

COMPORTAMIENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS CON FIBRAS DE CARBONO (CFRP)

Ricardo PROAÑO

(CISMID – Facultad de Ingeniería Civil - Universidad Nacional de Ingeniería)

RESUMEN

En respuesta a la creciente necesidad de reparar o rehabilitar estructuras de concreto reforzado, han surgido nuevas tecnologías de reforzamiento estructural entre las cuales los polímeros reforzados con fibras de carbono de alta resistencia (CFRP) son una alternativa real para la industria de la construcción dada la relación costo-beneficio, facilidad de colocación, etc.

Los ingenieros que intentan hoy el uso de CFRP en aplicaciones de reforzamiento externo se encuentran en el reto de la innovación. Actualmente no existen reglas claras para el diseño de elementos concreto (vigas o columnas) reforzados con CFRP, El instituto americano del concreto (ACI) comité 440-F esta desarrollando un documento (ACI 440F-99,1999) para proporcionar recomendaciones de diseño y técnicas de construcción para el uso de CFRP para el reforzamiento de concreto. Sin embargo esta por definirse una metodología explícita para uso apropiado de factores de seguridad, baja ductilidad, anclajes, etc.

Con respecto a esto proporcionarán algunos lineamientos conservadores para la filosofía del diseño utilizada en la actualidad y de los valores ϕ de fiabilidad del material.

El objetivo principal de este documento es tratar de describir el comportamiento de las estructuras de concreto reforzado con CFRP a través de los diagramas de momento-curvatura correspondientes a secciones compuestas (concreto-acero-CFRP) sometidas a flexión, también se muestra la formulación matemática para la obtención de estos diagramas.

INTRODUCCIÓN

El reforzamiento externo con CFRP (Polímeros Reforzados con Fibras de Carbono) es adecuado para varias aplicaciones estructurales entre las cuales podemos nombrar:

- Aumento de la capacidad debido a algún cambio de uso.
- Reparaciones de secciones agrietadas.
- Reforzamiento alrededor de nuevas aberturas en placas.
- Confinamiento pasivo para aumentar la resistencia sísmica etc.

El reforzamiento externo con CFRP “no” debe de ser usado en las siguientes condiciones:

- La condición del concreto en la zona donde se debe de colocar las fibras esté deterioradas.
- Existencia de corrosión sustancial en el acero de refuerzo interno.
- La no existencia de acero suficiente para proporcionar un comportamiento dúctil al elemento de concreto armado.

1. - FILOSOFIA DE DISEÑO PARA EL REFORZAMIENTO

Los lineamientos básicos para el diseño que están siendo considerados por el instituto americano del concreto (ACI 440-F) se ajustan a lo siguiente:

- Límites en el comportamiento de la resistencia para mantener el comportamiento dúctil.
- Factores ϕ apropiados (fiabilidad) y límites en la resistencia de diseño.
- Criterio mínimo requerido antes del reforzamiento para prevenir el colapso del pegamento adhesivo toda vez que pueda estar comprometido a eventos incontrolables (fuego, vandalismo, impacto, etc.).

1.1. - Umbral de resistencia de estructuras previas al reforzamiento

La estructura debe de ser capaz de resistir las cargas de servicio sin fluencia del acero de refuerzo y que la resistencia última del sistema sin reforzamiento exceda las nuevas cargas de servicio por un factor de 1.2.

$$\phi S_n = 1.2 (S_D + S_L + \dots)$$

Lo anteriormente descrito proporciona los factores de seguridad implicados de $1.2/0.9 = 1.3$ (para flexión), y $1.2/0.85 = 1.4$ (para corte), intentando con esto prevenir la fluencia del acero de refuerzo. Este nivel de carga es similar al proporcionado por las guías del ACI para pruebas de carga $0.85(1.4D+1.7L)$ que implican un factor de seguridad de 1.3. Una carga incrementada de $1.2(D+L)$ a $1.4D+1.7L$ es a pesar de todo significativa, y ofrece oportunidad para el reforzamiento y que este esté limitado.

Estos factores de seguridad son necesarios para considerar la probabilidad de coincidencia de carga no prevista, material de baja resistencia, influencias de construcción no previstas, influencias ambientales no previstas, pérdida de la adherencia del adhesivo debido a altas temperaturas, buen comportamiento del elemento reforzado a lo largo del tiempo.

1.2. - Mínima cuantía de refuerzo para asegurar un comportamiento "Pseudo- Dúctil"

$$\rho = A_s / bd \leq 0.75 \rho_b$$

Lo cual garantizará que la estructura en caso de sobrecarga mostrará una deformación excesiva y una alerta visible de colapso.

2. - PROPIEDADES MECANICAS DE LAS FIBRAS DE CARBONO.

Las platinas CFRP son una combinación de fibras de carbono y una matriz de resina epoxica y tiene en la dirección de la fibra una resistencia y rigidez muy altas, así como un comportamiento excepcional a la fatiga, mejor que la del acero y además su densidad es muy baja. Las fibras están colocadas en dirección longitudinal correspondiendo a la dirección de la solicitación, de esta forma la lamina tiene una dirección unidireccional.

Las fibras son los elementos con capacidad de carga y la matriz epoxica sirve para unir entre sí las fibras, permite la transferencia de carga entre las fibras y las protege del medio ambiente.

La resistencia en dirección transversal a las fibras así como la resistencia a cortante son bajas. Las características mecánicas en dirección longitudinal son determinadas por el tipo de fibra y por el contenido en volumen de fibras en la platina.

