

## **Estudio y Validación del reforzamiento de elementos de hormigón armado sometidos a flexión con fibras de carbono.**

*Validation Study and the strengthening of reinforced concrete elements subjected to bending with carbon fibers*



### **Ing. Mabel Pérez Alfonso**

Ingeniera Civil

Profesor Instructor

Profesora del Departamento de Construcciones de la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". Cuba

Teléfono 256782 E- Mail: [mabel.perez@umcc.cu](mailto:mabel.perez@umcc.cu)



### **Ing. Jorge de la Rosa González**

Ingeniero Civil

Profesor Instructor

Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA-INVESCONS). Cuba

E- Mail: [jrgonzalez@tmasc.cu](mailto:jrgonzalez@tmasc.cu), [civil2@tmasc.cu](mailto:civil2@tmasc.cu)

Recibido: 29-06-11

Aceptado: 02-09-11

### **RESUMEN:**

El uso de los materiales compuestos o CFRP (*CarbonFiber Reinforced Polymer*) para el reforzamiento a flexión de elementos estructurales es una técnica empleada en numerosos países. Su utilización en la rehabilitación de elementos de hormigón armado ofrece numerosas ventajas cuando el elemento reúne las cualidades necesarias para llevar a cabo el reforzamiento. En este artículo se realizará un estudio y análisis del comportamiento de los elementos de hormigón armado reforzados con fibras de carbono sometidos a la flexión, se propone una metodología de diseño del refuerzo CFRP adherido externamente a elementos de hormigón armado, manteniendo los patrones de diseño establecidos en el reglamento cubano pero sobre la base del enfoque establecido por el código ACI 440 2R-08. Finalmente se validan los resultados analíticos con datos experimentales obtenidos de la bibliografía internacional.

**Palabras clave:** CFRP, Materiales compuestos, Hormigón armado, Metodología

*Mabel Pérez Alfonso. Estudio y Validación del reforzamiento de elementos de hormigón armado sometidos a flexión con fibras de carbono.*

## **ABSTRACT:**

*The use of the compound materials or CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) for the reinforcement to flexion of structural elements is a technical employee at numerous countries. The utilization in the rehabilitation of elements of reinforced concrete offers numerous advantages when the element joins together the necessary attributes to accomplish the reinforcement. A study and analysis of the behavior of the elements of reinforced concrete reinforced with carbon fibers submitted to flexion will be accomplished in the present work, also is propose a methodology of design of the adhered CFRP sets himself reinforcement externally to elements of reinforced concrete, maintaining the designing patterns established in Cuban regulations but focus on the base established by the code ACI 440 2R 08. Finally the analytical results with experimental data obtained of the international bibliography become validated.*

**Keywords:** *CFRP, Composite materials, Reinforced concrete, Methodology*

## **Introducción:**

A lo largo de la historia de la ingeniería civil, el hombre ha sentido la necesidad de construir obras resistentes y duraderas. En los últimos años la reparación, rehabilitación y mejora de las estructuras existentes han estado entre los más importantes retos de la ingeniería civil.

Hasta hace unos treinta años no existía un método seguro y económico para reforzar y reparar los elementos de hormigón armado, lo que traía como consecuencia la demolición o el reemplazamiento de los mismos. La aparición de resinas de alta resistencia y otros adhesivos para estructuras cambió esta situación. Por medio de adhesivos, podemos unir material adicional de un modo rápido y sencillo a las vigas de hormigón aumentando así su resistencia y rigidez.

El uso de los materiales compuestos o CFRP (*CarbonFiber Reinforced Polymer*) para el reforzamiento a flexión de elementos estructurales es una técnica empleada en numerosos países. Los polímeros de fibras de Carbono (CFRP) tienen excelentes propiedades de resistencia-peso, una relativa ilimitada longitud del material, inmunidad a la corrosión y una fácil forma de aplicación lo que hace que su utilización en la rehabilitación de elementos de hormigón armado ofrezca numerosas ventajas para llevar a cabo el reforzamiento estructural.

Actualmente existen reglas para el diseño del reforzamiento empleando CFRP, varios países han establecido sus códigos para proporcionar recomendaciones específicas no solo en el diseño sino también en las técnicas de construcción. Muestra de ello son los documentos emitidos por el ACI (ACI 440 1R-01,1999; ACI 440 2R-08,2008), la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE) que en el 2000 emitió sus primeras especificaciones para el trabajo de reforzamiento con FRP, además de las guías comerciales las cuales tienen una amplia base experimental y son muy comunes entre los fabricantes de este refuerzo.

