



REFUERZOS DE HORMIGÓN CON LÁMINAS PULTRUÍDAS DE GFRP - ESTUDIO DE SUS SISTEMAS DE VINCULACIÓN

Ing. López, Rubén; Dr. Ing. Busnelli, Alberto; Mag. Ing. del Río, Marcelo
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario E-mail: ruben@lopezre.com

RESUMEN

Las láminas pultruidas son los elementos de materiales compuestos más usados como refuerzos para incrementar la resistencia de elementos estructurales, principalmente para la flexión de vigas de hormigón armado. El material de mayor difusión a nivel mundial para estas láminas son las fibras de carbono, pero su costo elevado desalienta la utilización en la reparación de estructuras en nuestro mercado. Además de presentar un costo menor, el mayor espesor de las láminas de fibra de vidrio permite el uso de anclajes adicionales abulonados que le otorgan al sistema capacidad portante post crítica y ductilidad, características muy necesarias, por ejemplo, para las estructuras en zona sísmica. De esta manera, es posible vincular estas láminas al hormigón de tres maneras diferentes: sólo pegadas (EB-FRP), sólo abulonadas (MF-FRP) y pegadas y abulonadas (EB-MF-FRP).

En este trabajo se presenta un estudio comparativo de las prestaciones mecánicas de estos tres sistemas de vinculación tanto bajo cargas estáticas como bajo cargas dinámicas.

ABSTRACT

Pultruded plates are the most commonly used composite material elements as reinforcements to increase the resistance of structural elements, very common in flexural strength of reinforced concrete beams. The most widely used material for these sheets in the world is made up of carbon fibers, but their high cost discourages their use in the repair of structures in our market. In addition to presenting a lower cost, the greater thickness of the fiberglass sheets allows the use of additional bolted anchors that give the system post-critical bearing capacity and ductility, characteristics that are very necessary, for example, for structures in a seismic zone. In this way, it is possible to joint these plates to the concrete in three different ways: only bonded (EB-FRP), only bolted (MF-FRP) and bond and bolted (EB- MF-FRP).

In this paper a comparative study of the mechanical performance of these three linking systems is presented both under static and dynamic loads.



1. INTRODUCCIÓN

En investigaciones anteriores se pudo comprobar la eficacia de las láminas pultruídas de fibra de vidrio como refuerzo de vigas de hormigón armado, especialmente mediante su vinculación mixta adherida y abulonada. En este trabajo se presenta un estudio comparativo de las prestaciones mecánicas de los tres sistemas de vinculación tanto bajo cargas estáticas como bajo cargas dinámicas.

A tal efecto se elaboraron dispositivos de ensayo para la realización de un número importante de pruebas de tracción excéntrica que permitieron deducir indicadores, gráficos y parámetros de comparación entre los sistemas mencionados.

Se comenzó con ensayos estáticos en probetas con láminas pultruídas de GFRP solamente adheridas a los bloques de hormigón con resina epoxi. Luego se continuó con los sistemas abulonados, de unión solamente mecánica o de unión mixta mecánica-resinosa, empleando diferente cantidad de bulones. Se probaron además algunos sistemas de vinculación alternativos.

Los valores de carga obtenidos en los ensayos estáticos se tomaron como referencia para establecer los escalones de carga de las pruebas dinámicas que consistieron en ensayos de cargas variables de signo alternado con escalones de carga crecientes.

2. MATERIALES UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS

Láminas pultruídas PRFV	Proveedor CME Argentina S.A. Dimensiones: espesor 5 mm – ancho 75 mm Tipo de fibra: vidrio E Resina Vinil éster - BASF A430
Hormigón:	H30 (CIRSOC 201)
Acero:	ADN420 (CIRSOC 201)
Resina epoxi	Concresive 227 - BASF Argentina S.A.
Varillas roscadas:	Acero SAE 1045, diámetro Ø 3/8"

3. ENSAYOS ESTÁTICOS

3.1. Dispositivo de ensayo

Para estos ensayos se tuvo que diseñar una máquina específica. Se construyó un bastidor metálico que alojaba un gato hidráulico, una celda de carga y una mordaza para tomar las láminas. En el extremo opuesto, donde se ubicaban las probetas se dispuso un tope que oficiaba de apoyo reactivo.

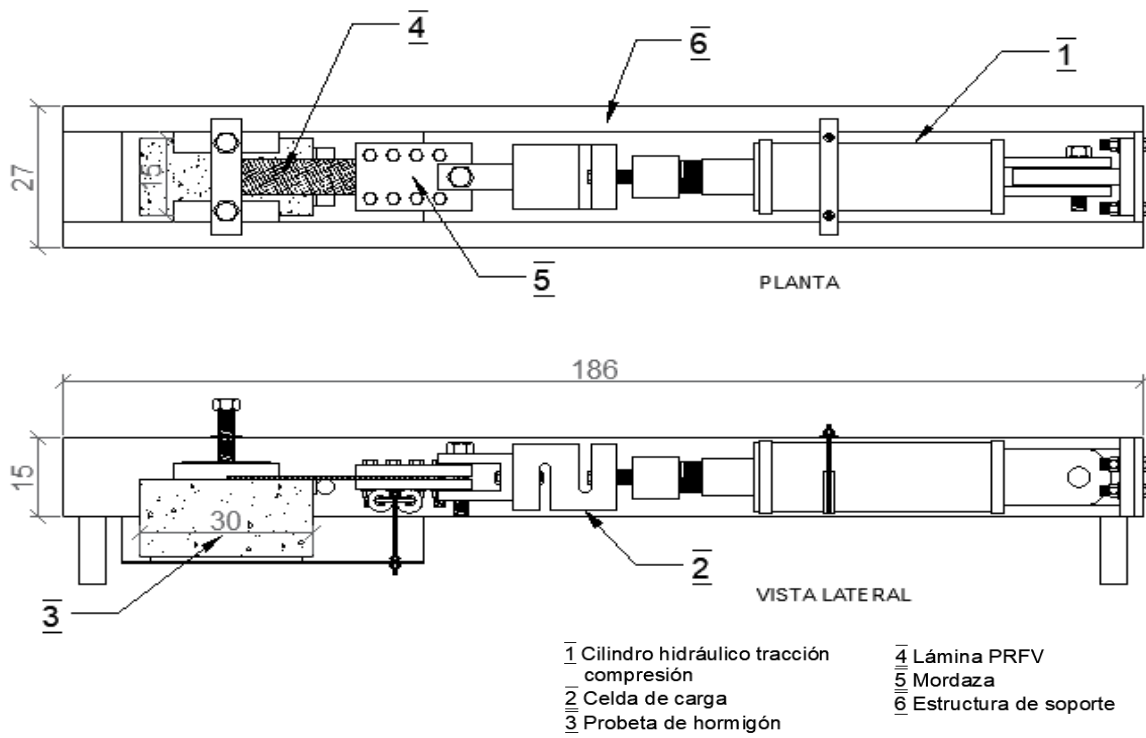


Figura 1 – Esquema de máquina para ensayo tracción asimétrica. Medidas en cm.

