

ASPECTOS BÁSICOS DE LA NORMA ACI 440 - 2008

DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADAS CON FIBRA DE CARBONO

Autor: Ing. William Baca Escobar
email: wbaca@topconsult.com.pe

Por diversas razones se necesita rehabilitar, reparar y reforzar las estructuras de concreto armado, entre las causas más usuales podemos citar: Defectos constructivos, cambio de uso, incremento de sobrecargas, cargas no previstas, adecuación sísmica, etc.

Una de las técnicas que se viene empleando a nivel mundial desde la década del 80 para realizar el reforzamiento de estructuras de concreto armado es mediante 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 hemos 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 emitió 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 de esta técnica hasta esa fecha. Posteriormente el año 2008, el comité 440 del ACI publicó la segunda revisión, la cual introdujo importantes modificaciones a la luz de las diversas investigaciones sobre el tema respaldado por los numerosos ensayos de laboratorio.

En nuestro país, 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, el efecto del número de capas de refuerzo, los efectos del sistema de puente de adherencia, entre otros, nos llevaron a realizar un programa de ensayos por flexión a escala natural, como parte de la asesoría a diversas tesis universitarias, estos ensayos se realizaron en el laboratorio de estructuras del CISMID.

Los resultados obtenidos 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 con las recomendaciones de los fabricantes, fallando prematuramente por delaminación del sistema y por desprendimiento del recubrimiento del concreto. A la luz de estos resultados y de numerosos ensayos a nivel mundial, la Norma ACI 440 el año 08, ha introducido diferentes parámetros y establecido criterios que permiten diseñar con mayor seguridad y confiabilidad el refuerzo de estas estructuras.

Estado del arte en el reforzamiento de estructuras con FRP.

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" este material es el resultado de embeber fibras 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 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, tuberías de concreto, pilotes en muelles u otras 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.
- La instalación es relativamente sencilla, pero requiere ser realizada por ingenieros y personal debidamente entrenado y capacitado por los fabricantes, ya que un error en la preparación de la superficie de concreto, mala forma de instalación, inadecuada saturación de las fibras de refuerzo o deficiente preparación de los epóxicos puede llevar a una inadecuada adherencia y falla prematura del sistema FRP.

PROPIEDADES DE LOS PRINCIPALES SISTEMAS FRP COMITÉ ACI - 440 R - 07						
FRP system	Fiber type	Weight g/m ² (lb/ft ²)	Desing thickness mm (in.)	Tensile strength, MPa (ksi)	Tensile elastic modulus, GPa (ksi)	ACI 440.3R test reporting method
Fyfe Co.LLC (2005)						
Tyfo SEH51 sheet	Glass	915 (0.19)	1.3 (0.052)	575 (83.4)	26.1 (3785)	Method 1
Tyfo SCH41 sheet	Carbon	644 (0.14)	1.0 (0.040)	985 (143)	95.8 (13,900)	Method 1
Sika Corp. (2007)						
Sika Wrap Hex 100G sheet	Glass	913 (0.19)	1.0 (0.40)	531 (77)	23.6 (3430)	Method 1
Sika Wrap Hex 103C sheet	Carbon	618 (0.13)	1.0 (0.040)	717 (104)	65.1 (9450)	Method 1
CarbonDur S plate	Carbon	1800 (0.37)	1.2 to 1.4 (0.048 to 0.055)	2800 (406)	165 (23,900)	Method 1
BASF (2006)						
MBrace EG 900 sheet	Glass	900 (0.19)	0.37 (0.015)	1517 (220)	72.4 (10,500)	Method 2
MBrace CF 130	Carbon	300 (0.062)	0.17 (0.007)	3800(550)	227 (33,000)	Method 2
MBrace CF 160	Carbon	600 (0.124)	0.33 (0.013)	3800 (550)	227 (33,000)	Method 2

Propiedades de los principales sistemas de refuerzo FRP

Todo diseñador debe tener muy claro las propiedades de los diferentes sistemas de refuerzo de fibra de carbono, las que son proporcionadas por los fabricantes, además debe distinguir si las propiedades reportadas son únicamente de las fibras de carbono o son las propiedades del sistema compuesto o sea fibras compuestas con las resinas saturantes.

