

ANALISIS EXPERIMENTAL DE VIGAS DE HORMIGON ARMADO DAÑADAS Y REPARADAS CON MATERIALES COMPUESTOS

Dr. Ing. Rougier, Viviana; Dr. Ing. Escalante, Mario; Ing. González, Federico
Facultad Regional C. del Uruguay, UTN.
rougierv@frcu.utn.edu.ar

RESUMEN

Durante su vida útil, las estructuras de hormigón armado pueden resultar expuestas a la acción de cargas mecánicas y/o agentes químicos o térmicos agresivos que producen la degradación de sus propiedades mecánicas. En consecuencia, y ante la pérdida de seguridad estructural, se hace necesario su reparación y/o refuerzo. Los polímeros reforzados con fibras (PRF) constituyen un tipo de material compuesto avanzado con el potencial de cambiar significativamente el comportamiento de una estructura.

En este trabajo, se presentan resultados experimentales del comportamiento a flexión de vigas de hormigón armado dañadas y luego reparadas con PRF. Se estudia la variación del grado de daño, la resistencia a compresión del hormigón y dos técnicas de reparación: barras y láminas. Se analizan para ambos tipos de refuerzo diagramas carga-desplazamiento, cargas últimas y modos de falla. Los resultados obtenidos muestran que la reparación de las vigas dañadas con PRF, es en general exitosa, lográndose además de la recuperación, un incremento significativo de su capacidad resistente. Los principales modos de falla observados varían entre despegue del laminado y desprendimiento del recubrimiento de hormigón.

ABSTRACT

During their service life reinforced concrete structures can be exposed to mechanical loads and aggressive chemical or thermal agents that produce degradation of their mechanical properties. This results in a loss of security and usually requires a prompt repair or retrofitting in order to preserve the structure serviceability.

In the present work experimental results of flexural behavior of damaged reinforced concrete beams repaired with FRP are presented. Damaged degree variation and two repairing techniques: rods and laminates, are studied. For both kind of retrofitting, load-vs-deflection curves, ultimate loads and failure modes, are analyzed. The results obtained show that the repair of damaged RC beams with PRF is in general successful. A recovery and a significant increase of load capacity are obtained. Failure modes registered vary from plate-end interfacial debonding and concrete cover separation.

INTRODUCCIÓN

Las estructuras de hormigón armado son diseñadas para una determinada vida útil. Sin embargo, existen numerosos edificios construidos con este material, que se han dañado considerablemente en un tiempo menor que el previsto, presentando diversos tipos de deterioro: fisuras, desprendimiento del hormigón y grandes deformaciones. Entre los factores que pueden originar estas fallas se encuentran: el envejecimiento de los materiales, la corrosión de las armaduras de acero, cambio de destino, diseño según normativas antiguas, cambio de filosofía de diseño (como es el caso del diseño por capacidad en hormigón armado), cargas sísmicas, efectos ambientales y cargas de impacto sobre la estructura. La rehabilitación y/o refuerzo de estas estructuras requiere de materiales que puedan soportar condiciones severas por un largo tiempo y de técnicas de reparación adecuadas en términos de bajos costos y tiempos rápidos de ejecución¹.

Los polímeros reforzados con fibras (PRF), han surgido como una nueva tecnología de refuerzo, con excelentes potenciales en áreas donde los materiales convencionales han fallado. Las propiedades favorables que poseen los PRF (alta resistencia a la tracción en la dirección de las fibras, buen comportamiento a la corrosión, fatiga y baja densidad), los hacen muy efectivos para el refuerzo de elementos estructurales o la reparación de estructuras dañadas de diferentes tipos, tales como, columnas, vigas, losas, túneles y silos^{2,3,4,1}. Los tipos más comunes de PRF se obtienen a partir de fibras de alta resistencia de carbono, vidrio o aramida, las cuales pueden ser preimpregnadas en matrices, alineadas unidireccionalmente en hojas laminadas, barras o bien tejidas bidireccionalmente. Los polímeros reforzados con fibras de vidrio (PRFV) son en general los menos costosos, pero tienen menor resistencia y rigidez que las otras alternativas, PRFC (polímeros reforzados con fibras de carbono) y PRFA (polímeros reforzados con fibra aramida). Los PRFC, por el contrario, son los más rígidos, los más durables y también los de mayor costo. Pueden soportar cargas severas de larga duración y fatiga. Los PRFA tiene excelente resistencia a cargas de impacto y muy buena durabilidad. Sin embargo, su uso es poco frecuente en la industria de la construcción⁵.

Cuando los PRFs se usan como refuerzo externo de vigas de hormigón armado y si se elige la configuración adecuada, mejoran la capacidad resistente a corte y flexión de dichos elementos^{6,7,8,9,10,11}. La técnica de refuerzo a flexión con PRFs consiste generalmente en adherir placas o láminas de material compuesto a la cara traccionada del hormigón, EB, por sus siglas en inglés (externally bonded). Alternativamente, existe otra técnica llamada NSM, por sus siglas en inglés (near surface mounted), que consiste en colocar barras de PRF en orificios previamente aserrados en el recubrimiento de hormigón^{12,13,14,15,16} y cubriéndolas luego con mortero o resina epoxy. Esta última técnica, tiene algunas ventajas con respecto a la primera (EB). Una de estas ventajas es la mejor adherencia a la superficie de hormigón, pues las barras quedan completamente embebidas en el adhesivo o mortero, presentando menos problemas de despegue en comparación con la técnica EB. Otra ventaja que ofrece la técnica NSM, es que el refuerzo de PRF, queda

protegido dentro del recubrimiento de hormigón y el adhesivo y menos expuesto a daños accidentales, vandalismo y temperatura¹. Sin embargo, los principales factores que pueden afectar el comportamiento de esta técnica son: la interacción entre la barra de refuerzo y el material de relleno, la adherencia entre dicho material y la superficie del hormigón, el tamaño del orificio donde se coloca la barra así como también su distancia desde los extremos de la viga¹⁷.