En Cuba, en los últimos años, el uso de materiales compuestos ha avanzado tras el objetivo de perfeccionar las técnicas de intervención tradicionales y buscar otras novedosas y más eficientes. Aunque todavía no es generalizado su empleo en los proyectos de reparación debido entre otros factores a los de índole económica.

*Revista de Arquitectura e Ingeniería. 2011, vol.5 no.3.*

## Desarrollo:

### Materiales compuestos

Cuando se habla de materiales compuestos avanzados o plásticos reforzados con fibras (FRP: *Fiber Reinforced Polymer*), se hace referencia a materiales compuestos que están formados por delgadas fibras de ultra-alta resistencia y rigidez, unidas entre sí con una matriz de resina u otros materiales termorrígidos. La resina actúa solamente como agente de unión ya que su función principal es configurar geoméricamente el material compuesto. Normalmente, la matriz es flexible y poco resistente, pues su misión es transmitir los esfuerzos de unas fibras a otras, y la superficie adyacente, además de proteger a las fibras de posibles daños mecánicos y ambientales. Las fibras pueden ser de distintos materiales entre las que podemos mencionar: fibras de vidrio (GFRP), fibras de aramida (AFRP) y fibras de carbono (CFRP). Estas últimas son las que poseen las mejores características mecánicas (resistencia a la tracción y alto módulo de elasticidad) y químicas. (Pulido, 2009)

Las láminas de CFRP son una combinación de fibras de carbono con una matriz de resina epoxi, dispuestas longitudinalmente, convirtiéndolo en un material anisótropo. Por lo tanto, en la dirección del eje de la fibra y de la carga poseen una resistencia a la tracción y rigidez muy altas, así como también un comportamiento lineal hasta la rotura, unas características excepcionales a la fatiga y a la fluencia (*creep*), y una densidad muy baja. Se debe mencionar además la importante resistencia química, al envejecimiento y a los rayos ultravioleta. Hay que aclarar que las resistencias en la dirección normal a las fibras y a cizallamiento son bajas.

Los modelos analíticos empleados para el cálculo de ese tipo de secciones están enfocados principalmente desde el punto de vista de la revisión de secciones previamente reforzadas, quedando el diseño contenido en ellos de forma implícita.

### Tipologías de refuerzo más frecuentes

En principio el reforzamiento se puede colocar tanto en la zona sometida a tracción, como en la de compresión, aunque la más común, en el caso de las vigas de hormigón, y de otros elementos sometidos a flexión, es que se coloque en la zona traccionada. El refuerzo puede ser realizado de las siguientes formas:

- Adhesión de láminas a la superficie (Figura 1 a).

Las láminas pueden ser horizontales o estar dobladas en ángulo (recomendadas para reforzamiento a cortante). Es muy común para los reforzamientos *in situ*.

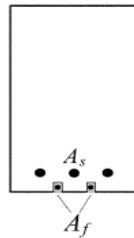
- Inserción de barras o láminas dentro de la sección (Figura 1.b).

Este tipo de reforzamiento puede presentar algunas dificultades para su realización cuando se trate de elementos existentes, pero presenta la ventaja de la invisibilidad y la protección contra el fuego. Además se aumenta la superficie de contacto entre el hormigón y el refuerzo, lo que facilita el trabajo conjunto de los materiales.

Mabel Pérez Alfonso. Estudio y Validación del reforzamiento de elementos de hormigón armado sometidos a flexión con fibras de carbono.



(a) Láminas adheridas externamente



(b) Barras embebidas en la sección

### Diseño de la sección compuesta de hormigón. Modelo teórico propuesto.

El modelo que se propone es la generalización del enfoque realizado por el ACI (ACI 440.2R-08, julio 2008), al adoptar las disposiciones en la determinación de la seguridad, tanto en los factores de carga como en el coeficiente de reducción de la capacidad resistente de la sección ( ).

Se aceptan las ecuaciones constitutivas del hormigón y el acero comúnmente empleadas, mientras que para el material compuesto se utiliza una relación totalmente lineal entre tensiones y deformaciones hasta rotura.

Con objeto de obtener una respuesta seccional dúctil, así como una mayor resistencia a flexión, se debe diseñar el refuerzo de modo que la rotura de la lámina de material compuesto se produzca durante la plastificación del acero y antes de que el hormigón alcance la rotura por compresión.

### Consideraciones generales para el diseño

A partir de la guía que ofrecen las diferentes normativas (ACI 440.2R-08, julio 2008)(Eurocom, 1996) para el diseño estructural y los textos de investigadores de todo el mundo a continuación se plantean las principales hipótesis para el diseño y comprobación de secciones sometidas a solicitaciones normales en el agotamiento.

