



Estudio Experimental de Probetas de Hormigón Confinadas con Materiales Compuestos

Paul H. Kohan^a, Rita F. Rango^a, Viviana C. Rougier^b

^a Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ingeniería
Av. Bolivia 5150 (4400), Salta, Tel: 0387 4255380

^b Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay

Ingeniero Pereira 676 (3260), Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Tel/fax: 03442 425541, Email: rougierv@frcu.utn.edu.ar

Resumen – Existen numerosas situaciones en las que es necesario mejorar la capacidad portante de elementos sometidos a sollicitaciones de compresión, como columnas y pilas de puentes. El refuerzo externo con polímeros reforzados con fibras (PRF) surgió como una solución que ha dado muy buenos resultados y cuya aplicación se ha incrementado en los últimos años.

En este trabajo se evalúa experimentalmente el comportamiento de probetas cilíndricas de hormigón simple y hormigón armado confinadas externamente con PRF y sometidas a carga axial. Se analiza la respuesta tensión-deformación axial y modos de falla, para ambos tipos de especímenes, hormigón simple y armado. En ambos casos el refuerzo externo de PRF incrementa la resistencia y confiere ductilidad a las probetas, confinando al hormigón y conteniéndolo luego de su falla. Se presentan también comparaciones entre valores experimentales de resistencia máxima a compresión y estimaciones realizadas a partir de modelos empíricos de diferentes autores.

Palabras clave: PRF, Hormigón, Compresión Uniaxial, Confinamiento

Experimental Study of Concrete Cylinders Confined by Composite Materials

Abstract – There are a number of situations where it may become necessary to enhance the load-carrying capacity of elements subjected to compression loads like columns and bridge piles. External reinforcement with fiber reinforced polymers (FRP) appeared with very good results and its use has increased in the last years.

The behaviour of simple and reinforced concrete cylinders confined with FRP and subjected to axial load is assessed experimentally in this paper. Axial stress and strain diagram and failure modes for both kind of specimens, simple and reinforced concrete are analyzed. In both cases FRP external reinforcement increases cylinders resistance and induces ductility, confining and containing the concrete after its failure. Comparisons between experimental maximum compression strength values and predictions using empirical models by different authors are also presented.

Key words: FRP, Concrete, Cylinders, Uniaxial Compression, Confinement

INTRODUCCIÓN

La aplicación de polímeros reforzados con fibras (PRF) como refuerzo externo de elementos comprimidos de hormigón armado ha resultado ser una solución muy eficiente, razón por la cual su uso se ha incrementado en las últimas décadas. Esta tendencia se debe al hecho de que estos materiales 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 en obra. Además, debido a su anisotropía, se puede optimizar fácilmente la respuesta estructural. De este modo, la adhesión de láminas de PRF a la superficie de una columna con las fibras orientadas en la dirección axial mejora la resistencia a flexión de la misma. La colocación de láminas de FRP en la dirección circunferencial, que debería hacerse juntamente con la axial, incrementa la capacidad de deformación del hormigón y, por ende, mejora significativamente la eficiencia del refuerzo, como así también la resistencia al pandeo de las fibras axiales (Arya et al., 2002).

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, (Mirmiran et al., 2000). Desde entonces, el método ha sido estudiado experimentalmente utilizando una gran variedad de fibras y diversidad de técnicas de

