

COMPORTAMIENTO DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADAS CON FIBRAS DE CARBONO EN ENSAYOS A ESCALA NATURAL

William Baca Escobar (1), Cristian Espinoza Anaya (2), Erik Baca Escobar. (3)

RESUMEN.

Son diversos los motivos por los que se requieren rehabilitar, reparar y reforzar las estructuras, entre los cuales podemos citar, defectos constructivos, cambio de uso, sobrecargas no previstas, corrosión, rehabilitación sísmica, etc.

Una de las técnicas que se viene empleando para realizar el reforzamiento de estructuras sujetas a flexión y cortante es el uso de las fibras de carbono, que trabajan adheridas a los elementos estructurales, este sistema es denominado FRP (Fiber Reinforced Polimer)

En el Perú se ha venido empleando esta tecnología desde la década del 90. Para el diseño y aplicación se han tomado en cuenta las recomendaciones de los fabricantes. El año 2002, el comité 440 del ACI emite el primer reglamento para el diseño y aplicación de elementos reforzados con el sistema FRP, estas recomendaciones han tomado en cuenta el estado del arte hasta la fecha.

El uso del sistema FRP en proyectos importantes y la necesidad de verificar el comportamiento de los elementos reforzados considerando los aspectos de resistencia, ductilidad, efectos de la longitud de adherencia del FRP, efecto del número de capas de refuerzo de FRP, los efectos del sistema de puente de adherencia, entre otros, nos llevaron a realizar un programa de ensayos, como parte de la asesoría a diversas tesis en la Universidad Ricardo Palma.

En el laboratorio de Estructuras del CISMID, se han realizado una serie de ensayos a escala natural de vigas reforzadas con el sistema FRP de diferentes patentes, para verificar su comportamiento y resistencia hasta la falla.

Los resultados obtenidos en estos ensayos son muy interesantes e ilustran lo complejo del comportamiento real, se ha determinado, que algunos especímenes ensayados no alcanzaron la resistencia nominal teórica de diseño, fallando prematuramente por delaminación del sistema y por desprendimiento del recubrimiento del concreto.

En base a estos resultados se proponen técnicas de reforzamiento y recomendaciones de diseño que permitirán mejorar el comportamiento de los elementos sujetos a cortante y flexión.

(1) Ing. Civil, Profesor del Área de Estructuras de la Universidad Ricardo Palma, Gerente de Operaciones de Constructora RF SA.

(2) (3) Ingenieros Civiles, Egresados de la Universidad Ricardo Palma, Autores de la tesis sobre Reforzamiento de Estructuras con Fibras de Carbono.

1) INTRODUCCION

En los últimos años, el avance de la ingeniería estructural ha sido importante, en el campo de la rehabilitación y reforzamiento estructural se vienen desarrollando nuevos métodos y tecnologías, uno de estos es el desarrollo de los materiales compuestos denominados, "Fibras de Carbono (FRP)" este material es el resultado de embeber fibras microscópicas de carbono en una matriz polimérica, la misma que ofrece excelentes propiedades fisicoquímicas y una elevada resistencia a la tracción en la dirección de las fibras, por lo que es ideal para reforzar elementos de concreto armado mediante la adhesión externa de bandas de fibra de carbono (FRP) en las zonas donde se requiera mayor resistencia a la tensión.

Es usual el empleo de reforzamiento con fibras de carbono para:

- Reforzar vigas, losas, columnas, muros si se requiere mejorar la resistencia a la flexión y el cortante.
- Reforzar columnas, placas si se requiere incrementar la carga axial y cortante por efecto de confinamiento.
- Otros usos como reforzamiento de puentes, estructuras especiales etc.

Las ventajas que ofrecen los sistemas de reforzamiento con fibras de carbono (FRP) son las siguientes:

- Tienen poco peso, lo que facilita la instalación y no aumenta carga a la estructura.
- No modifican la arquitectura o tamaño de la sección a reforzar, pues su espesor es reducido.
- Es muy resistente a la tracción.
- Es resistente a la corrosión
- Es fácil de instalar, pero estas labores deben ser realizadas por personal capacitado y acreditado por los fabricantes.

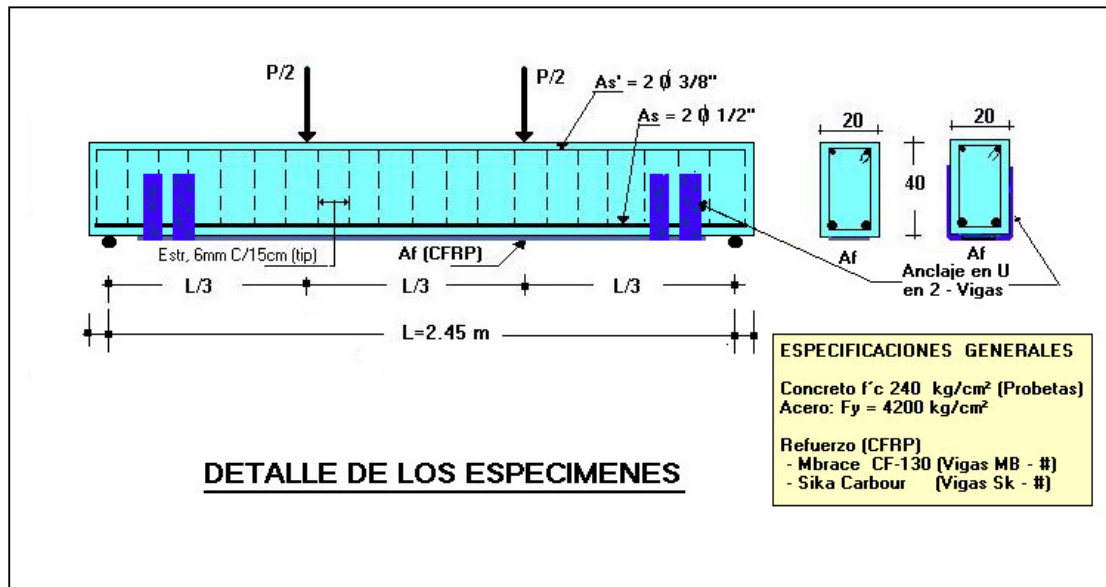
2) OBJETIVOS.

Con el objeto de estudiar el comportamiento de elementos sujetos a flexión, reforzados con el sistema CFRP se ensayaron 08 vigas de concreto armado a escala real, reforzadas con FRP, en el laboratorio de estructuras del CISMID.

El objetivo era verificar experimentalmente el tipo de falla, y compararlo con los valores teóricos de diseño, para ello se emplearon como variables el número de capas de reforzamiento, la longitud de anclaje extremo y el tipo de sistema de reforzamiento de FRP

3) DETALLE DE LOS ESPECIMENES ESTUDIADOS.

Para el reforzamiento se usaron fibras de carbono de patente Mbrace (CF-130) y Sika carbodur, La aplicación de cada sistema fue realizada siguiendo las recomendaciones de los fabricantes.