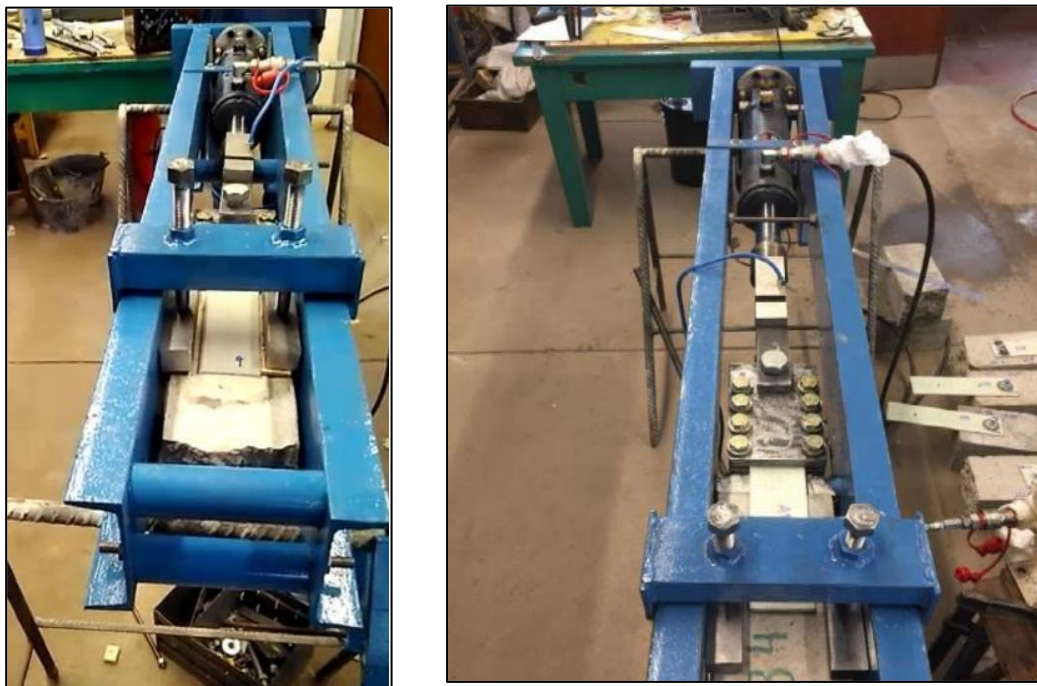


Figura 2 – Máquina para ensayo tracción asimétrica

3.2. Sistemas de vinculación ensayados

Se ensayaron ocho sistemas de vinculación. En los sistemas 1 a 6 las probetas fueron de hormigón simple, mientras que en los sistemas 7 y 8 se utilizaron probetas de hormigón armado para evaluar la influencia de las armaduras en la resistencia.

Los sistemas ensayados fueron los siguientes:

- 1- Pegado de las láminas con resina epoxi (EB-FRP) – 10 probetas
- 2- Pegado de láminas + Anclaje con 1 bulón (EB-MF-FRP) – 10 probetas
- 3- Pegado de láminas + Anclaje con 2 bulones (EB-MF-FRP) – 10 probetas
- 4- Anclaje con 1 bulón (MF-FRP) – 22 probetas
- 5- Anclaje con 2 bulones (MF-FRP) – 13 probetas
- 6- Anclaje con 3 bulones (MF-FRP) – 7 probetas
- 7- Anclaje con 2 bulones - Probetas de hormigón armado (MF-FRP) – 3 probetas
- 8- Anclaje con 3 bulones - Probetas de hormigón armado (MF-FRP) – 3 probetas

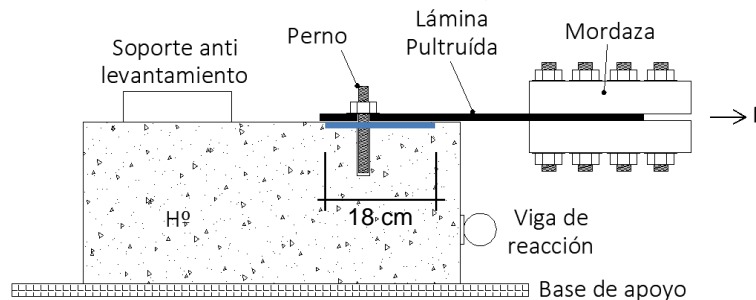


Figura 3 - Esquema de ensayo a tracción asimétrica.

3.3. Resultados de ensayos

Se presentan a continuación los valores promedio de rotura obtenidos en cada serie de ensayos.

Sistema	τ_{prom} [MPa]	P_{prom} [kN]
1- Láminas adheridas con resina al hormigón (EB-FRP)	2,52	34.0
2- Láminas adherida con resina y ancladas con un bulón central (EB-MF-FRP)	4,23	57.1
3- Láminas adherida con resina y ancladas con dos bulones (EB-MF-FRP)	5,12	69.1
4- Láminas ancladas al hormigón con un bulón (MF-FRP)		23,27
5- Láminas ancladas al hormigón con dos bulones (MF-FRP)		37,79
6- Anclaje con 3 bulones (MF-FRP)		55.59
7- Anclaje con 2 bulones en probeta de hormigón armado (MF-FRP)		42,71
8- Anclaje con 3 bulones en probeta de hormigón armado (MF-FRP)		58,85

Tabla 1 – Valores de rotura promedio de los ensayos estáticos

Área de contacto $A = 7.5 \text{ cm}$ (ancho lámina) \times 18 cm (longitud de pegado) $= 135 \text{ cm}^2$

$$\tau_{prom} = P_{prom} / A \quad (1)$$

En el gráfico siguiente se representan los resultados de los ensayos 1 a 6 con probetas de hormigón simple. No se grafican los valores obtenidos en las probetas de hormigón armado 7 y 8.