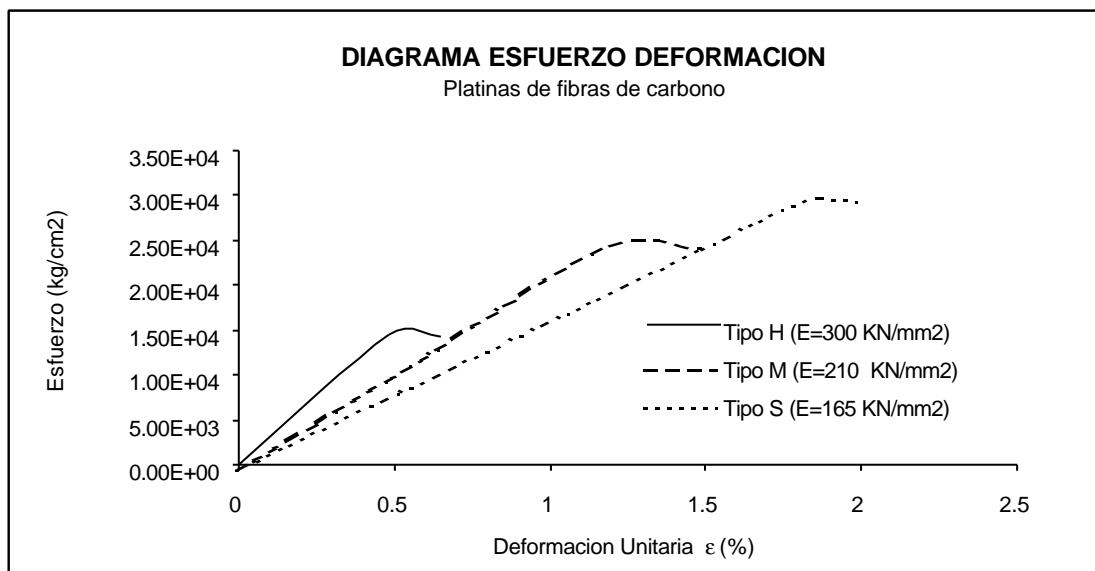


Fig. 1. Diagramas de Esfuerzo Vs. Deformación. De las fibras de carbono CFRP.

En la Fig. 1. Se muestra varias curvas de esfuerzo-deformación correspondientes a algunas existentes en el mercado. Se puede observar que las fibras de carbono con un módulo de elasticidad más elevado tienen menor esfuerzo máximo en tensión. Con respecto a las 3 curvas mostradas correspondientes a tres tipos de platinas S, M y H de acuerdo con su módulo de elasticidad, las 2 primeras son usadas mayormente para el reforzamiento de elementos de concreto armado mientras que la tercera se utiliza para reforzamiento de elementos de madera.

3. - PROPIEDADES MECANICAS DEL ADHESIVO.

El adhesivo es usado para unir las fibras de carbono al elemento estructural y para sellar el sustrato, previniendo las pérdidas del epoxico desde el tejido saturado. A continuación se muestran los rangos para las propiedades mecánicas del adhesivo existentes en el mercado.

	Adhesivo Epóxico
Esfuerzo máximo a la compresión	> 75 N/mm ² - 100 N/mm ²
Esfuerzo adhesivo en acero	> 10 N/mm ² - 26 N/mm ²
Esfuerzo adhesivo en el concreto	> 2 N/mm ²
Modulo de Elasticidad	9000 N/mm ² - 128000 N/mm ²
Temperaturas de trabajo	49°C - 93°C (120°F - 200°F)

4.- COMPORTAMIENTO DE SECCIONES REFORZADAS CON FIBRAS DE CARBONO

Las fibras de carbono no son un material dúctil y muestran un comportamiento de esfuerzo-deformación prácticamente lineal cuando es cargado a la falla en tensión, sin embargo las secciones de concreto armado con acero y con fibras de carbono muestran un comportamiento dúctil cuando son cargados a la falla.

Se puede observar que las curvas de momento rotación de vigas de concreto armado reforzado con fibras de carbono son bilineales. En las curvas se puede observar que lo siguiente:

- La primera parte de la curva presenta un ligero aumento en la pendiente con respecto a la curva que corresponde a la sección no reforzada.
- El punto de fluencia experimenta un aumento debido al refuerzo con las fibras.
- La parte de la curva comprendida entre la fluencia y la falla tiene una pendiente ascendente en vez de hacerse horizontal como es el caso de las curvas elastoplásticas.