En este trabajo se presentan los resultados experimentales de ensayos realizados en vigas de hormigón armado, dañadas y luego reparadas con barras de polímeros reforzados con fibras de vidrio (PRFV) y láminas de polímeros reforzados con fibras de carbono (PRFC), de acuerdo a dos técnicas, NSM y EB, respectivamente. El estudio se centra en evaluar la eficiencia de las técnicas mencionadas en el comportamiento a flexión de dichas vigas, de acuerdo al grado de daño existente y la resistencia a compresión del hormigón. El grado de daño (relación entre la carga de fisuración y la capacidad resistente de una viga sin daño ni refuerzo), se fija en 75 y 90 %. En cuanto a la resistencia característica del hormigón, se adoptan dos tipos (H20: resistencia característica a compresión o resistencia especificada de 20 MPa, y H30: resistencia característica a compresión de 30 MPa). Se analiza la influencia de los diferentes parámetros mencionados en términos de los diagramas carga-desplazamiento, modos de falla y capacidad resistente.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental se llevó a cabo mediante ensayos de flexión en vigas prismáticas sobre las cuales se aplicaron cargas puntuales en los tercios de la luz. Se elaboraron 24 vigas y a la fecha de presentación del presente trabajo se ensayaron 18, seis denominadas vigas de referencia o control y las restantes dañadas y reparadas con PRF. Las vigas de referencia se ensayaron hasta rotura, en tanto las restantes se dañaron hasta aproximadamente un 75 % y 90 % de la carga de falla de las vigas de referencia, se repararon y se volvieron a ensayar hasta la falla. Se utilizaron dos tipos hormigón, H20 y H30 y dos técnicas de reparación con PRF, EB y NSM.

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

Denominación	f'_{c28} [*] (MPa)	Características	Grado de daño (%)	Técnica de reparación
V1	30	Viga de control	-	-
V2	30	Viga de control	-	-
V3	30	Reparada	75	EB ^{**}
V4	30	Reparada	75	EB
V5	30	Reparada	75	NSM ^{***}
V6	30	Reparada	75	NSM
V7	20	Viga de control	75	-
V8	20	Viga de control	75	-
V9	20	Reparada	75	EB
V10	20	Reparada	75	EB
V11	20	Reparada	75	NSM
V12	20	Reparada	75	NSM
V13	30	Viga de control	90	-
V14	30	Viga de control	90	-
V15	30	Reparada	90	EB
V16	30	Reparada	90	EB
V17	30	Reparada	90	NSM
V18	30	Reparada	90	NSM

* Resistencia especificada o característica a compresión a los 28 días, ** Refuerzo externo con láminas de PRFC (externally bonded), *** Refuerzo con barras de PRFV (near surfaced mounted)

Tabla 1 – Detalle de especímenes ensayados con su denominación y características.

Especímenes

Todas las vigas se diseñaron con la misma sección rectangular: 80 mm x 160 mm, 1100 mm de longitud total y 1000 mm de luz libre entre apoyos. Se adoptó para todas las vigas la misma armadura longitudinal y transversal: barras ϕ del 8 mm para la armadura de tracción, barras ϕ del 6 para la armadura constructiva, y estribos ϕ del 4.2 cada 75 mm como armadura a corte. Todas las vigas se sobredimensionaron a corte para evitar la típica falla por corte. En la Figura 1 se

muestran las dimensiones de un espécimen y detalles de refuerzo.

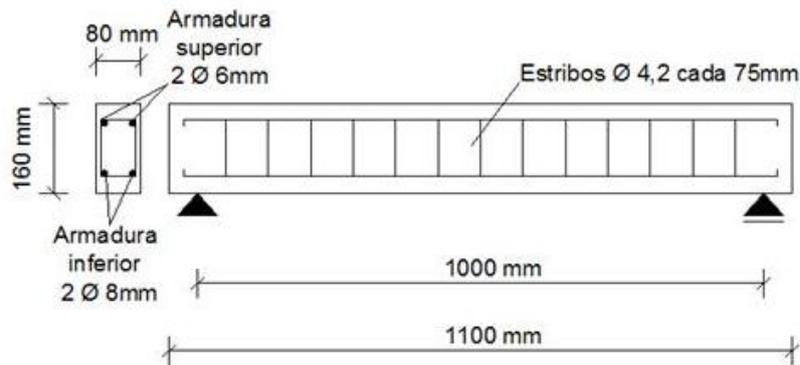


Figura 1. Detalle de viga de hormigón armado

Propiedades de los materiales

A continuación se describen las características y propiedades mecánicas de los materiales usados en la fabricación y reparación de las vigas objeto de estudio.

Hormigón

En la ejecución de las vigas se utilizaron dos tipos de hormigón que se dosificaron de acuerdo al reglamento CIRSOC 201-2005¹⁸, en función de obtener una resistencia característica de rotura a compresión a los 28 días de 30 MPa y 20 MPa. 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 1534¹⁹ y 1865²⁰, respectivamente. Se obtuvo una resistencia media a compresión del hormigón a los 28 días de 34.92 MPa y 25.18 MPa y un módulo elástico promedio, de 28.2 GPa para el hormigón de clase H30 y 21.13 GPa para el H20. En la *Tabla 2* se muestran las propiedades mecánicas de las dos clases de hormigón utilizadas.

Acero y FRP

Para la armadura principal y la constructiva de las vigas se empleó acero de Dureza Natural Acindar denominado comercialmente DN A-420. Para los estribos se usó acero de diámetro nominal 4.2 mm. Las propiedades de los aceros, dadas por los fabricantes, se presentan en la *Tabla 2*.