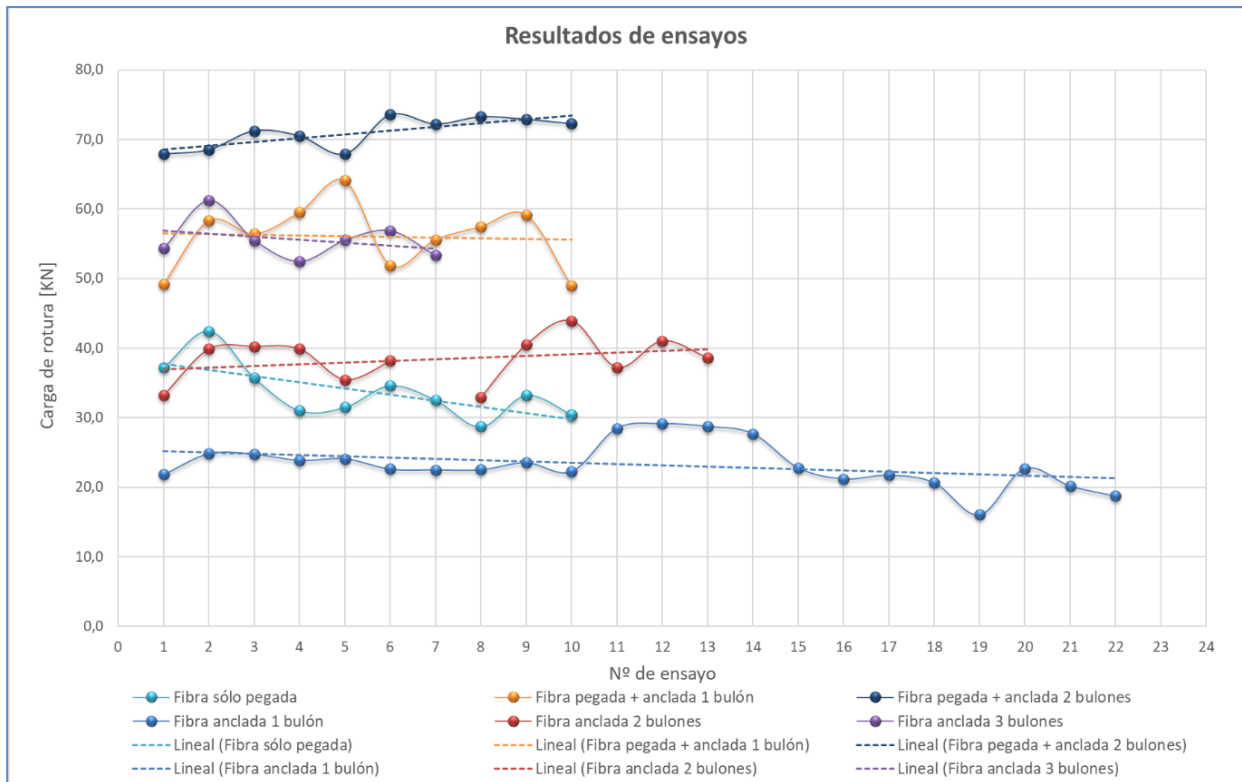


Figura 4 – Resumen de resultados de ensayos estáticos



Figura 5 – Probetas EB-FRP



Figura 6 – Probetas EB-MF-FRP



Figura 7 – Probetas MF-FRP

4. ENSAYOS DINÁMICOS

4.1 Dispositivo de ensayo

Para la realización de los ensayos dinámicos de resistencia fue necesario diseñar una máquina que permitiera ejercer cargas alternadas sobre las láminas vinculadas a los bloques de hormigón.

Se construyó un equipo con un marco metálico similar al utilizado en los ensayos estáticos, al cual se le incorporó un cilindro hidráulico de doble efecto.

Este nuevo equipo permite evaluar la respuesta del sistema lámina hormigón ya sea ante efectos estáticos como dinámicos de fatiga de bajos ciclos.

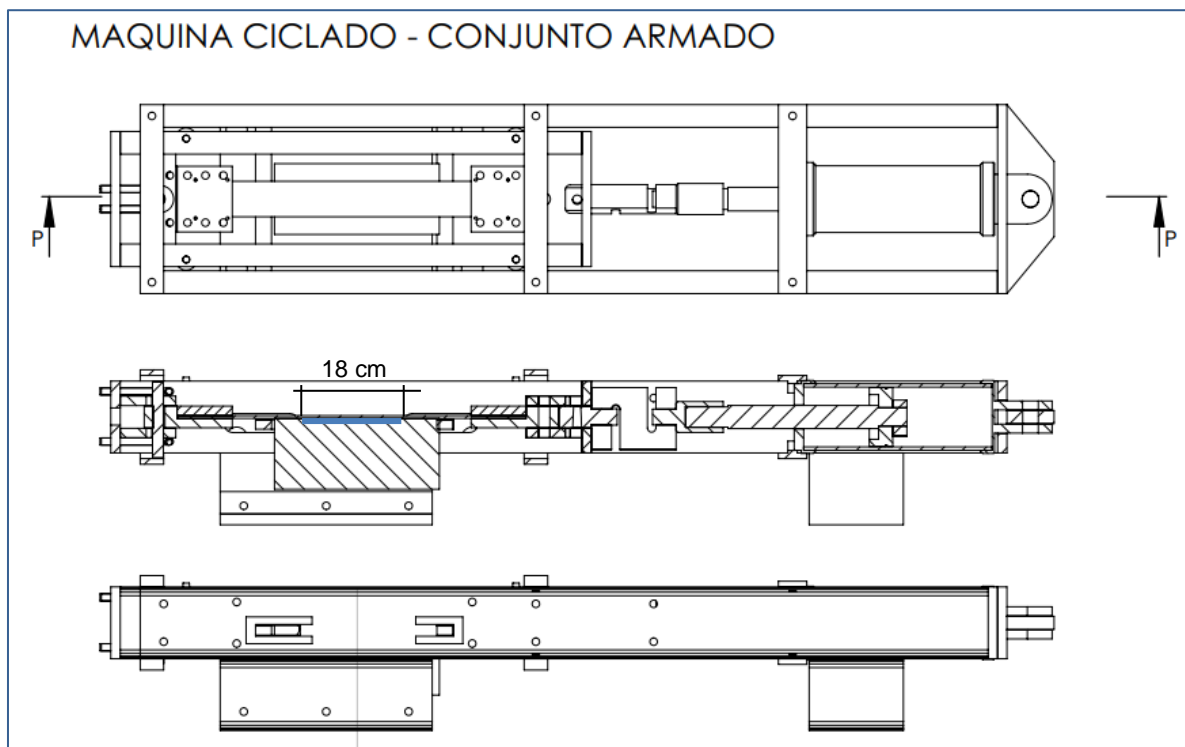
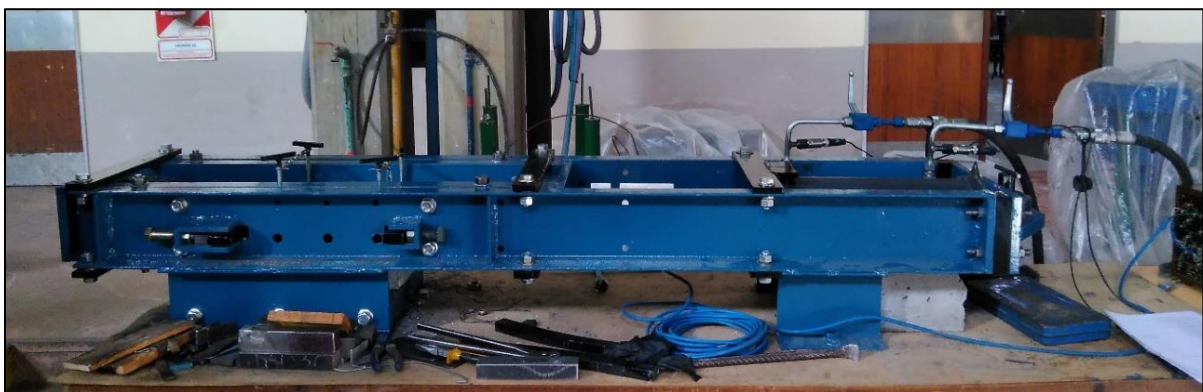


Figura 8 – Equipo de ensayo dinámico - Esquema.



Figuras 9 – Equipo de ensayo dinámico finalizado.



4.2. Sistemas de vinculación ensayados

El estudio de la respuesta frente a cargas cíclicas de los sistemas de vinculación lámina hormigón consistió principalmente en la evaluación de la resistencia frente a la aplicación de cargas alternadas escalonadas en función de los valores de resistencia estática. La investigación se concentró principalmente en los sistemas adheridos EB-FRP y EB-MF-FRP, ya que se verificó que las vinculaciones sólo mecánicas MF-FRP no constituían un buen sistema de vinculación ante la alternancia de cargas. El área de pegado fue igual a la de los ensayos estáticos.

