

## COMPORTAMIENTO A FLEXION DE VIGAS DE H<sup>o</sup> A<sup>o</sup> DAÑADAS Y REPARADAS CON MATERIALES COMPUESTOS

Dr. Rougier, Viviana; Ms. Toledo, Mario; Dr. Escalante, Mario; Ing. Villalba, Inés  
Grupo de Métodos Numéricos (GMN), Facultad Regional C. del Uruguay, UTN

### RESUMEN

El refuerzo de estructuras de hormigón armado con polímeros reforzados con fibras (PRF), se ha convertido en una alternativa muy interesante para la rehabilitación o reparación de estructuras dañadas. En este caso los materiales compuestos debido a su elevada resistencia a tracción, bajo peso, resistencia a la corrosión, buena durabilidad y fácil colocación, pueden ser usados exitosamente como refuerzo externo. El refuerzo de vigas de hormigón armado con dichos materiales mejora la resistencia a flexión y corte. El refuerzo con PRF puede ser aplicado externamente o mediante una técnica llamada NSM, por sus siglas en inglés (Near Surface Mounted), que consiste en colocar barras de PRF en orificios previamente aserrados en la superficie del hormigón.

En este trabajo se presentan los resultados experimentales del comportamiento a flexión de vigas de hormigón armado dañadas y reparadas con barras y láminas de PRF. Se analizan para ambos tipos de refuerzo diagramas carga-desplazamiento, cargas últimas y modos de falla. Adicionalmente, se presenta la modelación numérica de los ensayos realizados y se comparan los resultados numéricos con los experimentales.

### ABSTRACT

*Strengthening reinforced concrete (RC) structures with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) composites is becoming an attractive alternative for rehabilitation or repairing of damaged structures. In this case, composite materials are an excellent option to be used as external reinforcing because of their high tensile strength, light weight, resistance to corrosion, high durability, and of easy installation. Retrofitting of reinforced concrete beams with composite materials enhances the flexural capacity and shear strength. FRP strengthening can be applied as externally bonded FRP laminates or near surface mounted (NSM) FRP reinforcement. In the NSM technique, the FRP reinforcement is epoxy bonded inside grooves pre-cut on the concrete surface.*

*In the present work the experimental results of flexural behavior of damaged reinforced concrete beams repaired with FRP laminates and NSM bars are presented. Load-vs-deflection curves, ultimate loads and failure modes for both kind of retrofitting, are analyzed. Numerical simulation of carried out tests is additionally presented. Then experimental and numerical values are compared.*

## INTRODUCCIÓN

El refuerzo externo de elementos estructurales de hormigón armado mediante materiales compuestos (PRF) es una solución muy utilizada para la rehabilitación de estructuras existentes; la mayoría de las aplicaciones están relacionadas con el refuerzo a corte y flexión y confinamiento de columnas<sup>[1]</sup>.

En el caso de vigas de hormigón armado, se ha demostrado que el refuerzo externo de elementos estructurales de hormigón armado sometidos a esfuerzos de flexión utilizando materiales de matriz polimérica reforzados con fibras, es un método efectivo que permite incrementar la capacidad estructural de dichos elementos [2,3,4,5,6,7]

El refuerzo puede hacerse con placas prefabricadas, o puede ser preparado in situ mediante el proceso denominado húmedo. En el primer caso las placas se cortan de acuerdo al tamaño requerido y se pegan a la parte inferior de la viga. Esta técnica asegura un mayor grado de uniformidad del material y control de calidad. El proceso húmedo proporciona mayor flexibilidad. La resina se aplica a la superficie del hormigón mientras se impregnan las capas de tejido que luego son adheridas al elemento de hormigón mediante rodillos. La resina forma en este caso la matriz del PRF y ello crea una fuerte adherencia con la viga de hormigón armado. Este método, sin embargo, es sensible a las irregularidades de la parte inferior de la viga y ello puede provocar el despegue del laminado en los extremos. Para prevenir esto último se pueden colocar anclajes mecánicos de acero o PRF en forma de U, que pueden ser pegado o clavados.

Existe una tercera técnica, que consiste en colocar barras de PRF en orificios previamente aserrados en la cara traccionada del hormigón [8,9,10,11,12]. Resultados experimentales, analíticos y numéricos obtenidos en los últimos años, han demostrado la efectividad de esta técnica en lo que respecta a incrementos de la resistencia a flexión y corte de vigas de hormigón armado. De todos modos las guías de diseño existente enfatizan la necesidad de continuar realizando más investigaciones.

Por otro lado, el refuerzo con barras de PRF, tiene ventajas con respecto a los sistemas tradicionales de refuerzo externo con laminas o tejido de FRP, a saber: (1) mejor adherencia a la superficie de hormigón, pues las barras quedan completamente embebidas en el adhesivo y (2) el refuerzo queda protegido por el recubrimiento de hormigón y menos expuesto a daños accidentales. Los principales factores que pueden afectar el comportamiento de esta técnica son la interacción entre la barra de refuerzo y el material de llenado, 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 viga [12].

Si bien los datos experimentales son valiosos para entender el comportamiento del sistema de refuerzo con FRP, se necesitan también soluciones numéricas y analíticas que permitan obtener una mejor comprensión y predicción del

comportamiento y mecanismos de fallas de vigas reforzadas y/o reparadas utilizando dicha técnica.

En este trabajo se presentan los resultados experimentales y numéricos de ensayos realizados en vigas de hormigón armado, dañadas y luego reparadas con barras y láminas de polímeros reforzados con fibras. El estudio se centra en el comportamiento a flexión de dichas vigas en términos de diagramas carga-desplazamiento, modos de falla, capacidad resistente y patrón de fisuración. En primer lugar se describe el programa experimental desarrollado, los ensayos realizados y sus resultados. Luego se describen los modelos numéricos utilizados para el hormigón, el acero y los PRF. Finalmente se comparan los resultados obtenidos numéricamente con los valores experimentales a los efectos de evaluar la habilidad del modelo para reproducir el comportamiento del sistema de refuerzo con materiales compuestos.

