

RESPUESTAS EXPERIMENTALES POR FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO



REFORZADAS CON FIBRA DE CARBONO

Por: MSc. Ing. Jorge Bazán Serrano
 Jefe de Proyectos en Top Consult Ingeniería SAC.
 jbazan@topconsult.com.pe

Las técnicas comunes de rehabilitación y reforzamiento de estructuras de concreto existentes se llevan a cabo mediante procesos y con materiales tradicionales con la finalidad de que resistan mayores cargas de diseño, corrijan pérdidas de resistencia por deterioro y/o deficiencias constructivas, e incrementen la ductilidad de diseño.

Entre la diversidad de técnicas que se disponen se pueden mencionar el uso de platinas de acero externamente adheridas, camisas de concreto y/o acero, así como postensado exterior de los elementos de concreto armado.

Entre las nuevas técnicas emergentes se tienen las que se realizan mediante el uso de materiales compuestos, fabricados por fibras embebidas en una matriz de resina polimérica, llamados FRP por sus siglas en inglés (Fiber Reinforced Polymer). La aceptación de esta nueva técnica de reforzamiento de estructuras de concreto ha sido creciente a lo largo del mundo debido a sus diversas ventajas, principalmente a su bajo peso, alta resistencia y propiedades anticorrosivas.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL REFUERZO FRP

Sin embargo el sistema FRP demuestra un comportamiento de esfuerzo-deformación lineal elástico hasta la falla, sin ninguna ductilidad. Esta característica puede llegar a ser una

limitación importante para su aplicación en estructuras sismo-resistentes, donde se espera que la energía sísmica sea liberada por el comportamiento inelástico de los materiales que componen dicha estructura.

Tanto la resistencia como la ductilidad del sistema mixto (concreto armado + FRP) estará limitado a la relación entre la cantidad de acero de refuerzo y sistema FRP que se utilicen, que puede inducir a diferentes modos de falla, unos más dúctiles y otros más frágiles.

Entre otras limitaciones del sistema FRP se tiene: la calidad del concreto expresado en término de su resistencia cilíndrica a la compresión (f'_c), el nivel de deformación efectiva que el sustrato de concreto es capaz de soportar, el límite de las nuevas cargas a ser resistidas, y otras limitaciones (Guía para el reforzamiento externo de elementos de concreto reportada por el comité ACI 440-2R, 2008). El presente artículo estudia los diferentes modos de falla y sus características de la respuesta en cuanto a resistencia y ductilidad experimental.



Gráfico 1
 Viga de concreto armado montada en aparato de ensayo por flexión

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS ESTUDIOS EXPERIMENTALES

Los especímenes fueron construidos en condiciones de obra de la empresa patrocinadora de los ensayos. A los 31 días de vaciado se realizó una precarga de agrietamiento en tres de los especímenes. El reforzamiento externo se ejecutó al transcurrir 45 días desde el vaciado del concreto.

Sobre los especímenes reforzados con FRP de fibra de carbono se ejecutaron una serie de ensayos experimentales en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Ingeniería (CISMID), con la finalidad de identificar cuáles son aquellos modos de falla y configuraciones de refuerzo que resultan favorables en cuanto a la propiedad de ductilidad y resistencia que se espera de un sistema sismo-resistente (ver Gráfico N°1).

Las labores de concreto armado fueron ejecutadas por personal calificado de la empresa Constructora RF, y las fibras FRP de carbono fueron aplicadas por personal capacitado de Top Consult Ingeniería, empresa distribuidora de productos FRP de la marca Fyfe en Perú (ver Gráfico N°2).

Los ensayos de flexión fueron ejecutados sobre una estructura ensamblada de acero estructural, que consistió en un pórtico para sostener el transmisor de carga vertical y de una base nivelada, que fungía de apoyo tanto para los especímenes como para los transductores de desplazamiento que fueron colocados. Ambas estructuras se fijaron adecuadamente a la fundación rígida del laboratorio. La geometría del pórtico, la disposición de las vigas de concreto armado y la ubicación de los instrumentos se detalla en el Gráfico N°3. Los instrumentos empleados durante el ensayo de laboratorio incluyen: el sistema de medición (conformados por transductores LVDT), el transmisor o celda de carga y el sistema de adquisición de datos.