fabricación. Ye et al (2003) estudiaron el comportamiento sísmico de columnas prismáticas de hormigón armado confinadas externamente con bandas de polímeros reforzados con fibras de carbono (PRFC). Algunas probetas, fueron cargadas hasta alcanzarse la fluencia de las armaduras de acero y luego reparadas con PRFC y ensayadas a rotura. Otras en cambio fueron reforzadas y luego ensayadas, para reproducir el refuerzo bajo condiciones de servicio. Basados en los resultados experimentales, sugirieron un factor de confinamiento con PRFC y un Índice de refuerzo transversal equivalente. Tastani y Pantazopoulou (2004) evaluaron el comportamiento estructural de columnas prismáticas de hormigón armado dañadas por un proceso acelerado de corrosión electroquímica y reparadas externamente con PRFC y polímeros reforzados con fibra de vidrio (PRFV). Las probetas se ensayaron a rotura bajo compresión uniaxial; algunos especímenes fueron sometidos a ciclos repetidos de corrosión y luego ensayados. Observaron, en todos los casos, un aumento significativo de la resistencia y ductilidad de los especímenes reparados. En aquellas probetas reparadas con PRF y luego sometidas a ciclos repetidos de corrosión se registró una importante disminución de dicho proceso. Lin y Liao (2004) realizaron ensayos de compresión uniaxial sobre probetas cilíndricas de hormigón simple y hormigón armado reforzadas externamente con una y dos capas de PRFV. Comprobaron que al aumentar el número de capas, la efectividad del refuerzo mejora, si bien ello depende también de la calidad del material compuesto. Finalmente y a partir de la observación de los resultados experimentales formularon un modelo teórico simple para predecir la resistencia a compresión de columnas de hormigón confinadas con PRF. Li (2006) preparó probetas cilíndricas de hormigón simple confinadas externamente con dos tipos de PRF: tejido unidireccional y resina viniléster según distintos espesores y orientaciones de las fibras y tubos prefabricados de dos espesores. De los resultados experimentales obtenidos encontró que para lograr un confinamiento efectivo el hormigón debe estar dañado o tener una gran deformación axial y que la mayoría de los modelos teóricos existentes sobrestiman la eficiencia del confinamiento, existiendo una gran desviación entre la predicción obtenida aplicando dichos modelos y los resultados de los ensayos. Rousakis et al (2007), estudiaron la mejora en resistencia y ductilidad de especímenes de sección cuadrada confinados con PRFV y PRFC, sometidos a carga axial monótona creciente y carga axial cíclica. Los resultados indicaron que estas secciones, debidamente confinadas pueden alcanzar altos niveles de resistencia y ductilidad. Además desarrollaron un modelo de plasticidad capaz reproducir la respuesta tensión-deformación de columnas prismáticas cargadas axialmente y confinadas con tubos y láminas de PRF.

Teniendo en cuenta la importancia de contar con valores experimentales, el presente trabajo describe ensayos de compresión uniaxial, realizados sobre probetas cilíndricas de hormigón simple y hormigón armado, confinadas externamente con PRFC y sin confinamiento, de manera de comparar los resultados obtenidos y analizar los modos de falla. También se presenta un estudio comparativo entre los resultados experimentales, los obtenidos por la norma ACI 440.2R-02 y los estimados por tres modelos empíricos existentes en la literatura, (Lin y Liao, 2004).

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Especímenes y materiales

Se prepararon seis probetas cilíndricas de hormigón simple y hormigón armado de 150 mm x 300 mm según norma IRAM 1534. Algunas de dichas probetas fueron confinadas externamente con una capa de PRF. Las características y denominaciones de los especímenes se resumen en la Tabla 1. Para la elaboración del hormigón se utilizaron agregados de la zona y cemento portland normal. La dosificación se hizo en función de obtener una resistencia característica a compresión uniaxial a los 14 días de 13 MPa. Para ello se utilizó un acelerante de fragüe sin cloruros para morteros y hormigones.

En el caso de los especímenes reforzados externamente se utilizó como material de confinamiento un tejido unidireccional de fibra de carbono Sika Wrap Hex 103 C de alto módulo y alta resistencia saturado en obra con el sistema epoxídico Sikadur Hex 300. Las propiedades de la lámina curada se determinaron de acuerdo a las especificaciones suministradas por el fabricante y se detallan en la Tabla 2.