1. Los estudios y cálculos deberán ser efectuados con base en las dimensiones existentes de las secciones y de la cantidad y distribución de los refuerzos de acero de la misma, así como las propiedades y características de los materiales constituyentes del elemento de hormigón armado.

Mabel Pérez Alfonso. Estudio y Validación del reforzamiento de elementos de hormigón armado sometidos a flexión con fibras de carbono.

2. Prevalecen los criterios de Bernoulli, o sea las secciones planas permanecen planas después de la ocurrencia de las cargas y las deformaciones son linealmente proporcionales a su distancia del eje neutro.
3. Se desprecia la resistencia a tracción del hormigón.
4. La deformación máxima admisible para la fibra comprimida del hormigón es 0.003.
5. La deformación se considera lineal hasta la rotura en el sistema compuesto (CFRP).
6. La adherencia entre el sistema compuesto y el sustrato del hormigón debe ser perfecta.
7. La relación entre la distribución de tensiones del hormigón en compresión y su deformación, se puede suponer que es rectangular, trapezoidal, parabólica o de cualquier otra forma que resulte de la predicción de la resistencia y que coincida con resultados de extensos ensayos.

Estas son suposiciones necesarias con motivo de hacer más fácil el cálculo computacional. Aunque estas suposiciones no reflejan exactamente el verdadero comportamiento a flexión del refuerzo CFRP ya que existirá deformación de corte en el estrato adhesivo causando un deslizamiento relativo entre el CFRP y el sustrato. Es por ello que para compensar cualquier discrepancia se introduce el factor adicional  $\Psi_f$ .

### Regiones de trabajo y formas de fallo

El fallo de las secciones de hormigón armado reforzadas con fibras de carbono sometidas a flexión puede realizarse, tal como se hace con las secciones de hormigón armado, mediante un diagrama donde se recojan los diferentes estados deformacionales últimos para los que puede fallar el elemento. Los diferentes estados deformacionales son una expresión de las consideraciones e hipótesis establecidas por la guía de diseño emitida por el comité ACI 440(ACI 440.2R-08, julio 2008), con algunas modificaciones que lo ajustan a la forma de trabajo de las normativas europeas (EHE, 1999)(Eurocom, 1996) y específicamente a la normativa de diseño cubana (NC 207, 2003).

A continuación se definen las fronteras de cada uno de las regiones que definen un tipo de fallo, Figura.1.

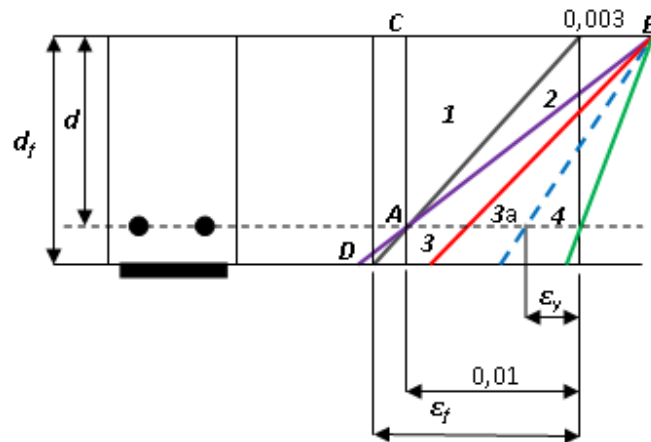


Figura.1. Diagrama de dominios. Elaborado por el autor

Mabel Pérez Alfonso. Estudio y Validación del reforzamiento de elementos de hormigón armado sometidos a flexión con fibras de carbono.

**Siendo:**  $\varepsilon_f = \varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}$  (1)

**Dominio 1:** Deformación última del acero en tracción, con toda la sección transversal traccionada. El agotamiento se produce por deformación plástica del acero ( $\varepsilon_s = 0,01$ ) y por delaminación del refuerzo de la fibra ( $\varepsilon_{fe} > \varepsilon_{fd}$ ).

**Dominio 2:** Deformación última del acero en tracción. Para este dominio la deformación del hormigón se encuentra entre ( $0 < \varepsilon'_c < 0,003$ ) y la deformación del refuerzo a tracción del acero será igual a su deformación máxima de rotura ( $\varepsilon_{s2} = 0,01$ ), mientras que en el refuerzo de la fibra el agotamiento se producirá por delaminación ( $\varepsilon_{fe} > \varepsilon_{fd}$ ).