MODOS DE FALLA POR FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO EXTERNAMENTE REFORZADAS CON FRP

Se pueden obtener cuatro modos de falla de flexión para vigas de concreto armado reforzadas externamente con FRP, que dependen de las cuantías de refuerzo y calidad de los materiales considerados; éstas se describen a continuación (ver Gráfico N°4):



Gráfico 2
 Viga VF-01, después del ensayo

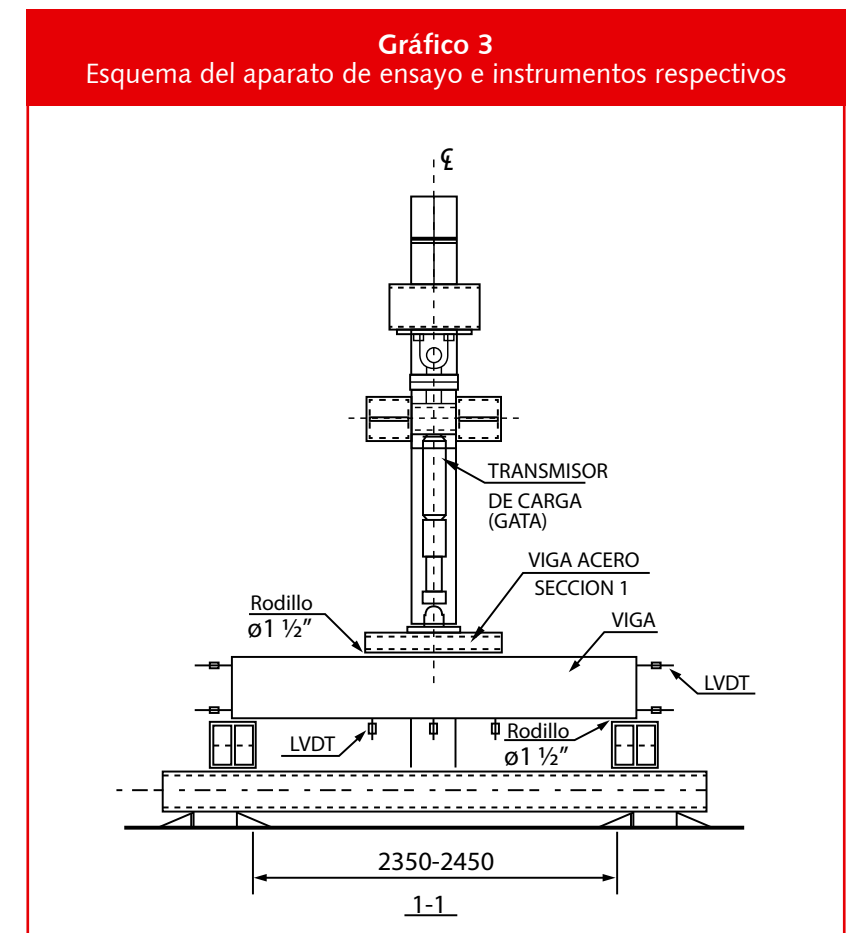


Gráfico 3
 Esquema del aparato de ensayo e instrumentos respectivos

- **Modo A.** Fluencia del acero de refuerzo, seguido por ruptura del FRP. La deformación en la fibra FRP supera su capacidad última resistente a la rotura ϵ_{fu} , mientras que las grietas por flexión y el esfuerzo en el concreto están por debajo de sus límites.
- **Modo B.** Fluencia del acero de refuerzo, seguido por despegue

o delaminación del sistema FRP. La falla se da por el despegue o desprendimiento del sistema FRP. La delaminación o despegue del sistema de refuerzo FRP frecuentemente controlan la falla antes que el modo A, porque la deformación por despegue ϵ_{fd} ocurre, generalmente, antes que la deformación de rotura ϵ_{fu} .

- **Modo C.** Fluencia del acero de refuerzo, seguida del aplastamiento del concreto. El mecanismo de falla se da cuando los esfuerzos de compresión asociados a la flexión superan la resistencia del concreto, mientras que los esfuerzos en el acero y concreto están en dentro de lo admisible.
- **Modo D.** Aplastamiento del concreto sin fluencia del refuerzo. La cantidad de refuerzo de acero y sistema externo de refuerzo FRP superan la cuantía balanceada, produciéndose una falla frágil, donde el acero no fluye y el sistema FRP está en esfuerzos bajos.

DISEÑO DE LOS ESPECÍMENES DE ENSAYO

Se diseñaron las vigas especímenes con el objeto de alcanzar los distintos modos de falla por flexión descritos, respecto a cada uno de sus materiales. En el Gráfico N°5 se muestra el detalle de los especímenes diseñados para los ensayos.