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

A continuación se detallan los especímenes ensayados, características de los materiales y procedimiento de ensayo e instrumentación.

### Descripción de los especímenes ensayados

El programa experimental que forma parte de un proyecto de investigación en desarrollo, 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 18 probetas de sección rectangular de: 80 x 160 mm y 1100 mm de longitud. En esta primera fase del proyecto, se ensayaron 6 vigas, dos denominadas de referencia o control y las restantes dañadas y reparadas con dos tipos de PRF. Las vigas de referencia se ensayaron hasta rotura, en tanto las restantes se dañaron hasta un 90 % de la carga de falla de las vigas de referencia, se repararon y se volvieron a ensayar hasta la falla. Se adoptó para todas las vigas la misma armadura longitudinal y transversal: barras  $\phi$  del 8 mm para la armadura de tracción, barras  $\phi$  del 6 para la armadura constructiva, y estribos  $\phi$  del 4.2 cada 75 mm como armadura a corte. En la Figura 1 se muestran los detalles de armadura y sección de las vigas y en la Tabla 1 se resumen la denominación y características de los especímenes ensayados hasta el momento.

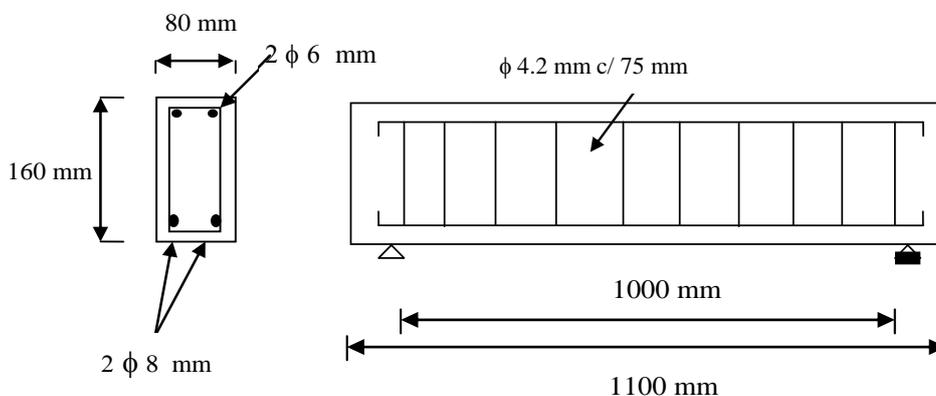


Figura 1. Detalle de viga de hormigón

Denominación	Características
V1	Viga no reparada- de Referencia o control
V2	Viga no reparada- de Referencia o control
V3	Viga dañada y reparada con láminas de PRFC
V4	Viga dañada y reparada con láminas de PRFC
V5	Viga dañada y reparada con barras de PRFV
V6	Viga dañada y reparada con barras de PRFV

TABLA 1 – Detalle de las vigas ensayadas con su denominación y características

### Características de los materiales

El hormigón utilizado en la ejecución de las vigas se dosificó en planta hormigonera de acuerdo al reglamento CIRSOC 201-2005<sup>[13]</sup>, en función de obtener una resistencia a compresión a los 28 días de 30 MPa. Se trabajó con agregados de la zona y cemento Portland normal. Los especímenes fueron hormigonados y curados en planta.

Las características mecánicas del hormigón se determinaron mediante ensayos de compresión uniaxial sobre probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm, según norma IRAM 1534<sup>[14]</sup>. Se obtuvo una resistencia media a compresión del hormigón a los 7 y 28 días de 23.06 MPa y 38.88 MPa, respectivamente.

Para las armaduras principal y constructiva se empleó acero de Dureza Natural Acindar denominado comercialmente DN A-42. Para los estribos se usó acero tipo T 500 de diámetro nominal 4.2 mm.

El refuerzo externo de las vigas se realizó con láminas de polímeros reforzados con fibra de carbono de alto desempeño y barras de fibra de vidrio (fibrobarras), que se adhirieron externamente a la superficie del hormigón mediante el empleo de una formulación epoxídica. Se buscó tener una cuantía equivalente de ambos tipos de refuerzo. En la Tabla 2 se muestran las propiedades mecánicas del adhesivo epoxi, de la lámina de PRFC y las fibrobarras, datos suministrados por los fabricantes. En la Figura 2 se pueden ver los dos tipos de refuerzo, láminas y barras, y sus dimensiones.

Propiedades	Resina epoxy	Lámina de PRFC	Fibrobarras
Módulo de Elasticidad longitudinal (MPa)	12800	165000	45000
Resistencia a compresión (MPa)	95	-	-
Resistencia longitudinal a tracción (MPa)	-	2800	740
Deformación específica longitudinal [%]	-	1.7	-

Tabla 2 – Propiedades mecánicas del material de reparación



Figura 2. Láminas de PRFC y barras de fibra de vidrio

### Procedimiento de reparación

La técnica de reparación con platinas 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 fibrobarras, se usaron barras de 12mm de diámetro que se colocó en un orificio previamente aserrado en la cara

traccionada de la viga. Las dimensiones del orificio, 20 mm de ancho x 20 mm de profundidad, se determinaron siguiendo las recomendaciones de la Norma ACI 440.2R-08<sup>[3]</sup>. El orificio 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 es laboriosa y debe realizarse con sumo 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.

