

USO DE LÁMINAS PULTRUÍDAS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO PARA INCREMENTAR LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO

STRENGTHENING CONCRETE BEAMS WITH FIBERGLASS REINFORCED POLYMER LAYERS

A. Busnelli, R. López, J. Adué

Recibido 29/02/2016; Aprobado: 05/05/2016

RESUMEN

Por medio de este artículo se presenta el estudio que se viene realizando en la Facultad de Ingeniería de Rosario, en referencia al uso de láminas pultruídas de Polímeros Reforzados con Fibra de Vidrio (PRFV) para incrementar la resistencia a flexión de vigas de hormigón armado, siendo dichas láminas unos de los elementos de materiales compuestos más empleados para este tipo de refuerzos. El material de mayor difusión a nivel mundial que lo constituye son las de fibras de carbono, pero su elevado costo desalienta la utilización en la reparación de estructuras en el mercado argentino. Uno de los objetivos de este programa de investigación, es comprobar la posibilidad de sustitución de dichas láminas por elementos de fibra de vidrio de fabricación nacional significativamente más económicos. Los resultados obtenidos en los ensayos demostraron la factibilidad de esta alternativa. Además, el mayor espesor de las láminas de fibra de vidrio permite el uso de anclajes adicionales abulonados, que otorgan al sistema capacidad portante post crítica y ductilidad, características muy necesarias, por ejemplo, para las estructuras en zona sísmica.

Palabras clave: Láminas pultruídas, fibra de vidrio, refuerzo de flexión

*Mag. Ingeniero, profesor investigador en estructuras metálicas de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional del Rosario. Argentina. Correo: drbu@arnet.com.ar

**Ingeniero investigador. Jefe de Laboratorio de Estructuras del Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional del Rosario. Argentina. Correo: ruben@lopezre.com

*** Ingeniero investigador. Director del Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional del Rosario. Argentina. Correo: adue@fceia.unr.edu.ar

ABSTRACT

Through this article the study being done at the Faculty of Engineering of Rosario, referring to the use of sheets pultruded Reinforced Polymer Fiberglass (GRP) to increase the bending strength of reinforced concrete beams is presented, THESE layers are one of the elements of compound materials most commonly used in these type of reinforcements. The material most widely distributed worldwide that constitutes it is the carbon fibers, but its high cost discourages the use in the repair of structures in the Argentine market. One of the goals of this research program is to check the possibility of replacing such sheets by fiberglass elements of Argentinean production and significantly cheaper. The results of the tests demonstrated the feasibility of this alternative. In addition, the increased thickness of the sheets of fiberglass allows the use of additional bolted anchors, which give the system supporting capacity post critical and ductility, much needed features, for example, for structures in seismic zone.

Keywords: Pultruded plates, glass fibers, flexural strengthening

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los estudios realizados sobre el refuerzo de elementos en flexión mediante el empleo de materiales compuestos fibrorreforzados, han apuntado a las fibras de carbono por ser éstas las de mejores propiedades mecánicas [1]. Los productos más comunes que se comercializan son las telas con espesores del orden de décima de mm, así como, las láminas pultruídas cuyo espesor es de varios mm. La capacidad mecánica que aportan las telas a las vigas de hormigón armado es relativa por la escasa sección agregada, no ocurre lo mismo con el refuerzo de losas en la que el aporte relativo de sección resistente es mayor.

Por el contrario, la utilización de láminas pultruídas ha demostrado ser una solución muy efectiva para el refuerzo de vigas. La mayor cantidad de fibras aportadas permite incrementar notablemente la capacidad flexional de los elementos intervenidos. En Argentina, el alto costo de las fibras de carbono impidió una difusión masiva de su utilización en el mercado local, además, la mayoría de las intervenciones realizadas han sido con telas por volverse casi prohibitivo el uso de láminas [2].

Estas circunstancias, determinaron que en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional del Rosario, se profundizara el estudio de la aplicación de telas y perfiles pultruídos de fibras de vidrio. Estos productos son de fabricación nacional y tienen un costo muy inferior al de los elementos análogos realizados con fibras de carbono.

2. MATERIALES

- Hormigón y acero: Se utilizó hormigón H21 (Resistencia a la compresión a 28 días 21 MPa) armado con barras de acero ADN420 (Tensión de fluencia 420 MPa).