En todos los casos las probetas fueron ensayadas a compresión uniaxial según norma IRAM 1546, a los 14 días de ser coladas.

| Probeta | Características | A _s | A _{st} | Refuerzo |
|---------|------------------------------|----------------|-----------------|---|
| PNA1 | H° Simple | - | - | - |
| PNA2 | H° Simple | - | - | - |
| PA1 | H° A° | 4 φ 6 | 3 φ 4.2 | - |
| PA2 | H° A° | 4 φ 6 | 3 φ 4.2 | - |
| PNAR | H° Simple confinado con PRFC | - | - | Tejido de fibra de carbono y resina epoxi |
| PAR | H° A° confinado con PRFC | 4 φ 6 | 3 φ 4.2 | Tejido de fibra de carbono y resina epoxi |

A_s: Armadura Longitudinal, A_{st}: Armadura Transversal

Tabla 1 - Características y denominaciones de las probetas ensayadas

| | |
|--|-------|
| Módulo de Elasticidad E (MPa) | 73100 |
| Resistencia a tracción, σ _t (MPa) | 960 |
| Coefficiente de Poisson, ν | 0.2 |
| Alargamiento a la rotura (%) | 1.33 |
| Espesor (mm) | 1 |

Tabla 2 - Propiedades mecánicas del PRFC

Proceso de aplicación del refuerzo de PRFC

La técnica de refuerzo y/o reparación se realizó envolviendo la superficie de las probetas previamente imprimadas con resina, con el tejido de fibra de carbono embebido en resina epoxi, siguiendo el proceso denominado húmedo y asegurando un solape de 7 cm (Fig. 1). 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 colocó una sola capa de refuerzo de 1 mm de espesor con las fibras orientadas en la dirección circunferencial.

Equipo de carga utilizado en los ensayos, instrumentación y adquisición de datos

La Fig. 2 muestra el montaje utilizado en los ensayos. La carga fue aplicada usando una prensa manual con una capacidad máxima de 60 tn, provista de un flexímetro para medir fuerzas. Para la medición de los desplazamientos verticales se utilizó un reloj comparador (flexímetro) con una sensibilidad de 0.001mm ubicado sobre la probeta a través de un soporte sujeto a 7.5 cm de los extremos de la misma.



Fig. 1 - Aplicación del compuesto



Fig. 2 - Montaje usado en los ensayos

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Todos los ensayos realizados consistieron en la aplicación de cargas de compresión uniaxial, cuasiestáticas monótonas crecientes. Se midieron cargas y desplazamientos axiales a partir de los cuales se construyeron luego diagramas tensión-deformación. En todos los ensayos, por razones de seguridad y para proteger el instrumental de medición, el mismo fue retirado al observarse en las probetas los primeros indicios de rotura. Por este motivo en los gráficos tensión-deformación no se representa el comportamiento posterior a la resistencia máxima.

Especímenes de hormigón simple (PNA1, PNA2 y PNAR).

El modo de falla observado en las probetas PNA1 y PNA2 fue el típico de ensayos de compresión uniaxial, formación de grietas paralelas a la dirección de aplicación de la carga, como se muestra en la Figura 3. La resistencia del hormigón obtenida de estos ensayos fue de 16.24 y 11.68 MPa que corresponden a cargas de falla de 287 y 206.42 kN respectivamente.



Fig. 3 - Probeta de hormigón simple. Modo de falla

En el caso de la probeta PNAR, reforzada con una capa de PRFC, se observó una falla repentina al cortarse un conjunto de fibras del refuerzo. Esta falla fue precedida por ruidos asociados al despegue del refuerzo que se inició en la zona de solape del mismo y continuó a lo largo de la interfaz hormigón-PRF. Como se muestra en la Figura 4 una capa fina de hormigón quedó adherida al PRF. Ello indica que la adherencia entre uno y otro material fue satisfactoria. No hubo desintegración del hormigón en la zona de rotura y la probeta permaneció íntegra hasta el final del ensayo. En la Figura 5 se representan las curvas tensión-deformación axial (σ - ϵ) del hormigón sin confinar y del hormigón confinado con PRFC. Esta última refleja una significativa mejora de la resistencia y ganancia en ductilidad del hormigón, aún con una sola capa de refuerzo, y está formada por tres regiones diferentes. En la primera, el comportamiento es similar al del hormigón sin confinar, es decir, la expansión lateral del núcleo de hormigón es insignificante.