**Dominio 3:** Deformación última del hormigón en compresión. Para este dominio la deformación del hormigón es ( $\varepsilon'_c = 0,003$ ), y la deformación del acero de refuerzo en tracción es superior al límite elástico siendo ( $0,005 \leq \varepsilon_s < 0,01$ ), mientras que la fibra estará trabajando por debajo de su deformación máxima de diseño ( $\varepsilon_{fe} < \varepsilon_{fd}$ ), por lo que el fallo de la fibra estará gobernado por el aplastamiento del hormigón.

**Dominio 3a:** Zona de transición. Deformación última del hormigón en compresión. Para este dominio la deformación del hormigón es ( $\varepsilon'_c = 0,003$ ), y la deformación del acero de refuerzo en tracción es superior al límite elástico siendo ( $\varepsilon_y \leq \varepsilon_s < 0,005$ ), mientras que la fibra estará trabajando por debajo de su deformación máxima de diseño ( $\varepsilon_{fe} < \varepsilon_{fd}$ ), por lo que el fallo de la fibra estará gobernado por el aplastamiento del hormigón.

**Dominio 4:** Deformación última del hormigón. En este dominio la zona de compresión abarca casi toda la sección ( $\varepsilon'_c = 0,003$ ), la deformación en tracción del acero varía ( $0 \leq \varepsilon_s < \varepsilon_y$ ), por lo cual trabaja a valores menores que su resistencia en fluencia. En este dominio no es rentable disponer de refuerzo externo de fibra, puesto que su colaboración sería muy poca ( $\varepsilon_{fe} \ll \varepsilon_{fd}$ ).

Las fronteras entre los diferentes dominios adoptan como profundidad relativa de la línea neutra, los mismos valores del diseño de secciones de hormigón armado con refuerzo ordinario:

Frontera 1y2:  $k=0$

Frontera 2y3:  $k=0,231$  (Fallo simultáneo)

Frontera 3 y 3a:  $k=0,375$  (frontera del fallo en tracción controlada)

Frontera entre 3a y 4:  $k=k_b$  (fallo balanceado)

## Formas de Fallo

**Dominio 1:** Agotamiento del acero en tracción seguido de la ruptura del laminado.

**Dominio 2:** Fallo simultáneo, tanto el hormigón como el acero se encuentran trabajando a su máxima deformación, mientras que la fibra falla por delaminación.

**Dominio 3:** Fallo dúctil, el acero está en fluencia y el hormigón trabajando a su máxima capacidad, mientras que el refuerzo de la fibra está trabajando en tracción pero por debajo de su deformación máxima de diseño.

**Dominio 3a:** Fallo dúctil. Este dominio representa la transición entre los fallos dúctiles de las secciones y los fallos frágiles o elementos con predominio de la compresión.

**Dominio 4:** Fallo frágil por aplastamiento del hormigón ( $\varepsilon'_c = 0,003$ ).  
*Revista de Arquitectura e Ingeniería. 2011, vol.5 no.3.*

*Mabel Pérez Alfonso. Estudio y Validación del reforzamiento de elementos de hormigón armado sometidos a flexión con fibras de carbono.*

El diseño dentro de los primeros dominios 1 y 2 conduce a secciones donde el fallo está controlado por la tracción del acero y de la fibra. En los dominios 3 y 3a el fallo está controlado por la tracción del acero y el aporte de la fibra aunque este es más limitado aún continúa siendo en tracción. El diseño dentro del dominio 4 conduce a secciones donde el fallo está controlado por la compresión del hormigón y el aporte de la fibra es casi nulo por lo que no es recomendable el refuerzo con materiales compuestos en este dominio, ni siquiera para elementos de hormigón armado con acero ordinario.

Así pues, en un problema general de refuerzo a flexión es conveniente saber, antes de disponerse a calcular, en cuál de los dominios antes descritos se encuentra el plano de rotura de la sección reforzada.

### **Algoritmo de trabajo**

Los métodos de diseño y revisión de elementos de hormigón armado reforzados externamente con fibras de carbono requieren al igual que los elementos tradicionales de hormigón armado que se satisfagan las dos condiciones básicas del diseño: (a) el equilibrio estático y (b) la compatibilidad de deformaciones.

El diseño del refuerzo de elementos de hormigón armado con CFRP se realiza mediante una revisión iterativa, suponiendo inicialmente un refuerzo mínimo que será corregido y ajustado mediante la metodología de trabajo que se pretende adoptar.

### **Nomenclatura utilizada**

$f_c$ : Resistencia característica a compresión del hormigón.

$f_y$ : Resistencia de fluencia del acero.

$f_{fu}^*$ : Resistencia última de la fibra dada por el fabricante.

$f_{fu}$ : Resistencia última de la fibra considerando el ambiente.