VF-01, VF-01A y VF-01B se diseñaron para obtener la fluencia en el acero de refuerzo interno seguido de una falla en el sistema FRP. V-Control (viga de concreto armado sin refuerzo externo FRP) se diseñó para alcanzar fluencia del acero de refuerzo, seguida del aplastamiento del concreto. VF-02 se diseñó para obtener una falla en el sistema FRP sin fluencia del acero de refuerzo interior. VF-03, se diseñó para que el concreto experimente aplastamiento antes que el acero alcance la fluencia o el refuerzo externo experimente alguna falla.

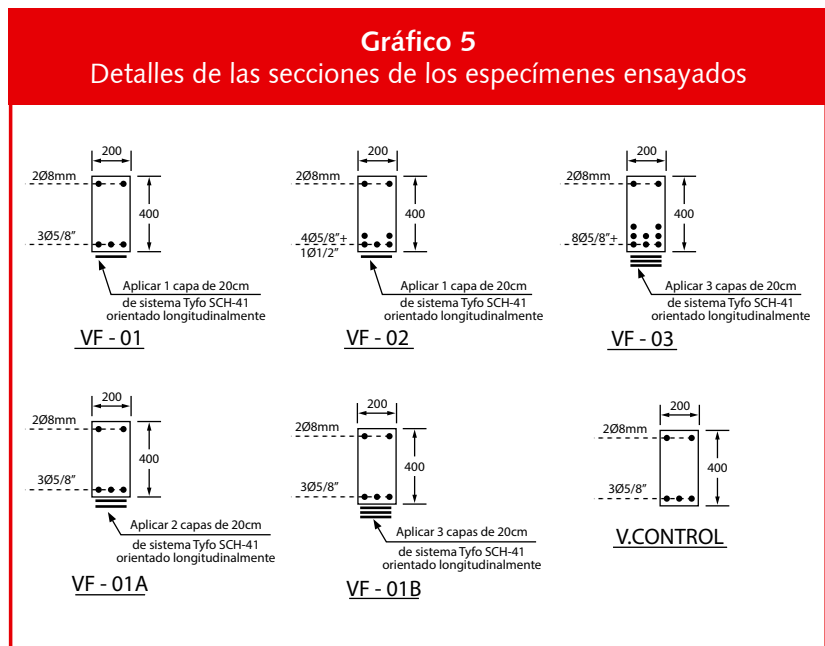
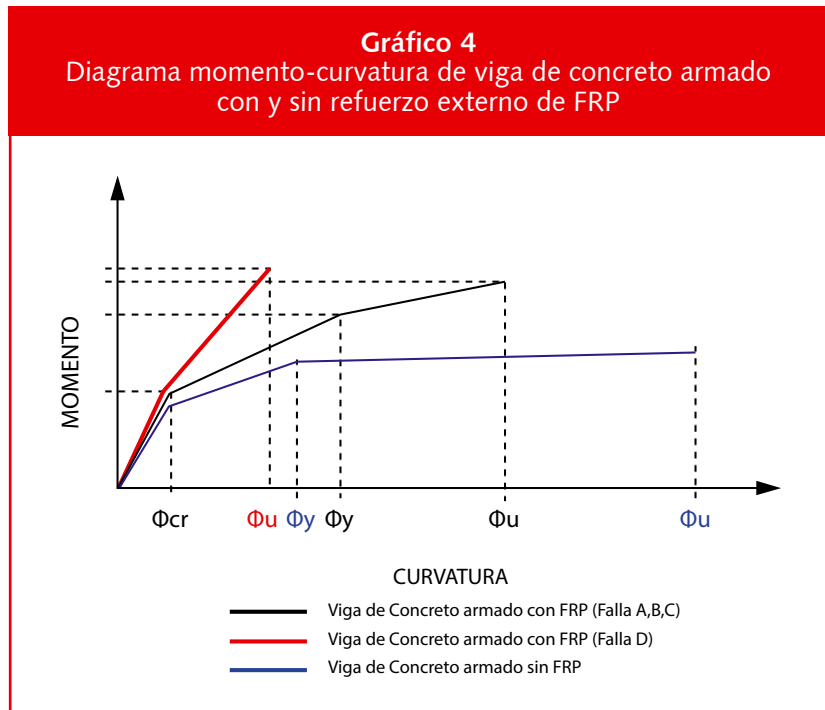


Tabla N° 1
Resumen de resultados del grupo de nuevos ensayos, con FRP de Tyfo SCH-41 de Tyfe