Se colocaron medidores de desplazamiento vertical y horizontal ubicados a los tercios de luz y en la zona central de cada viga, las características del refuerzo de las vigas ensayadas fueron las siguientes:

Denominación del espécimen*.	Dimensiones del espécimen (cm).	Sistema CFRP	Longitud sistema CFRP (cm)	Ancho sistema CFRP (cm).	Nº capas sistema CFRP	Anclaje en U.
MB-01	20x40x270	Mbrace	215	15	1	SI
MB-02	20x40x270	Mbrace	215	15	1	-----
MB-03	20x40x270	Mbrace	230	15	1	-----
MB-04	20x40x270	Mbrace	230	7.5	2	-----
MB-05	20x40x270	Mbrace	215	7.5	2	-----
SK-01	20x40x270	Sika CarboDur	230	10	1	-----
SK-02	20x40x270	Sika CarboDur	215	5	1	-----
NR-01	20x40x270	-----	-----	-----	-----	-----
MB-R	20x40x270	Mbrace	230	15	1	SI

- El espécimen **NR-01** fue tomado como patrón para determinar su capacidad sin refuerzo de FRP, luego fue reparado con resinas epóxicas y reforzado con el sistema FRP Mbrace, a este último espécimen se le denominó **MB-R**.

- La resistencia del concreto de las vigas obtenida mediante ensayos a compresión fue de $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$.

Las principales propiedades de cada sistema de refuerzo empleado son las siguientes:

Características	CF-130 Mbrace	Sika carbodur
Modulo de Elasticidad (E_f)	$2.35 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$	165 kN/mm^2
Deformación de Rotura (ϵ_f)	1.5% (0.015)	1.7% (0.017)
Resistencia a Tracción (T_u)	$35,500 \text{ kg/cm}^2$	$28,000 \text{ kg/cm}^2$
Espesor de la lamina (t)	0.165mm	1.2 mm

4) CALCULOS TEORICOS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA NOMINAL Y EL MODO DE FALLA ESPERADO.

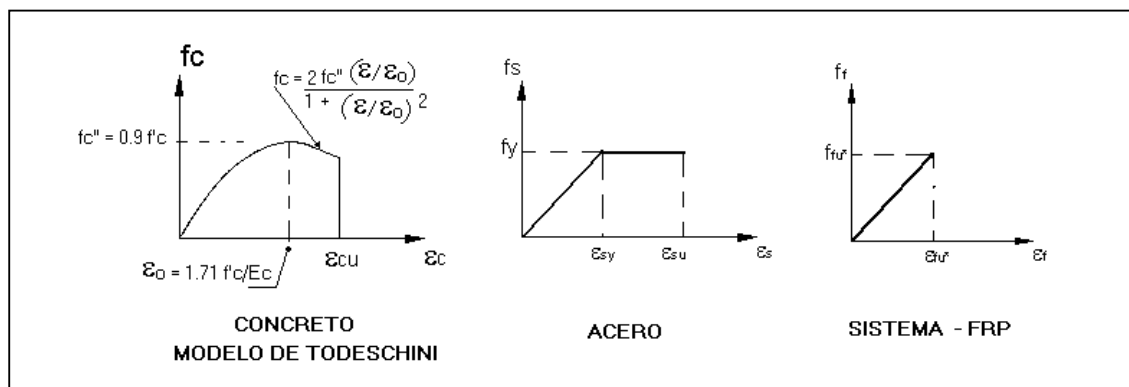
Se realizo un cálculo de resistencia nominal teórico de cada espécimen para compararlos con los resultados de los ensayos.

Para tal efecto se desarrolló un programa de cómputo en Visual Basic, para evaluar la resistencia a flexión, y construir los diagramas de Momento - Curvatura de secciones reforzadas con FRP. Este programa considera las recomendaciones de la Norma ACI – 440.

Las propiedades físicas, la relación esfuerzo – deformación de cada material, considerado para los cálculos teóricos han sido las siguientes:

Concreto: Para el calculo de la resistencia a flexión, se ha considerado la curva esfuerzo - deformación propuesta por Todeschini, que actualmente es muy recomendada por diversos autores para evaluar el comportamiento por flexión.

Acero: Para el acero se ha considerado el diagrama esfuerzo – deformación, elastoplástico bilineal.



Sistema CFRP: Las fibras de carbono tienen un comportamiento elástico lineal hasta la falla, lo que se refleja en la relación esfuerzo – deformación mostrada.

Las hipótesis para la evaluación de la capacidad por flexión han sido las siguientes:

- Prevalecen los criterios de Bernoulli, es decir, las secciones planas permanecen planas después de la ocurrencia de las cargas y las deformaciones son directamente proporcionales a su distancia al eje neutro.
- Se desprecia la resistencia a tracción del concreto.
- La deformación unitaria del concreto máxima es de $\epsilon_{cu} = 0.003$
- No existe deslizamiento relativo entre el sistema compuesto CFRP y el sustrato de concreto, es decir, la adherencia entre el sistema compuesto y el sustrato de concreto debe ser perfecta.
- La deformación de corte dentro de la capa adhesiva es despreciada, debido a que ésta es muy delgada, con pequeñas variaciones en su espesor.
- El ACI-440, con la finalidad de evitar la falla por delaminación o desgarre propone que la deformación efectiva admisible para el sistema sea:

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_b - \epsilon_{bi} \leq K_m \cdot \epsilon_{fu} \quad \text{donde:}$$

K_m Es un factor menor a 0.90, que toma en cuenta el tipo de fibras, su resistencia y el número de capas de laminado.