El ACI 440, considera la posibilidad de diseñar las estructuras con las propiedades ya sea de la sección compuesta (Método 1) o con las propiedades únicamente de las fibras (Método 2) mostramos las propiedades de los sistemas de refuerzo reportadas por los fabricantes al ACI 440 - R07

Otro punto importante que todos los diseñadores deben tener presente es distinguir los esfuerzos y deformaciones máximas tolerables de los diferentes componentes de una sección a reforzar, vale decir concreto, acero y sistema FRP.

En azul se muestran las propiedades únicamente de las fibras de carbono, éstas pueden tomar esfuerzos a tensión con valores de 38,000 kg/cm² hasta una deformación unitaria de falla del orden de 1.7%

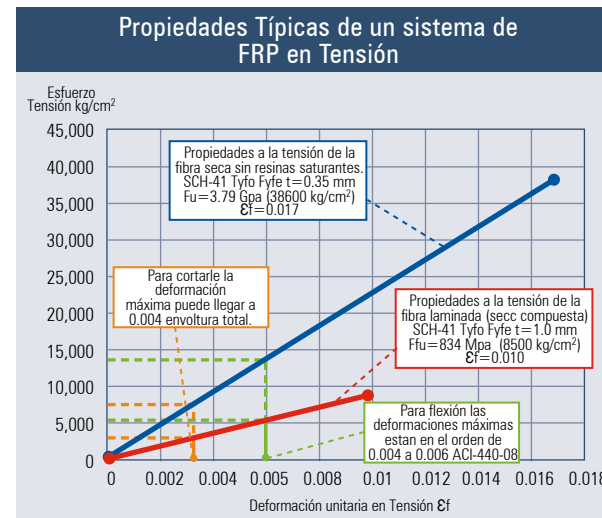
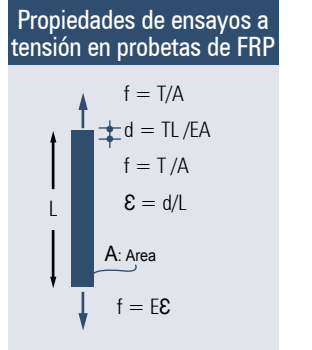
En rojo se muestran las propiedades de las mismas fibras pero ya saturadas con las resinas (sección compuesta) éstas soportan tensiones nominales del orden de 8,500 kg/cm², hasta deformaciones unitarias de falla del orden de 1.0%

Es importante tener presente además que estos valores son obtenidos en ensayos a tensión en laboratorio. Para el diseño por flexión, cortante u otros los valores máximos de las deformaciones unitarias de las fibras de refuerzo serán valores inferiores, debido a que las fibras están adheridas al concreto y antes de que las fibras lleguen a este nivel de deformaciones el concreto circundante se agrietará, presentándose fallas por delaminación del sistema de FRP.

En la décadas anteriores y hasta antes de la publicación de la norma ACI 440, 2008, los diseños se realizaban en base a las propiedades de las fibras y a las recomendaciones de los fabricantes. Era común diseñar por flexión considerando deformaciones unitarias del orden de 0.0015 y esfuerzos superiores en las fibras de 35,000 kg/cm².

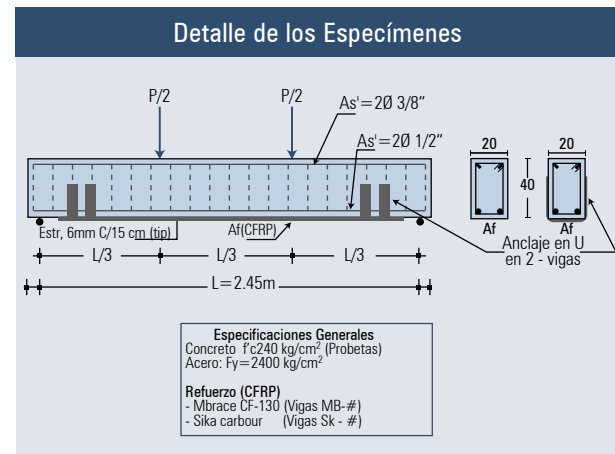
A raíz de numerosas investigaciones y ensayos, se comprobó que dichos valores estaban del lado de la inseguridad, lo cual ha sido corregido en la norma ACI 440 - 08.