VIGA	Φ_{Mn} (ACI 440.2R-08) t-m	M_u t-m	M_u/Φ_{Mn} %	Falla Esperada	Falla Experimental	Descripción
V-Control	7.21	7.50	104 %	Fluencia	Fluencia	Fluencia
VF-01	11.1	15.82	142 %	Modo A	Modo A	Ruptura del FRP por tensión
VF-01A	11.81	17.02	144 %	Modo B	Modo B	Delaminación del FRP en un extremo
VF-01B	11.75	17.44	148 %	Modo B	Modo B	Delaminación del FRP en un extremo
VF-02	13.87	17.89	129 %	Modo C	Modo C	Fluencia, seguida de Aplastamiento del concreto
VF-03	13.79	19.27	140 %	Modo D	Modo D	Aplastamiento del concreto sin fluencia

El cálculo de las capacidades nominales de las vigas se ha realizado según lo indicado por la guía ACI 440.2R-08: Guide for the Design and Construction of externally Bonded FRP systems for Strengthening Concrete Structures (ACI, 2008) para refuerzo FRP externo en elementos de concreto armado.

RESULTADOS

En cuanto a resistencia, las probetas reforzadas externamente demostraron una sobre-resistencia de más del 30% superior a la resistencia anticipada por las ecuaciones del ACI. Similares resultados de sobre-resistencia han sido anticipados por diferentes investigadores. Así como también se tiene que las fallas prediseñadas coincidieron con las obtenidas experimentalmente. Tabla N°1

En el Gráfico N°6 se muestra el resultado carga P vs deflexión en el centro para los nuevos ensayos ejecutados.

Como parte de la investigación, se calcularon las ductilidades de las

diferentes configuraciones de refuerzo externo. Para ello se construyó la curva momento-curvatura de las diferentes vigas mediante métodos analíticos, y por simple comparación se obtuvieron conclusiones interesantes acerca del ensayo.

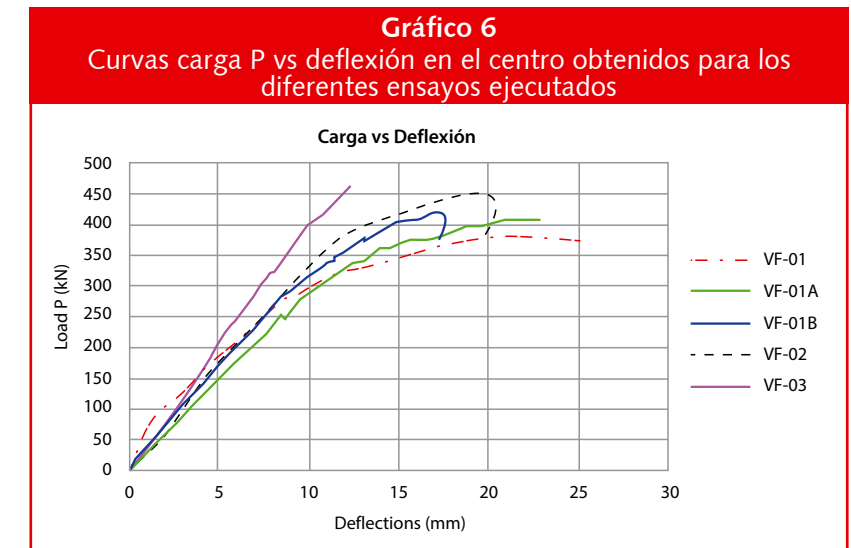
En el Gráfico N°7 se grafican y comparan la Viga Control, VF-01, VF-01A y VF-01B. Se puede ver el

efecto de rigidizar al ir agregando capa tras capa de FRP, así como la reducción de la ductilidad del sistema (ver Tabla N°2).

CONCLUSIONES

En cuanto a la ductilidad experimental, se tiene que:

- El factor de ductilidad obtenido para los ensayos varía dependiendo



[/MegaofficePeruSAC](#)
[/MegaDecorSRL](#)
 CENTRAL: 376 9095 WHATSAPP: 946 599 600 www.mega-decor.com

de la configuración en cuanto al número de capas, así como también para la rigidez del sistema FRP de refuerzo aplicado.

- El número de capas tiene una incidencia contraria en cuanto al factor de ductilidad así como también al factor de deformabilidad, influyendo de forma inversamente proporcional.