En efecto, en estos sistemas se comenzaban a presentar deformaciones excesivas ya en los primeros ciclos; inmediatamente empezaba a fallar la fricción entre lámina y hormigón y el sistema se degradaba rápidamente produciendo el ojalamiento de la lámina y roturas en los bordes de la perforación del anclaje en el hormigón, deformando los pernos que terminaban cortándose por fatiga en pocos ciclos y con baja carga.

Los sistemas ensayados fueron los siguientes:

- 1- Pegado de las láminas con resina epoxi (EB-FRP) – 27 probetas
- 2- Pegado de láminas + Anclaje con 1 bulón (EB-MF-FRP) – 26 probetas
- 3- Pegado de láminas + Anclaje con 2 bulones (EB-MF-FRP) – 20 probetas

4.3. Programación de los ensayos

Al establecer el número de ciclos al que se debían someter las probetas se pensó en los ciclos de carga que se presentan en los sismos más frecuentes. En tal sentido se supuso razonable una resistencia de la probeta a la aplicación de 45 ciclos de carga divididos en tres escalones crecientes. Se propusieron cinco ciclos para cada uno de los dos primeros escalones, mientras que el último valor de carga cíclica se mantendría hasta la rotura de la probeta, siempre y cuando se produjera antes de cien ciclos, considerando que este era un valor límite para el ensayo.

Las cargas cíclicas alternadas se escalonaron en función de los valores de tensión promedio obtenidos de los ensayos de resistencia estática que se resumen en la siguiente tabla.

Sistema	τ_{prom} [MPa]
Láminas adheridas (EB-FRP)	2.52
Láminas adheridas y ancladas con un bulón central (EB-MF-FRP)	4.23
Láminas adheridas y ancladas con dos bulones (EB-MF-FRP)	5.12

Tabla 2 – Tensiones promedio obtenidas de los ensayos de resistencia estática

Se establecieron tres escalones de cargas alternadas con valores de porcentajes crecientes de la resistencia estática. Se comenzó cargando cada probeta con cinco ciclos del porcentaje menor, se continuó con cinco ciclos del porcentaje medio y por último se cargó con el porcentaje mayor hasta la rotura de la unión, poniendo como límite 100 ciclos para suspender el ensayo.

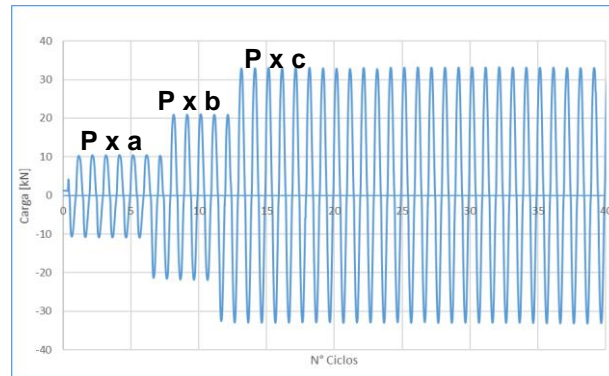


Figura 10 – Esquema de ciclado de cargas.

P = Valor de rotura estático del espécimen. a/b/c: % de P en cada escalón

Se utilizó la siguiente nomenclatura:

LP: Lamina Solo Pegada (EB-FRP)

LP+1B: Lamina Pegada más un bulón de anclaje (EB-MF-FRP)

LP+2B: Lamina Pegada más dos bulones de anclaje (EB-MF-FRP)

a) Láminas sólo pegadas (EB-FRP)

Se comenzó ensayando con ciclos de carga alternadas en escalones crecientes de 20%, 40% y 60% de la carga máxima estática, Esto es, cinco ciclos variando entre +/-20%, luego otros cinco ciclos entre +/-40% y finalmente se subió a +/-60% hasta alcanzar la rotura de la probeta o superar los 100 ciclos. Estos fueron los primeros ensayos y para ellos se utilizaron un mayor número de probetas, doce en total.

Luego se continuó ensayando cinco probetas con escalones de ciclos de mayor porcentaje (25%-50%-75%) y cinco con escalones de menor porcentaje (15%-30%-45%). Finalmente, se ensayaron otras cinco probetas con escalones de carga intermedios (17.5%-35%-52.5%).

Probeta N°	Escalón (%)	Cantidad
1 a 10 – 19 - 25	20/40/60	12
26 a 29 – 51	25/50/75	5
52 a 56	15/30/45	5
67 a 71	17.5/35/52.5	5

Tabla 3 – Probetas sistema EB-FRP

En la siguiente tabla se muestra para cada escalón de carga los porcentajes de probetas que superaron los ciclos aplicados.

Porcentaje de carga estática	Total Muestras	% de Probetas que superaron n ciclos																
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
25%-50%-75%	5	100	100	80	80	60	60	60	60	60	60	60	40	40	40	40	20	20
20%-40%-60%	12	100	100	92	92	92	83	75	75	75	75	75	67	67	67	33	33	
17,5%-35%-52,5%	5	100	100	100	100	100	100	100	80	80	80	80	60	40	20	0	0	
15%-30%-45%	5	100	100	100	100	100	100	100	100	80	80	80	80	80	80	80	80	
TOTAL	27	100	100	93	93	89	85	81	78	78	74	74	67	59	56	52	33	33

Tabla 4 – Porcentaje de probetas sistema EB-FRP que superaron n ciclos

Con estos valores se confeccionó un gráfico en el que se representan en abscisas los números de ciclos y en ordenadas, el porcentaje de muestras que los van superando. De esta manera, podemos ver que todas las probetas superaron los dos primeros escalones de carga (10 ciclos) y comenzaron a desprenderse recién en el tercer escalón con diferente cantidad de ciclos resistentes. A manera de resumen, se confeccionó una curva global considerando la totalidad de las probetas ensayadas, esta curva consideraría la posibilidad de que la estructura estuviera sometida a ciclos de carga con diferentes porcentajes del valor máximo de su resistencia estática durante el evento.