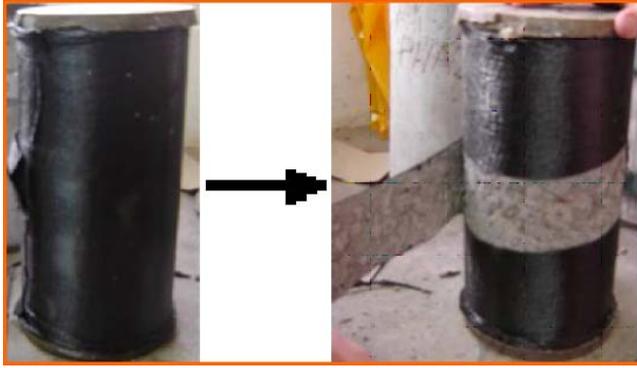


Fig. 4 - Probeta de hormigón simple confinada con PRFC. Modo de falla

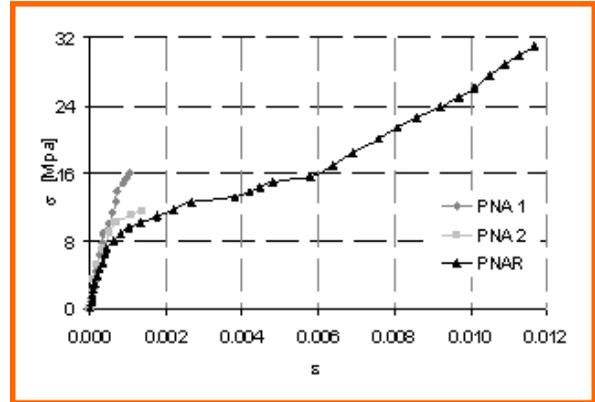


Fig. 5 - Curvas σ - ϵ . Probetas de hormigón simple

Con el crecimiento de las microfisuras, el volumen de hormigón comienza incrementarse provocando la activación del mecanismo de confinamiento. El refuerzo empieza, entonces, a ejercer presión lateral sobre el núcleo de hormigón y contrarresta la degradación del mismo. Este punto es llamado por algunos autores (Mirmiran et al, 2000) punto de transición e indica un comportamiento pseudoplástico del hormigón confinado con PRF. Finalmente, se reconoce una tercera zona en la cual el encamisado está completamente activo, y la rigidez se estabiliza alrededor de un valor constante. En esta región las tensiones son proporcionales a las deformaciones y la respuesta depende principalmente de la rigidez del material de confinamiento, pues el hormigón tiene un comportamiento plástico y no puede soportar cargas adicionales.

Especímenes de Hormigón Armado (PA1, PA2 y PAR).

En el caso de las probetas de hormigón armado no reforzadas con PRF, PA1 y PA2, las cargas máximas alcanzadas fueron de 287.30 kN y 276.65 kN, observándose fisuras similares a las de las probetas de hormigón simple sin confinar.

La falla de la probeta PAR confinada con 1 capa de PRFC se produjo para una carga de 606 kN. En este caso la rotura también fue repentina al cortarse algunas fibras del refuerzo y fue precedida por ruidos asociados a la rotura de la interfase entre la superficie de la probeta y el material compuesto, y a la deformación no uniforme de las fibras (Figura 6). No se produjo pandeo de las barras longitudinales de acero ni desintegración del núcleo de hormigón.



Fig. 6 - Rotura de la interfase material compuesto-hormigón

En la Figura 7 se reproduce el diagrama tensión-deformación axial (σ - ϵ) del hormigón sin confinar y del hormigón confinado con PRFC. Se puede ver un incremento importante de la resistencia última y de la capacidad de deformación del hormigón confinado. Como en el caso del hormigón simple confinado se obtuvo una curva bilineal.