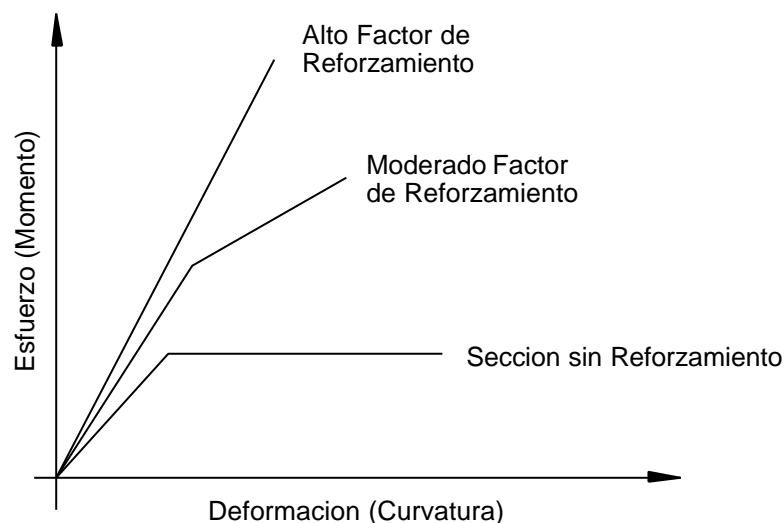


Fig. 2. Relaciones de Momento-Curvatura para secciones de concreto armado

Es importante que el diseñador entienda el comportamiento de la sección reforzada en la falla. Esto requiere no solamente evaluaciones tradicionales en los límites asociados con la ruptura del concreto (aplastamiento), acero y la fibra de carbono sino también los modos de falla relacionados con la adherencia del sistema CFRP, estos modos están asociados con la pérdida repentina de adherencia, o la súbita delaminación debido a la incompatibilidad de las deformaciones del sustrato de concreto reforzado y el compuesto CFRP. Adicionalmente a esto la fiabilidad estadística del material, de su manufactura y del proceso de instalación. Ya que la investigación de CFRP se encuentra en sus primeras etapas y muchas variables están siendo estudiadas y evaluadas, simples límites de deformación son apropiados para definir los estados límites empíricamente desarrollados.

5. - TIPOS DE FALLA

La Fig. 3, muestra la sección de una viga sometida a flexión que ha sido reforzada externamente con fibra de carbono en la zona en tracción y en el se pueden observar los distintos tipos de falla encontrados de manera experimental.

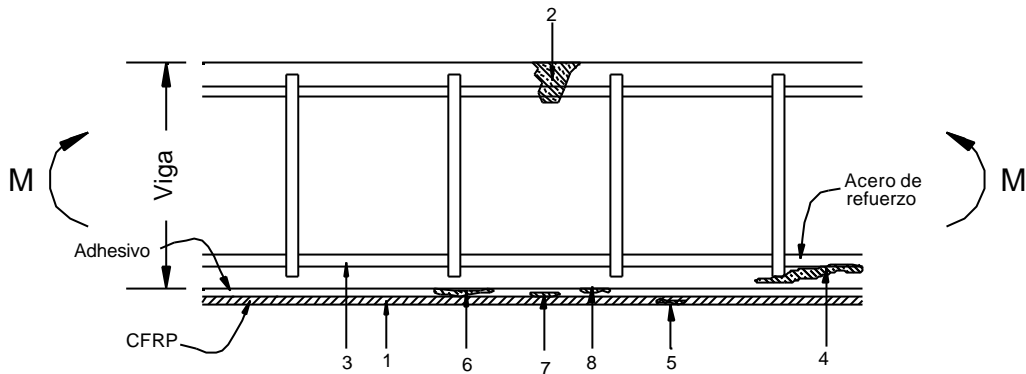


Fig. 3. Tipos de falla de secciones reforzadas con fibras de carbono.

1. - **Falla a tensión de fibra.** Cuando se alcanza la resistencia de tensión de la platina
2. - **Aplastamiento del concreto en la zona a compresión.** Cuando se alcanza la máxima deformación en el concreto ($\epsilon = 0.003$).
3. - **Fluencia del acero o rotura del acero.** Cuando se excede la deformación de fluencia o cuando se alcanza la resistencia a la fatiga.
4. - **Desprendimiento del concreto en la zona a tracción.** Debido a un desplazamiento vertical de la superficie inferior de la viga por irregularidades locales debidas a la insuficiente separación de la superficie y/o por desplazamientos relativos de las paredes de las fisuras por fuerzas de corte (se puede causar deflexión local de la platina CFRP)
5. - **Rotura interlaminar.** Si se sobrepasa la resistencia al corte en la platina CFRP esta falla a lo largo de las fibras y se da la rotura interlaminar.
6. - **Falla de cohesión en la capa de adhesivo.** Si los esfuerzos de corte en esta zona son muy grandes. También es debido a presiones perpendiculares al plano entre el concreto y el CFRP (fibra de carbono) a este efecto se le conoce como "pilling". También debido a la falla del adhesivo, se pueden presentar presencia de burbujas de aire en la pega luego de la colocación de la platina o CFRP.
7. - **Falla de cohesión (superficie de lamina CFRP).** Por falla en a adherencia en la capa platina o CFRP con el adhesivo. o por un mala preparación de la suoerficie de la platina o CFRP.
8. - **Falla de cohesión (superficie de concreto).** Por la misma razón que la anterior y también por la deficiente preparación de la superficie de concreto.

6. - FACTORES ϕ PARA ESTRUCTURAS REFORZADAS CON FIBRAS DE CARBONO CFRP.

Un elemento de concreto armado reforzado con CFRP es un compuesto conformado de tres materiales. Los principios de equilibrio y compatibilidad de deformaciones son aplicables y las ecuaciones de resistencia similares pueden ser formuladas. Estas formulaciones pueden estar basadas ya sea en un solo factor global ϕ conveniente para todo el compuesto o en un conjunto de factores ϕ_i aplicados separadamente a cada uno de los materiales que constituyen el compuesto (Concreto, acero y CFRP).

Los conceptos preliminares actuales que están siendo considerados por el ACI 440-F implican el uso de un método con un único y con varios factores ϕ sin embargo es de importancia recordar que en la actualidad varios tipos de materiales son usados para la reparación y rehabilitación de estructuras de concreto tales como: polímeros con fibra de vidrio (GFRP), polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP) y polímeros reforzados con fibras aramid (AFRP). Estos materiales compuestos vienen en diferentes presentaciones incluyendo entre otras platinas e hilos. Cada uno de estos materiales y sus variaciones se fabrican en forma diferente y poseen distintas propiedades de material y desempeño y es instalado en forma única.

Kelly et al. (1997) sugirió el uso de un factor ϕ general de 0.7 en el diseño para aplicaciones de reforzamiento a flexión con CFRP.