$E_{s1}$  y  $E_{s2}$ : Módulo de elasticidad del acero en la zona de compresión y en la zona de tracción.

$E_f$ : Módulo de elasticidad de la fibra.

$I_{fis}$ : Inercia de la sección de hormigón fisurada.

$\varepsilon_{s1}$  y  $\varepsilon_{s2}$ : Deformación específica del acero comprimido y traccionado.

$\varepsilon_{fu}^*$ : Deformación última de la fibra dada por el fabricante.

$\varepsilon_{fu}$ : Deformación última de la fibra considerando el ambiente.

$\varepsilon_{fd}$ : Deformación por delaminación de la fibra.

$\varepsilon_{bi}$ : Deformación inicial en el momento de colocación del refuerzo de CFRP.

$\varepsilon_f$ : Deformación de la fibra por compatibilidad.

$\varepsilon_{fec}$ : Deformación efectiva de la fibra por compatibilidad.

$\varepsilon_{fe}$ : Deformación efectiva de la fibra empleada en el diseño.

$\alpha$  y  $\beta_1$ : Coeficientes que afectan la resistencia del hormigón y la profundidad del bloque de compresión para equivalencia de la ley constitutiva.

*Revista de Arquitectura e Ingeniería. 2011, vol.5 no.3.*

Mabel Pérez Alfonso. Estudio y Validación del reforzamiento de elementos de hormigón armado sometidos a flexión con fibras de carbono.

$k$  : Posición relativa del eje neutro.

$M_{ala}^*$ : Momento resistente del ala de la sección.

$M_u^*$ : Momento de diseño de la sección.

$M_{af}$ : Momento actuante antes de colocar el refuerzo de fibra.

$M_n$ : Momento nominal de la sección.

$\mu_n$ : Momento específico nominal del hormigón a compresión.

$\omega_{s1}$  y  $\omega_{s2}$ : Cuantía mecánica del acero comprimido y traccionado.

$\omega_c$  : Fuerza específica del hormigón.

$\omega_f$  : Cuantía mecánica de la fibra.

$bw$ : Ancho de las vigas de sección rectangular o de la nervadura de las vigas sección T.

$b_f$ : Ancho de la lámina de fibra.

$b_e$ : Ancho efectivo de la sección de hormigón.

$d$ : Peralto efectivo de la sección de hormigón.

$d_f$ : Peralto efectivo del refuerzo de fibra externo.

$h_f$ : Espesor del ala de las vigas de sección T.

$ds_1$ : Recubrimiento mecánico del acero comprimido.

$As_1$  y  $As_2$ : Área de la sección transversal del acero comprimido y el acero traccionado.

$A_f$ : Área de la sección transversal del refuerzo externo de fibra.

$\Psi_f$ : Coeficiente de reducción de fuerza adicional para fibra.

$CE$ : Factor de reducción medioambiental para fibra.

$n$ : Número de capas de refuerzo externo de fibras.

$e_f$ : Espesor de las láminas de fibras.

$\eta$ : Grado de utilización del material.

**Ecuaciones para el trabajo con las secciones de hormigón armado reforzadas con CFRP.**

$$\beta_1 = 0,85 - \left( \frac{0,05 * (f'c - 28)}{7} \right) \quad (2)$$

$$\alpha = 0,85$$

$$\eta_{s1} = \frac{Es_1 * \epsilon_{s1}}{fy} \quad (3)$$

Revista de Arquitectura e Ingeniería. 2011, vol.5 no.3.



Mabel Pérez Alfonso. Estudio y Validación del reforzamiento de elementos de hormigón armado sometidos a flexión con fibras de carbono.

$$\eta_{s2} = \frac{E_{s2} \cdot \varepsilon_{s2}}{f_y} \quad (4)$$

$$\eta_f = \frac{E_f \cdot \varepsilon_{fe}}{f_{fu}} \quad (5)$$

$$\delta S_1 = \frac{ds_1}{d} \quad (6)$$

$$Y = \left( \frac{b}{b_w} - 1 \right) \alpha \frac{h_f}{d} \quad (7)$$

$$X_2 = Y \left( 1 - \frac{h_f}{2d} \right) \quad (8)$$

$$M_{ala}^* = 0,85 f_c' \cdot b \cdot h_f \cdot \left( d - \frac{h_f}{2} \right) \quad (9)$$

$$A_f = n \cdot e_f \cdot b_f \quad (10)$$

$$f_{fu} = CE \cdot f_{fu}^* \quad (11)$$

$$\varepsilon_{fu} = CE \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad (12)$$

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f_c^*}{n_c E_f e_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{fu} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_f - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (14)$$

$\varepsilon_f$ : Su ecuación depende del dominio en el que se esté revisando y diseñando.