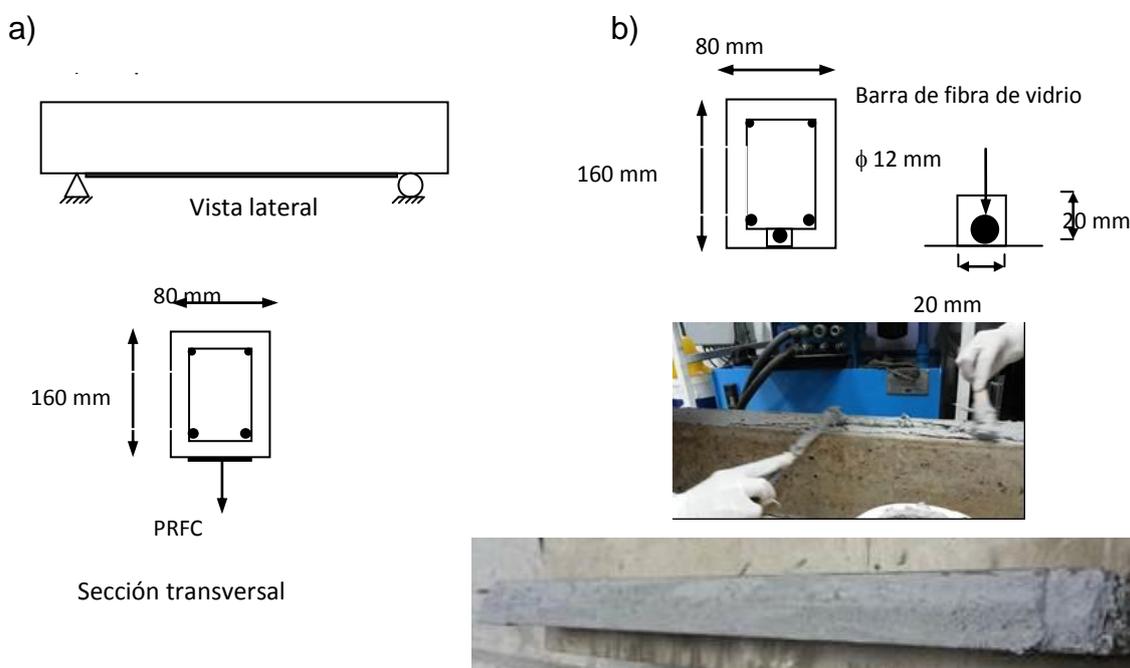


Figura 3. Tipos de reparación. a) Reparación con láminas de PRFC. b) Reparación con barras de fibras de vidrio

### Procedimiento de ensayo e instrumentación

Todos los ensayos realizados consistieron en la aplicación de cargas cuasiestáticas monótonas crecientes en los tercios de la luz. 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 Shimatzu con sistema hidráulico y posibilidad de desarrollar una carga vertical nominal máxima de 1000 kN. Para la medición de los desplazamientos se utilizó un reloj comparador (flexímetro) 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 por seguridad del mismo.

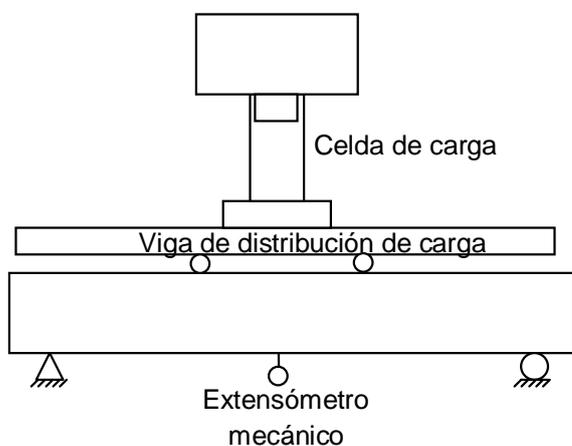


Figura 4. Ensayo de flexión. Esquema de ensayo e instrumentación

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados obtenidos experimentalmente. Se analizan cargas y modos de falla de las vigas dañadas y reparadas con láminas de PRFC y barras de fibra de vidrio.

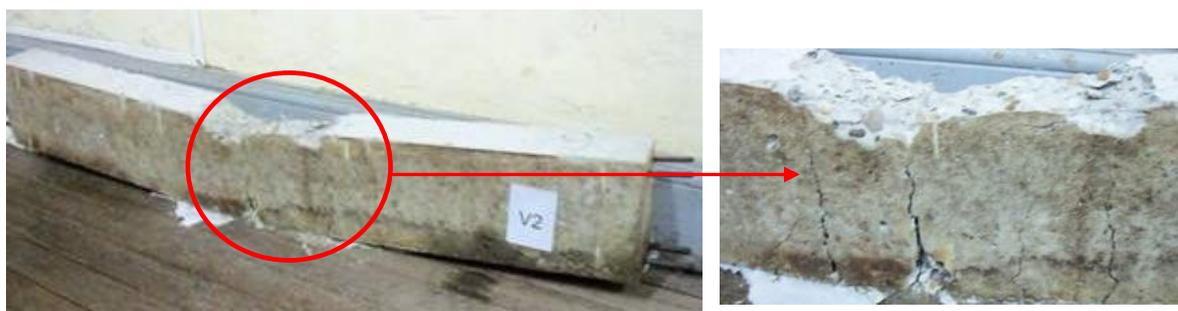
### Cargas y modos de falla

En la Tabla 4 se presentan los valores de carga máxima, el incremento de la resistencia debido a la reparación con los PRF y los modos de falla. Las vigas de referencia fallaron por rotura del hormigón en compresión con fluencia de la armadura de acero. En las vigas reparadas con láminas de PRFC la falla se produjo por el despegue del laminado que comenzó en la mitad de la luz (Figura 5). Este mecanismo de rotura puede ser descrito del siguiente modo: cuanto mayor es la fisura formada en el hormigón, las tensiones de tracción generadas por el hormigón fisurado se transfieren a la placa o lámina de PRF. En consecuencia se producen tensiones interfaciales locales muy altas entre el refuerzo y el hormigón en las cercanías de la fisura. Con el incremento de la carga aplicada, las tensiones de tracción en el refuerzo y las tensiones interfaciales entre el hormigón y aquél en las cercanías de la fisura también aumentan. Cuando estas tensiones alcanzan valores críticos, se inicia el despegue del refuerzo en la fisura y se propaga hacia uno de los extremos del mismo. Se produce una rotura frágil y repentina. En el caso de la V3, no sólo se recuperó la resistencia original, tomando como referencia el promedio de los valores de carga última de las vigas V1 y V2, sino que además la superó en un 4 % aproximadamente. La viga V4 en cambio, no logró recuperar la capacidad portante alcanzada por las vigas de referencia V1 y V2. Las vigas reparadas con la barra de fibra de vidrio, tuvieron un mejor comportamiento en términos de carga última y ductilidad. En el caso del espécimen V5, la falla se produjo por compresión del hormigón. En la viga V6, la rotura fue provocada por una falla en el apoyo. Esto