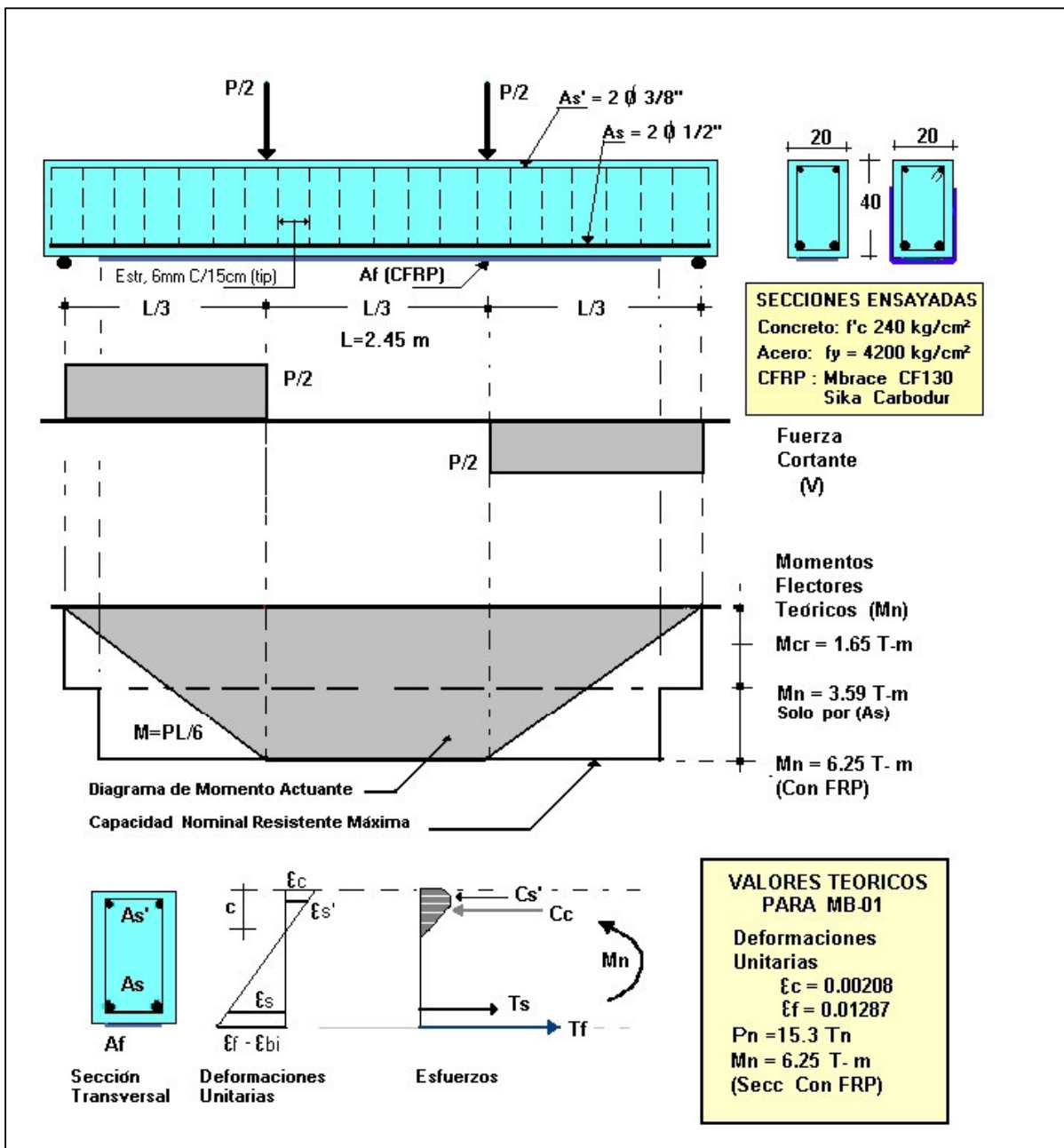
ϵ_{bi} : Es la deformación existente en la viga cuando se instala el sistema de reforzamiento.

- La deformación unitaria máxima nominal a la tracción (ϵ_{fu}), de cada tipo de sistema de refuerzo de CFRP consideradas para los cálculos teóricos han sido tomadas de las recomendaciones de los fabricantes, estos valores nominales sin considerar los factores de reducción (k_m) y factor de reducción por exposición ambiental (CE) son los siguientes:

- $\epsilon_{fu} = 0.008$ (Sistema Sika carbodur)
- $\epsilon_{fu} = 0.015$ (Sistema CF-130 - Mbrace)

En base a estas consideraciones, se han encontrado las resistencias nominales de cada espécimen.

La figura No. 01 muestra esquemáticamente la configuración de los ensayos realizados, también se muestran los valores teóricos de resistencia nominal para el espécimen No. 01



Capacidad Resistente por Flexión: (Mn)

- Verificación de Equilibrio: Tensión = Compresión: $Cs' + Cc = Ts + Tf$
- Momento Nominal: $Mn = Cs' (d-d') + Cc (d-a/2) + Tf (h-d)$

Nota: Para el diseño considerar los Factores de Reducción de Capacidad para el CFRP y para el concreto armado, según ACI - 440

Fig. No. 01:
Esquema de los Ensayos

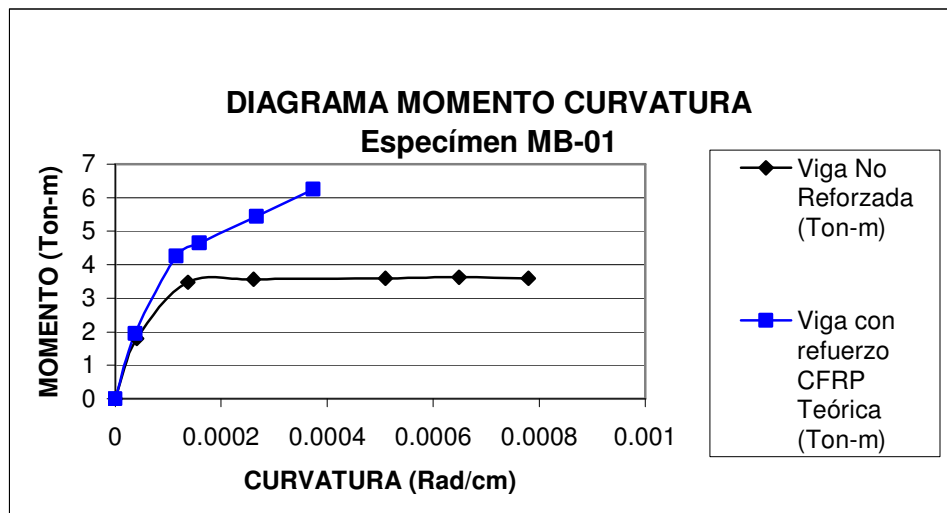
Valores teóricos calculados para MB-0 1

Para cada espécimen se construyó el diagrama Momento Curvatura, con la finalidad de compararlos con los resultados de los ensayos. Apreciamos el diagrama Momento - Curvatura calculado para el espécimen MB - 01.

De acuerdo a los cálculos teóricos, se esperaba una carga nominal de $P = 15.3$ ton para producir la falla de la sección reforzada con CFRP, la cual producía un momento flector nominal del orden de $M_n = 6.25$ Tn-m

La resistencia nominal de la sección no Reforzada con FRP (solo con acero) se determinó en $M_n = 3.59$ Tn-m.

En los diagramas apreciamos que el reforzamiento con CFRP incrementaría teóricamente la capacidad por flexión de este espécimen en un 75%, se aprecia también la pérdida de ductilidad de la sección reforzada con CFRP.



Tipo de Falla Esperada: En todos los casos, se había encontrado que el tipo de falla por flexión se iniciaría por fractura ó falla del sistema de fibras de carbono (CFRP) en la zona central, que era la de máximos esfuerzos por tracción.

Los especímenes se dimensionaron de modo tal de que no ocurra la falla por aplastamiento del concreto, se evaluaron previamente secciones de diferentes dimensiones de modo que los esfuerzos en la fibras más comprimidas estén por debajo de su capacidad máxima, en la figura No. 01 se indica que las fibras más comprimidas para el espécimen MB - 01 alcanza un valor de $\epsilon_c = 0.00208$.

Revisión por Fuerza Cortante: Para evitar la falla por cortante, las vigas se reforzaron con estribos cerrados de $\frac{1}{4}$ " espaciados a 0.15 en toda la longitud.

La fuerza cortante nominal (V_n) resistente de la sección considerando el aporte del concreto (V_c) y el acero de los estribos (V_s) son los siguientes:

$$\begin{aligned} V_c &= 0.53 \sqrt{f'c} b d = && 6,030 \text{ Kg.} \\ V_s &= A_v f_y d / s = && 6,093 \text{ Kg.} \\ \mathbf{V_n = V_c + V_s =} &&& \mathbf{12,123 \text{ Kg}} \end{aligned}$$

La fuerza cortante máxima actuante teórica, asociada al instante de la falla por flexión M_n , se determinó para cada caso por equilibrio estático, obteniéndose:

$$V = 0.5 P \quad \text{donde: } P = 6 (M_n) / L$$

Para el caso de las vigas más esforzadas se determinaron los siguientes valores:

$$\mathbf{Viga MB-02} \quad V = 7,650 \text{ Kg.} \quad (63\% \text{ de } V_n \text{ resistente})$$

$$\mathbf{Viga SK-01} \quad V = 10,600 \text{ Kg.} \quad (87\% \text{ de } V_n \text{ resistente})$$

En ambos casos la capacidad nominal resistente era mayor que el cortante actuante máximo, asociado al instante de la falla por flexión, por consiguiente la sección no debería fallar por cortante.

5) RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de Estructuras del CISMID bajo norma ASTM C-78.

La mayoría de especímenes fallaron prematuramente por delaminación del recubrimiento de concreto y despegue del CFRP en las zonas extremas, no alcanzando la resistencia nominal teórica por flexión, los tipos de falla encontrados se describen más adelante.

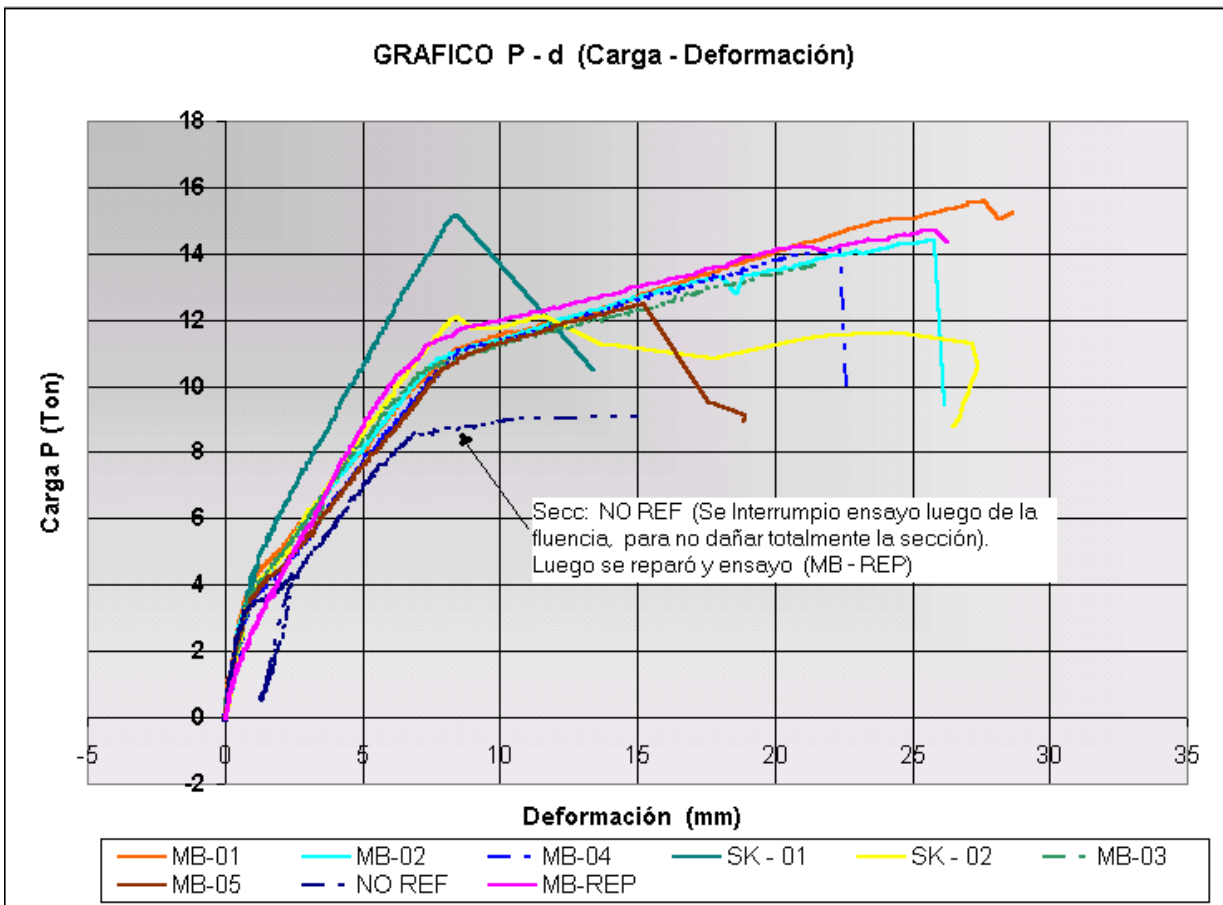
Mostramos una grafica Carga – Deformación, con el comportamiento de los 9 ensayos realizados, así mismo una tabla con las cargas máximas nominales (P), las deformaciones transversales de la viga medidas en el centro de la luz (d) en el instante de la falla así como los momentos flectores nominales (M_n).

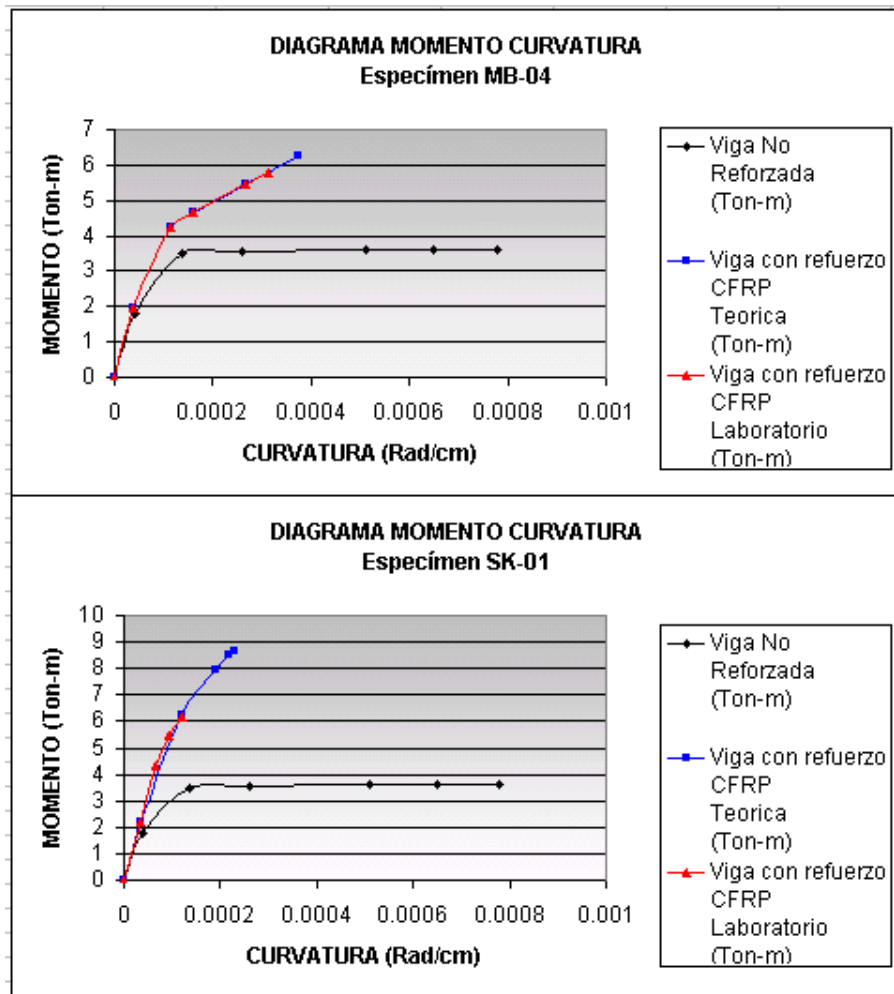
En base a estos resultados, se calcularon los diagramas Momento Curvatura de los ensayos, de este modo poder comparar los valores numéricos con los experimentales.