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{af} \cdot (d_f - kd)}{E I_{fis}} \quad (15)$$

$$\Psi_f = 0,85$$

## Metodología de diseño y revisión de la capacidad resistente de secciones de hormigón armado sometidas a flexión reforzadas con fibras de carbono (CFRP).

### 1. Comprobar la capacidad resistente de la sección sin refuerzo externo

$$\phi M n_{existente} \geq (1,1 M_{CP} + 0,75 M_{CU})_{nueva} \quad (16)$$

### 2. Identificar el tipo de trabajo

$$M_{ala}^* = 0,85 f_c' \cdot b \cdot h_f \cdot \left( d - \frac{h_f}{2} \right)$$

$$M_{ala}^* : M_u^*$$

Si  $M_{ala}^* \geq M_u^*$  trabaja como sección rectangular

Si  $M_{ala}^* < M_u^*$  trabaja como sección T

Mabel Pérez Alfonso. Estudio y Validación del reforzamiento de elementos de hormigón armado sometidos a flexión con fibras de carbono.

### 3. Identificar el tipo de refuerzo.

Simple o Doble

### 4. Determinar la cuantía mecánica de los aceros y fibra.

$$\omega_{s1} = \frac{A_{s1}f_y}{f'_c b w d} \quad (17)$$

$$\omega_{s2} = \frac{A_{s2}f_y}{f'_c b w d} \quad (18)$$

$$\omega_f = \frac{A_f f_u}{f'_c b w d} \quad (19)$$

### 5. Determinar posición relativa de la línea neutra

Se supone que ambas armaduras están en fluencia y la fibra trabaja a su máxima capacidad ( $\eta_{s1}, \eta_{s2} = 1$  y  $\eta_f = 1$ ).

$$\omega_c = \eta_{s2} \omega_{s2} + \eta_f \omega_f - \eta_{s1} \omega_{s1} - Y \quad (20)$$

$$k = \frac{\omega_{s2} + \omega_f - \omega_{s1} - Y}{\alpha \beta_1} \quad (21)$$

### 6. Comprobación de la deformación de las armaduras y fibra.

Para las armaduras:

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \left( \frac{1-k}{k} \right)$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_c \left( \frac{1-k}{k} \right)$$

Para la fibra:

#### 6.1. Deformación efectiva por compatibilidad

$$\varepsilon_{fec} = \varepsilon_f - \varepsilon_{bi}$$

$\varepsilon_f$ : Su ecuación se calcula por compatibilidad dependiendo del dominio en el que se esté revisando.

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{af} * (d_f - kd)}{EI_{fis}}$$

#### 6.2. Deformación última

$$\varepsilon_{fu} = CE * \varepsilon_{fu}^*$$

#### 6.3. Deformación por delaminación

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c^*}{n_c E_f e_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu}$$

Mabel Pérez Alfonso. Estudio y Validación del reforzamiento de elementos de hormigón armado sometidos a flexión con fibras de carbono.

**Para las armaduras:**

Si  $\varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_y$  y/o  $\varepsilon_{s2} \geq \varepsilon_y$  se cumple que  $\eta_{s1} = 1$  y/o  $\eta_{s2} = 1$

Si  $\varepsilon_{s1} < \varepsilon_y$  y/o  $\varepsilon_{s2} < \varepsilon_y$  se recalculan los valores de  $\eta_{s1}$  y/o  $\eta_{s2}$  en función de la deformación obtenida en el paso anterior.

Siendo:  $\eta_{s1} = \frac{E_s}{f_y} \varepsilon_{s1}$  y  $\eta_{s2} = \frac{E_s}{f_y} \varepsilon_{s2}$

**Para la fibra:**

De las tres deformaciones calculadas se asume el menor valor para que se cumplan todos los criterios chequeados. Con este valor de deformación se recalcula el  $\eta_f$ .

Siendo  $\eta_f = \frac{E_f * \varepsilon_{fe}}{f_{fu}}$

**7. Calculo iterativo de la posición relativa de la línea neutra.**

Los pasos que se muestran en 6 requieren de un proceso iterativo que implican en cada caso, primero, calcular los valores de  $\varepsilon_{s1}$ ,  $\varepsilon_{s2}$  y  $\varepsilon_{fe}$ , segundo, calcular  $\eta_{s1}$ ,  $\eta_{s2}$  y  $\eta_f$  en función del dominio y por último obtener el valor de k, hasta que todos los valores converjan correspondiéndose unos con otros.

$$k = \frac{\eta_{s2} \omega_{s2} + \eta_f \omega_f - \eta_{s1} \omega_{s1} - Y}{\alpha \beta_1} \tag{22}$$