- Telas y láminas: Se utilizaron telas unidireccionales de fibra de carbono y de vidrio y láminas pultruidas de fibra de vidrio. En la Figura 1 se muestra las características de tejidos y láminas.

	Tejido de fibra de carbono	Lámina pultruida de fibra de vidrio
Módulo de elasticidad	240.000 MPa	34.000 MPa
Resistencia a tracción	3.800 MPa	244,7 MPa
Deformación a rotura	0,0155	0,0072
Densidad	300 g/m ² (sup.)	1,8 t/m ³ (vol.)
Ancho	150 mm	75 mm
Espesor	0,176 mm	5 mm

Figura 1. Características de tejidos y láminas

Las láminas pultruidas son los elementos más utilizados para el refuerzo a flexión de vigas de hormigón armado ya que ofrecen un importante aporte mecánico [3, 4]. Si bien, las más utilizadas son las láminas de fibras de carbono, para el caso de este estudio se emplearon láminas de fibra de vidrio. Estas son de mayor espesor, 4 a 6 mm contra 1 a 2 mm de las láminas de carbono. Pueden ser adheridas con resinas epoxídicas pero además presentan la ventaja de poder ser ancladas mecánicamente mediante pernos minimizando el efecto de delaminación, permitiendo por lo tanto un mayor aprovechamiento del material [5].

Este tipo de anclaje es posible por la menor fragilidad de la lámina. En los refuerzos con láminas pultruidas resulta imprescindible la colocación de anclajes para evitar la delaminación de extremos [6]. En este tipo de elementos con gran rigidez transversal, a diferencia de las telas que acompañan las deformaciones, las tensiones de tracción por delaminación en extremos conocidas como tensiones de peeling, son muy elevadas, por lo que se deben reforzar correctamente estas zonas con elementos que garanticen un anclaje adecuado.

3. ENSAYOS

Se realizaron cuatro series de ensayos en el laboratorio de estructuras del Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE) de la Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario [7]. Para la primera serie, se confeccionaron seis vigas de dimensiones para edificios industriales: 19x45 cm de sección y 5 m de luz que fueron reforzadas con distintas capas de telas de fibras de carbono y láminas pultruidas de fibras de vidrio. Para la segunda serie, se confeccionaron ocho vigas como prototipos de menores dimensiones de 14x29 cm de sección, y 3 m de luz reforzadas con telas de fibras de vidrio y láminas pultruidas de fibras de vidrio.

Para la tercera serie, se confeccionaron ocho pares de especímenes para ensayos de adherencia a través de fuerzas de tracción por flexión. Se elaboraron 16 probetas de 19x12 cm de sección, y 75 cm de longitud que se vincularon con una lámina pultruida de fibra de vidrio de 150 cm. Para la cuarta serie se reutilizaron las probetas de la tercera serie para profundizar el estudio del sistema de anclajes abulonados

3.1. Primera serie

Se ensayó una viga sin refuerzo como viga de referencia (V0). Cuatro vigas fueron reforzadas con capas de telas unidireccionales de fibra de carbono (V1, V2, V3 y V4), y una se reforzó con láminas pultruidas de fibra de vidrio (V5).

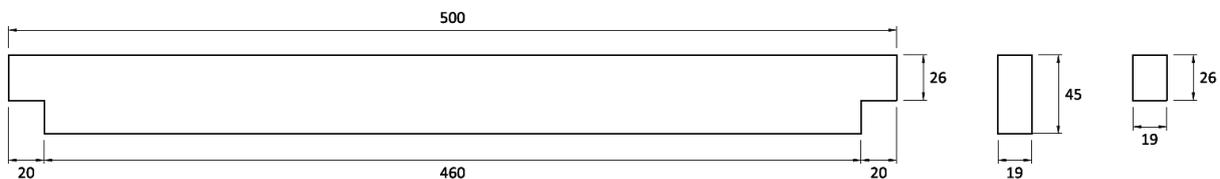


Figura 2. Geometría de las vigas

Se buscó minimizar la delaminación del refuerzo colocando bandas de telas de fibra de carbono en los extremos en todas las vigas, y en las últimas dos se agregaron fajas en la zona de aplicación de las cargas.