Karbhari y Seible (1997) señalan que los materiales FRP tienen registros de datos incompletos y deben de ser tratados como materiales en desarrollo. Por esta razón sugiere el siguiente procedimiento conservador para la determinación de los valores ϕ_f :

$$\phi_f = \phi_{Mat} * \phi_{Proc} * (\phi_{Curado} + \phi_{Loc}) * \phi_{Degr}$$

donde

- ϕ_{Mat} : debido a la incertidumbre del material.
- ϕ_{Proc} : debido al proceso de elaboración.
- ϕ_{Curado} : debido a la variación de propiedades según el curado.
- ϕ_{Loc} : debido a la incertidumbre en el nivel de desempeño.
- ϕ_{Degr} : debido a la degradación de las propiedades en el tiempo.

Para tejido de fibras de carbono saturado en obra, el documento de Karbhari y Seible (1997) sugieren $\phi_{Mat} = 0.97$, $\phi_{Proc} = 0.75$, $\phi_{Curado} = 0.9$, $\phi_{Loc} = 0.90$, $\phi_{Degr} = 0.75$, obteniéndose un valor de $\phi_{fibra} = 0.45$. Los valores propuestos para ϕ_{fibra} , ϕ_{Mat} , ϕ_{Proc} , ϕ_{Curado} , ϕ_{Loc} , ϕ_{Degr} son mucho mas bajos que los utilizados comúnmente para el concreto y el acero ($\phi_C = 0.90$, $\phi_S = 0.90$ en flexión).

Siguiendo con la determinación del factor ϕ apropiado para el material CFRP lo cual es una tare ambigua independiente del método utilizado la aproximación para incorporar un factor ϕ en la formulación de la resistencia global deberá ser establecido. El método canadiense ULSD aplica el factor ϕ del CFRP solo en la parte de la ecuación relacionada con la contribución del CFRP a la resistencia global.

Con lo anteriormente descrito la ecuación de la resistencia a la flexión se una sección reforzada podría estar dada por:

$$M_n = \phi \cdot \left[\alpha(\epsilon_{cm}) \cdot f_{2c} \cdot b \cdot k_d \cdot \left(\frac{h}{2} - \gamma(\epsilon_{cm}) \cdot k_d \right) + (E_f \cdot b_f \cdot e_f \cdot \epsilon_f) \cdot \left(\frac{-h}{2} - \frac{e_f}{2} \right) + \sum_{i=0}^n f_{s_i} \cdot A_{s_i} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_i \right) \right]$$

o

$$M_n = \left[\phi_c \left[\alpha(\epsilon_{cm}) \cdot f_{2c} \cdot b \cdot k_d \cdot \left(\frac{h}{2} - \gamma(\epsilon_{cm}) \cdot k_d \right) \right] + \phi_f \cdot \left[(E_f \cdot b_f \cdot e_f \cdot \epsilon_f) \cdot \left(\frac{-h}{2} - \frac{e_f}{2} \right) \right] + \phi_s \left[\sum_{i=0}^n f_{s_i} \cdot A_{s_i} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_i \right) \right] \right]$$

A continuación se muestran los valores de ϕ que distribuye Sika (uno de los principales distribuidores de CFRP en Europa y América) que, según ellos, deben de ser utilizadas hasta que nuevas investigaciones indiquen lo contrario

Tabla 1. Valores ϕ para el diseño recomendados

Modo de falla	f Concreto	f Acero	f Platinas Sika Carbodur	f Sika Wrap (Carbono)	f Sika Wrap (vidrio)	f Sikadur epoxico
Tensión Directa	--	0.90	0.60	0.45	0.25	--
Flexión	0.90	0.90	0.60	0.45	0.25	--
Compresión (estribos)	0.70	0.70	0.60	0.45	0.25	--
Compresión (espiral)	0.75	0.75	0.60	0.45	0.25	--
Corte	0.85	0.85	0.60	0.45	0.25	--
Adherencia (tensión al corte)	0.50	0.70	0.60	0.45	0.25	0.40

7. - ELABORACION DE LA CURVA DE MOMENTO CURVATURA PARA SECCIONES DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE CARBONO.

Con el fin de obtener la curva de momento curvatura de una sección de concreto armado que ha sido reforzada o rehabilitada se debe de tener en cuenta que estos elementos estaban sometidos a solicitaciones antes del reforzamiento propiamente dicho con fibras de carbono, lo cual quiere decir que se deben de tener en cuenta 2 instantes, el primero en el cual se debe de hacer un análisis de la sección de concreto armado antes del reforzamiento en la cual se debe de hacer el equilibrio de la sección y la compatibilidad de deformaciones para la sección de concreto armado existente con las solicitaciones respectivas. Y un segundo instante en el cual, para la sección de concreto armado reforzada con fibras de carbono, se debe de hacer también el equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones considerando que en el estado inicial el concreto y acero existentes tienen deformaciones existentes o remanentes del 1er estado de solicitaciones.

En resumen para hacer el equilibrio de fuerzas en la sección y la compatibilidad de deformaciones se debe de tener en cuenta que el concreto y el acero tienen tanto deformaciones iniciales ϵ_{C_0} y ϵ_{S_i} , respectivamente, las cuales deben de ser tomadas en cuentas en la formulación de las ecuaciones que describirán el comportamiento de la sección reforzada.