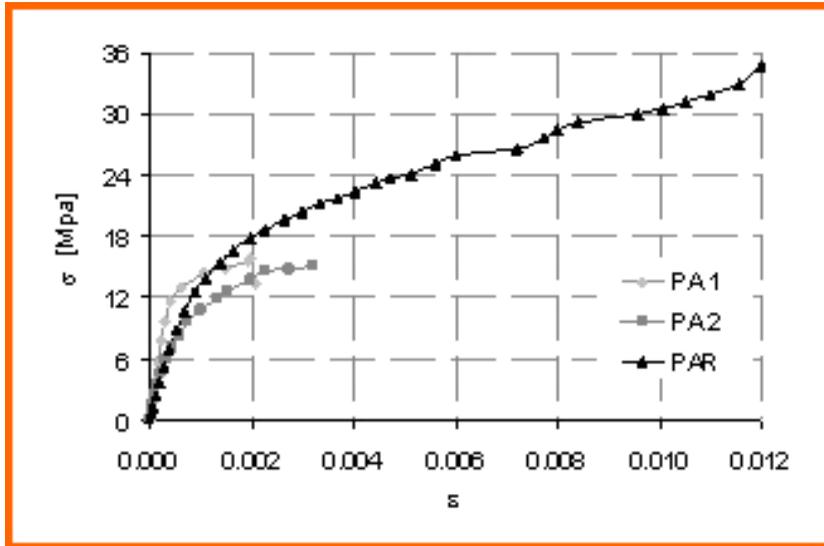


Fig. 7 - Curvas σ - ϵ . Probetas de hormigón armado

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 máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x.}$) alcanzados en el ensayo de compresión uniaxial por los especímenes de hormigón simple y hormigón armado sin refuerzo y reforzados con PRFC. Se puede ver una mayor resistencia de las probetas confinadas y una deformación axial considerablemente mayor con respecto al hormigón sin confinar. La eficiencia del confinamiento es ligeramente mayor en el hormigón simple que en el armado. Con respecto al hormigón sin confinar, la resistencia a compresión es 2.33 veces mayor en el primer caso y 2.44 en el segundo. Estos resultados son coincidentes con los obtenidos por Lin y Liao (Lin y Liao, 2004) sobre probetas de 100 mm x 200 mm confinadas con una capa de PRFV. Del cociente entre las deformaciones axiales máximas del hormigón confinado y el no confinado se puede obtener un índice de ductilidad, a saber: 9.00 (0.0117/0.0013; ver Tabla 3) y 4.62 (0.0120/0.0026; Tabla 3) para las probetas PNRA y PAR, respectivamente.

De la Tabla 3 también se puede observar que el refuerzo o confinamiento con PRF es más efectivo que el refuerzo con barras de acero. De este modo la armadura de acero incrementa la resistencia a compresión del hormigón simple en 2 MPa y dos veces la capacidad de deformación. El refuerzo externo con PRF aumenta 9 veces la ductilidad y 17 MPa la capacidad resistente.

| Especímen | $P_{rot.}$ (kN) | $\sigma_{m\acute{a}x.}$ (MPa) | $\epsilon_{m\acute{a}x.}$ |
|-----------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------|
| PNA1 | 287.00 | 16.24 | 0.0011 |
| PNA2 | 206.42 | 11.68 | 0.0014 |
| <i>Promedio</i> | <i>246.71</i> | <i>13.96</i> | <i>0.0013</i> |
| PNAR | 547.80 | 31.00 | 0.0117 |
| PA1 | 287.30 | 16.25 | 0.0020 |
| PA2 | 276.65 | 15.66 | 0.0032 |
| <i>Promedio</i> | <i>281.98</i> | <i>15.96</i> | <i>0.0026</i> |
| PAR | 606.00 | 34.29 | 0.0120 |

Tabla 3 - Resultados Experimentales

DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD A COMPRESIÓN AXIAL SEGÚN NORMAS ACI Y MODELOS EMPÍRICOS EXISTENTES. COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los valores de capacidad de carga axial computados según las normas ACI 318-05 y 440.2R-02 para probetas de hormigón armado sin confinar y confinadas con PRF, respectivamente. Considerando los resultados de los ensayos de las probetas de hormigón simple se adoptó un valor promedio de resistencia a la compresión $f'_c = 14$ MPa.