Instrumentación de los ensayos

Los ensayos se realizaron en un pórtico reactivo vertical con dos gatos hidráulicos para la aplicación de las cargas (ver Figura 3). Las vigas se montaron sobre dos pilares de hormigón y el apoyo simple en ambos extremos se materializó mediante cilindros y placas metálicas interpuestas para permitir la libre deformación de las vigas.

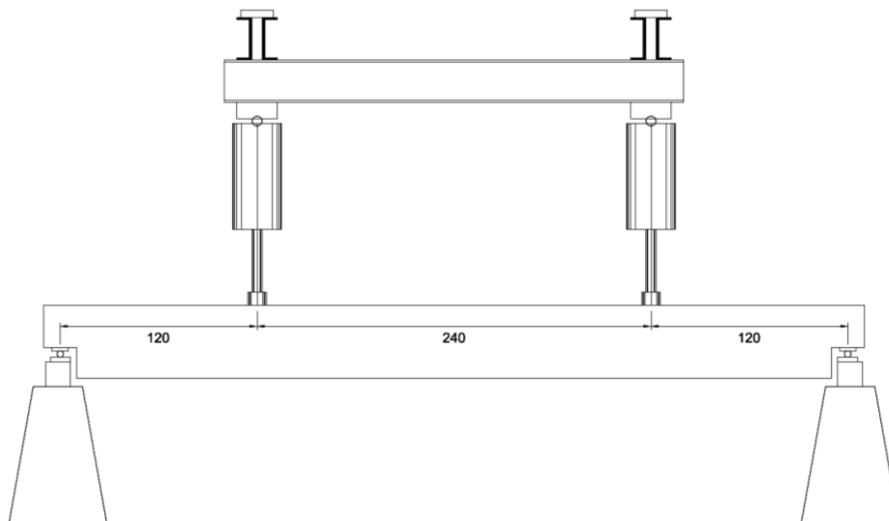


Figura 3. Esquema de los ensayos

Tipos de falla

La viga de referencia (V0) falló por compresión del hormigón en la zona central de la viga. Las tres vigas reforzadas con telas de fibras de carbono (V1, V2 y V3) fallaron por rotura del refuerzo en la zona de aplicación de la carga. En este punto, es donde se produce la concomitancia del momento máximo con el corte máximo observándose la presencia de dislocamientos localizados. Esta forma de rotura se denomina *Critical Diagonal Crack* (CDC) debonding, o sea delaminación por fisuras diagonales críticas [8]. Además de incrementar la carga de rotura, los refuerzos con telas disminuyeron la flecha.

Para controlar este fenómeno, en las vigas V4 y V5 se colocaron refuerzos transversales en las zonas de aplicación de las cargas, además de los refuerzos de extremos. En la viga V4 la rotura del refuerzo se produjo en la zona central, y en la V5, falló por rotura de la cabeza comprimida manteniéndose intactas las láminas pultruidas de fibra de vidrio (ver Figuras 4, 5 y 6). Y en la Tabla 1 se muestra el resumen de resultados para la carga de rotura y tipo de falla.



Figura 4. Rotura del refuerzo de fibras bajo carga puntual de viga V1



Figura 5. Rotura del refuerzo de fibras bajo carga puntual de viga V1



Figura 6. Falla por compresión del hormigón de viga V5 (refuerzo de fibras de vidrio intacto)

Tabla 1. Resumen de resultados. Carga de rotura y tipo de falla.

Viga	Cantidad capas	Carga rotura por actuador [ton]	Flecha máxima [cm]	Incremento resp. a V0 (%)	Tipo de falla
V0	0	11,550	6,16	0	Compresión hormigón
V1	1 (FC)	11,650	4,59	0.9	Rotura refuerzo bajo carga
V2	2 (FC)	12,600	4,53	9.1	Rotura refuerzo bajo carga
V3	3 (FC)	12,750	4,50	10.4	Rotura refuerzo bajo carga
V4	1 (FC)	12,800	-	10.8	Rotura refuerzo en zona central
V5	1 (FV)	15,600	-	35.1	Compresión hormigón

3.2. Segunda serie

Para la segunda serie de ensayos se elaboraron ocho vigas de menor dimensión (ver Figura 7). Cuatro de ellas fueron reforzadas con telas y cuatro con láminas pultruidas de fibras de vidrio. Se decidió elaborar vigas de iguales dimensiones y armaduras, que las ensayadas habitualmente en el laboratorio ya que se disponía de una gran cantidad de resultados de ensayos en las vigas sin refuerzo para usar como comparación.