El objetivo era verificar el nivel de esfuerzos y deformaciones unitarias en el concreto y en las fibras de carbono en el instante de la falla.

Tabla Carga P, Deformación y Momento nominal Mn en el instante de la falla

Denominación del especimen.	Carga P (Ton)	Deformación (mm)	Momento nominal (Ton-m)
MB-01	15.6	27 mm	6.37
MB-02	14.4	26 mm	5.88
MB-03	13.65	22 mm	5.58
MB-04	14.15	23 mm	5.78
MB-05	12.475	15 mm	5.10
NO REF	9.05	15 mm	3.70
MB-REP	14.70	26 mm	6.00
SK-01	15.15	08 mm	6.19
SK-02	12.125	15 mm	4.95





Se muestran los diagramas Momento Curvatura de 2 especímenes, (MB-04) Y (SK-01) en los cuales podemos apreciar que ninguno de ellos llegó a alcanzar la capacidad nominal teórica por flexión, debido a que ambos fallaron por delaminación del recubrimiento en la zona de extrema de la viga.

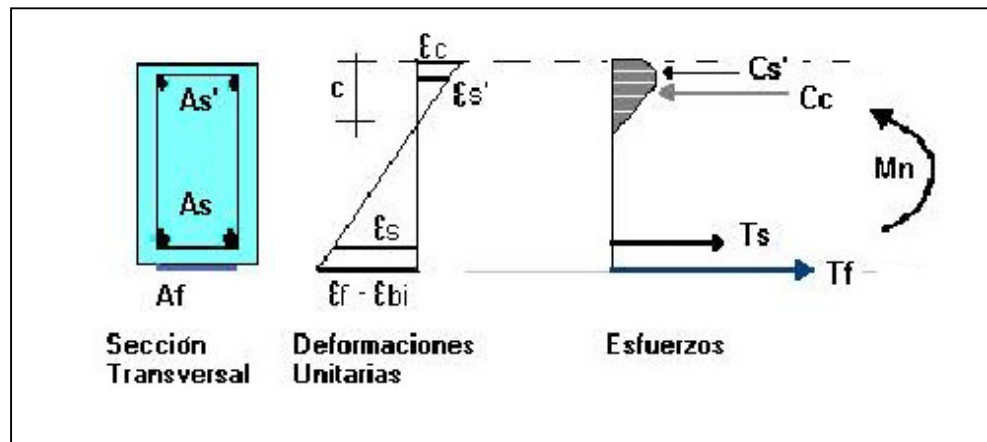
En el cuadro resumen siguiente, se observa que los especímenes con el sistema Mbrace CF-130, alcanzaron un Momento de falla promedio del 87% del Momento nominal teórico de cada sección.

Para las vigas con Refuerzo Sika carbodur, se aprecia que el Momento de falla alcanzó en promedio el 75% del Momento Nominal Teórico.

Las vigas a las que se adicionaron refuerzo en U en la zona extrema, (MB-01) y (MB-R) llegaron a desarrollar su capacidad nominal teórica por flexión.

RESUMEN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ESPECÍMENES ENSAYADOS

Denominación del espécimen.	Dimensiones del espécimen (cm).	Sistema aplicado.	Longitud sistema CFRP (cm).	Ancho sistema CFRP (cm).	Nº capas sistema CFRP	Anclaje en U.	TEORICO			LABORATORIO			$\frac{\epsilon_{f_{lab}}}{\epsilon_{f_{teo}}}$ (%)	$\frac{Mn_{lab}}{Mn_{te}} \circ$ (%)
							ϵ_c	ϵ_f	Mn	ϵ_c	ϵ_f	Mn		
MB-01	20x40x270	MBrace	215	15	1	SI	0.00208	0.01287	6.25	-----	-----	6.37	-----	102
MB-02	20x40x270	MBrace	215	15	1	-----	0.00208	0.01287	6.25	0.00179	0.011111	5.88	86	94
MB-03	20x40x270	MBrace	230	15	1	-----	0.00208	0.01287	6.25	0.001571	0.009609	5.58	75	89
MB-04	20x40x270	MBrace	230	7.5	2	-----	0.002074	0.01287	6.25	0.001727	0.010719	5.78	83	92
MB-05	20x40x270	MBrace	215	7.5	2	-----	0.002074	0.01287	6.25	0.001273	0.007475	5.10	58	82
SK-01	20x40x270	Sika CarboDur	230	10	1	-----	0.001813	0.007452	8.66	0.0009925	0.003815	6.19	51	71
SK-02	20x40x270	Sika CarboDur	215	5	1	-----	0.001429	0.007452	6.18	0.0009	0.004113	4.95	55	80
NR-01	20x40x270	-----	-----	-----	-----	-----	0.003	-----	3.59	-----	-----	3.70	-----	103
MB-R	20x40x270	MBrace	230	15	1	SI	0.00208	0.01287	6.25	0.001873	0.011625	6.00	90	96