Se debe destacar que los cálculos se hicieron en base a las normas ACI pues no existe aún en el país normativa para el cálculo de estructuras de hormigón reforzadas externamente con PRF. Por lo tanto para seguir una coherencia en el cálculo, la determinación de la capacidad axial para el hormigón armado sin confinar se hizo de acuerdo a la norma ACI 318-05.

Probetas de Hormigón Armado.

En este caso la capacidad axial P_n puede estimarse como:

$$P_n = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (1)$$

donde A_g es la sección de la probeta [150 x 300] mm², A_{st} la sección de la armadura longitudinal = 4 ϕ 6, f_y la tensión de fluencia del acero = 420 MPa y f'_c la resistencia a compresión del hormigón sin confinar = 14 MPa.

Teniendo en cuenta las propiedades de los materiales, la capacidad axial P_n es de 256.40 kN. Dicha estimación resulta algo conservadora con respecto a los valores obtenidos experimentalmente ($PA1 = 287.30$ kN y $PA2 = 276.65$ kN).

Probetas de hormigón armado confinadas con PRFC.

La capacidad a compresión axial de una columna de hormigón armado reforzada con PRF, según la norma ACI 440.2R-02 puede computarse como:

$$P_n = 0.80 \left[0.85 \psi_f f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \right] \quad (2)$$

donde ψ_f es un coeficiente de reducción que puede tomarse igual a 0.95, y f'_{cc} es la resistencia a compresión del hormigón confinado que puede determinarse como:

$$f'_{cc} = f'_c \left[2.25 \sqrt{1 + 7.9 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1.25 \right] \text{ [MPa]} \quad (3)$$

donde a su vez, la tensión de confinamiento producida por el PRF, f_l , se estima como:

$$f_l = \frac{\kappa_a \rho_f \varepsilon_{fe} E_f}{2} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

El valor κ_a es un coeficiente de eficiencia que para secciones circulares puede considerarse igual a 1. El módulo elástico del PRF, E_f , es una característica propia del tipo de refuerzo y debe ser indicada por los fabricantes, en el caso de la lámina curada compuesta por tejido de fibra de carbono Sika Wrap 103C y resina epoxy SiKadur, es igual a 73100 MPa.

Según la norma la deformación efectiva en el refuerzo de PRF, ε_{fe} debe ser:

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \varepsilon_{fu} \quad (5)$$

Para el material utilizado la deformación de rotura ε_{fu} es 1.33%. El parámetro ρ_f es una cuantía de refuerzo que puede calcularse como:

$$\rho_f = \frac{4nt_f}{h} \tag{6}$$

siendo n el número de capas del tejido (en este caso 1), t_f su espesor (1mm) y h el diámetro de la columna o probeta (150 mm).

Por lo tanto:

De (5) $\rho_f = 0.0267$

De (3) $f_l = 3.904 \text{ MPa}$

De (2) $f'_{cc} = 31.07 \text{ MPa}$ con $f'_c = 14 \text{ MPa}$

A partir de estos valores, la capacidad de la probeta sin armadura se estima en $P_n = 354.68 \text{ kN}$ y para el caso de probeta con armadura $P_n = 390.40 \text{ kN}$. Ambos valores están muy por debajo de las capacidades halladas experimentalmente (547.80 kN y 606 kN, Tabla 3), resultando una aproximación muy conservadora.