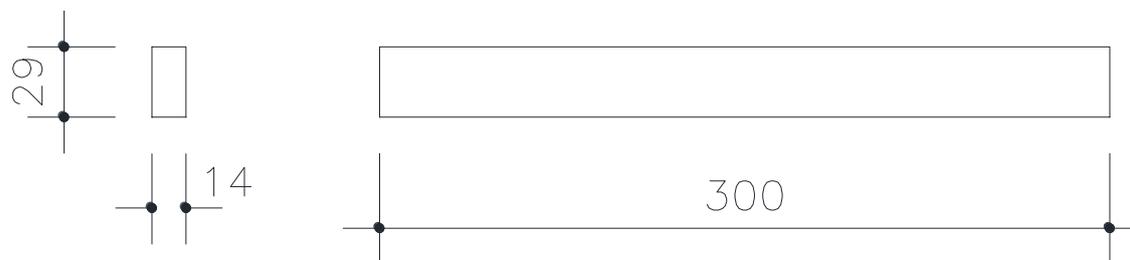


Figura 7 Dimensiones vigas

Se utilizaron dos juegos de encofrados y las vigas se fueron hormigonando simultáneamente

de a pares. Se fabricaron cuatro vigas con una armadura inferior de 2 Ø 12 (el primer par V1-V1' y el segundo par V2-V2'), luego dos vigas con 2 Ø 10 (V3 y V3') y finalmente el cuarto par con 4 Ø 8 (V4 y V4'). La instrumentación de los ensayos fue similar a la primera serie.

3.3. Resultados y conclusiones de las dos primeras series

En la Tabla 3 se presentan los resultados de carga de rotura. En los renglones indicados como vigas 1o, 3o y 4o se indican los valores promedios y máximos de las cargas de rotura obtenidas en más de veinte ensayos realizados en el laboratorio en los últimos años. Mientras que en la Tabla 4 se muestran los resultados del incremento de las cargas de rotura.

Tabla 3. Resumen de resultados. Carga de rotura.

Viga	Armadura	Refuerzo	Carga de Rotura		
			(kg)	(kN)	
1o	2Ø12	Sin refuerzo	Promedio	4090	401
			mayor valor	4540	445
1	2Ø12	Lámina GFRP		5680	557
2	2Ø12	Lámina GFRP		5500	539
1'	2Ø12	2 capas de tela GFRP		4900	480
2'	2Ø12	2 capas de tela GFRP		5450	534
3o	2Ø12	Sin refuerzo	Promedio	3450	338
			mayor valor	3520	345
3	2Ø12	Lámina GFRP		4150	407
3'	2Ø12	2 capas de tela GFRP		4360	427
4o	4Ø8	Sin refuerzo	Promedio	3750	368
			mayor valor	4100	402
4	4Ø8	Lámina GFRP		4300	421
4'	4Ø8	2 capas de tela GFRP		4200	412

Tabla 4. Resumen de resultados. Incremento de las cargas de rotura.

Viga	Armadura	Refuerzo	Incremento al promedio (%)	Incremento al mayor valor (%)
1o	2Ø12	Sin refuerzo		
1	2Ø12	Lámina GFRP	39	25
2	2Ø12	Lámina GFRP	34	21
1'	2Ø12	2 capas de tela GFRP	20	08
2'	2Ø12	2 capas de tela GFRP	33	20
3o	2Ø12	Sin refuerzo		
3	2Ø12	Lámina GFRP	20	18
3'	2Ø12	2 capas de tela GFRP	26	24
4o	4Ø8	Sin refuerzo		
4	4Ø8	Lámina GFRP	15	05
4'	4Ø8	2 capas de tela GFRP	12	02

Primera serie de ensayos

- El aumento de cantidad de capas de tejidos de fibras de carbono no produjo un aumento

significativo en la resistencia de las vigas reforzadas.