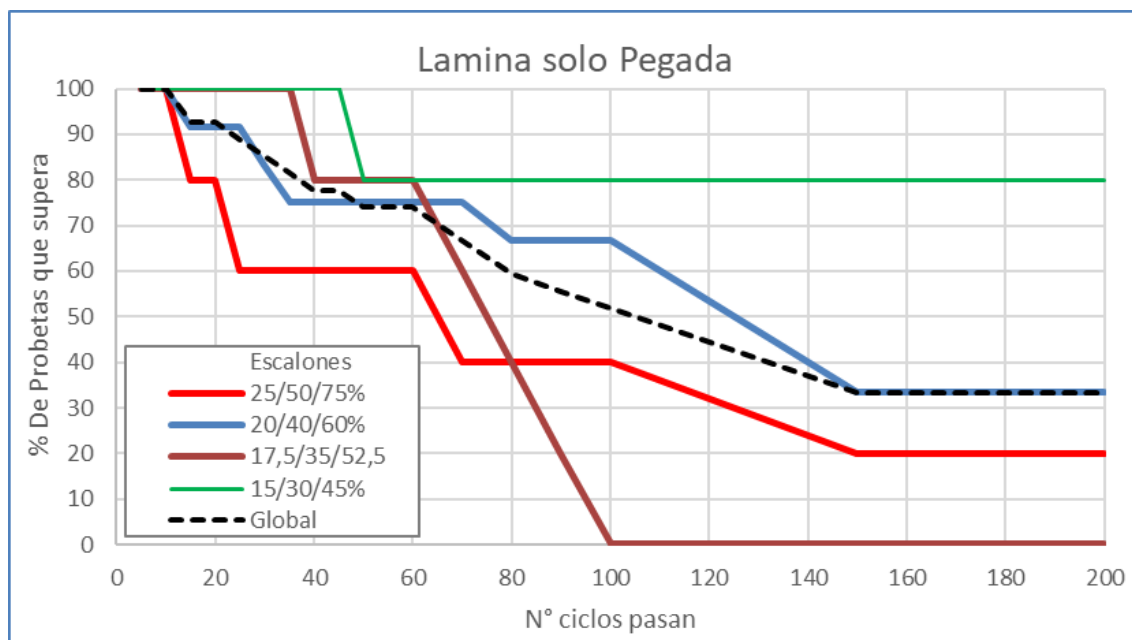


Figura 11 – Probetas sistema EB-FRP. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan.

b) Láminas pegadas y ancladas con un bulón central (EB-MF-FRP)

Para este sistema de vinculación se ensayaron cinco grupos de probetas con diferentes escalones de carga alternadas que se presentan en la siguiente tabla.

Probeta N°	Escalón (%)	Cantidad
20 a 24	22.5/45/67.5	5
30 a 34 - 45	20/40/60	6
40 a 44	17.5/35/52.5	5
62 a 66	15/30/45	5
72 a 76	16/32/48	5

Tabla 5 – Probetas sistema EB-MF-FRP con un bulón

A continuación, se muestra para cada escalón de carga los porcentajes de probetas que superaron los ciclos aplicados.

Porcentaje de carga estática	Total Muestras	% de Probetas que superaron n ciclos																
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
22,5%-45%-67,5%	5	100	60	60	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20%-40%-60%	6	100	83	67	50	33	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17,5%-35%-52,5%	5	100	100	100	100	80	60	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16%-32%-48%	5	100	100	100	100	100	100	100	60	60	60	40	0	0	0	0	0	0
15%-30%-45%	5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	40	40	40	0	0	0	0
TOTAL	26	100	88	85	73	65	54	46	31	31	27	15	8	8	0	0	0	0

Tabla 6 – Porcentaje de probetas sistema EB-MF-FRP con un bulón que superaron n ciclos

A continuación, se muestra el gráfico en el que se representan en abscisas los números de ciclos y en ordenadas, el porcentaje de muestras que los van superando y la curva global considerando la totalidad de las probetas ensayadas.

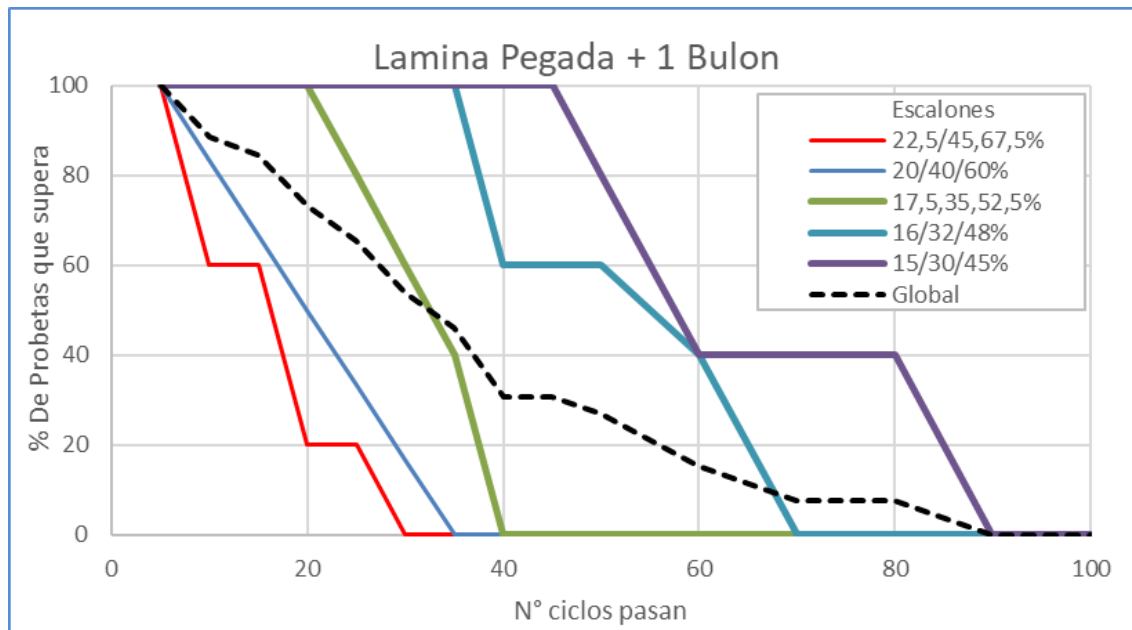


Figura 12 – Probetas sistema EB-MF-FRP con un bulón. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan.

c) Láminas pegadas y ancladas con dos bulones (EB-MF-FRP)

Para este sistema de vinculación se ensayaron cuatro grupos de probetas con diferentes escalones de carga alternadas que se presentan en la siguiente tabla.

Probeta N°	Escalón (%)	Cantidad
35 – 36 – 46 a 48	20/40/60	5
37 a 39 – 49 – 50	15/30/45	5
57 a 61	12/24/36	5
77 a 81	13.5/27/40.5	5

Tabla 7 – Probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones

A continuación, se muestra para cada escalón de carga los porcentajes de probetas que superaron los ciclos aplicados.

Porcentaje de carga estática	Total Muestras	% de Probetas que superaron n ciclos																
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200
20%-40%-60%	5	100	100	40	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15%-30%-45%	5	100	100	100	100	100	80	60	60	60	60	40	20	20	20	20	0	0
13,5%-27%-40,5%	5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	60	40	40	40	40	40
12%-24%-36%	5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	80	0	0	0
TOTAL	20	100	100	85	80	75	70	65	65	65	65	60	50	45	40	35	10	10

Tabla 8 – Porcentaje de probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones que superaron n ciclos

A continuación, se muestra el gráfico en el que se representan en abscisas los números de ciclos y en ordenadas, el porcentaje de muestras que los van superando y la curva global considerando la totalidad de las probetas ensayadas.