El año 2006 dirigimos 2 tesis con ensayos a escala natural, las que se realizaron en el laboratorio del CISMID. Los resultados de los ensayos confirmaron que muchos de los valores y recomendaciones de los fabricantes estaban del lado de la inseguridad, muchas de las vigas no llegaron a alcanzar la resistencia teórica de diseño ya que antes fallaron por delaminación anticipada. A continuación mostramos los resultados más importantes y los tipos de falla encontrados en dichos ensayos.



El siguiente gráfico muestra las propiedades de uno de los tipos de fibra de carbono más empleados en nuestro medio distinguiendo las propiedades del sistema compuesto y el rango de esfuerzos y deformaciones unitarias para flexión y cortante.

Ensayos a escala natural Tesis E. Baca – C. Espinoza
Detalle de los especímenes ensayados.



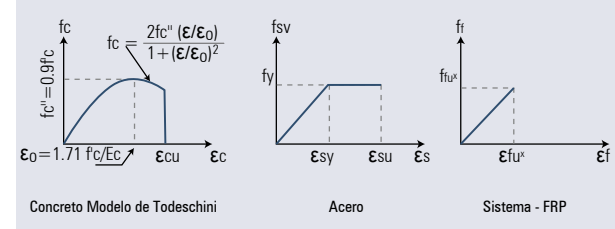
Cálculos teóricos para evaluar la resistencia nominal y el modo de falla esperado. (Con parámetros anteriores ACI 440 08)

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

Las propiedades de los materiales y consideraciones para los cálculos han sido las siguientes.

- **Concreto:** Para el cálculo 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.

Cálculos Teóricos para evaluar la resistencia nominal



Las normas indicaban que las deformaciones efectivas no debían exceder de:

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_b - \epsilon_{bi} \leq K_m \cdot \epsilon_{fu}$$

Donde:

ϵ_{fu} : Deformación máxima de cada sistema de fibra de carbono, reportada por los fabricantes, estos valores nominales sin considerar los factores de reducción (km) y factor de reducción por exposición ambiental (CE) fueron los siguientes:

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

Resultados de los ensayos.

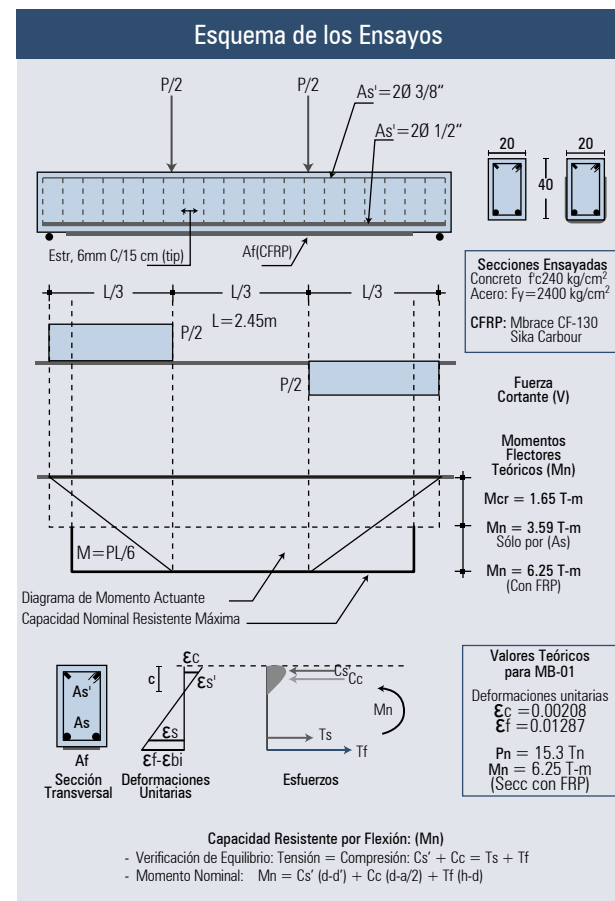
El espécimen NR-01 fue tomado como patrón para determinar su capacidad sin refuerzo de FRP, luego fue reparado con resinas epóxicas y reforzado con el sistema FRP Mbrace, a este último espécimen se le denominó MB-R.