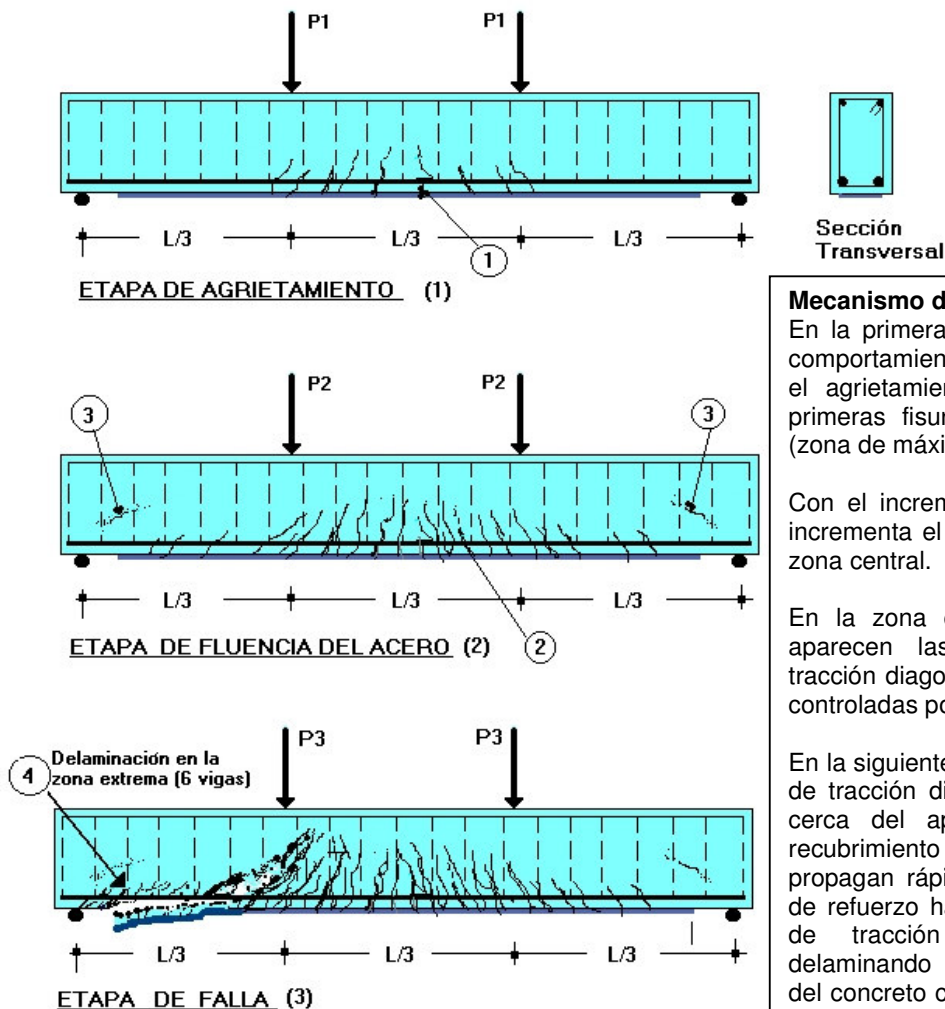
6.0 Evaluación de los Resultados

Los ensayos reportaron dos tipos de fallas.

- Falla por delaminación extrema
- Falla por fractura del sistema CFRP.

6.1 Falla por delaminación extrema: Este tipo de falla se presentó en 6 de los especímenes ensayados, MB-02, MB-03, MB-04, MB-05 y SK-01 y SK-02. El mecanismo de falla se describe a continuación.

ESQUEMA DE LOS ENSAYOS



Mecanismo de falla:

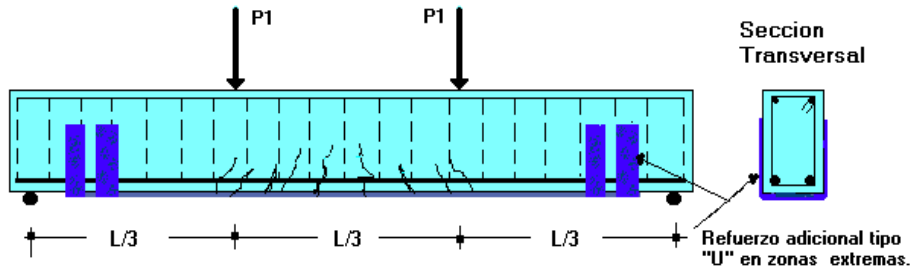
En la primera etapa, la viga tiene un comportamiento lineal y elástico hasta el agrietamiento, donde ocurren las primeras fisuras en la zona central, (zona de máximas tensiones) (1)

Con el incremento de las cargas, se incrementa el nivel de fisuración de la zona central. (2)

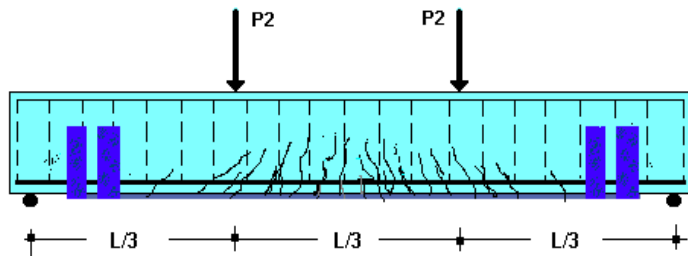
En la zona cercana de los apoyos aparecen las primeras fisuras de tracción diagonal, las mismas que son controladas por los estribos. (3)

En la siguiente etapa, aparecen fisuras de tracción diagonal y agrietamiento, cerca del apoyo, en la zona del recubrimiento inferior, estas fisuras se propagan rápidamente bajo el acero de refuerzo hasta alcanzar las fisuras de tracción por flexión (2) delaminando el recubrimiento inferior del concreto con el refuerzo de CFRP, ocasionando una falla frágil del elemento. (4)

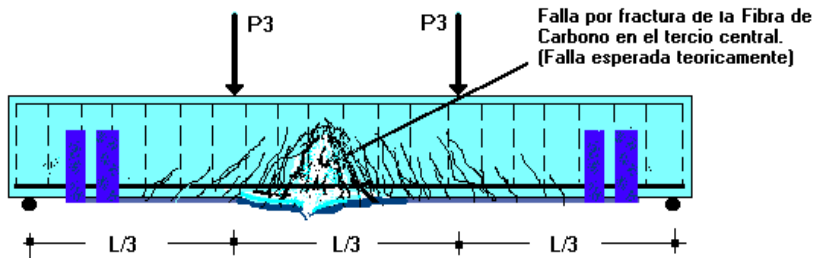
6.2 Falla por Fractura del Sistema CFRP: Este tipo de falla se presentó en los dos especímenes a los que se añadió un refuerzo tipo U en los extremos para mejorar el anclaje y evitar la falla por delaminación en los extremos.



ETAPA DE AGRIETAMIENTO (1)



ETAPA DE FLUENCIA DEL ACERO (2)



ETAPA DE FALLA (3)

Mecanismo de falla.

A pesar de tener las mismas características, referente a cuantías de acero y área de refuerzo por flexión de FRP, las vigas MB-01 y MB-R fallaron por fractura de las fibras en la zona central, luego de una intensa fisuración en la zona central.

Los anclajes en U en la zona extrema evitaron que se generen las grietas de tracción diagonal bajo el recubrimiento en la zona extrema.

Estas vigas alcanzaron en los ensayos la resistencia nominal teórica por flexión, con un grado de aproximación muy bueno, como se muestra



En estas vistas apreciamos la viga MB-01 ensayada, la falla se produjo por fractura del sistema CFRP, en la zona central, con valores ligeramente superiores a la resistencia nominal teórica, las bandas de refuerzo transversal tipo U, colocadas en los extremos evitaron que se produzca la falla por delaminación del recubrimiento cerca de los apoyos, como sucedió con 06 especímenes a los que no se colocaron dichas bandas.



En estas vistas apreciamos las vigas MB-02 y SK-02, estas vigas fallaron por delaminación anticipada del sistema de refuerzo, esta falla se inició en los extremos, cerca de los apoyos.

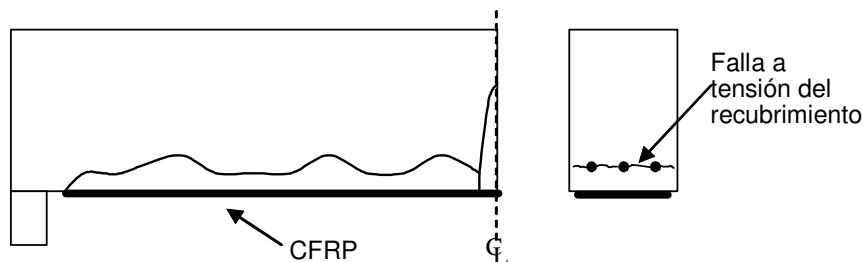
En la primera viga se observa que la delaminación produjo desgarramiento del recubrimiento de concreto, en el segundo caso la falla se inició por delaminación del sistema CFRP en la zona extrema.