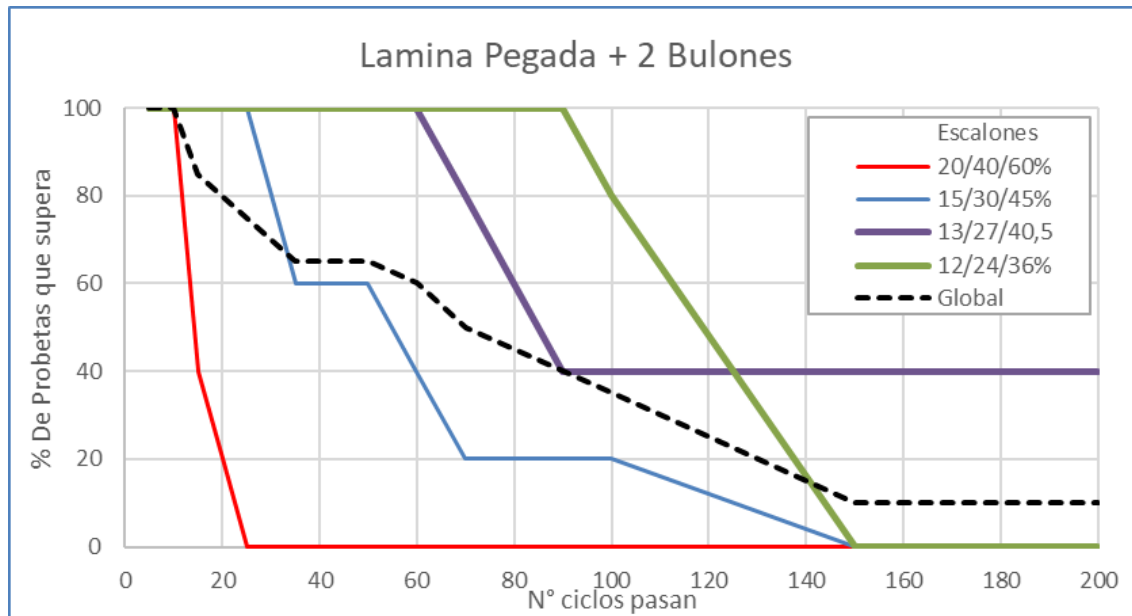


Figura 13 – Probetas sistema EB-MF-FRP con dos bulones. Número de ciclos en función del porcentaje de probetas que los superan.

4.4. Gráficos S-N

Se presentan los gráficos S-N (en inglés Stress – Number of cycles) en los cuales se representan en ordenadas las tensiones máximas ejercidas en cada ensayo y en abscisas los números de ciclos mínimos que produjeron la rotura de la probeta.

En la tabla y en el gráfico siguiente se resumen los números de ciclos requeridos mínimos para provocar la rotura de las probetas para cada tipo de vinculación, esto significa que hasta ese número de ciclos el 100% de las probetas resistieron la carga máxima del ensayo.



N° Ciclos Requeridos	LP		LP+1B		LP+2B	
	% τ rot	τ_{max} (Mpa)	% τ rot	τ_{max} (Mpa)	% τ rot	τ_{max} (Mpa)
1	100.0	2.52	100	4.23	100.0	5.12
5	75.0	1.89	67.5	2.85	60.0	3.07
10	75.0	1.89	60	2.54	60.0	3.07
15	60.0	1.51	52.5	2.22	45.0	2.30
20	52.5	1.32	52.5	2.22	45.0	2.30
25	52.5	1.32	48.0	2.03	45.0	2.30
30	52.5	1.32	48.0	2.03	40.5	2.07
35	52.5	1.32	48.0	2.03	40.5	2.07
40	45.0	1.13	45.0	1.90	40.5	2.07
45	45.0	1.13	45.0	1.90	40.5	2.07
50	45.0	1.13			40.5	2.07
60					40.5	2.07
70					36.0	1.84
80					36.0	1.84
90					36.0	1.84
100						

Tabla 9 – Ciclos requeridos para la rotura de probetas según el porcentaje de tensión

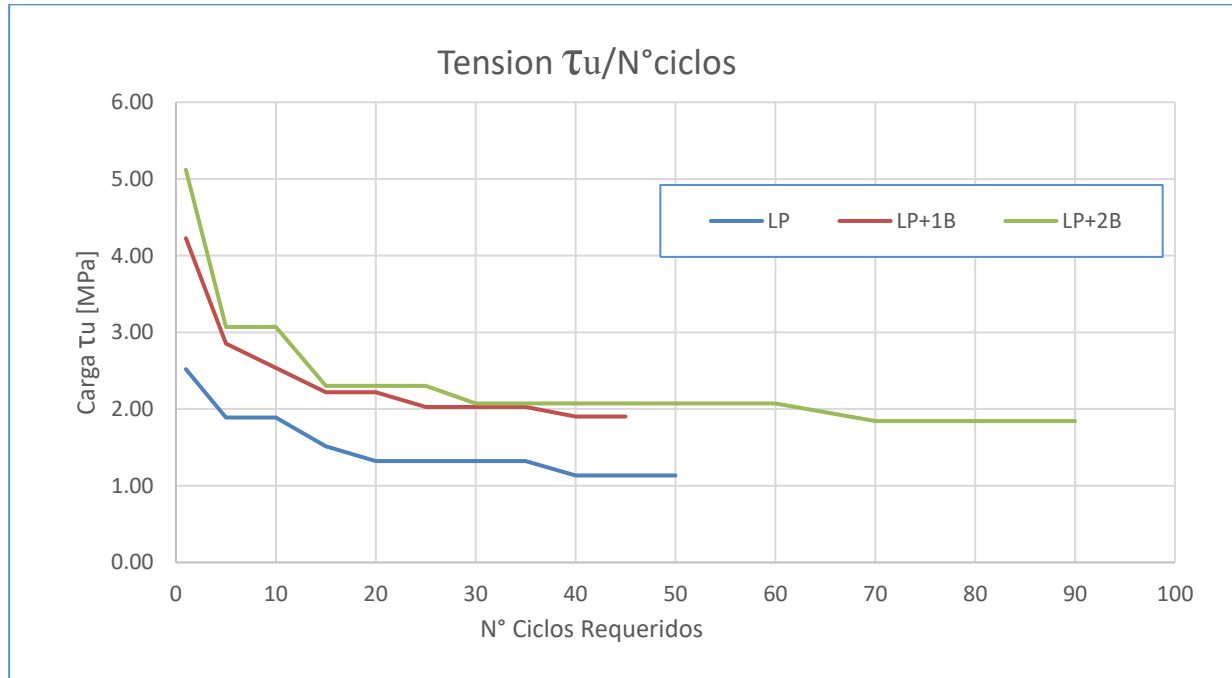


Figura 14 – Ciclos requeridos para la rotura de probetas según el porcentaje de tensión



Al hacer una aproximación exponencial de las gráficas se puede elaborar una ley general para cada una de las opciones de vinculación.

$$\tau_u = \tau_r \times N^{-(0,0315 \times nb + 0,1885)} \quad (2)$$

Donde:

N = Número de ciclos

Nb = Número de bulones en la unión

τ_u = Tensión de rotura a N ciclos

τ_r = Tensión de rotura estática (N = 1)

En la tabla y en el gráfico que se presentan a continuación se representan los valores anteriores junto con los valores teóricos calculados con la fórmula exponencial.

Esta ecuación resulta muy útil para poder estimar de manera simple la pérdida de capacidad de carga en función del número de ciclos partiendo del valor de rotura estático que se puede obtener con un ensayo mucho más sencillo que el de cargas alternadas.