En cuanto a la respuesta momento-curvatura, se tiene que:

- La inclusión de un sistema de refuerzo exterior de FRP en una viga dúctil de concreto armado ocasiona la modificación en el comportamiento de la sección, en las siguientes tres características: un incremento de resistencia a la flexión, reducción de la curvatura última y modificación del modo de falla.
- El comportamiento final obtenido al reforzar una viga de concreto armado dependerá principalmente de la cuantía de acero de refuerzo existente, la cuantía de refuerzo externo FRP colocado, la rigidez axial del sistema FRP a aplicarse, así como la calidad del concreto de la sección. Otros factores que pueden afectar son el refuerzo de acero por compresión y el uso de refuerzos FRP transversales en "U", entre otros.
- En general la resistencia final de los elementos estuvo por encima de la resistencia calculada en concordancia a la Guía del Comité ACI 440.2R-08, en un promedio de 30% de la resistencia esperada. Esto está acorde a la filosofía de diseño propuesta por la guía mencionada.
- Los ensayos con una configuración que incluía anclajes en "U" en los extremos, en general, demostraron un incremento de resistencia mayor a los ensayos sin anclaje "U" extremo. Esto es compatible con lo indicado por la guía para el diseño, construcción y control de calidad de miembros de concreto externamente reforzados con FRP de China (CECS-146 (2003), que señala hasta un 30% de incremento en la deformación por delaminación del FRP, que en consecuencia produce un aumento en la resistencia a flexión final.

Gráfico 7
Curvas momento versus curvatura en el centro obtenidos para los ensayos indicados

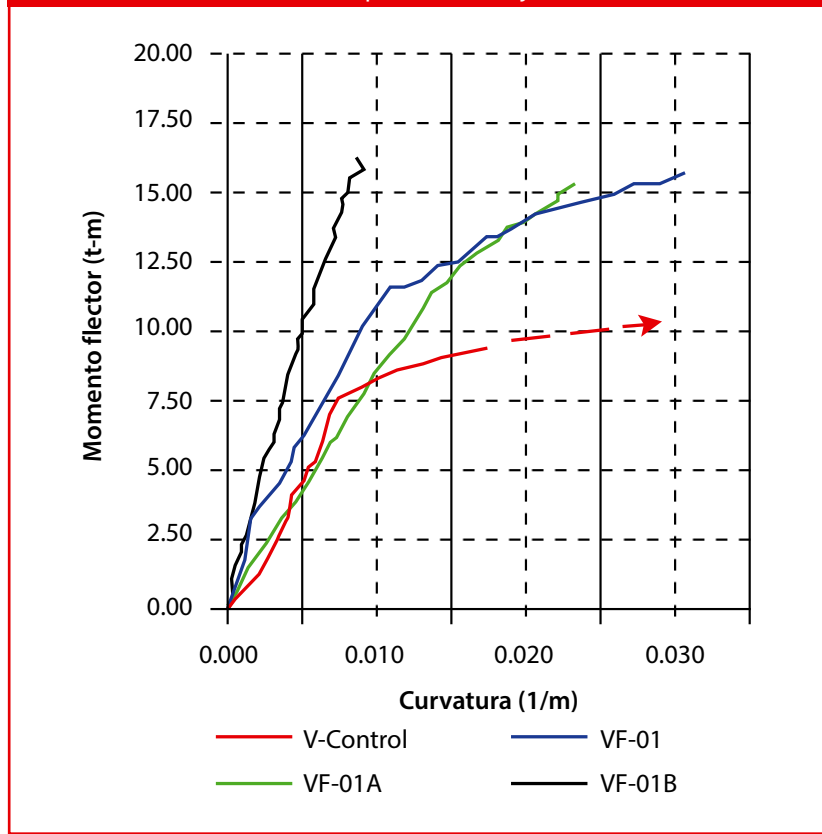


Tabla N°2
Resumen de resultados de ductilidad de vigas ensayadas con FRP de Tyfo SCH-41 de Fyfe

VIGA	nf # de capas	ρs Cuantía de acero (%)	ρf Cuantía de FRP (%)	μ Ductilidad Experimental
VF-01	1	0.86	0.29	2.92
VF-01A	2	0.86	0.58	1.89
VF-01B	3	0.86	0.87	1.17
VF-02	1	1.42	0.30	2.12
VF-03	3	2.53	0.97	-

REFERENCIAS

American Concrete Institute, Inc. (2008). 440-2R-08: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. Estados Unidos, American Concrete Institute, Inc.

American Concrete Institute, Inc. (1996). 440-R96: State of the Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Estados Unidos, American Concrete Institute, Inc.

Espinoza C., Baca E. (2005). "Reforzamiento de Estructuras con Fibras de Carbono". Tesis URP – FIC. Perú.

Bank L. (2006). Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials. Estados Unidos, John Wiley & Sons Inc.

Bazán J. (2015). "Estudio experimental y numérico del comportamiento de flexión de vigas de concreto armado reforzadas con bandas de FRP". Tesis, UNI – FIC. Perú. ■