- Los refuerzos transversales impidieron la delaminación en los extremos. En los casos en que no se contaba con dichos refuerzos bajo los puntos de aplicación de la carga, fue justamente allí donde se produjo la rotura de las vigas. En el caso en que se colocaron los refuerzos transversales bajo los puntos de aplicación de las cargas, la rotura se produjo en la zona central de la viga y se obtuvo el máximo aumento de resistencia (11%) con una única capa de tejido de fibras de carbono. Esto confirmó la necesidad de colocar los refuerzos transversales intermedios.
- La viga con refuerzo longitudinal de láminas pultruidas de fibra de vidrio, y refuerzos transversales de tejidos de fibra de carbono (en los extremos y bajo el punto de aplicación de cargas), presentó los resultados de mayor incremento de resistencia (35%). Esta viga falló por compresión del hormigón, manteniéndose intactos los perfiles adheridos como refuerzo.
- Al evaluar el costo de la intervención en relación al incremento de resistencia obtenido, el refuerzo con láminas pultruidas resultó el más eficiente.

Segunda serie de ensayos

- En todos los casos se obtuvieron resultados de cargas de rotura superiores tanto al promedio como al valor mayor obtenido sin refuerzo en un gran número de vigas ensayadas anteriormente en el laboratorio.
- Las vigas 3 y 4, reforzadas con láminas pultruidas fueron las primeras en ensayarse y tuvieron una rotura prematura debido a la falla del refuerzo de extremo que no soportó los esfuerzos de tracción (peeling). Debido a esto, se duplicaron los refuerzos de las vigas 1 y 2 provocando la rotura de la viga en la cabeza comprimida, logrando un porcentaje mayor del incremento de carga.
- En estos ensayos también se verificó que las láminas pultruidas no mostraron deterioros visibles. Las vigas fallaron por corte.

Conclusiones de las primeras dos series:

Los resultados obtenidos demostraron la efectividad de las láminas pultruidas de fibra de vidrio para el refuerzo de vigas de hormigón armado, evidenciando además la ventaja económica de su utilización. El costo en el mercado local de los productos de fibra de vidrio, es sensiblemente inferior a la opción de productos similares elaborados con fibra de carbono.

La diferencia en costos, compensa con creces la necesidad de colocar mayor cantidad de material para alcanzar las mejores propiedades mecánicas que presentan las fibras de carbono. Este tipo de refuerzos encuentra su aplicación más provechosa en elementos subarmados que permiten un desarrollo ulterior de su cabeza comprimida. Por otro lado, otra limitación importante a tener en cuenta para lograr la efectividad del refuerzo, es la capacidad sobrerresistente al corte que presenta la viga, si bien en este caso también puede realizarse un refuerzo mediante telas o láminas.

Las láminas pultruídas presentan una resistencia a la tracción muy elevada, es prácticamente imposible lograr su rotura en un ensayo de flexión, por lo que, se puede deducir que la falla siempre resultará en el anclaje de la misma salvo que la viga rompa por corte o por compresión del hormigón. Se decidió entonces profundizar la investigación de los sistemas de anclaje de dichas láminas en una tercera serie de ensayos.

3.4. Tercera serie

Se ensayaron conjuntos compuestos por dos probetas de hormigón armado sujetadas ambas a un sistema de perfiles de acero articulados, con el objetivo de que al aplicar una carga en la rótula, todo el esfuerzo sea traducido en tracción en la zona inferior del sistema (zona donde esta adherido el refuerzo) (ver Figura 8). La fuerza de tracción a la que es sometida la lámina de PRFV se rige por la siguiente fórmula:

$$F = \frac{P \times L}{4 \times h} \quad (1)$$

donde

P: fuerza aplicada del gato hidráulico.

L: luz entre los apoyos.

H: brazo de palanca entre la lámina de PRFV y la rótula (punto donde se aplica la carga).