Con respecto a los modelos empíricos utilizados para predecir la capacidad resistente a compresión de columnas de hormigón confinadas con PRF, la mayoría de ellos han sido calibrados con datos experimentales de sus propios autores y algunos adaptados para el caso de confinamiento con FRP, pues originalmente las formulaciones fueron pensadas para reproducir el confinamiento con tubos de acero. En la Tabla 4 se presentan las ecuaciones y variables utilizadas por tres modelos analíticos para obtener la resistencia a compresión de hormigones confinados, Mander et al (Rougiar, 2003), Samaan et al (Samaan et al., 1998), Lin y Liao (Lin y Liao, 2004). Luego en la Tabla 5 se muestra la comparación de la resistencia máxima a compresión obtenida experimentalmente con los valores calculados a partir de la norma ACI 440.2R-02 y los modelos empíricos mencionados precedentemente.

| Modelo | Ecuaciones |
|---------------------|---|
| Mander et al., 1988 | $f'_{cc} = f'_c \left(\begin{matrix} -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f_r}{f'_c}} \\ -2 \frac{f_r}{f'_c} \end{matrix} \right) [MPa]$ |
| Samaan et al., 1998 | $f'_{cc} = f'_c + 6.0(f_r)^{0.7} [MPa]$ |
| Lin y Liao, 2004 | $f'_{cc} = f'_c + 2f_r [MPa]$ |

Tabla 4 - Modelos empíricos-Ecuaciones

| Unidad de tensión: MPa | | | |
|--|-------|--------|----------------------------|
| Espécimen | PNAR | PAR | Variables |
| Valores Exp. | 31.00 | 34.29 | - |
| ACI 440.2R-02 | 20.07 | 22.09 | $f'_c = 14 \text{ MPa}$ |
| Mander et al. | 47.53 | 52.12* | $f_{fu} = 960 \text{ MPa}$ |
| Samaan et al. | 49.74 | 51.74* | $t_f = 1 \text{ mm}$ |
| Lin y Liao | 39.60 | 41.60* | $d_c = 150 \text{ mm}$ |
| * El cálculo de estas tensiones también se hizo utilizando un valor de $f'_c = 14 \text{ MPa}$, que corresponde a la resistencia promedio a compresión de las probetas de hormigón armado sin confinar (Tabla 3). | | | |

Tabla 5 - Comparación de valores de resistencia a compresión, experimentales y empíricos, del hormigón confinado con PRF

donde f'_{cc} y f'_c tienen el mismo significado que en las fórmulas del ACI y f_r es la máxima presión de confinamiento ejercida por el PRF antes de la rotura.

$$f_r = \frac{2nt_f f_{fu}}{d_c} \tag{6}$$

donde n es el número de capas del PRF, t_f el espesor del PRF, f_{fu} la resistencia última a tracción del PRF y d_c el diámetro de la probeta de hormigón.

El modelo de Mander et al (Rougier, 2003), originalmente desarrollado para hormigón confinado con acero, relaciona la resistencia a rotura del hormigón confinado con la presión de confinamiento y la resistencia a compresión del hormigón sin confinar. Se basa en las propiedades del diagrama tensión-deformación y datos de ensayos.

La formulación de Samaan et al. (Samaan et al., 1998) fue calibrada con resultados experimentales obtenidos por los autores sobre probetas de hormigón encamisadas con tubos de FRP. Es un modelo de confinamiento simple, capaz de reproducir de manera satisfactoria la respuesta bilineal tensión-deformación axial y transversal del hormigón confinado con FRP. Los parámetros del modelo están relacionados directamente con las propiedades del compuesto (FRP) y del núcleo de hormigón.

El modelo de Lin y Liao (Lin y Liao, 2004), a diferencia de los dos anteriores, no es un modelo de regresión. Se trata de un modelo muy simple formulado por sus autores a partir de observaciones experimentales.