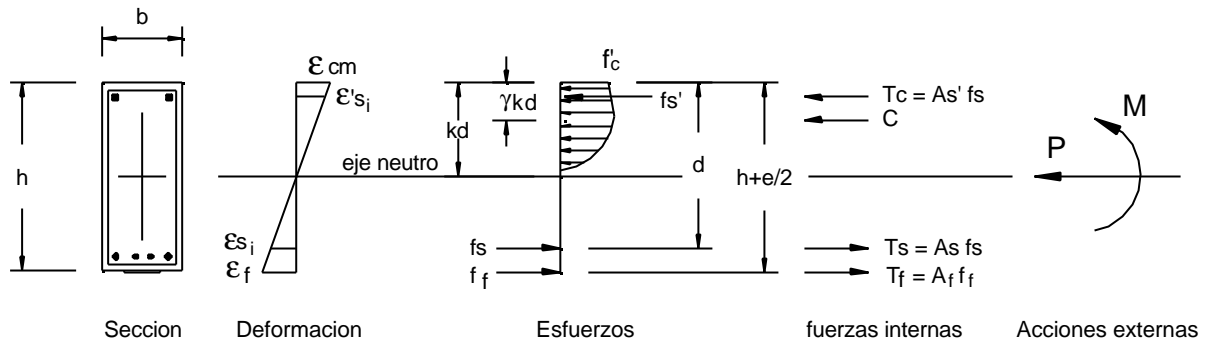


Fig. 4. Sección, deformaciones, esfuerzos y distribución de fuerzas

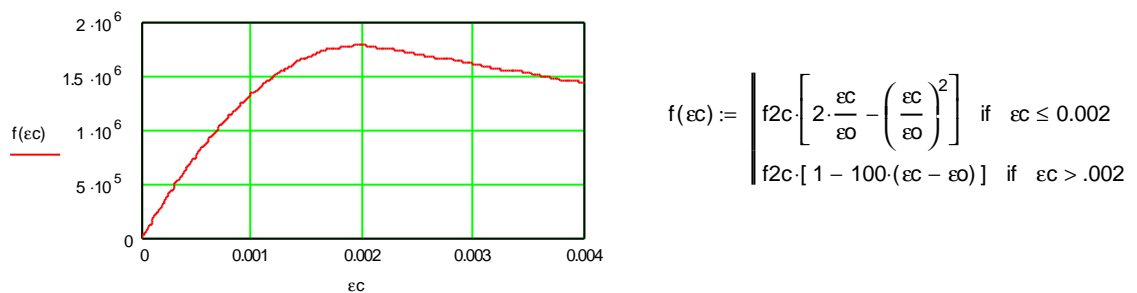


Fig. 5. Relaciones de Esfuerzo deformación del concreto

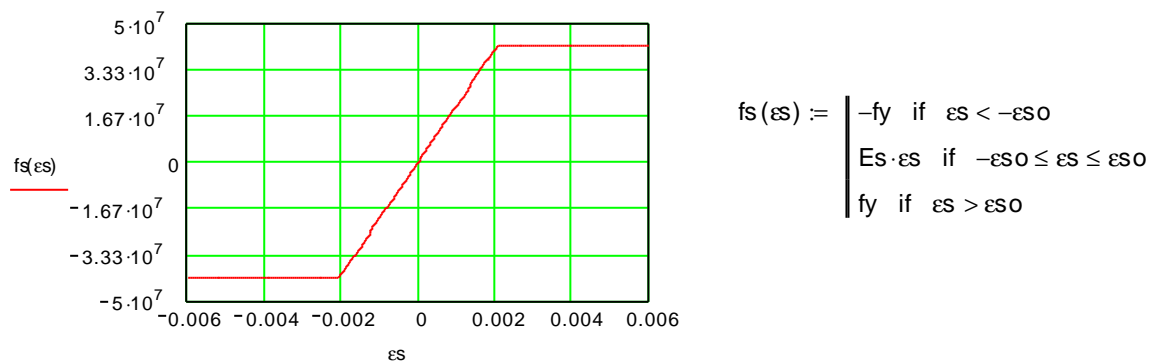


Fig. 6. Relaciones de Esfuerzo deformación del acero

Las deformaciones de esfuerzo deformación para la fibra de carbono fueron mostradas en la Fig. 1.

A continuación pasamos a mostrar la formulación de las ecuaciones que describen el comportamiento de la sección.

Siendo las deformaciones del concreto ϵ_{c0} y las deformaciones de las varillas de concreto ϵ_{si} , para el estado en el cual se empieza a analizar la sección reforzada

La deformación de la fibra extrema en compresión de la sección esta dada por “ ϵ_{cm} ” la cual estará por encima de la deformación inicial ϵ_{c0} .

La deformación de las varillas de acero ϵ_{si} estarán dadas por:

$$\epsilon_{si} = (\epsilon_{cm} - \epsilon_{c0}) \cdot \frac{(kd - d_i)}{kd} + \epsilon_{s0}$$

obtenido a través de la compatibilidad de deformaciones. Se debe de indicar aquí que d_i es la distancia de la varilla i de acero a la fibra extrema en compresión de modo matricial de tal modo de poder considerar secciones con aceros en varias capas en las zonas de tracción y compresión, si este fuera el caso, lo cual da un carácter general a la formula. Con esto se debe de indicar que las varillas en tracción tendrán signo negativo y las que estén en compresión serán positivas.

Las deformaciones de la fibra de carbono estará dada por Kl veces la deformación obtenida de la compatibilidad de deformaciones en donde Kl es la razón deformaciones medias máximas.

$$\epsilon_f := \frac{1}{kl} \cdot \left[(-1) \cdot (\epsilon_{cm} - \epsilon_{c0}) \cdot \frac{(h - kd)}{kd} \right]$$

de la ecuación anterior debe de entenderse que la fibra de carbono empieza a trabajar para deformaciones de la fibra máxima en compresión mayores que ϵ_{c0} . el signo negativo es por que la fibra esta en tracción.