7.0 MECANISMOS Y TIPOS DE FALLA POR DELAMINACION RECOMENDACIONES PARA EVITARLAS.

Los ensayos han permitido verificar un tipo de falla no muy estudiado y tomado en cuenta en el diseño, denominado falla por delaminación del recubrimiento del concreto. Las siguientes son las recomendaciones que permitirán evitar este tipo así como otras fallas asociadas.

7.1 Delaminación del recubrimiento: Como se ha apreciado en los ensayos el mecanismo de falla por delaminación es muy complejo debido a la existencia de mecanismos de transferencia de las tensiones de tracción por flexión y tracción diagonal o cortante. En los ensayos realizados se ha verificado que esta falla se inició desde lo extremos (zona de esfuerzos cortantes altos) y se propagó hasta la grieta por flexión, produciendo una falla frágil.

Diversas investigaciones y los ensayos realizados han demostrado que el uso de tiras perpendiculares de CFRP sobre los extremos de la lámina de refuerzo disminuye el efecto de delaminación por tensión del recubrimiento.



Delaminación causada por falla a tensión del recubrimiento del concreto.

Recomendación para evitar la falla por delaminación: Una de las recomendaciones que debe tomarse en cuenta para prevenir esta falla es verificar que se cumpla que:

$$V_u < 2/3 V_c \quad \text{donde:}$$

V_u: es la fuerza cortante amplificada en la zona de cortado final de las fibras.

En caso (**V_u > 2/3 V_c**) diversos investigadores recomiendan colocar envoltura en U para que el concreto de la zona exterior pueda transmitir los esfuerzos a la sección confinada.

En nuestra investigación, las vigas ensayadas falladas por delaminación tenían los siguientes valores de fuerza cortante nominal:

Resistencia del concreto:	$V_c = 6,030 \text{ kg}$	$(2/3 V_c = 4020 \text{ kg})$
Cortante Actuante Viga MB-05:	$V = 6,238 \text{ kg}$	$V = (1.03 V_c)$
Cortante Actuante para SK-02:	$V = 6,062 \text{ kg}$	$V = (1.01 V_c)$

Las vigas MB-01 y MB-R que tuvieron un refuerzo en U de 02 tiras verticales de 10 cm. de ancho espaciadas a 0.15 mts. Lograron soportar los siguientes cortantes, fallando finalmente por fractura del sistema FRP por flexión.

Cortante Actuante Viga MB-01:	V= 7,800 kg	V = (1.29 Vc)
Cortante Actuante Viga MB-R:	V= 7,350 kg	V = (1.22 Vc)

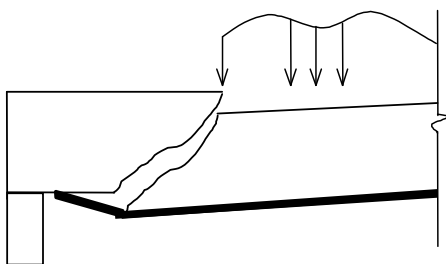
Los valores obtenidos confirman que la delaminación ocurrirá a esfuerzos cortantes del orden de (Vc), por lo que las recomendaciones indicadas, nos parecen totalmente acertadas, el uso de refuerzo en U incremento la resistencia en mas de 20%.

7.2 Falla de Delaminación por Cortante de la viga.

Las vigas que sean sometidas a unas cargas de flexión mayor a la capacidad resistente de la sección, fallarán ya sea por exceso de esfuerzo cortante o por una acción combinada de esfuerzo cortante con esfuerzo de flexión.

Es necesario verificar que los esfuerzos cortantes sean menores que los permisibles, considerando el aporte del concreto y el acero.

En nuestros ensayos, se produjeron grietas menores de tracción diagonal, las que fueron controladas por los estribos.



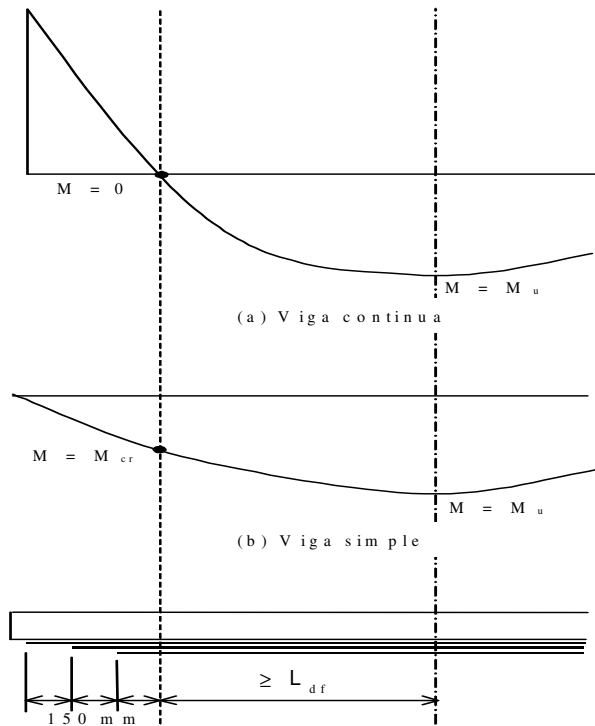
Delaminación causada por grietas por cortante de la viga.

7.3 Puntos de cortado de las láminas refuerzo de CFRP

El ACI-440 nos da las siguientes recomendaciones para ubicar los puntos de corte del refuerzo de FRP para vigas.

- Cada capa sucesiva debe terminarse a una distancia adicional de 150 mm, más allá del punto correspondiente al momento de agrietamiento.

- De manera similar a los refuerzos de acero, el laminado de CFRP debe extender su longitud de desarrollo desde el punto de esfuerzo máximo en la lámina.



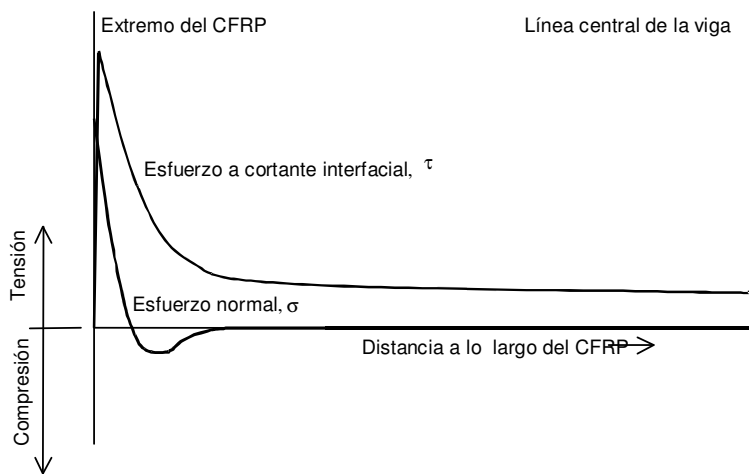
Esquema recomendado para el corte del refuerzo del laminado de 3 capas de FRP.