N° Ciclos Requerido	LP			LP+1B			LP+2B		
	% τ rot	τ_{max}	τ_{max} teo	% τ rot	τ_{max}	τ_{max} teo	% τ rot	τ_{max}	τ_{max} teo
1	100,0	2,52	2,52	100,0	4,23	4,23	100,0	5,12	5,12
2	75,0	2,36	2,21		3,81	3,63		4,61	4,30
3	75,0	2,21	2,05		3,38	3,32		4,10	3,88
4	75,0	2,05	1,94		2,96	3,12		3,58	3,61
5	75,0	1,89	1,86	67,5	2,85	2,97	60,0	3,07	3,42
10	75,0	1,89	1,63	60,0	2,54	2,55	60,0	3,07	2,87
15	60,0	1,51	1,51	52,5	2,22	2,33	45,0	2,30	2,59
20	52,5	1,32	1,43	52,5	2,22	2,19	45,0	2,30	2,41
25	52,5	1,32	1,37	48,0	2,03	2,08	45,0	2,30	2,28
30	52,5	1,32	1,33	48,0	2,03	2,00	40,5	2,07	2,18
35	52,5	1,32	1,29	48,0	2,03	1,93	40,5	2,07	2,09
40	45,0	1,13	1,26	45,0	1,90	1,88	40,5	2,07	2,02
45	45,0	1,13	1,23	45,0	1,90	1,83	40,5	2,07	1,97
50	45,0	1,13	1,21				40,5	2,07	1,91
60							40,5	2,07	1,83
70							36,0	1,84	1,76
80							36,0	1,84	1,70
90							36,0	1,84	1,65
100									

Tabla 10 – Comparación entre valores experimentales y teóricos

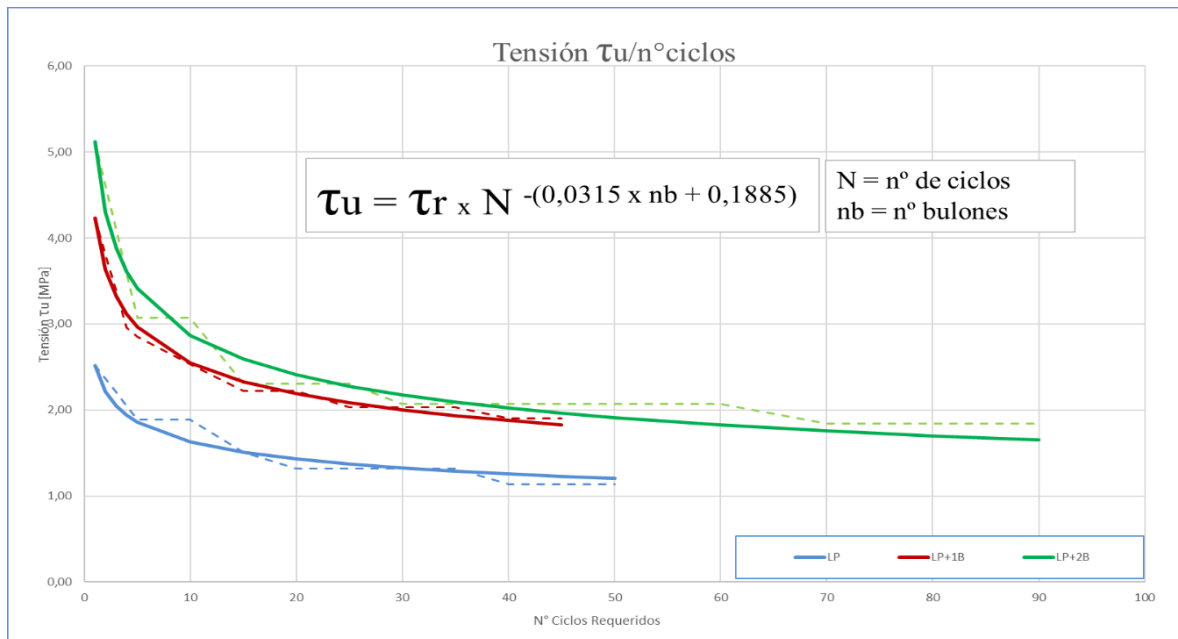


Figura 15 – Comparación entre valores experimentales y teóricos

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se profundizó el estudio de la utilización de láminas pultruidas de fibra de vidrio (GFRP o PRFV) como sistema de refuerzo para estructuras de hormigón armado. Ya comprobado en un trabajo anterior [Busnelli A. (2018)] la efectividad de utilización de estas láminas como alternativa a los preformados más difundidos a base de fibras de carbono utilizando un sistema complementario de vinculación mecánica a la tradicional vinculación resinosa entre láminas y hormigón. Además de haberse podido demostrar su prestación de resistencia estructural como refuerzo de vigas de hormigón armado sometidas a solicitaciones de flexión, se habían verificado características adicionales como la ductilidad, absorción de energía de deformación y la verificación de cargas residuales luego de la rotura de la vinculación principal que alentaban su utilización en estructuras sometidas a cargas dinámicas como las producidas por los sismos.

En este trabajo se ejecutaron en primer lugar un conjunto de ensayos estáticos sobre probetas confeccionadas con los tres sistemas de vinculación y, en base a los resultados de estas pruebas, se programaron los ensayos de cargas variables.

5.1. Ensayos estáticos

a) Sistema EB-FRP

Estos ensayos constituyeron el punto de referencia para las pruebas posteriores. Las roturas se verificaron principalmente arrancando el recubrimiento de hormigón por lo que el pegado de las probetas resultó correcto. La dispersión de los resultados



fue aceptable y se tomaron como base para la comparación de los ensayos estáticos posteriores.

b) Sistema EB-MF-FRP

Se ensayaron dos grupos de probetas con sistema de vinculación mixta resina bulón. En el caso de las probetas con un bulón se confinaba sólo la zona central de la longitud de anclaje, mientras que la disposición de dos bulones involucraba prácticamente toda la unión.

La vinculación mecánica adicional produjo un incremento significativo en la carga de estática de las probetas en comparación con el sistema EB-FRP. En efecto, con un bulón la carga se incrementó en un 68%, mientras que con dos bulones el incremento fue más del doble, 103%.

En los ensayos sobre vigas [Busnelli A. (2018)] también se había evidenciado un aumento importante en la capacidad de carga del sistema mixto con respecto a la unión sólo adherida. En este caso se supuso que dicho aumento de carga podía deberse al control de las tensiones transversales de peeling que en el caso de estas láminas tan rígidas era mucho más importante que en las tradicionales láminas delgadas a base de fibras de carbono. Pero en los ensayos de tracción excéntrica no existe tal efecto, por lo tanto, debe existir otro fenómeno que aumenta la resistencia de la unión. La causa puede ser de origen física como el incremento de la fuerza de rozamiento que depende del esfuerzo normal entre las superficies, o de origen química como la polimerización bajo presión, o una combinación de ambos efectos.

Comparando entre sí los ensayos de probetas con uno y dos bulones, se verificó que el agregado de un bulón incrementó la carga de rotura un 21 % al sistema mixto, mientras que duplicó (121%) la resistencia residual del sistema abulonado una vez rota la unión resinosa.

c) Sistema MF-FRP

En este caso, como parte de la investigación, se ensayaron probetas vinculadas con uno, dos y tres bulones de diámetro $\varnothing 3/8$ " (9,5 mm) ajustados sobre arandelas y ubicados manteniendo una separación del agujero al borde mínima de aproximadamente 6 cm.