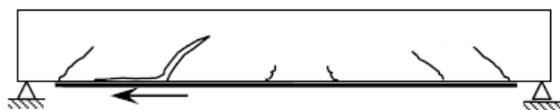
se debió a que en el momento del aserrado del orificio donde se colocó la barra de refuerzo, se dañó accidentalmente la zona de dicho apoyo. En ningún caso se despegó el refuerzo, además se recuperó la capacidad resistente inicial y lograron incrementos de carga última del 48% y del 38 % aproximadamente (vigas V5 y V6, respectivamente). En la Figura 5 se muestra el tipo de falla de una viga de referencia o control V2 y de las vigas reparadas con láminas de PRFC y con fibrobarras, V4, V5 y V6, respectivamente.

Viga	$P_{\text{máx}}$ (kN)	$\Delta P_{\text{máx}}$ (%)	Modos de falla
V1	41.20	-	Rotura por compresión
V2	42.70	-	Rotura por compresión
$P_{\text{Promedio V1 y V2}} = 41.95$			
V3	43.80	4	Despegue del laminado
V4	24.00	-	Despegue del laminado
V5	62.20	48	Rotura por compresión
V6	58.10	38	Falla en el apoyo

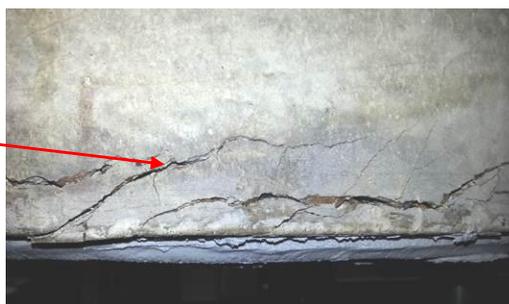
Tabla4 – Resultados experimentales



V2: viga de referencia



V4: viga reparada con láminas de PRFC



V5: viga reparada con barras de fibra de vidrio



V6: viga reparada con barras de fibra de vidrio

Figura 5. Modos de falla de vigas de referencia y vigas reparadas

## ANÁLISIS CON ELEMENTOS FINITOS

A fin de modelar el comportamiento no lineal de vigas H<sup>0</sup>A<sup>0</sup> reparadas con material compuesto, se construyó un modelo tridimensional utilizando el programa de elementos finitos Abaqus<sup>[15]</sup>. Se modelaron las vigas de referencia o control y los especímenes reparados con láminas de polímeros reforzados con fibras de carbono.

### Modelos constitutivos y propiedades mecánicas

#### Hormigón:

Para modelar el comportamiento del hormigón armado existen diferentes enfoques y modelos constitutivos que caracterizan su comportamiento. Uno de los aspectos que debe tener en cuenta un modelo de hormigón es su capacidad para capturar características destacadas tales como el ablandamiento (comportamiento post-pico). En trabajos previos<sup>[7]</sup> se consideró la respuesta del hormigón en compresión a través de un modelo de plasticidad perfecta Drucker-Prager. Otro enfoque es considerar un modelo de daño plástico<sup>[16,17]</sup>, disponible en la librería de Abaqus<sup>[15]</sup> (Concrete Damage Plasticity). El modelo considera los fenómenos más importantes del hormigón tanto en tracción como en compresión y fue creado para estudiar los efectos de daños irreversibles asociados a los mecanismos de fallos en el hormigón. El comportamiento no lineal del material puede ser atribuido a dos procesos mecánicos combinados: plasticidad y daño. A fin de representar la respuesta uniaxial en tracción y compresión el modelo supone dos mecanismos de falla diferenciado para tracción y compresión: la fisuración y el aplastamiento respectivamente. La propagación de la fisura en estado de tracción se modela usando mecanismos de daño continuo isótropo.

El modelo de daño plástico requiere definir los valores de módulo elástico, relación de Poisson, parámetros de daño-plástico y descripción del comportamiento (Curvas  $\sigma - \varepsilon$ ) en tracción y compresión. Los parámetros de plasticidad: ángulo de dilatación, excentricidad de flujo potencial, relación de tensiones (compresión equibiaxial inicial dividida por la compresión uniaxial inicial:  $f_{bo}/f_{co}$ ), relación del segundo invariante de tensión sobre el meridiano de tracción (Kc) la viscosidad fueron adoptados de acuerdo a la documentación Abaqus. En la Tabla 5 se resumen estos parámetros.

Existen diferentes propuestas para calibrar la curva tensión-deformación  $\sigma - \varepsilon$  de compresión uniaxial del hormigón partiendo de los datos del problema ( $f'_c$ ,  $E_c$ , deformación  $\varepsilon_o$ ). En este trabajo se utilizó la propuesta de Saenz, L.<sup>[18]</sup>. En la Figura 6 se muestra la curva obtenida a partir de los datos de laboratorio.

A fin de considerar el comportamiento uniaxial a tracción se considera una respuesta elástica lineal hasta alcanzar el valor de la falla  $f_{to}$ . Para capturar el comportamiento post pico a tracción del hormigón se considera el criterio de la energía de fractura  $G_f$ <sup>[19]</sup>. Se adoptó una Energía de fractura  $G_f = 90 \text{ J/m}^2$ . En Figura

7 se muestra la curva que resume el comportamiento post crítico a tracción.