Los esfuerzos f_{si} de las varillas de acero correspondientes a las deformaciones ϵ_{si} obtenidas a partir de la curva esfuerzo deformación, se pueden encontrar multiplicando por las áreas respectivas A_{si}

$$T_{si} = f_{si} \cdot A_{si}$$

La fuerza de compresión en el concreto C se puede encontrar a partir de la curva de esfuerzo deformación del concreto para la cual para una deformación “ ϵ_{cm} ” en la fibra extrema en compresión. Según esto se puede definir la fuerza de compresión del concreto y su posición según los parámetros “ α ” y “ γ ”

$$C = \alpha f'c b kd$$

Que actúa a una distancia γkd de la fibra extrema en compresión. Se puede determinar el factor α del esfuerzo medio y el factor γ del centroide para cualquier deformación ϵ_{cm} en la fibra extrema en compresión para secciones rectangulares.

El área bajo la curva esfuerzo deformación es :

$$\alpha = \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon}{f_c \cdot \epsilon_{cm}}$$

de lo cual se ha deducido la siguiente expresión general :

$$\alpha(\epsilon) := \begin{cases} \left(\frac{10^3}{6}\right) \cdot (3 \cdot \epsilon - 500 \cdot \epsilon^2) & \text{if } \epsilon \leq .002 \\ \frac{-26}{3 \cdot 10000 \epsilon} - 50 \cdot \epsilon + \frac{12}{10} & \text{if } \epsilon > 0.002 \end{cases}$$

El primer momento alrededor del origen del área bajo la curva esfuerzo deformación

$$\gamma = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} \epsilon \cdot f_c d\epsilon}{\epsilon_{cm} \int_0^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon}$$

de lo cual se ha deducido la siguiente expresión general :

$$\gamma(\epsilon) := \begin{cases} \frac{(2 - 250 \cdot \epsilon)}{2 \cdot (3 - 500 \cdot \epsilon)} & \text{if } \epsilon \leq .002 \\ 1 - \frac{\left[\left(\frac{-56}{12 \cdot 10^7}\right) + \left(\frac{6}{10}\right) \cdot \epsilon^2 - \frac{100}{3} \cdot \epsilon^3\right]}{\epsilon \cdot \left[\left(\frac{-26}{3 \cdot 10^4}\right) + \left(\frac{12}{10}\right) \cdot \epsilon - 50 \cdot \epsilon^2\right]} & \text{if } \epsilon > 0.002 \end{cases}$$

En consecuencia se pueden escribir las ecuaciones de equilibrio de fuerzas como :

$$P = \phi_c \cdot \alpha \cdot f_c \cdot b \cdot kd + \phi_f \cdot E_f \cdot b_f \cdot e_f \cdot \epsilon_f + \phi_s \cdot \sum_{i=0}^n f_{s_i} \cdot A_{s_i}$$

$$M = \phi_c \cdot \alpha(\epsilon_{cm}) \cdot f_{2c} \cdot b \cdot kd \cdot \left(\frac{h}{2} - \gamma \cdot kd\right) + \phi_f \cdot (E_f \cdot b_f \cdot e_f \cdot \epsilon_f) \cdot \left(\frac{-h}{2} - \frac{e_f}{2}\right) + \phi_s \cdot \sum_{i=0}^n f_{s_i} \cdot A_{s_i} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_i\right)$$

La curvatura ψ está dada por:

$$\psi = \frac{\epsilon_{cm}}{kd}$$

Finalmente se puede determinar la relación teórica de momento curvatura para un nivel dado de carga axial, incrementando la deformación del concreto en la fibra extrema en compresión. Para cada valor de " ϵ_{cm} " se encuentra la profundidad " kd " del eje neutro que satisface el equilibrio de fuerzas en la dirección axial hasta obtener la carga axial externa en el elemento y con esto se encuentra el momento flector asociado a la curvatura determinada por ϵ_{cm} y kd .

8.- EJEMPLO DE APLICACION

Se procederá al calculo de la curva para la sección de una viga que corresponde a un pórtico de una edificación que en un inicio tenia como uso el de oficina (S/C = 200 kg/m²) y el cual se quiere utilizar como sala de computadoras (S/C = 350 kg/m²).

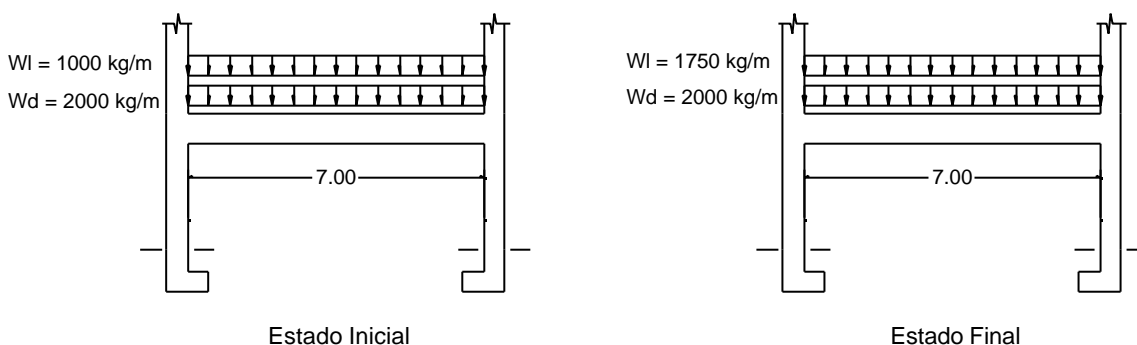


Fig. 7. Pórtico con sobrecargas en estado inicial y final.