**8. Determinar el momento específico nominal de la sección.**

$$\mu_n = \alpha \beta_1 k (1 - 0.5 \beta_1 k) + \eta_{s1} \omega_{s1} (1 - \delta_{s1}) + X_2 + \Psi_f * \omega_{freal} \left( \frac{d_f}{d} - 1 \right) \tag{23}$$

**9. Determinar el momento de diseño**

Si  $k \leq k_b \mu_d = \phi \mu_n$  Fallo dúctil  $\phi = 0.90$

Si  $k \leq k_b \mu_d = \phi \mu_n$  Fallo frágil  $0.65 \leq \phi \leq 0.70$

**10. Comprobar la sección.**

$$M_d = \mu_d (b w * d^2 * f'c) \tag{24}$$

$$M_{act}^* \leq M_d$$

**Comparación Metodología analítica vs Resultados experimentales publicados**

Los valores experimentales empleados para esta comparación fueron obtenidos de la tesis de doctorado del Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos Alfredo M Luizaga Patiño, titulada: Comportamiento mecánico de vigas de hormigón armado reforzadas con bandas encoladas con resinas epoxídicas (Patiño, 2005). Estudios investigativos en el cuales se analiza el comportamiento mecánico de los elementos de hormigón armado reforzados con fibras de carbono.

### Descripción general

Los ensayos de todos los elementos reforzados con fibras de carbono fueron realizados a flexión y simplemente apoyados. Empleando una prensa cuyos puntos de aplicación de carga fueron regulados a un tercio de la longitud de los apoyos libres, para obtener un tramo central de momento flector constante y cortante cero para un mejor estudio del fenómeno de la flexión sin influencia de esfuerzos tangenciales.

Se construyeron 18 vigas en total con secciones diferentes (110x15x10) y (300x25x20) las cuales fueron reforzadas con fibras de diferentes características, lo que da lugar a que las comparaciones analíticas y teóricas no sean contra una población de muestras de iguales características, sino que en un mismo ensayo se analizan varias muestras de diferentes características mecánicas y geométricas. Se realizó la caracterización de todos los materiales y de sus resistencias características según la norma UNE 83 301/84.

La tabla 1 muestra un resumen de los resultados obtenidos de la caracterización de todos los materiales empleados en el ensayo.

**Tabla 1. Características de los materiales utilizados. Elaborado por el autor**

<i>N° prueba</i>	<i>Ancho (cm)</i>	<i>Peralto (cm)</i>	<i>f'cm (MPa)</i>	<i>fy (MPa)</i>	<i>As1 (cm<sup>2</sup>)</i>	<i>As2 (cm<sup>2</sup>)</i>	<i>f<sub>fu</sub> (MPa)</i>	<i>E<sub>fu</sub> (MPa)</i>	<i>A<sub>f</sub> (cm<sup>2</sup>)</i>	<i>n (u)</i>
1	10	15	27,5	490	1.00	1.00	2500	160000	0.60	1
2	10	15	27,5	490	1.00	1.00	3400	230000	0,34	2
3	25	20	27,5	490	1.00	1.50	2500	160000	1,80	1
4	25	20	27,5	490	1.00	1.50	3400	230000	1,04	2

Todas las fibras estudiadas son pegadas externamente con sistemas a base de resinas epóxicas.

### Resultados experimentales del ensayo y analíticos según la metodología propuesta.

En general el comportamiento observado en las vigas ensayadas es similar al descrito por otros autores.

Los resultados de los ensayos realizados por Patiño conjuntamente con los resultados analíticos obtenidos en la metodología aparecen en la tabla 2.

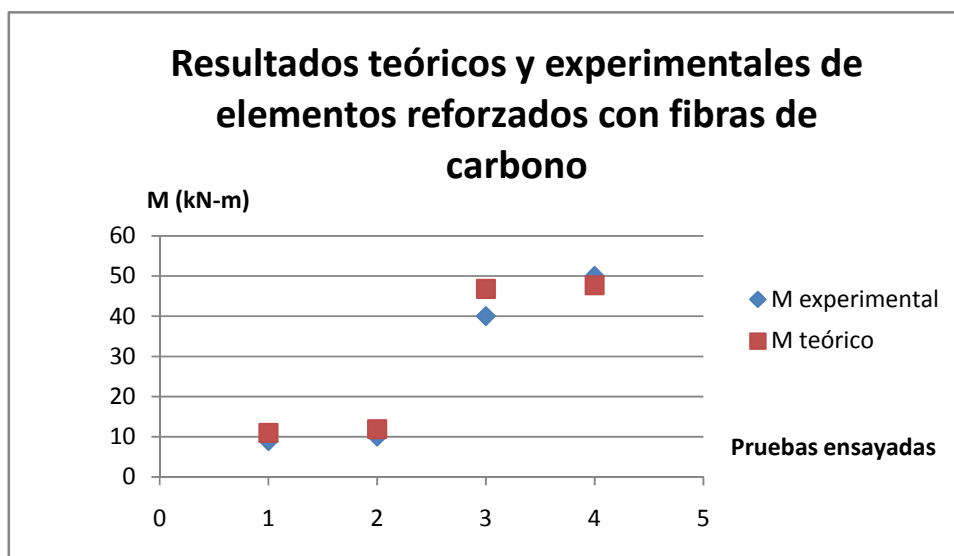
Mabel Pérez Alfonso. Estudio y Validación del reforzamiento de elementos de hormigón armado sometidos a flexión con fibras de carbono.