$E_c$ [MPa]	$\mu$	$f'_c$ [MPa]	$\psi$ [°]	EFP	$f_{bo}/f_{co}$	$K_c$
26000	0.2	30	37	0.1	1.16	0.6667

$E_c$ : Módulo de Elasticidad;  $f'_c$  : Resistencia a la compresión;  $\mu$  : Módulo de Poisson , $\psi$  : Angulo de dilatancia ,EFP: excentricidad de flujo potencial

Tabla 5 - Parámetros modelo de daño plástico Hormigón

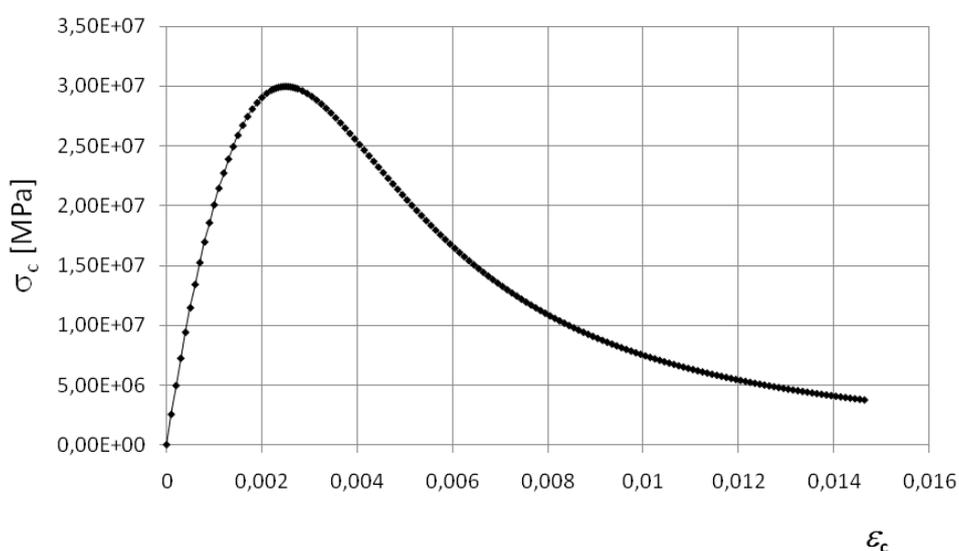


Figura 6. Curva Tensión – Deformación ( $\sigma_c$ - $\epsilon_c$ ) del hormigón

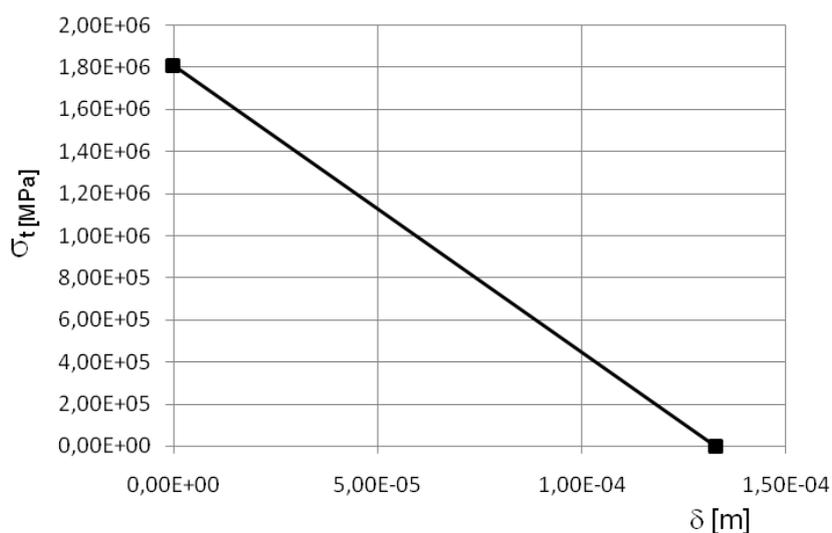


Figura 7. Tensión post-falla versus desplazamiento

### Material compuesto (PRFC):

Se consideraron dos alternativas para modelar las láminas de polímeros reforzados con fibras unidireccionales de carbono (PRFC). Una de ellas, fue considerar el PRFC como lineal elástico isótropo hasta la falla, y la otra alternativa, como un material ortótropo lineal elástico. Si bien el comportamiento unidireccional es fundamentalmente ortótropo, el material está siendo tensionado en la dirección de la fibra por lo que es probable que solo el módulo en la dirección de la fibra sea el parámetro determinante. En la Tabla 6 se resumen las propiedades adoptadas para el modelo isótropo y para el modelo ortótropo, siendo  $E_{11}$ ,  $E_{22}$  y  $E_{33}$  los módulos elásticos en las direcciones de la fibra (1-1), y transversal a la fibra (2-2 y 3-3),  $G_{12}$ ,  $G_{13}$ , y  $G_{23}$  los módulos de corte y  $\mu_{12}$ ,  $\mu_{13}$  y  $\mu_{23}$  los módulos de Poisson correspondientes.

Modelo PRFC isótropo		Modelo PRFC ortótropo						
$E_{11}$ [GPa]	$\mu$	$E_{11}$ [GPa]	$E_{22} = E_{33}$ [GPa]	$G_{12} = G_{13}$ [GPa]	$G_{23}$ [GPa]	$\mu_{12}$	$\mu_{13}$	$\mu_{23}$
165	0.3	165	9.65	5.2	3.4	0.3	0.3	0.45

Tabla 6- Propiedades mecánicas de PRFC.