La reparación de las vigas dañadas se realizó con barras de fibra de vidrio (PRFV) y láminas de polímeros reforzados con fibra de carbono (PRFC), según las técnicas NSM y EB, respectivamente. Se buscó tener una cuantía equivalente de ambos tipos de refuerzo y el cálculo de los mismos se realizó siguiendo los lineamientos de los códigos ACI 440.2R-08⁷ y ACI 440. 1R-06²¹, para la técnica EB y NSM,

respectivamente. En la Figura 2 se muestran los tipos de PRF usados y en la *Tabla 2*, sus características mecánicas, proporcionadas por los fabricantes. En el caso de la reparación con barras de fibra de vidrio, se usaron barras nervuradas de 12mm de diámetro (Figura 2a). Para la reparación con PRFC, se emplearon láminas de alto desempeño de 1.2 mm de espesor y 50 mm de ancho (Figura 2b).

Materiales		E* (GPa)	f _m ** (MPa)	f _y *** (MPa)	f _u **** (MPa)
Hormigón	H20	28.20	34.92	-	
	H30	21.13	25.18	-	
Acero	Barras	210	-	420	500
Barras PRFV		45	-	-	740
Láminas de PRFC		165	-	-	2800
Resina epoxi		12.8	95	-	-

*Módulo de elasticidad, **Resistencia media a compresión, ***Tensión de fluencia, ****Tensión última.

Tabla 2 – Propiedades mecánicas de los materiales utilizados



a)



b)

Figura 2. Tipos de PRF: a) Barras de fibra de vidrio; b) Láminas de fibra de carbono

Preparación de especímenes y técnicas de reparación

La reparación y/o refuerzo con PRF, independientemente del tipo de material o técnica utilizada, requiere una preparación muy cuidadosa de la superficie a la cual será adherido el PRF. De ello depende el éxito de la reparación y/o refuerzo.

En este trabajo se utilizaron dos técnicas de reparación, láminas de PRFC adheridas externamente a la superficie del hormigón y barras de PRFV colocadas en orificios previamente aserrados en el recubrimiento de hormigón.

La técnica de reparación con láminas de fibra de carbono se realizó aplicando una lámina de 50 mm de ancho, 100 mm de largo y 1.2 mm de espesor en la cara traccionada de la viga. En la Figura 3a se muestra el esquema de reparación y las dimensiones. En el caso de la reparación con barras de fibra de vidrio, también llamadas fibrobarras, se usaron barras de 12mm de diámetro. Debido a las dimensiones de la sección transversal de las vigas y el diámetro de las barras, se colocó una sola en cada viga dañada. La longitud de las barras se adoptó teniendo en cuenta las investigaciones realizadas por otros autores¹⁷, que como resultado de ensayos experimentales sugieren adoptar una longitud igual o mayor que 80 veces el diámetro de la barra de FRP. En consecuencia la longitud de las barras de PRFV se fijó en 1000 mm. En cuanto a las dimensiones del orificio que aloja las barras de refuerzo y el material de relleno, se tuvieron en cuenta también los trabajos realizados por otros investigadores^{22,23,24} y el código ACI 440. 1R-06²¹. El orificio de 20 mm de ancho x 20 mm de profundidad, se rellenó hasta la mitad de la altura con resina epoxy, se posicionó la barra y se completó con la misma resina hasta cubrir totalmente la el orificio. Se debe destacar que la operación de aserrado del orificio resultó algo laboriosa y de cuidado. En la Figura 3b se presenta el esquema reparación con fibrobarras. Antes de la colocación del material de reparación, las superficies de los especímenes fueron cuidadosamente pulidas con cepillo de cerdas de acero a los efectos de eliminar incrustaciones de mortero y suciedades. Finalmente y para dejarlas perfectamente limpias, se aplicó aire comprimido.

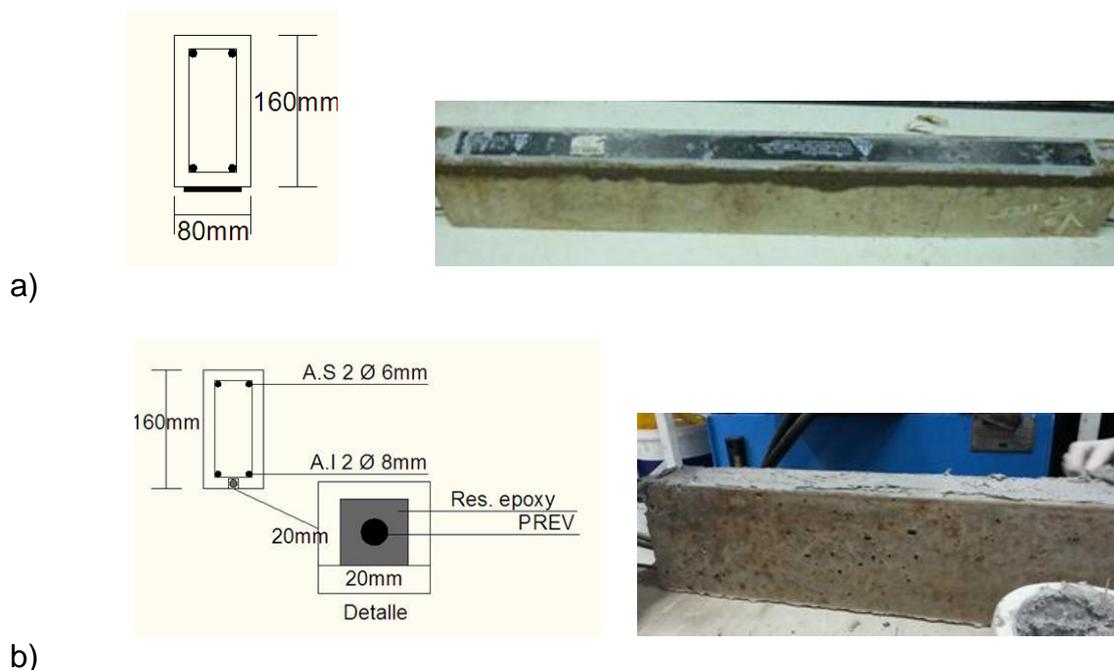


Figura 3. Técnicas de reparación. a) Reparación con láminas de PRFC; b) Reparación con barras de fibra de vidrio