Comparando la carga de rotura promedio de estos ensayos con los ensayos anteriores se puede concluir lo siguiente:

- Cuando se confrontan las cargas de rotura obtenidas en los tres ensayos con los del sistema EB-FRP se verifica que el sistema sólo adherido presentó una carga 62 % mayor que el sistema vinculado con un solo bulón, mientras que se obtuvieron valores de carga similares en el caso de la vinculación con dos bulones y la vinculación con tres bulones superó en 47 % al valor sólo adherido.
- Si en cambio comparamos la carga de rotura promedio con las obtenidas como carga residual de los bulones en los ensayos sobre sistemas EB-MF-FRP cuando se rompió la unión resinosa, se verificaron valores similares en el caso de un solo bulón, mientras que en el caso de dos bulones los valores de carga residual de los sistemas mixtos resultaron un 50 % superior.



- Si se comparan las cargas de rotura entre los tres sistemas abulonados se puede observar que el agregado de un segundo bulón incrementó en 68 % la carga de rotura y el agregado del tercer bulón incrementó la carga un 139 %

Las probetas de hormigón armado arrojaron valores superiores a aquellas de hormigón simple, 9 % en el caso de la vinculación con dos bulones y 6 % en el caso de tres bulones. Estos resultados estarían mostrando que, en las aplicaciones más habituales en estructuras armadas, para las uniones abulonadas se pueden esperar valores superiores a los de los ensayos.

d) Comparación entre los sistemas estudiados

Comparando los cinco sistemas de vinculación estudiados se puede concluir:

- El sistema que mostró la mayor carga última fue el pegado y abulonado con dos pernos con una carga de aproximadamente 70 kN
- Las probetas pegadas y abulonadas con un perno y las probetas sólo ancladas con tres bulones dieron valores equivalentes de carga de aproximadamente 57 kN, presentándose como la segunda opción en orden de resistencia.
- Las probetas sólo abulonadas con un perno y las probetas sólo adheridas también dieron valores equivalentes de carga, en este caso de aproximadamente 37 kN.
- Por último, el sistema menos resistente fue el sólo abulonado con un perno.
- En general las dispersiones de resultados fueron bajas, demostrando una buena confiabilidad en los resultados de este grupo de ensayos.

5.2. Ensayos dinámicos

Los ensayos de ciclos alternados involucraron 81 especímenes de los diferentes sistemas de vinculación sometidos a ensayos de tracción excéntrica con cargas alternadas escalonadas.

Los resultados de estos ensayos dinámicos de evaluación de resistencia fueron los números de ciclos soportados por los distintos sistemas de vinculación estudiados sometidos a diferentes escalones de cargas.

5.2.1. Gráficos %-Nº de ciclos

Con estos resultados se elaboraron gráficos en los que se representó en abscisas los números de ciclos y en ordenadas los porcentajes de probetas que superaban dichos ciclos. Estos gráficos funcionan como una herramienta de diseño para la aplicación de cada uno de los sistemas como refuerzos de estructuras de hormigón sometidas a esfuerzos sísmicos.

En base a los números de ciclos más probables de los sismos de la zona, obtenidos de los estudios estadísticos de registros, se obtiene el porcentaje de carga estática máxima que soportaría el sistema elegido. O, lo que es lo mismo, la inversa de este porcentaje constituye el coeficiente de seguridad adicional que es necesario tener en cuenta en el método de diseño de refuerzo estático de cada uno de los sistemas.



Se pueden utilizar las gráficas individuales que estarían considerando un sismo de intensidad uniforme o la gráfica de resumen que se constituye como una mezcla probable de ciclos de intensidades variables.

5.2.2. Gráficos S-N

Estos gráficos son los más comúnmente utilizados en el diseño de refuerzos para elementos sometidos a cargas sísmicas. En base a los números de ciclos más probables de los sismos de la zona estudiada, obtenidos de los estudios estadísticos de registros, se obtiene la tensión última τ_u que soportaría cada uno de los sistemas. De esta manera, partiendo de valores de rotura obtenidos de ensayos estáticos ($N=1$) se puede estimar de manera simple la pérdida de capacidad de carga en función del número de ciclos.

Estos ensayos, mucho más simples que de cargas alternadas se pueden realizar para distintos sistemas con los materiales que se piensan utilizar en el refuerzo de la estructura.

6. FUTURAS INVESTIGACIONES

Este trabajo muestra que son necesarias para futuras investigaciones que permitan ir completando el estudio del funcionamiento de los refuerzos.

A continuación, se presentan alguno de estos argumentos a profundizar.

Diámetro de los bulones

Los ensayos de este trabajo se concentraron en la utilización de bulones de acero SAE 1045 de diámetro 3/8". En algunos ensayos estáticos, se probó utilizar un diámetro superior 7/16", verificando un incremento del 22 % en la carga de rotura. Por lo tanto, el incremento de diámetro presenta una alternativa a estudiar.

Mejoramiento de la rugosidad superficial del hormigón

Las mejoras en la preparación superficial del hormigón consistente en la creación intencional de rugosidades ameritan profundizar el estudio de diferentes técnicas.

Ensayos de cargas pulsantes y de fatiga

La investigación sobre la aplicación de cargas pulsantes en los ensayos de tracción excéntrica y en los ensayos de fatiga sobre vigas demostraron la buena respuesta de estos sistemas de refuerzo. La investigación adicional debería considerar la ejecución de ensayos de larga duración.

Ensayos de cargas pulsantes sin cambio de signo

Un número bajo de especímenes se ensayó a cargas pulsantes de un solo signo, creemos que el hecho de no alternar el sentido de la carga reduce de manera importante la degradación de la unión, aumentando la resistencia.



Referencias Bibliográficas

Normas

ACI 440.2R-17 (2017) – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.

CIRSOC 201 (2005) - Reglamento argentino de estructuras de hormigón

Publicaciones

Bank L.C., D. Arora (2007) - Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP (MF-FRP) strips – Compositated structures 79 – pages 180-191

Busnelli A.P. (2018) - Diseño del refuerzo de vigas de hormigón armado con láminas de PRFV – Tesis doctoral – Fac. Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura UNR

Busnelli A.P., R.E.López, M. del Rio (2014) - Refuerzo de vigas de hormigón armado con láminas de PRFV” – 23º Jornadas de Ingeniería Estructural

Busnelli A.P., R.E.López, M. del Rio (2016) - Vigas de hormigón armado reforzadas con láminas de PRFV abulonadas – 24º Jornadas de Ingeniería Estructural

Focacci F., G. Giacomini (2009) - Utilizzo di connettori meccanici per il miglioramento dell'ancoraggio di nastri in FRP – Studi di revisione CNR

Lamanna A.J., L.C. Bank, D.T. Borowicz, D. Arora (2003) - Strengthening of concrete beams with mechanically fastened FRP strips – Papers University of Wisconsin, Madison USA

Napoli A. (2009) - RC Structures Strengthened with Mechanically Fastened FRP Systems - University of Miami

Yoshikate, I., Yumikura, K., Mimura, Y., & Kim, Y. J. (2011). Composite strips with various anchor systems for retrofitting concrete beams. International Journal of Computing Science and Mathematics, 5(1), page 43-48