

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.

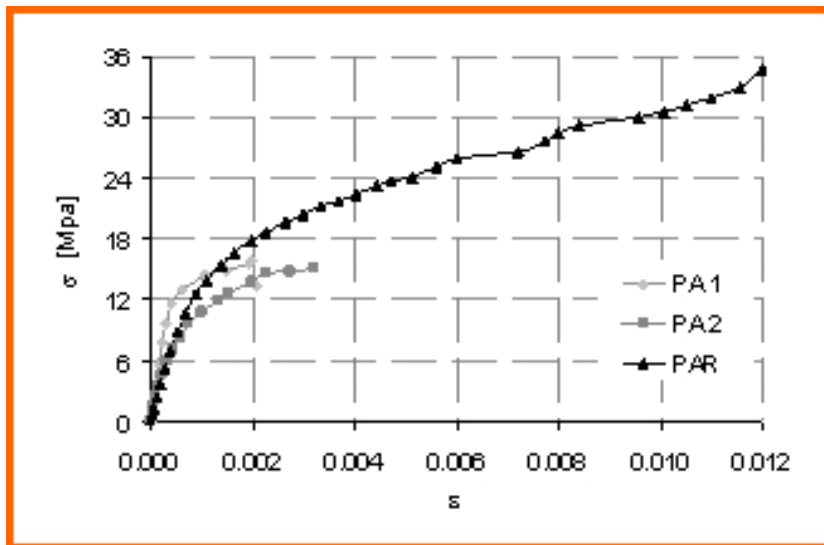


Fig. 7 - Curvas σ - ϵ . Probetas de hormigón armado

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., Kiouisis 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).