Instrumentación y Esquema de Ensayo

Todos los ensayos realizados consistieron en la aplicación de cargas cuasi estáticas monótonas crecientes en los tercios de la luz (flexión en cuatro puntos). Se adoptó una velocidad de carga de 1.5 mm/min. Se midieron cargas y desplazamientos del punto medio de las probetas. La carga fue aplicada usando una prensa Shimadzu con sistema hidráulico con posibilidad de desarrollar una carga vertical nominal máxima de 1000 kN. Para la medición de los desplazamientos se utilizó un reloj comparador (flexímetro) digital con una sensibilidad de 0.001mm. En la Figura 4 se presenta el esquema de ensayo e instrumentación utilizado. En general, el instrumental de medición fue retirado antes de alcanzar la carga máxima, como medida de precaución para evitar la posible rotura del mismo.

Las vigas dañadas fueron cargadas hasta alcanzar el grado de daño fijado (75 y 90 %). Luego se repararon y se ensayaron nuevamente hasta alcanzar la rotura.

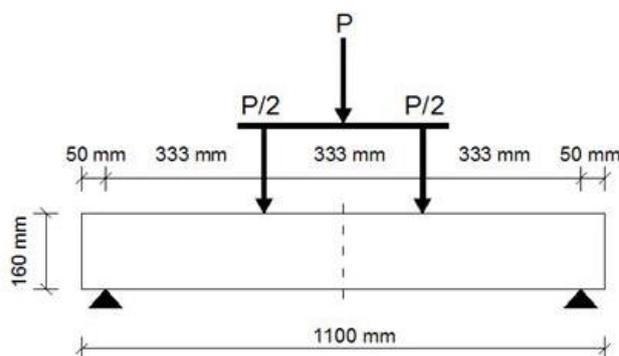


Figura 4. Ensayo de flexión en cuatro puntos. Esquema de ensayo e instrumentación

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos experimentalmente. Se analizan cargas y modos de falla, efecto del grado de daño, efecto de la técnica de reparación usada y por último efecto de la clase resistente de hormigón.

Modos de falla

En la Tabla 3 se presentan los valores de carga máxima (P_u), el porcentaje de recuperación de resistencia debido a la reparación con los PRF y los modos de falla. La comparación de recuperación de resistencia de las vigas reparadas se realizó con los valores promedio de resistencia máxima de las vigas de control o referencia, es decir V1, V2, V13 y V14 para el hormigón H30 y V7 y V8 para el hormigón clase H20. Todas las vigas de referencia, independientemente de la resistencia a compresión del hormigón, fallaron por aplastamiento del hormigón en la zona comprimida, con fluencia de la armadura de acero y una gran deflexión. Este tipo de

falla se caracteriza por la aparición de dos fisuras localizadas bajo los dos puntos de carga, seguidas por la formación de microfisuras entre aquellas (Figura 4). Con respecto a las vigas reparadas, se observaron tres modos de falla frágil: despegue del PRF (Figura 5), desprendimiento del recubrimiento de hormigón (Figura 6) y rotura en zona de apoyos (Figura 7). Estos tipos de falla obedecen al comportamiento lineal elástico hasta la rotura de los PRF. Por ello la ductilidad de las vigas reparadas fue menor que la de las vigas de control. En ningún caso se produjo la rotura del PRF, barras o láminas.

La falla por despegue de la lámina de PRFC (V3 y V4) probablemente se debió a una mala adherencia entre la resina epoxi y la superficie del hormigón, producto de una limpieza y pulido deficiente de dicha superficie y un exceso de producto desmoldante en los encofrados (Figura 5). En el caso de la viga V3, se logró recuperar la resistencia original, y además se la superó en un 4 % aproximadamente. La viga V4 en cambio, falló repentinamente sin siquiera recuperar la capacidad portante alcanzada por las vigas de referencia. Los especímenes V9 y V10, con el mismo tipo de refuerzo, pero con una resistencia a compresión del hormigón más baja, tuvieron un comportamiento muy diferente, tanto en lo que respecta a resistencia como a modo de falla. Se observó una recuperación de resistencia inicial, con respecto a la resistencia promedio de las vigas de referencia, V7 y V8, y un incremento del 41 % y 39 %, para V8 y V9, respectivamente. La rotura se produjo en ambos especímenes, por desprendimiento del recubrimiento de hormigón (Figura 6) como consecuencia de la concentración de tensiones cerca de los extremos de la placa de refuerzo. Las vigas V15 y V16, no lograron recuperar la capacidad resistente de las vigas de control. La falla se produjo también por desprendimiento del recubrimiento de hormigón (Tabla 3)

Las vigas reparadas con barras de PRFV, recuperaron y superaron en todos los casos la resistencia de las vigas de control. En general tuvieron el mismo tipo de falla. En la viga V5, la rotura se produjo por compresión del hormigón con una marcada fisuración en la zona del apoyo izquierdo. En la viga V6, la rotura fue provocada por una falla en el apoyo. Esto se debió a que al practicarse el aserrado del orificio, donde se colocó luego la barra de reparación, se dañó accidentalmente la zona de dicho apoyo. En ningún caso se despegó el refuerzo, además se recuperó la capacidad resistente inicial y se lograron incrementos de carga última del 48% y del 42 % aproximadamente. La viga V12 registró el mismo tipo de falla que la viga V5 y se logró un porcentaje importante de recuperación de resistencia, Tabla 3. Los especímenes V11, V17 y V18 tuvieron un tipo de rotura similar a las vigas V8 y V9, es decir, despegue del recubrimiento de hormigón que se inició en uno de los apoyos.

