reinforced concrete columns under axial compressive monotonic or cyclic loading*. Materials and Structures 45, 2012, pp. 957-975.
- (7) MOSTOFINEJAD, D.; ILIA, E. *Confining of square RC columns with FRP sheets using corner strip-batten technique*. Construction and Building Materials 70, 2014, pp. 269-278.
- (8) GUO, A.; XIE, J.; XIE, B.; ZHONG, J. *Experimental study on compressive behavior of damaged normaland high-strength concrete confined with CFRP laminates*. Construction and Building Materials 107, 2016, pp. 411-425.
- (9) MAALEJ, S.; TANWONGSVAL, P.; PARAMASIVAM, P. *Modelling of rectangular RC columns strengthened with FRP*. Cement & Concrete Composites 25, 2003, pp. 263-276.
- (10) CIRSOC 201-2005. *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, Argentina, 2005.
- (11) IRAM 1534. *Hormigón de cemento Portland. Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorio*. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, 1985.
- (12) IRAM 1865. *Hormigón de cemento. Métodos de ensayo para la determinación del módulo elástico y la relación de Poisson de probetas y testigos cilíndricos de hormigón sometidos a esfuerzos de compresión axial*. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, 2009.
- (13) SAADATMANESH, H.; ESHANI, M.; LI, M. *Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps*. ACI Structural Journal 91, 1994, pp. 434-447.
- (14) ACI 440.2R-08. *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. ACI Committee 440, USA, 2008.