### Interfaz hormigón-PRFC:

También se consideraron dos alternativas, en un primer caso la interfaz se modeló con una restricción de pegado perfecto, y en el segundo se utilizó un modelo de zona cohesiva. Los posibles modos de deslizamiento del material pueden ocurrir por falla de la interfaz hormigón-acero, separación PRFC-adhesivo y/o separación hormigón-adhesivo. Es usual considerar un pegado perfecto en la interfaz PRFC-hormigón, sin embargo, de acuerdo a lo mostrado en la etapa de experimentación, el despegue “debonding” del laminado, fue el tipo de falla dominante. En este trabajo se utilizó un modelo bilineal de tracción-separación disponible en la biblioteca de Abaqus y que se muestra en Figura 8, donde  $\tau$  es la tensión de tracción efectiva y  $\delta$  el desplazamiento de apertura efectiva. Los parámetros del modelo son: la rigidez inicial  $K_0$  (adoptada en este trabajo de acuerdo a Guo Z.G. et. al, 2005<sup>[20]</sup>) que es la relación entre la tensión de tracción y el desplazamiento de apertura de fisura efectiva  $\delta_0$ ; el desplazamiento de apertura característico en fractura  $\delta_f$  y la energía necesaria para la apertura de la fisura  $G_{cr}$  y representa el área bajo la curva mencionada. De acuerdo a investigaciones<sup>[21]</sup> se proponen los siguientes valores para la  $\tau_{max}=1,5\text{MPa}$ ,  $G_{cr}= 900 \text{ J/m}^2$ .

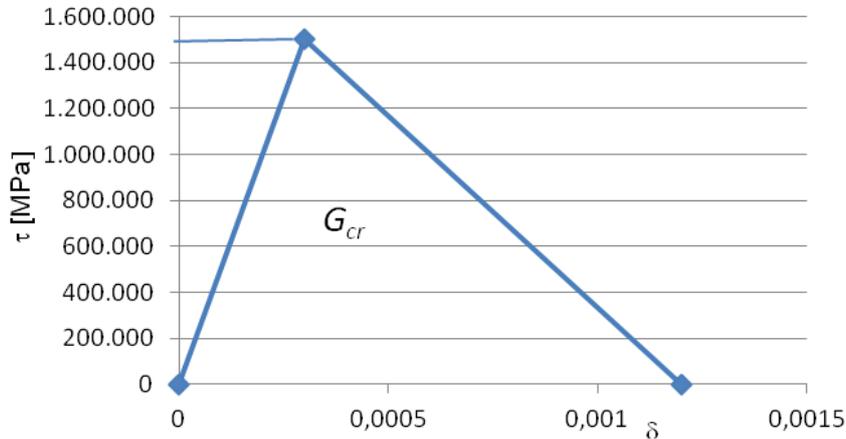


Figura 8. Ley Tracción- separación bilineal

La iniciación del daño comienza cuando la tensión y/o deformación satisface cierto criterio de iniciación del daño que se especifique. Varios criterios de iniciación de daño están disponibles en la biblioteca de Abaqus Hibbitt et.al, 2000<sup>[22]</sup>, en particular se adoptó un criterio de tensión nominal cuadrática definida por:

$$\left\{ \frac{\sigma_n}{\sigma_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_n}{\tau_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_t}{\tau_t^0} \right\}^2 = 1 \tag{1}$$

Donde  $\sigma_n$  es la tensión de tracción cohesiva,  $\tau_s$  y  $\tau_t$  son las tensiones de corte de la interfase, y  $n$ ,  $s$  y  $t$  se refieren a las direcciones de las componentes de tensión como se muestra en la siguiente Figura 9.

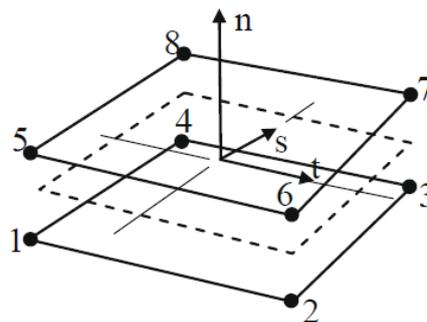


Figura 9. Elementos cohesivo 3D de 8 nodos

La evolución del daño se expresó en términos de la energía liberada, en este trabajo se utilizó el criterio de fractura de Benzeggagh-Kenane, que se resumen en la siguiente expresión:

$$G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left\{ \frac{G_s}{G_T} \right\}^n = G^c \quad (2)$$

Donde  $G_s = G_s + G_t$ ,  $G_T = G_n + G_s$ ,  $\eta$ ,  $G_n^c$  y  $G_s^c$  son parámetros del material.

### Geometría y elementos utilizados:

En trabajos previos<sup>[7]</sup> se simuló las armaduras de refuerzo con elementos continuos, esta metodología generó un problema en la discretización y exige que se utilicen elementos tetraédricos a fin de compatibilizar entre la geometría circular de las barras y la geometría rectangular de la viga. En este trabajo se resolvió este problema considerando superficies embebidas en los elementos sólidos. Por ello, a fin de modelar la viga de hormigón, placa de apoyo, y material compuesto se utilizaron elementos tipo ladrillos sólidos 3D de 8 nodos de integración reducida denominado C3D8R. Estos elementos pertenecen a la familia de los elementos continuos con tres grados de libertad por cada nodo en las tres direcciones x, y, z; de 1er orden de interpolación (interpolación lineal); con integración reducida lo que permite un ahorro computacional.

La capa de interfaz se modeló utilizando elementos cohesivos tridimensionales de 8 nodos denominados COH3D8. Estos elementos están compuestos de dos superficies separadas (Figura 9), el movimiento relativos de las partes superior e inferior del elemento representan la apertura o cierre de la interfaz.

Debido a la geometría de la viga, la simetría de las condiciones de borde y de carga, se modeló sólo un cuarto de la viga como se muestra en la Figura 10.