Viga	P _u (kN)	% de Recuperación de resistencia	Modos de Falla
V1	41.2	-	RC*
V2	42.7	-	RC
P _{Promedio} V1 y V2 = 41.95- H30			
V3	43.8	4	DL**
V4	24.0	-	DL
V5	62.2	48	RC
V6	59.4	42	FA***
V7	45.0	-	RC
V8	42.0	-	RC
P _{Promedio} V7 y V8 = 43.50 - H20			
V9	61.4	41	DR****
V10	60.5	39	DR
V11	58.9	35	RC
V12	58.0	33	RC
V13	41.4	-	RC
V14	45.0	-	RC
P _{Promedio} V13 y V14 = 43.2- H30			
V15	36.30	-	DR
V16	37.90	-	DR
V17	46.40	7	DR
V18	51.10	18	DR

*Rotura por Compresión, ** Despegue del laminado, ***Falla en el apoyo, ****Desprendimiento del recubrimiento de hormigón

Los porcentajes de recuperación de resistencia se calcularon con respecto a los valores P_{promedio} de las vigas de control

Tabla 3 – Resultados experimentales



Figura 4. Modo de falla de viga de control



Figura 5. Modo de falla de viga reparada: despegue del laminado



Figura 6. Modo de falla de viga reparada: desprendimiento del recubrimiento de hormigón



Figura 7. Modo de falla de viga reparada: falla en el apoyo

Efecto del grado de daño

En este párrafo se analizan los efectos del grado de daño (D) en la capacidad resistente de las vigas reparadas siguiendo las dos técnicas descriptas precedentemente, EB y NSM y para el hormigón de resistencia especificada $f'_c = 30$ MPa. Los resultados correspondientes al hormigón H20 no están completos, pues aún restan 6 ensayar probetas, razón por la cual no se presentan en este trabajo. De este modo se comparan los resultados obtenidos en los especímenes de control V1, V2, V13 y V14, con las vigas V3 y V4, reparadas con láminas de PRFC (grado de daño: 75%), V5 y V6 reparadas con barras PRFV (D: 75 %), V15 y V16 reparadas con láminas de PRFC (D: 90%) y finalmente V17 y V18 reparadas con barras PRFV (D: 90 %).

Para un valor de $D = 75 \%$, las vigas se encuentran aún en estado elástico, sin fisurar mientras que para $D = 90 \%$ ya han alcanzado el rango plástico con algunas fisuras observadas en la zona cercana a los apoyos (fisuras de corte). En la Figura 8 se muestran las curvas carga desplazamiento correspondientes a una viga de control (V2), dos vigas dañadas y reparadas con PRFC, V3 y V15 con $D=75\%$ y 90% , respectivamente y dos vigas reparadas con PRFV, V6 y V17 con $D = 75\%$ y 90% , respectivamente.

De la observación de la *Tabla 3* y la Figura 8, se puede decir que las vigas reparadas tuvieron un comportamiento mecánico diferente, en términos de capacidad resistente y rigidez, de acuerdo al grado de daño y de la técnica de reparación utilizada. Sin dudas el mejor desempeño en cuanto a recuperación y aumento de la capacidad de carga, se logró con la técnica NSM, para $D=75\%$ y 90% . Por otro lado para $D=90 \%$ cualquiera sea la técnica de reparación usada, no se pudo incrementar la rigidez de las vigas, contrariamente a lo que ocurrió para un grado de daño $D = 75 \%$. El mejor comportamiento de las vigas, en términos de capacidad resistente y rigidez para $D=75 \%$, se debió a la contribución adicional del hormigón armado. El tipo de falla de las vigas reparadas fue de tipo frágil en todos los casos, según se puede ver en las curvas carga-desplazamiento de la Figura 8.

En la Figura 9 donde se representa la carga de rotura en función del grado de daño, se resume lo dicho anteriormente.

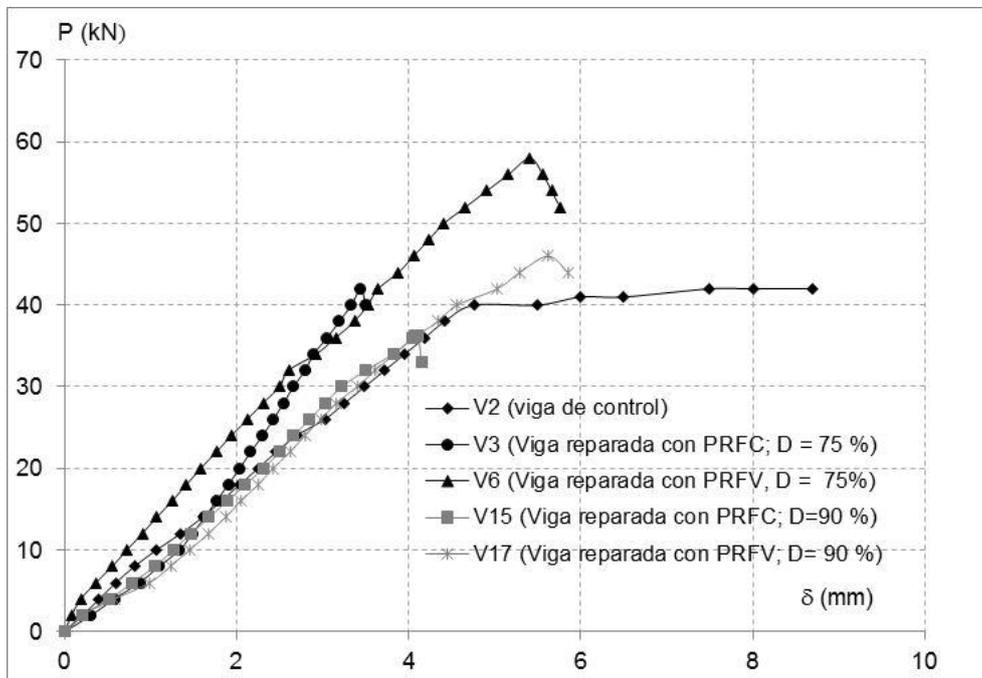


Figura 8. Curvas carga-desplazamiento para vigas con diferente grado de daño para un H30