Los datos de comparación a utilizar son los valores promedio de momento último experimental y carga última experimental, para verificar significativamente el incremento de capacidad resistente proporcionado por el reforzamiento de fibra de carbono y la aproximación del modelo teórico de diseño.

**Tabla 2. Resultados teóricos y experimentales de los elementos reforzados con fibra de carbono. (Elaborado por el autor)**

<i>N° prueba</i>	<i>M<sub>exp</sub></i> <i>Rotura</i> <i>(kN – m)</i>	<i>M<sub>teó</sub></i> <i>(∅ = 1)</i> <i>(kN – m)</i>	$\frac{M_{teórico}}{M_{experimental}}$
1	8,91	10,98	1,23
2	10,02	11,89	1,17
3	40,00	46,79	1,17
4	50,00	47,69	0,95

El siguiente gráfico da una idea de la aproximación del modelo teórico a los valores Experimentales.



**Gráfico 1. Resultados teóricos y experimentales de los elementos reforzados con fibra de carbono. (Elaborado por el autor)**

Se observa que el modelo teórico se comporta de forma semejante al fenómeno real, pero se obtienen valores ligeramente superiores. El hecho de no contar con todos los datos acerca de las condiciones en que se desarrolló el experimento es una causa de incertidumbre a la hora de evaluar el modelo. En cualquier caso, la similitud de los resultados es un indicio de que los cálculos son acertados.

*Mabel Pérez Alfonso. Estudio y Validación del reforzamiento de elementos de hormigón armado sometidos a flexión con fibras de carbono.*

## **Conclusiones**

Todas las conclusiones enunciadas a continuación son válidas solamente para el caso que se ha estudiado, elementos de hormigón armado sometidos a flexión reforzados con fibras de carbono.

1. El parámetro más importante que rige el diseño de elementos de hormigón armado reforzados con fibras de carbono es la deformación del refuerzo de fibra debido a su comportamiento lineal elástico hasta la rotura.
2. El diseño de los elementos con refuerzo de fibra debe realizarse en los dominios 2 ,3 y 3a, en el dominio 4 no es rentable diseñar debido a que el refuerzo de fibra disminuye la ductilidad del elemento y las deformaciones en este dominio tienden a anularse.
3. La metodología propuesta permite el diseño y la revisión de secciones de hormigón armado sometidas a flexión reforzadas con fibras de carbono.

## **Bibliografía:**

1. ACI 318.1995. Building Code Requirements for Structural Concrete y Comentario (ACI-318R-95). 1995.
2. ACI 440.2R-08. julio 2008. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. julio 2008.
3. Arroyo Portero, J. C. y otros.(2004). Guía de diseño del sistema de refuerzo mediante fibra de carbono Replark. DRIZORO S.A. Madrid.
4. Caneiro., J. A.Hernandez.(2005). Métodos modernos de cálculo.El método de estados límites según el enfoque del ACI.
5. EHE.(1999). Comisión Permanente de Hormigón . Instrucción de Hormigón Estructural , 5ª. edición. Ministerio de Fomento, Madrid.
6. Hernández Caneiro, J. A y Hernández Santana, J. J. (2010). "Hormigón Estructural. Diseño por estados límites". Ciudad de la Habana.
7. NC 207:2003. Requisitos Generales para el Diseño y Construcción de Estructuras de Hormigón. 2003.
8. Patiño, A. Comportamiento mecánico de vigas de hormigón armado reforzados con bandas encoladas con resinas epoxídica. [En línea] <http://oa.upm.es/92/1/04200504.pdf>.
9. Pulido, M. D. (2009). Refuerzo de estructuras de hormigón con laminados compuestos. Universidad San Pablo CEU.