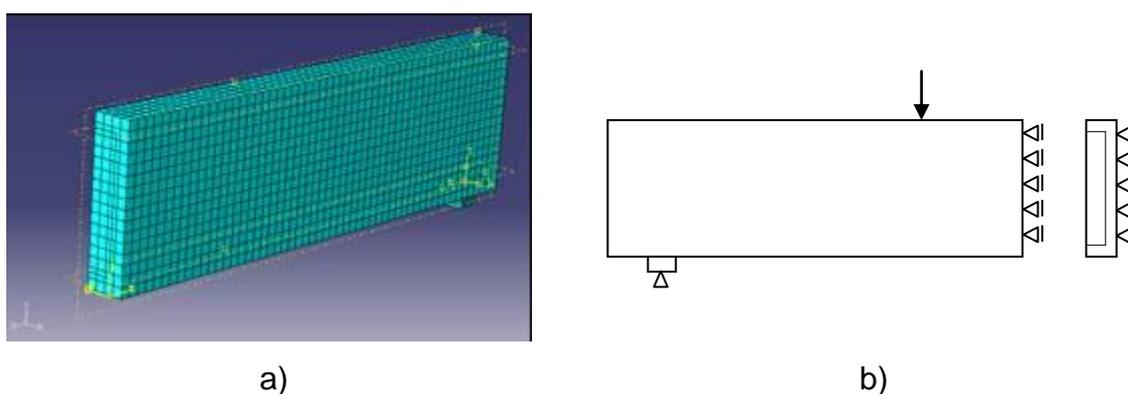


Figura 10. Modelo de elementos finitos: a) discretización; b) condiciones de borde

## COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES

En la Figuras 11 se muestran las curvas cargas-deflexión obtenidas a partir de los resultados experimentales y el análisis con el método de elementos finitos de las

vigas V1 y V2 de control.

En la Figura 12 se muestran las curvas carga-deflexión máxima ( $P-\delta$ ) obtenidas para las vigas reparadas con material compuesto (PRFC). En la Figura se comparan los valores experimentales obtenidos para las vigas V3 y V4 y se muestra los resultados numéricos obtenidos: a) Modelo sin reforzar (hasta la rotura); b) Modelo: etapa de carga-descarga: a fin de dañar la viga; y c) Modelo dañado y reparado con planchuelas de material compuesto. En la gráfica se observa que los resultados numéricos del modelo previamente dañado y reparado aproximan razonablemente con los resultados experimentales de la viga V3. Tanto los resultados numéricos como experimentales de la viga reparada evidencian un aumento en la pendiente y una carga de rotura mayor a la de la viga sin reparar.

En la Figura 13 se muestra el contorno de tensiones máximas que se observan en el modelo numérico de la viga reparada.

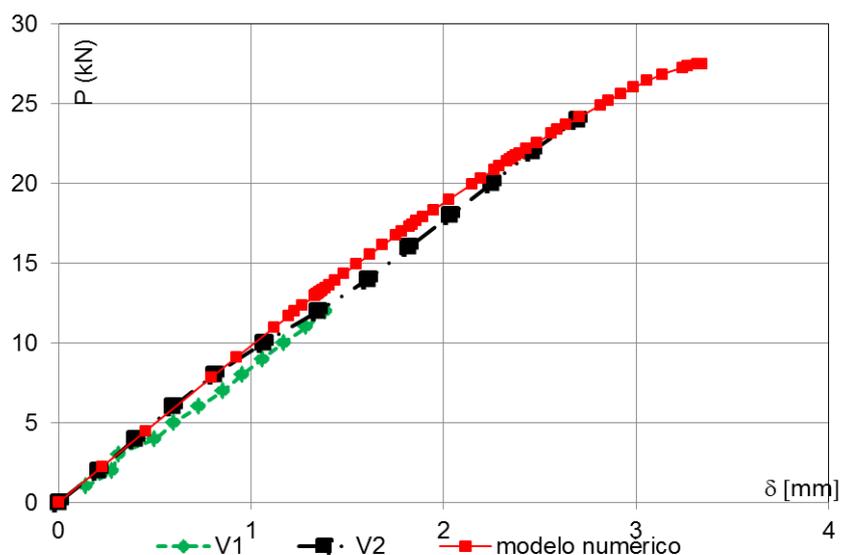


Figura 11. Curva  $P-\delta$  vigas de referencia o control (V1 y V2)

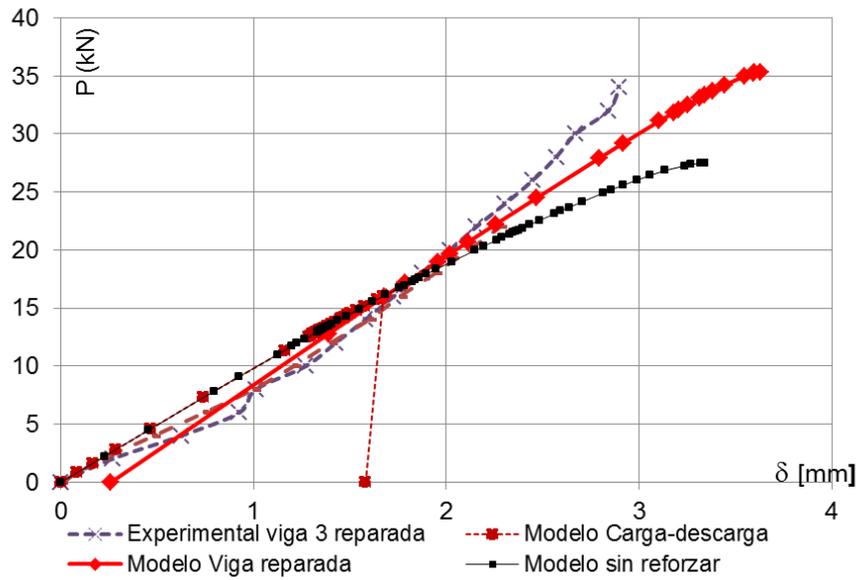


Figura 12. Curva P- $\delta$  viga reparada (V3)