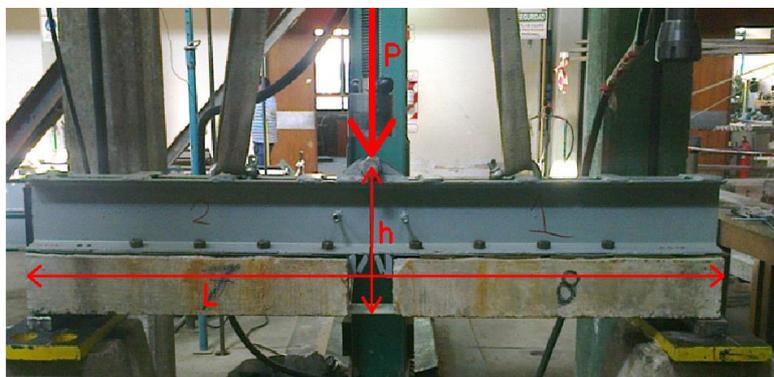


Figura 8. Dispositivo de ensayo y dimensiones

Se prepararon distintos sistemas de anclaje (ver Figura 8, 9, 10, 11):

- Solamente adheridos con resina epoxi (dos conjuntos)
- Reforzados en los extremos con telas unidireccionales de fibra de vidrio (dos conjuntos)
- Fijados con bulones (sistema de anclaje de expansión). En este caso hubo 3 variantes:
 - 1 bulón común \varnothing 8 mm en cada extremo. (un conjunto)
 - 1 bulón 8,8 (A325) \varnothing 8 mm en cada extremo. (un conjunto)
 - 2 bulones 8,8 (A325) \varnothing 8 mm en cada extremo (dos conjuntos)



Figura 9. Sistema de anclaje a) lámina simplemente adherida



Figura 10. Sistema de anclaje b) refuerzo de tela unidireccional en el apoyo

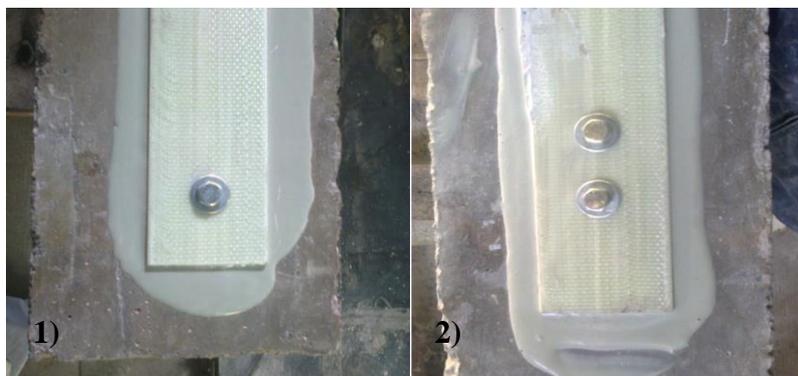


Figura 11. Sistema de anclaje c):
1) 1 bulón común, 2) 2 bulones 8.8

A continuación se presenta una serie de figuras en las cuales se evidencia los ensayos realizados para la tercera serie (ver Figuras 12, 13, 14, 15):



Figura 12 - Ensayos n° 1 y n° 2 – Lámina adherida sin refuerzos de anclaje – despegue y colapso



Figura 13 - Ensayos n° 3 y n° 4: Lámina con refuerzos de telas en los extremos despegue sin colapso pero sin resistencia resiliente



Figura 14 - Ensayo n° 6 – Lámina con dos bulones 8.8 en cada extremo Se produjo el desprendimiento de los bulones por el escaso anclaje



Figura 15 - Ensayos n° 7 y n° 8: Lámina con un bulón 8.8 en cada extremo despegue sin colapso y con resistencia resiliente

3.5. Resultados y conclusiones de la tercera serie

A continuación se presenta en la Tabla 5 los resultados de cada ensayo para la tercera serie, en la cual se detalla el sistema de adherencia, la carga de rotura y observaciones sobre el tipo de rotura.