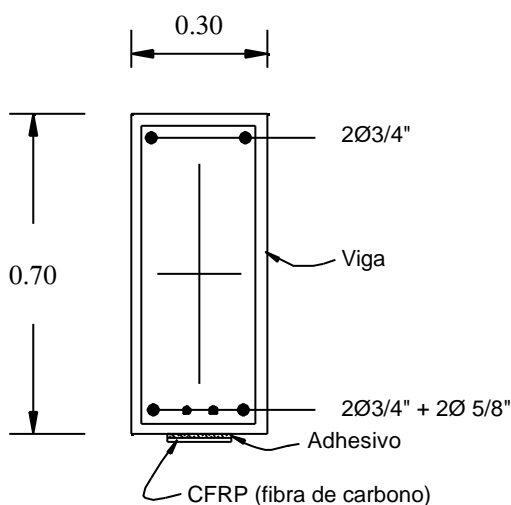


Fig.8. Viga reforzada con fibra de carbono (CFRP)

El momento máximo en el centro de luz antes del cambio de uso es

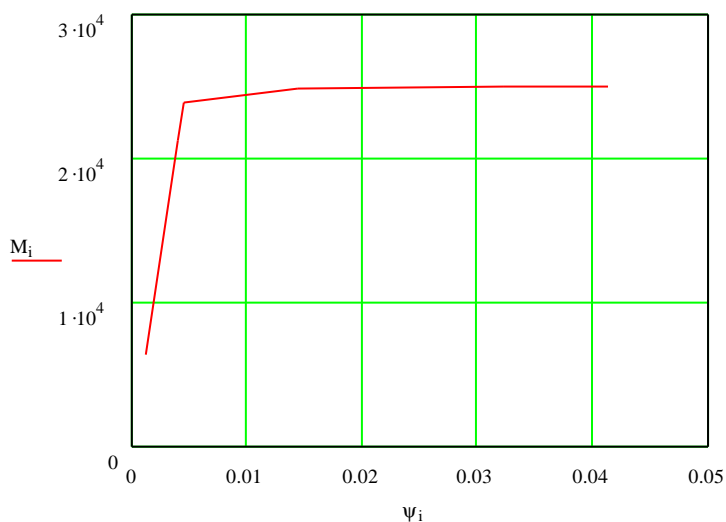
$$M_d = 9,380 \text{ kg-m} \quad M_l = 3,925 \text{ kg-m} \quad M_u = 1.5 M_d + 1.8 M_l = 21,135 \text{ kg-m}$$

El momento máximo en el centro de luz después del cambio de uso será :

$$M_d = 9,380 \text{ kg-m} \quad M_l = 6,870 \text{ kg-m} \quad M_u = 1.5 M_d + 1.8 M_l = 26,436 \text{ kg-m}$$

Según la filosofía de diseño para el reforzamiento la sección deberá tener una capacidad mayor que la requerida inicialmente, que sea dúctil y que la resistencia ultima del sistema sin reforzamiento exceda las nuevas cargas de servicio por un factor de 1.2.

A) La capacidad de la sección de concreto armado (sin fibra) es de $M_n = 23,910 \text{ kg-m}$



La ductilidad es: $\mu = 9.388$

Fig. 9. Diagrama de Momento curvatura de sección sin fibras de carbono.

B) La resistencia ultima del sistema con las nuevas cargas:

$$\phi M_n \geq 1.2 M_u = 1.2 (M_d + M_l)$$

$$0.9 * (23910 \text{ kg-m}) = 21,520 \text{ kg-m} \geq 1.2 (9380 \text{ kg-m} + 6870 \text{ kg-m}) = 19,500 \text{ kg-m}$$

C) Siguiendo con el procedimiento descrito en el ítem 6 se obtiene la grafica de momento curvatura para la sección reforzada con 6 fibras de carbono Tipo M ($E = 210 \text{ KN/mm}^2$) de dimensiones: 1.2mm de espesor y 8.0 cm de ancho.