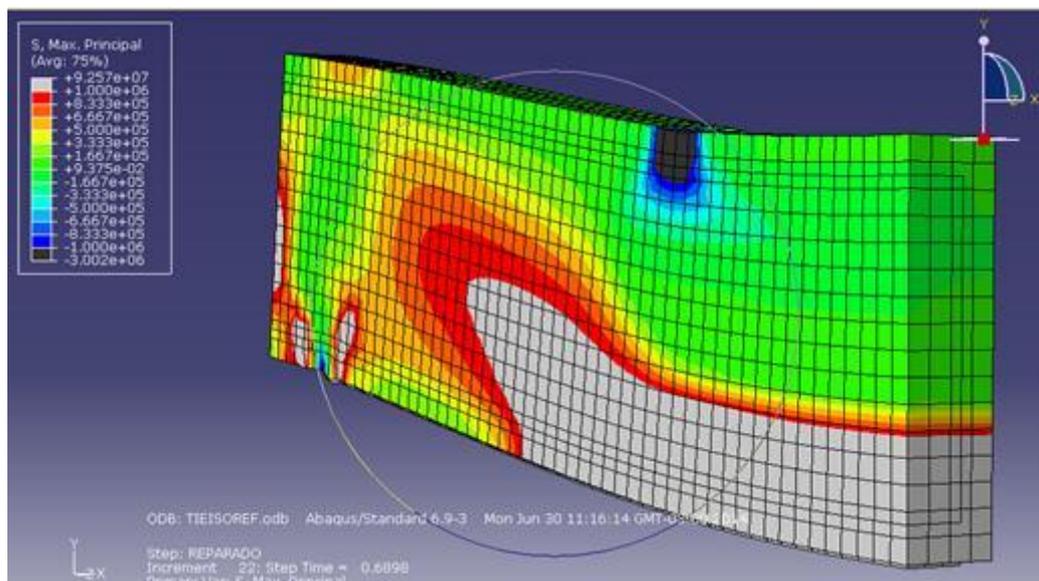


Figura 13. Contorno de tensiones de viga reparada

## CONCLUSIONES

Se han presentado resultados de ensayos de flexión de vigas de hormigón armado dañadas y luego reparadas con láminas y barras de materiales compuestos, así como también resultados de la simulación numérica de dichos ensayos. Si bien el número de ensayos realizados es modesto, del análisis y la comparación de dichos resultados se puede decir lo siguiente:

De acuerdo al estudio experimental, la reparación con láminas de PRFC no fue eficiente en la reparación de vigas dañadas. Ello se debió al tipo de falla frágil causado por el despegue del laminado que apenas permitió recuperar la capacidad portante de la viga dañada, en un caso (V3), mientras que en el otro (V4) la falla se produjo prematuramente a una carga muy baja. Por el contrario, el refuerzo con barras de fibras de vidrio, mejoró el comportamiento de las vigas reparadas en lo que respecta a carga última y ductilidad. Sin embargo esta técnica de refuerzo y/o reparación fue laboriosa y se debió realizar con extremo cuidado. La técnica de refuerzo y/o reparación con PRF resultó más rápida y sencilla de ejecutar.

El análisis de elementos finitos no lineal pudo predecir razonablemente el comportamiento flexional de las vigas de hormigón armados reforzadas y/o reparadas con láminas de PRFC. Este análisis fue validado por comparación con resultados experimentales.

**Colaboradores:** Se destaca la colaboración de los Ingenieros Ricardo Gómez y Pedro Becker en la puesta a punto y realización de los ensayos. Así como también la de los alumnos becarios de Grupo de Investigación de Métodos Numéricos de la Facultad Regional Concepción del Uruguay, UTN, María Alejandra Grosso, Juan Pablo Buenahora y Martín Biaturi.

**Agradecimientos:** Se agradece muy especialmente a los Ingenieros Guillermo y Eduardo Bevilacqua por su valiosa colaboración y asesoramiento en las tareas de dosificación y elaboración del hormigón, colado y curado de los especímenes.

### Referencias:

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

[2] Shahawy M, Beitelman T. (1999). Static and fatigue performance of RC beams strengthened with CFRP laminates. *Journal of Structural Engineering* Vol.125, p. 613–21

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

[4] Teng, J., Chen, J., Smith, S. and Lam, L. (2002). FRP strengthened RC structures.

[5] 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.

[6] O. Benjeddou, O., Ouezdou, M., Bedday, A. (2007). Damaged RC beams repaired by bonding of CFRP laminates. *Construction and Building Materials* Vol. , p. 1301-1310.

[7] Toledo, M., Rougier, V., Nallim, L. (2010). Análisis numérico-experimental de vigas de hormigón armado reforzadas con materiales compuestos”, XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, San Juan, Argentina.

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

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Hawileh, R. (2012). Nonlinear finite element modeling of RC beams strengthened with NSM FRP rods. *Construction and Building Materials* Vol. 27, p. 461–471

[13] ) Cirsoc 201-2005. Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón, (2005).

[14] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. (1985). Hormigón de cemento Portland. Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorio. IRAM 1534

[15] Abaqus, User’s manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (2007)

[16] Oller S., Lubliner, J., J. Oliver, and E. Oñate, “A Plastic-Damage Model for Concrete,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 25, pp. 299–329, 1989.

[17] Oller S. Modelos constitutivos. Curso sobre métodos numéricos para el cálculo y diseño en ingeniería. UPC, España, 1996.

[18] Saenz, LP. Discussion of Equation for the stress-strain curve of concrete by Desayi P, Krishnan S. *ACI Journal* 1964; 61: 1229-35.

[19] Hillerborg, A., M. Modeer and P. Petersson. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture Mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, vol. 6, pp. 773-782, 1976.

[20] Guo ZG, Cao SY, Sun W.M, Lin X.Y. Experimental study on bond stress-slip behaviour between FRP sheets and concrete. In: *FRP in construction, proceedings*

of the international symposium on bond behaviour of FRP in structures; 2005. P. 77-84.

[21] Obaidat Y.T., Heyden S., Dahlblom O. The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling retrofitted RC beams with FEM. *Comp. Structures* 92, 1391-1398, 2010.

[22] Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc. *Abaqus Theory manual, User manual and Example Manual*. 2000.