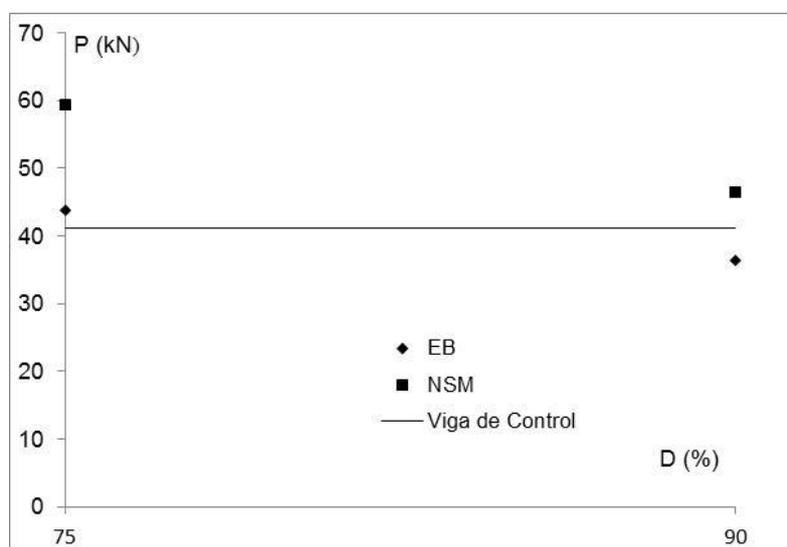


Figura 9. Carga de rotura vs. grado de daño para un H30

Efecto de la técnica de FRP usada

El efecto de la técnica de reparación utilizada se puede ver en la Tabla 3, y en la Figura 10 a y b donde se representan las curvas carga-desplazamiento correspondientes a las dos clases de hormigón, H20 y H30 y considerando solamente un grado de daño $D = 75\%$. Los valores correspondientes a un valor de $D = 90\%$, están incompletos, pues no están disponibles aún los resultados de las vigas para el hormigón H20.

En la Figura 10 a se representan las curvas carga desplazamiento correspondientes a tres vigas V8 (viga de control), V9 (EB-PRFC) y V11 (NSM-PRFV), correspondientes al hormigón de clase H20 y para un valor de $D = 75\%$. Se puede ver, que en este caso, la técnica de reparación con láminas de PRFC resultó más efectiva, en cuanto a recuperación e incremento de capacidad de carga y aumento de la rigidez. La rotura se produjo por desprendimiento del recubrimiento de hormigón. La falla de la viga V11, reparada con barras de PRFV, se produjo por rotura en el apoyo.

En la Figura 10 b se muestran las curvas carga-desplazamiento de las vigas V2 (viga de control), V3 (EB-PRFC) y V5 (NSM- PRFV), hormigón H30 y grado de daño = 75%. En este caso, la técnica de reparación con barras de PRFV dió mejores resultados que la reparación con láminas de PRFC. Sin embargo hay que destacar que debido al exceso de producto desmoldante en los encofrados de las vigas, no fue posible asegurar una superficie limpia y pulida que garantice una buena adherencia entre PRFC y hormigón. Por lo tanto la falla se produjo prematuramente, y en el caso de la viga V3 apenas logró superarse la capacidad resistente de las vigas de control (4%, ver Tabla 3). La viga V4, también reparada con PRFC, no alcanzó ni siquiera la mitad de dicha capacidad (Tabla 3). La reparación con barras de PRFV resultó, sin embargo exitosa, independientemente del estado de la superficie del hormigón. Se obtuvieron incrementos significativos de la resistencia (Tabla 3) y rigidez.

En general, y aun cuando deberían realizarse más ensayos, la técnica NSM sin bien resultó más laboriosa de ejecutar, fue más eficiente, en términos de recuperación e incremento de la capacidad resistente y rigidez de los especímenes dañados. Independientemente del estado de la superficie del hormigón y si bien las propiedades mecánicas de los PRFV, resistencia última a tracción y módulo elástico, no son tan altas como las de los PRFC, se obtuvieron muy buenos resultados.

En términos de ductilidad, las vigas reparadas, con cualquiera de las dos técnicas, NSM y EB, mostraron un comportamiento mucho más frágil que las vigas de control, lo cual es coherente con el comportamiento lineal elástico hasta la rotura, característico de los PRF.