7.4 Delaminación por Corte Interfacial.

La distribución de esfuerzos tangenciales de corte y de los esfuerzos normales de tracción desarrollados a lo largo de la interfase concreto-sistema CFRP, se muestra en la siguiente figura

El fenómeno de delaminación puede ocurrir debido a que el concreto no puede mantener el esfuerzo cortante interfacial y el esfuerzo normal, teniendo como resultado la delaminación de la lámina CFRP conjuntamente con una capa de concreto relativamente delgada.

Nuestros ensayos reportaron una de estas fallas en el espécimen SK-02, el mismo que tenía el menor ancho de banda de CFRP (5 cm), que producía mayores esfuerzos en la interfase Concreto - Sistema FRP.



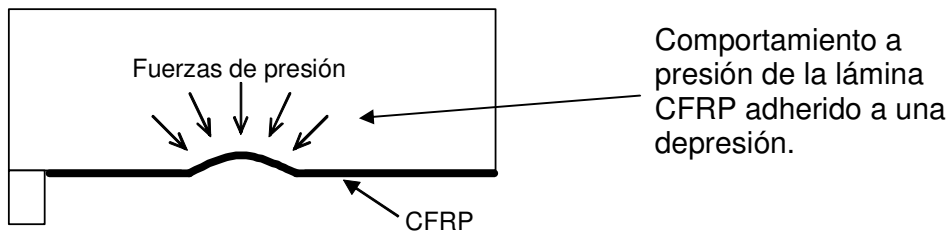
Distribuciones de corte interfacial y esfuerzo normal (delaminación) a lo largo de un laminado CFRP.

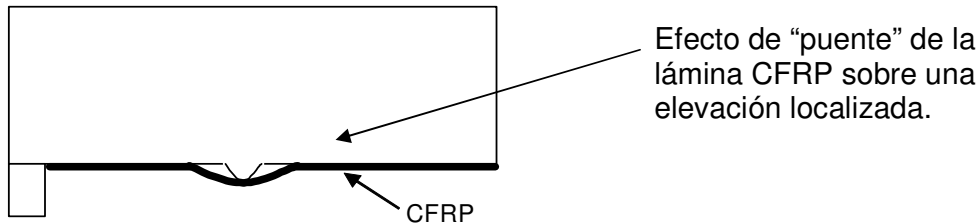
Para evitar este tipo de falla, se debe aplicar el refuerzo de FRP únicamente si el substrato de concreto es adecuado, ello se verifica mediante el siguiente ensayo:

Ensayo de Tracción del Concreto: Existe una prueba denominada ensayo de tracción “Pull Off” para determinar la capacidad resistente a la tracción del concreto y la adhesión del sistema FRP. El ACI 440, indica que el valor mínimo que debe tener el concreto para poder aplicar el sistema FRP es **ft = 14 kg/cm²**, de lo contrario la falla por delaminación sería muy probable.

7.5 Falla por delaminación por Irregularidades superficiales.

Debido a que el sistema CFRP puede seguir el contorno de las superficies de concreto, es importante rellenar las cavidades y desbastar las elevaciones para conformar una superficie lo más plana posible. Si la lámina CFRP sigue el contorno de una depresión no corregida o sobre una elevación localizada, iniciará la falla por delaminación.





7.6 Longitud de desarrollo.

Otros aspectos que deben considerarse es dar una adecuada longitud de desarrollo en la zona extrema. La distribución apropiada de esfuerzos de adhesión para un laminado CFRP adherido a un concreto agrietado, es una distribución triangular que comienza en 0, asciende en forma inclinada a la resistencia a la tensión del concreto, y desciende en forma inclinada a 0. Se supone que esta distribución de esfuerzos actúa sobre la longitud de desarrollo del CFRP. Esta suposición se hace comúnmente para la adhesión de placas de acero y es apropiada para sistemas CFRP.

Algunas expresiones para dimensionar la longitud de desarrollo son las siguientes:

$$\frac{L_{df}}{n} = \frac{2 \cdot f_{fu} \cdot t_f}{f_{ct}}$$

Donde:

- L_{df} Longitud requerida para que se desarrolle la resistencia a la rotura del laminado CFRP (mm).
- n Número de capas del sistema CFRP.
- f_{fu} Resistencia de diseño del sistema CFRP (Mpa).
- t_f Espesor de una capa del sistema CFRP (mm).
- f_{ct} Resistencia a tracción directa del concreto (Mpa).

Otra expresión para el cálculo de la longitud de anclaje es suministrada por Rostasy:

$$l_t = 0.7 \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{f_{ct,m}}}$$

donde:

- E_f Modulo de elasticidad del sistema CFRP (Mpa).
- t_f Espesor total del sistema CFRP (mm).
- $f_{ct,m}$ Resistencia media a la tracción del concreto (Mpa).

8) CONCLUSIONES.

Los ensayos nos han permitido verificar diferentes tipos de falla de las vigas estudiadas.

De las 08 vigas ensayadas con FRP, solo 2 alcanzaron la resistencia nominal teórica por flexión, debido a que se usaron anclajes tipo U que evitaron la falla por delaminación anticipada del sistema CFRP. Estas vigas, tienen grados de aproximación muy buenos, comparados con los valores teóricos por flexión.

Las vigas que no llegaron a alcanzar la resistencia nominal teórica, por el efecto de delaminación, fallaron a resistencias del orden del 87% para el sistema CF-130 MBrace y con resistencias del orden del 75% para el sistema Sika-Carbodur.

Un aspecto importante para un adecuado reforzamiento es el de prevenir las fallas por delaminación, en este trabajo se muestran los mecanismos de falla conocidos y reportados en estos ensayos, así como las recomendaciones para evitarlas.

El reforzamiento con FRP incrementará la resistencia de cualquier sección por flexión, sin embargo la falla final será del tipo frágil, debido a la pérdida de ductilidad de la sección. Por ello es importante determinar que tipo de elementos pueden ser reforzados mediante esta técnica.

Los efectos estudiados de las variables “ancho de la capa” de refuerzo y el “número” de capas se reflejan en los ensayos, por regla se tiene que: A menor ancho de capa, mayor esfuerzo de adherencia, por lo que la delaminación ocurrirá a valores menores de flexión. Del mismo modo la resistencia disminuye con el incremento del número de capas de refuerzo.

9) REFERENCIAS

- Mbrace Composite Design Guide, Master Builders Technologies, 1998
- ACI 440 2R-02: Guide for the Design and Construcción of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Estructuras. Sika “Guía para reforzamiento con sistemas de fibra de carbono para estructuras de concreto y madera”. Bogotá – Colombia 2003.
- S&P “Design guide Fiber Reinforced Polimer”. Austria – 2000.
- Antonio Nanni y Gustavo Tumialan “Aplicaciones de materiales compuestos en el reforzamiento de infraestructura”. I Convención Internacional del Capítulo Peruano del ACI - Lima 2002.
- Ari de Paula Machado “Reforco de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono”. Primera edición. Editorial Pini. Sao Paulo – Brasil 2002.
- R. Park & T. Paulay “Estructuras de concreto reforzado”. Editorial LIMUSA. México 1986.
- Reforzamiento de Estructuras con Fibras de Carbono: Tesis de Grado de la Univ. Ricardo Palma, 2005, Cristian Espinoza A. y Erik Baca Escobar.