Tabla 5 Resultados de la tercera serie

Ensayo n°	Sistema de adherencia	L (m)	P (kN)	F (kN)	Tipo de rotura
1	Resina	1,56	440	545	Despegado de la banda - colapso
2	Resina	1,57	358	446	Despegado de la banda - colapso
3	resina + tela en extremos	1,57	505	629	Despegado de la banda - corte de la tela - colapso
4	resina + tela en extremos	1,58	366	459	Despegado de la banda - corte de la tela - colapso
5 (*)	resina + 1 bulón común de cada lado	1,57	285	355	Despegado de la banda - corte del bulón - colapso
6	resina + 2 bulones 8.8 de cada lado	1,57	410	511	Despegado de la banda - arranque de los bulones - capacidad resistente post rotura
7	resina + 1 bulón 8.8 de cada lado	1,58	567	711	Despegado de la banda - ojalado de la lámina - no cortó los bulones - capacidad resistente post rotura
8	resina + 2 bulones 8.8 de cada lado	1,58	355	445	Despegado de la banda - arranque de los bulones - capacidad resistente post rotura

(*) Esta probeta tuvo un problema durante la manipulación y se despegó parte de la lámina por lo que se suponía que el resultado no iba a ser representativo. De todos modos este ensayo sirvió para descartar la utilización de los sistemas de anclajes comerciales con bulones comunes.

Conclusiones de la tercera serie de ensayos

- La carga de rotura obtenida por el encolado simple no fue notablemente incrementada por el mejoramiento del anclaje en los extremos, con excepción del ensayo n° 7 en el que se produjo el ojalamiento de la planchuela sin cortar los bulones.

4. El anclaje con bulones mostró una buena capacidad de resistencia post crítica que le confiere a las estructuras una característica de ductilidad muy útil en zonas sísmicas.
5. La falla de los anclajes con bulones de alta resistencia se produjo siempre por el arranque de los mismos, nunca se cortaron.
6. En el único ensayo en el que no se desprendieron los bulones (ensayo n° 7) se obtuvo el mayor valor de la carga de rotura.
7. En este tipo de ensayos, al producirse el giro independiente de las dos probetas vinculadas por la rótula, resultan despreciables los esfuerzos de tracción por deformación elástica diferenciada entre viga y refuerzo (peeling). Este tipo de fenómeno se estudiará en las siguientes etapas en ensayos con vigas.
8. La falla de arrancamiento de los bulones que demostró ser el punto débil de este sistema de vinculación, puede corregirse utilizando anclajes más profundos. Éste es uno de los objetivos de la cuarta serie de ensayos.

3.6. Cuarta serie

El objetivo de esta cuarta serie, era validar el sistema de anclajes con pernos más profundos. Como se trataban de ensayos de aproximación, se reciclaron las probetas anteriores que habían quedado prácticamente intactas, con el conocimiento de que los valores a obtener servirían únicamente de manera orientativa para comprobar el funcionamiento de dichos pernos. Se prepararon siete probetas con 2 varillas 8.8 Ø 10 mm embebidas en el hormigón 80 mm. Estas superaban el espesor de recubrimiento penetrando en el núcleo de la probeta. Se utilizaron varillas lisas, sin embargo, en una etapa posterior se piensan utilizar varillas roscadas.



Figura 16 – En estos ensayos no se desprendieron las láminas, se verificó el ojalamiento de los agujeros.

3.7. Resultados y conclusiones de la cuarta serie

A continuación se presenta en las Tablas 6 y 7 los resultados de cada ensayo de la cuarta serie, en la cual se detalla la carga última, la fuerza de adherencia, la carga de 1º falla, la carga resiliente, las relaciones entre la carga última y la carga de primera falla con la carga última promedio obtenida con las láminas solamente adheridas. Esta carga promedio es $Pu0 = (440 + 358) / 2 = 399$ kN. Se indica también el tipo de rotura que se verificó en cada caso.

Tabla 6. Resultados de la cuarta serie - Cargas

Ensayo n°	L(m)	P última (kN)	F (kN)	P 1º falla (kN)	P resil. (kN)	Pu / Pu0 (kN)	P1ºf / Pu0 (kN)
1	1,535	537	654	490	360	1,35	1,23
2	1,575	790	988	475	750	1,98	1,19
3	1,56	632	782	510	350	1,58	1,28
4	1,53	505	613	390	300	1,27	0,98
5	1,54	615	752	485	360	1,54	1,22
6	1,54	538	658	475	370	1,35	1,19
7	1,545	532	652	495	160	1,33	1,24