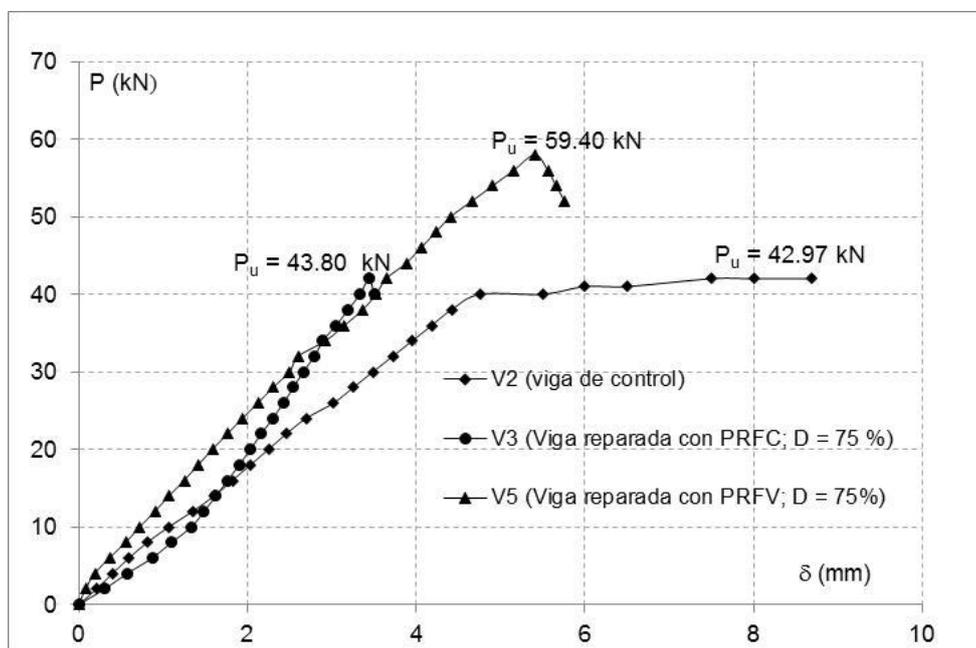
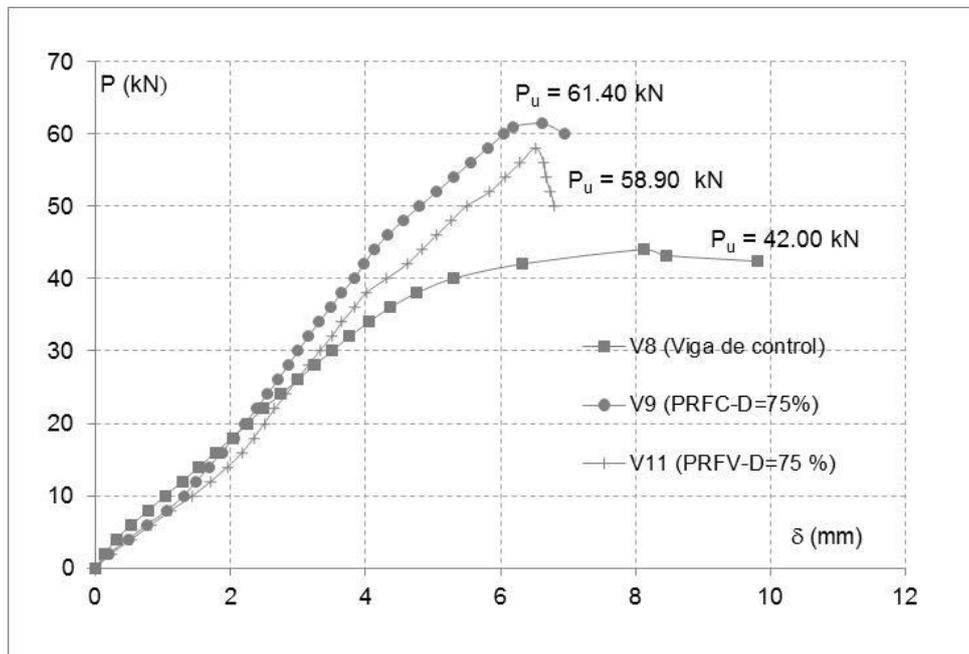


Figura 10. Efecto de la técnica de reparación: a) Hormigón H20 y D=75%;
 Hormigón H30 y D = 75%

Efecto de la resistencia del hormigón

En este apartado se analiza la influencia de la clase resistente de hormigón en la capacidad de carga y rigidez de las vigas reparadas. En la Figura 11 se representan las curvas carga-desplazamiento de las vigas de control V2 y V8, y las vigas V3 y V9 (EB-PRFC) y V5 y V11 (NSM-PRFV), para las dos resistencias de hormigón, H20 y H30 y H30 y

Según se desprende de la Tabla 3, la resistencia a compresión del hormigón no tuvo influencia significativa en la capacidad resistente de los especímenes. De la Figura 11 se puede observar que para los dos tipos de hormigón y para un grado de daño del 75 %, la rigidez de las vigas reparadas es afectada solamente por los FRP.

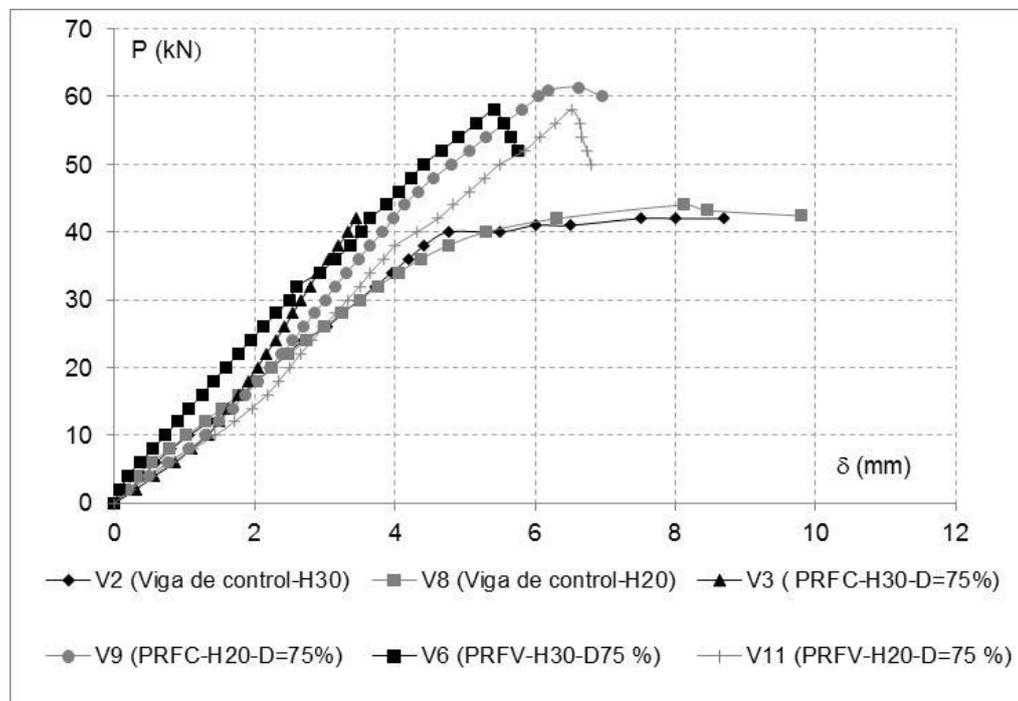


Figura 10. Curvas carga-desplazamiento para los dos tipos de hormigón

CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado resultados de ensayos de flexión de vigas de hormigón armado dañadas y luego reparadas con dos sistemas de refuerzo, barras de PRFV y láminas de PRFC, analizándose también la influencia del grado de daño y de la resistencia a compresión de hormigón. Aún cuando es necesaria la ejecución de un mayor número de ensayos, del análisis y la comparación de dichos resultados se puede decir lo siguiente:

Para los dos porcentajes de daño estudiados la reparación con barras de PRFV resultó muy efectiva, pues las vigas reparadas, lograron recuperar y superar las propiedades mecánicas de resistencia de las vigas de control.