La mayoría de especímenes fallaron prematuramente por delaminación del recubrimiento de concreto y despegue de la fibra de carbono en las zonas extremas, no alcanzando la resistencia nominal teórica.

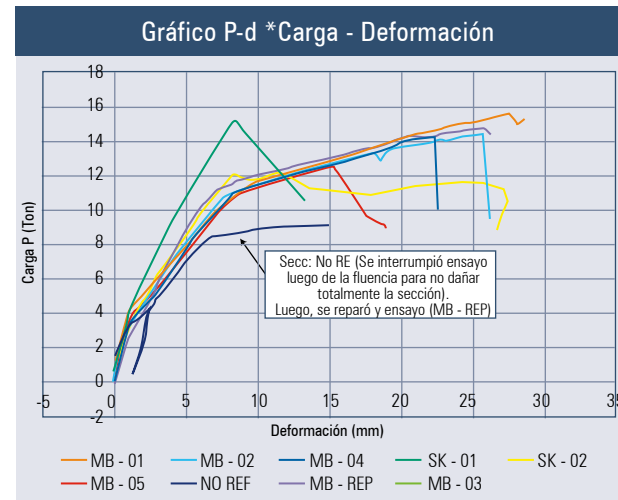
Algunas de las vigas reforzadas con Mbrace, alcanzaron Momento de falla del orden del (82% al 94%) del Momento nominal teórico.

Para las vigas con Refuerzo de platinas 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 la capacidad nominal teórica por flexión.



aviso
vivargo



Especimen	VALORES NOMINALES TEÓRICOS			RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIOS - CISMID			$\epsilon_{f_{100}} / \epsilon_{f_{100}}$ (%)	$M_{n_{100}} / M_{n_{100}}$ (%)
	ϵ_c	ϵ_f	M_n	ϵ_c	ϵ_f	M_n		
MB-01	0.00208	0.01287	6.25	-----	---	6.37	100	102
MB-02	0.00208	0.01287	6.25	0.00179	0.01111	5.88	86	94
MB-03	0.00208	0.01287	6.25	0.00157	0.00961	5.58	75	89
MB-04	0.00207	0.01287	6.25	0.00173	0.01072	5.78	83	92
MB-05	0.00207	0.01287	6.25	0.00127	0.00748	5.10	58	82
SK-01	0.00181	0.00745	6.66	0.00099	0.00382	6.19	51	71
SK-02	0.00143	0.00745	6.18	0.0009	0.00411	4.95	55	80
NR-01	0.00300	---	3.59	-----	---	3.70	---	103
MB-R	0.00208	0.01287	6.25	0.01163	0.01163	6.00	90	96

TIPOS DE FALLA

Los ensayos reportaron dos tipos de fallas.

Falla Tipo 1: 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-06. El mecanismo de falla se describe a continuación.



Mecanismo de falla:

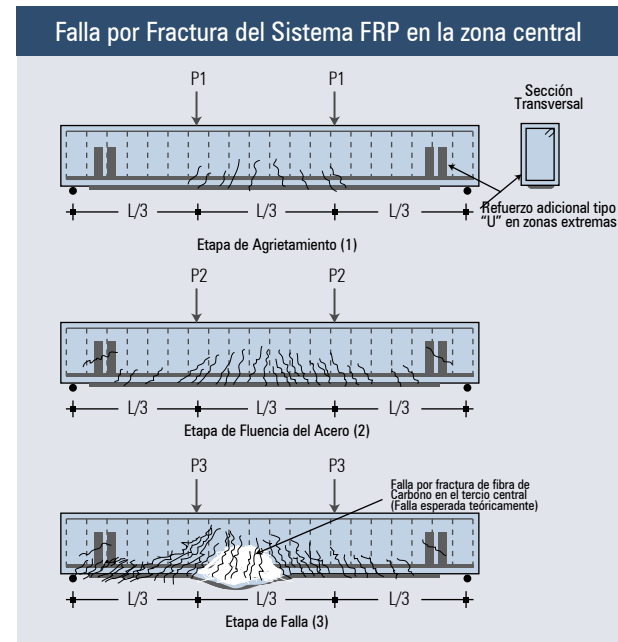
En la primera etapa, la viga tiene un comportamiento lineal y elástico hasta el agrietamiento, donde ocurren las primeras fisuras en la zona central, (zona de máximas tensiones) (1)