Se puede ver en la Tabla que los valores de tensión calculados a partir de la norma ACI 440.2R-02 subestiman la eficiencia del confinamiento con PRF, tanto en el caso del hormigón simple como el armado. Contrariamente los modelos empíricos, en particular los de Mander et al y Samaan et al. sobreestiman la resistencia a compresión del hormigón confinado simple (51 % y 58 %, respectivamente) y armado (39 % y 45 %), probablemente por haber sido originalmente propuesto para confinamiento con acero (estribos circulares y espirales), el primero, y calibrado para datos experimentales de sus autores, el segundo. La formulación de Lin y Liao es la que mejor se ajusta a los valores experimentales presentados en este trabajo, pues como se dijo anteriormente surgió del análisis de datos de laboratorio. La sobreestimación de la resistencia compresión es del orden del 26 % para la probeta de hormigón simple y del 16 % para el hormigón armado.

CONCLUSIONES

Si bien el número de ensayos realizados es modesto, del análisis y la comparación de los resultados se puede concluir lo siguiente:

El confinamiento lateral mediante la envoltura de láminas o tejidos de PRF, ha demostrado ser muy eficiente por cuanto incrementa notablemente la resistencia y ductilidad de las probetas. Esto se debe al desarrollo de un estado triaxial de tensiones que confina y contiene al hormigón luego de que éste ha sido dañado.

Se debe asegurar una perfecta adherencia entre el hormigón confinado y el PRFC, así como también una longitud de solape adecuada que evite el despegue del refuerzo y la consiguiente falla frágil de los especímenes.

Los valores de resistencia máxima a compresión axial obtenidos a partir de las fórmulas del ACI y de modelos empíricos existentes, tanto en el caso de probetas de hormigón simple como en el caso de probetas de hormigón armado, resultaron menores a los experimentales en el primer caso y sustancialmente mayores en el segundo, excepto el modelo de Lin y Liao (Lin y Liao, 2004), con el cual se logró un mejor ajuste de los datos de laboratorio.

De todas maneras para poder arribar a conclusiones más generales es necesario continuar realizando ensayos y analizar otras variables como por ejemplo cantidad óptima de PRF, esto es número de capas, longitud adecuada de solape para evitar la falla frágil por pérdida de adherencia que se produce en esa zona, así como también otros esquemas de refuerzo y PRFs.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta, a Sika Argentina y a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Reg. C del U.

REFERENCIAS

Arya C., Clarke J., Kay E., O'Reagan P., "Design guidance for strengthening concrete structures using fiber composite materials: a review.", *Engineering Structures*, 24, 889-900, (2002).

- Mirmiran A., Zagers K., Yuan W., "Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber composites", *Finite Elements in Analysis and Design*, 35, 79-96, (2000).
- Ye L. P., Zhang K., Zhao S. H., Feng P., "Experimental study on seismic strengthening of RC columns with wrapped CFRP sheets", *Construction and Building Materials*, 17, 499-506, (2003).
- Tastani S. P., Pantazopoulou S. J., "Experimental evaluation of FRP jackets in upgrading RC corroded columns with substandard detailing", *Engineering Structures*, 26, 817-829, (2004).
- Luccioni B. M., Rougier V. C., "A plastic damage approach for confined concrete", *Computers and Structures*, 83, 2238-2256, (2005).
- Guoqiang Li, "Experimental study of FRP confined concrete cylinders", *Engineering Structures*, 28, 1001-1008, (2006).
- Rousakis T., Karabinis A., Kioussis P., "FRP-confined concrete members: Axial compression experiments and plasticity modelling", *Engineering Structures*, 29, 1343-1353, (2007).
- ACI 440.2R-02, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures", (2002).
- ACI 318-05, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", (2005).
- Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, IRAM 1534, Hormigón de cemento portland. Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorio, (1985).
- Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, IRAM 1546, Hormigón de cemento portland. Método de ensayo de compresión, (1992).
- Rougier V., "Confinamiento de columnas de hormigón con materiales compuestos", Tesis (Magister en Ingeniería Estructural), Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán. Argentina, 125, (2003).
- Samaan M., Mirmiran A., Shahawy M., "Model of Concrete Confined by Fiber Composites", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 124 (9), 1025-1031, (1998).