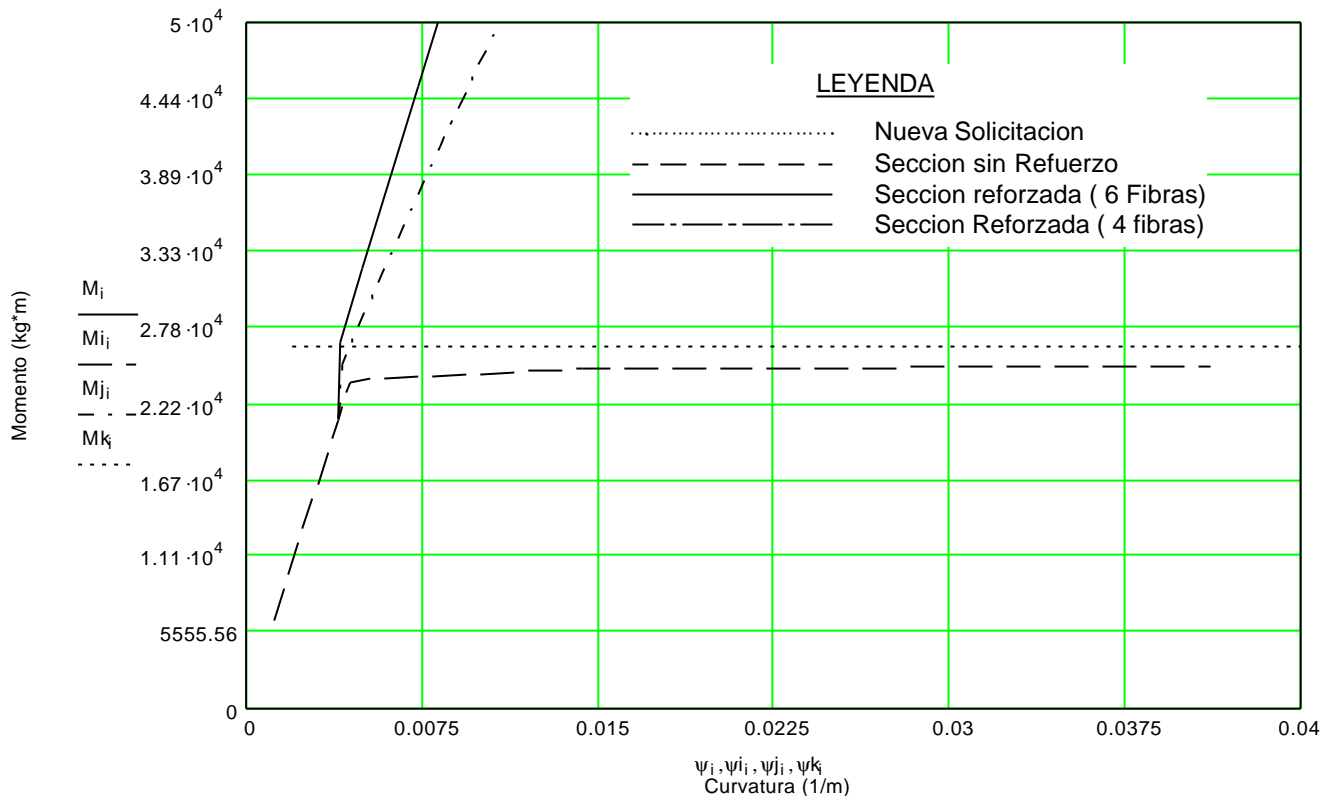


Fig. 10. Diagrama de Momento curvatura para la sección reforzada.

Se puede comentar finalmente que la sección reforzada con las 6 fibras de carbono alcanza la fluencia para un valor de momento de 26,624 kg-m. En el segundo tramo de la curva de comportamiento se puede ver que la rigidez ha aumentado en gran medida. Con respecto a la ductilidad de la sección 3.18 para cuando el concreto alcanza su deformación máxima por aplastamiento de 0.003 pero esto sucederá para un valor de momento mucho mayor que el solicitado (valor a cual es poco probable que suceda) sin embargo, deberíamos indicar que antes de que ocurra este tipo de falla (ruptura del concreto en compresión) se producirán otro tipo de fallas tales como la separación del adhesivo o que se llegue a la ruptura de la fibra de carbono. Pero la descripción de los puntos de falla antes mencionados son materia de estudio en la actualidad.

Se debe de indicar que también se analizó el comportamiento de la sección con 4 fibras en vez de 6. Con lo cual se llegó a un momento de fluencia de 25,170 kg-m que está por debajo de la nueva solicitud, debe de entenderse de que la sección con la nueva solicitud no deberá de haber llegado a la fluencia. Según la curva de comportamiento (ver Fig.10) se observa que la rigidez del elemento reforzado con 4 planchas de fibra no está muy por debajo de la reforzada con 6 planchas.

Con esto se concluye que en realidad no es tan sencillo levantar el punto de fluencia de la sección existente al reforzarla con fibras de carbono para que soporte mayores solicitaciones, si el acero de la sección antes del reforzamiento está sometido a esfuerzos cercanos a los de la fluencia. Y por el contrario si el acero antes del reforzamiento está sometido a esfuerzos no tan cercanos a los de fluencia será más fácil aumentar el punto de

fluencia. Con esto se quiere decir que hay una relación inversa entre el esfuerzo del acero antes del reforzamiento y el aumento de la capacidad de la sección reforzada.

En general la sección experimenta un aumento en la rigidez después de la fluencia en la cual la sección tiene un comportamiento, por así llamarlo, pseudo dúctil ya que el acero a fluido pero la fibra no. La capacidad última la sección antes del colapso tomar valores tales como 1.5, 2 o más veces el valor de la capacidad a la fluencia en el cual por lo general falla el adhesivo antes que el concreto en compresión o la fibra de carbono.

De lo obtenido aquí se podría sugerir que para los ensayos en laboratorio con el fin de obtener la capacidad real del sistema compuesto con fibras de carbono se debe de colocar la fibra en la viga sometida a las solicitaciones iniciales.

Referencias :

1. - *Test report N. 154490-99. EMPA Reseach Center. Switzerland 1994.*
2. - *Stregthening of structures with CFRP strips. W Steiner, Sika AG, Tuffenwies 16-22, CH-8048 Zurich, Switzerland*
3. - *Schweizer Baublat N. 64, 1989 Sika AG Zurich.*
4. - *Influence of the stell porperties on the ductility of RC structures. Antonio Grimaldi and Zila Rinaldi. 2000 World conference of earthquake engineering.*
5. - *Estructuras de concreto reforzado. R. Park & T. Paulay - Cap.-6. Editorial Limusa, México 1990.*
6. - *Guías para el Reforzamiento con sistemas de fibras de carbono para estructuras de concreto y madera. Sika – Carbodur. SantaFé de Bogotá. Colombia – Enero 2000.*
7. - *Estudio del comportamiento de vigas reforzadas con fibras de carbono. Ensayos realizados en el laboratorio de estructuras del CISMID para Sika-Perú. 1997.*