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)

Falla Tipo 2: Por Fractura del Sistema FRP en la zona central: 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.



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 aceptable, como se muestra en el cuadro resumen del comportamiento de los especímenes ensayados.



En estas vistas apreciamos la viga MB-01 ensayada, la falla se produjo por fractura del sistema FRP, en la zona central, con valores ligeramente superiores a la resistencia nominal teórica, las bandas de refuerzo trasversal 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.

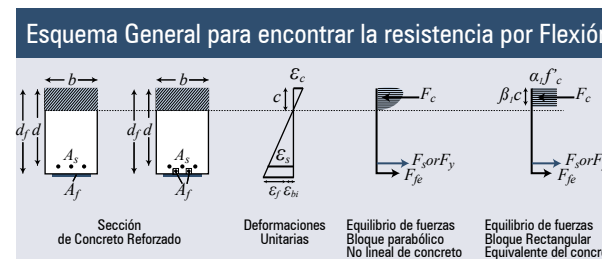
En estas vistas la falla por delaminación del recubrimiento de los especímenes MB-2 y SK-1. La falla se inicia cuando aparecen las fisuras de tracción diagonal y agrietamiento, cerca del apoyo, en la zona del recubrimiento inferior, estas fisuras se propagan rápidamente bajo el acero de refuerzo hasta alcanzar las fisuras de tracción por flexión, delaminando el recubrimiento inferior del concreto con el refuerzo de FRP, ocasionando una falla frágil del elemento.

PRINCIPALES DISPOSICIONES DE LA NORMA ACI – 440 R 2008 PARA EVITAR LA FALLA POR DELAMINACIÓN

El ACI 440 08, a la luz de los resultados de los numerosos ensayos a escala natural realizados en todo el mundo y en el Perú, introdujo un valor límite (ϵ_{fd}) para las deformaciones de las fibras en tracción, Así tenemos lo siguiente:

El ACI limita la deformación efectiva (ϵ_{fe}) hasta un valor máximo de (ϵ_{fd}) que está en función de la calidad del concreto, la rigidez y el número de capas de fibra de carbono ϵ_{bi} se define como la deformación de las capas en tracción durante la instalación del refuerzo de fibra de carbono.

Las deformaciones y esfuerzos en el concreto, acero y fibra de carbono, se calculan en base a los criterios usuales de la teoría de concreto reforzado:



$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd}$$

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$$

Valores límite de ϵ_{fd} para Refuerzo de FRP Adherido externamente (Laminados)

$$\epsilon_{fd} = 0.083 \sqrt{\frac{f'_c}{n E_f t_f}} \leq 0.9 \epsilon_{fu} \text{ in in.-lb units}$$

$$\epsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{n E_f t_f}} \leq 0.9 \epsilon_{fu} \text{ in SI units}$$

Revisión de Esfuerzos en la Etapa de Servicio.

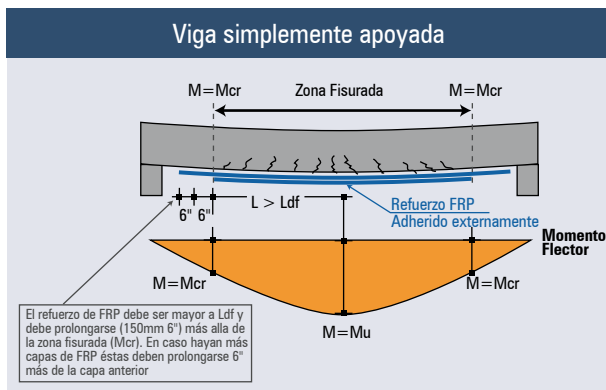
El ACI 440 limita los esfuerzos bajo cargas permanentes o cargas de servicio. Se debe verificar que los esfuerzos en el acero, concreto y fibra de carbono no se excedan de:

- $f_s < 0.8f_y$ (Para el Acero en tensión)
- $f_c < 0.45 f'c$ (Para el concreto en compresión)
- $ff < 0.55 ff_u$ Sistema de Refuerzo C-FRP (Fibra de Carbono)

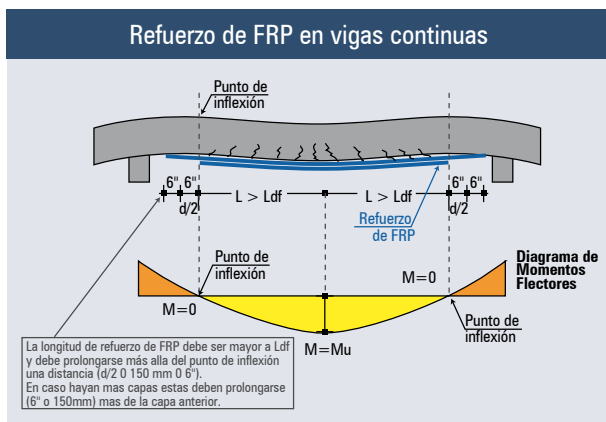
Longitud del Refuerzo de Fibra de Carbono.

Por otro lado es importante que el refuerzo con fibra de carbono tenga una longitud adecuada de adherencia y los extremos se encuentren anclados y/o adheridos en zonas no fisuradas. Para estos efectos el ACI 440-08 recomienda lo siguiente:

a) Anclaje del Refuerzo en vigas simplemente apoyadas



b) Vigas continuas.



Otros factores que minimizaran el riesgo de falla por delaminación son los siguientes

- Detallar el refuerzo de manera de minimizar el esfuerzo de adherencia durante la transferencia de esfuerzos entre las bandas de fibra de carbono y el sustrato de concreto.

Esquema de refuerzos de 03 sistemas aparentemente equivalentes

A	B	C
Af = 01 capa de 30 cm e = 1 mm x capa	Af = 02 capa de 15cm e = 1 mm x capa	Af = 01 capa de 10 cm e = 3 mm x capa
Af = 30x0.1 = 3cm ²	Af = 15x0.1 = 3cm ²	Af = 10x0.3 = 3cm ²
Area contacto: 30 cm	Area contacto: 15 cm	Area contacto: 10 cm
Esf Adh = $\frac{Tensión}{Área contacto}$	Esf Adh = $\frac{Tensión}{Área contacto}$	Esf Adh = $\frac{Tensión}{Área contacto}$
Esf Adh = 1	Esf Adh = 2	Esf Adh = 3

El esquema mostrado muestra 3 hipotéticos sistemas equivalentes, pues la cantidad de fibra de carbono es la misma, (3 cm²) sin embargo, por efectos de riesgo de delaminación, el sistema (A) es el más óptimo debido a que ofrece el menor valor de esfuerzos de adherencia a la tensión (falla por delaminación) que los otros sistemas (B) y (C) pues ofrece mayor área de contacto para la transferencia de esfuerzos.

- Si los esfuerzos cortantes son moderados ($V_u > 0.67V_c$) se debe suministrar un refuerzo adicional tipo U en las zonas extremas o de máximos cortantes. El área del refuerzo transversal (anchors) se puede evaluar considerando la siguiente ecuación:

$$A_f \text{ Ref. Transv} = \frac{(A_f F_{fu}) \text{ Ref. long.}}{(E_f k_v \epsilon_{fu}) \text{ Ref Transv}}$$

Actualmente los fabricantes vienen desarrollando sistemas de anclajes de fibra de carbono para poder anclar el refuerzo de las vigas en cortante, momentos negativos, anclajes de columnas y otros, como se aprecian en los esquemas adjuntos de Patente Tyfo - Fyfe. ■

Esquema de Anclajes de Fibra de Carbono (Anchors) para vigas