Las láminas de PRFC resultaron muy eficientes en la recuperación de resistencia, pero sólo en aquellos casos en que no se produjo el despegue del laminado. La adherencia entre el material de refuerzo y la superficie del hormigón, para este tipo de reparación, fue más difícil de garantizar. Como contrapartida, la técnica resultó más sencilla y rápida de ejecutar.

El incremento en la rigidez de las vigas reparadas, para un grado de daño $D=75\%$ se debió solo al aporte de los PRF, es decir no tuvo influencia la resistencia a compresión del hormigón.

Colaboradores: Los autores destacan la colaboración de los Ingenieros Inés Villalba y Pedro Becker en la planificación y realización de los ensayos de laboratorio. Así como también la de los alumnos becarios de Grupo de Investigación de Mecánica Computacional y de Estructuras de la Facultad Regional Concepción del Uruguay, UTN, María Alejandra Grosso, Verónica Rudaz y Santiago Iribarren.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional C. del Uruguay (FRCU), por el apoyo económico brindado para la realización del trabajo, a los Ingenieros Guillermo y Eduardo Bevilaqua por su valioso aporte y asesoramiento en las tareas de dosificación y elaboración del hormigón, al jefe de laboratorio de Ingeniería Civil de la FRCU, Ingeniero Civil Ricardo Gómez, por su valiosa colaboración en la puesta a punto y realización de los ensayos.

Referencias:

- 1 El-Gamal, S.E., Nuaimi, A., Al-Lawati, A. (2016). Efficiency of near surface mounted technique using fiber reinforced polymers for the flexural strengthening of RC beams. *Construction and Building Materials* Vol.118, p. 52–62.
- 2 Luccioni, B., Rougier, V. (2005). A plastic damage approach for confined concrete. *Computer and Structures*, Vol. 83, p. 2238–2256.
- 3 Rougier, V., Luccioni B. (2007). Numerical assesment of FRP retrofitting systems for reinforced concrete elements. *Engineering Structures*, Vol. 29, p. 1664–1675.
4. Benjeddou, O., Ouezdou, M., Bedday, A. (2007). Damaged RC beams repaired by

bonding of CFRP laminates. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, p.1301–1310.

5 Kulkarni, S. Calibration of flexural desing of concrete members reinforced with FRP bars. (2006). Ph.D. thesis, University of Pune, India.

6 Shahawy, M., Beitelman, T. (1999). Static and fatigue performance of RC beams strengthened with CFRP laminates. *Journal of Structural Engineering* Vol.125, p. 613–210.

7 American Concrete Institute. (2008). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. ACI 440.2R-08.

8 Teng, J., Chen, J., Smith, S. and Lam, L. (2002). FRP strengthened RC structures. John Wiley & Sons, Ltd, UK.

9 Wang Y., Chen C. (2003). Analytical study on reinforced concrete beams strengthened for flexure and shear with composite plates. *Composite Structures*, Vol. 59, p. 137–48.

10 Ceroni, F. (2010). Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, p. 1547–1559.

11 Dola, T., Ahmed, Z. (2015). A Comparative Study on Beam Strengthened with Externally Bonded FRP Material. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 6, p. 3125-1332.

12 Badawi, M., Soudki, K. (2009). Flexural strengthening of RC beams with prestressed NSM CFRProds – Experimental and analytical investigation. *Construction and Building Materials* Vol.23, p. 3292–3300.

13 Kothandaraman, S., Vasudevan G. (2010). Flexural retrofitting of RC beams using external bars at soffit level – An experimental study. *Construction and Building Materials* Vol. 24, p 2208–2216.

14 Al-Mahmoud, F., Castel, A., François R., Tourneur, C. (2011). Anchorage and tension-stiffening effect between near-surface-mounted CFRP rods and concrete. *Cement & Concrete Composites* Vol. 33, p 346–352.

15 Kotynia, R. (2012). Bond between FRP and concrete in reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted and externally bonded reinforcement. *Construction and Building Materials* Vol. 32, p. 41–54.

16 De Lorenzis, L., Teng, JG. (2007). Near-surface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures. *Composites: Part B*, Vol.38, p.119–143.

17 Sharaky, I., Torres, L., Comas, J., Barris, C. (2014). Flexural response of reinforced concrete (RC) beams strengthened with near surface mounted (NSM) fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Composite Structures*, Vol. 109, p. 8–22.

18 Cirsoc 201-2005. (2005) Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón.

- 19 Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. (1985). Hormigón de cemento Portland. Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorio. IRAM 1534.
- 20 Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. (2009). 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. IRAM 1865.
- 21 American Concrete Institute. (2006). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars, ACI 440.1R-06.
- 22 Al Mahmoud, F., Castel, A., François R., Tourneur, C. (2009). Strengthening of RC members with near-surface mounted CFRP rods. Composites Structures, Vol. 91, p.138–47.
- 23 Choi, H., West J., Soudky, K. (2011). Partially bonded near-surface mounted CFRP bars for strengthened concrete T-beams. Construction and Building Material, Vol. 25, p.2441–2449.
- 24 Soliman, S., El Salakawy, E., Benmokrane, B. (2010). Flexural behaviour of concrete beams strengthened with near surface mounted fibre reinforced polymer bars. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 37, p. 1371–82.