Tabla 7. Resultados de la cuarta serie – Tipos de rotura

Ensayo n°	Tipo de rotura
1	Despegado de la banda - ojalamiento 3 cm
2	Despegado de la banda - desgarro en la zona de anclaje
3	Despegado de la banda - ojalamiento 1,5 cm
4	Despegado de la banda - ojalamiento 8,5 cm
5	Despegado de la banda - ojalamiento 2 cm
6	Despegado de la banda - ojalamiento 1 cm
7	Despegado de la banda - ojalamiento 5 cm

4. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo, todavía en curso, era comprobar la efectividad de un sistema de refuerzo estructural que sea económicamente viable para su utilización masiva. En efecto, como se mencionó, el alto costo de las láminas pultruídas de fibras de carbono impidió la difusión de su utilización en el mercado local, por ello, se decidió experimentar con láminas de fibras de vidrio de fabricación nacional que tienen un costo notablemente inferior.

Además de su resistencia mecánica, las láminas de fibra de vidrio presentan la ventaja de poder vincularse a las estructuras con bulones que aseguran el anclaje al núcleo de hormigón entre armaduras; de esta manera no se depende solamente de la resistencia a tracción del

recubrimiento. Además, este tipo de vinculación es notablemente más efectiva que las bandas de tela en U para absorber los esfuerzos de tracción por deformación elástica diferenciada entre viga y refuerzo (peeling).

Si bien este sistema de anclajes presenta la dificultad de tener que atravesar la zona inferior de vigas donde en muchas ocasiones la densidad de armaduras no permite el fácil acceso, generalmente se suele disponer de la información sobre la distribución de armaduras y, caso contrario, se puede verificar esta distribución picando el recubrimiento. Desde el punto de vista de su resistencia mecánica, como era de esperar, los resultados obtenidos demostraron la efectividad de las láminas pultruidas de fibra de vidrio para el refuerzo de vigas de hormigón armado evidenciando además la ventaja económica de su utilización.

Con respecto a los refuerzos en los extremos de las láminas, se pudo comprobar la ventaja de la resistencia post crítica que presenta la vinculación abulonada al otorgar ductilidad al refuerzo permitiendo la disipación de energía necesaria en estructuras sometidas a solicitaciones sísmicas. Si se extendiera esta vinculación a toda la longitud del refuerzo se lograría incrementar notablemente este fenómeno. Por otro lado, en la cuarta serie de ensayos al trabajar con bulones más largos se incrementó la carga de primera falla y mucho más la carga de rotura. Además, las probetas demostraron una importante carga resiliente y en ningún momento se produjo el colapso total del sistema.

5. REFERENCIAS

- [1] R. Aguiar, A. Busnelli, P. Caiza, A. Haro, R. Seracino, M. Tornello, J.C. Vielma (2014) *Proceedings del II Curso Internacional Avanzado de FRP*
- [2] A. Busnelli, R.E.López, M. del Río (2014) *Refuerzo de vigas de hormigón armado con láminas de PRFV*” *Proceedings de las 23° Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, Buenos Aires.
- [3] A. J. Lamanna, L. C. Bank, D. T. Borowicz, D. Arora (2003) “Strengthening of concrete beams with mechanically fastened FRP strips” *Technical report*. University of Wisconsin, Madison USA.
- [4] M. B. Leeming, J. J. Darby (1998) “Strengthening of reinforced concrete structures using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering”. *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, CRC Press, Boca Raton.
- [5] M. Molina, J. P. Gutiérrez, C. López (2008) “Consideraciones acerca del empleo de láminas de fibras de carbono aplicadas al campo de las estructuras” *V Congreso Nacional de la Ingeniería Civil*. 2007. *Desarrollo y Sostenibilidad en el Marco de la Ingeniería*. Sevilla
- [6] D. J. Ohelers, M. S. Mohamed Ali, M. Haskett, M. C. Griffith (2008) “A partial-interaction ductility model for FRP plated RC flexural members” *Proceedings of the Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Zurich.

- [7] S. Visintini, Busnelli A. (2013) “Refuerzo de vigas de hormigón armado con materiales compuestos adheridos exteriormente” – Proyecto Final – Fac. Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura U.N.R.
- [8] A. Wei, H. Saadatmanesh, M. R. Ehsani (1991) “RC Beams strengthened with FRP plates” Journal of Structural Engineering. Vol 117. N 11. 3434-3455.