



**3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008**  
**Chihuahua; Chih. México**  
**Del 12 al 14 de Noviembre**



**MODELACIÓN CON ELEMENTOS FINITOS DE LA ADHERENCIA DE  
MATERIALES COMPUESTOS USADOS EN LA REPARACIÓN DE VIGAS DE  
CONCRETO**

**J. Castorena González<sup>1</sup>, F. Díaz Vásquez<sup>1</sup>, F. Almeraya Calderón<sup>2</sup>, C. Gaona Tiburcio<sup>2</sup>, C. P. Barrios<sup>1</sup>,  
R. E. Nuñez<sup>1</sup>, J. de J. Armenta<sup>1</sup>, J. L. Almaral<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Mochis, Fuente Poseidón y Prol. Ángel Flores, Col. Las Fuentes, CU., C.P. 81223, Los Mochis, Sin.

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Materiales Avanzados, CIMAV., Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua, Chih.

**RESUMEN**

Las estructuras de concreto reforzado (CR) se deterioran por diversos factores. Desde un punto de vista económico y ambiental, es preferible repararlas que volverlas a construir. En años recientes, se han estado utilizando materiales compuestos a base de fibras (de vidrio o de carbono), por tener una gran relación *resistencia-peso*. Sin embargo, aún existe la necesidad de entender mejor los factores que son importantes para su análisis y diseño. Tal es el caso de la longitud de anclaje. El presente trabajo trata sobre el análisis con elemento finito del efecto que tiene la longitud de anclaje sobre la recuperación y refuerzo de vigas agrietadas por flexión. El modelo con elemento finito es calibrado con dos vigas ensayadas en el laboratorio. Los resultados obtenidos hasta el momento muestran que la longitud de anclaje es como mínimo 0.5 veces el peralte de la viga.

**Palabras clave:** Concreto reforzado, materiales compuestos, adherencia, anclaje, Elemento Finito.

**ABSTRACT**

Concrete structures (RC) deteriorate for many factors. From an economic and environmental point of view, it is preferable to repair them that to return them to build. In recent years, composites materials have been used, where the prime material types are glass or carbon fiber, due the qualities of high strength-to-weight ratio. However, there is still a need to better understand the factors that are important for analysis and design. Such is the case with the length of anchor. The present work tries on the analysis with finite element of the effect of theis longitude over recovery and reinforced of beams cracked by flexion. The model of finite element is calibrated with two beams tested in the laboratory. The results so far show that the anchorage longitude is at least 0.5 times the deep of the beam.

**Keywords:** Concrete structures, composites materials, adherence, anchorage, Finite Element.



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México  
Del 12 al 14 de Noviembre



### INTRODUCCION

Las estructuras de concreto reforzado (CR) se deterioran por diferentes razones, entre ellas se puede mencionar la corrosión en el acero de refuerzo, aplicación de cargas no previstas en el diseño y que pueden deberse, principalmente, al cambio de uso del edificio, así como el deterioro en el concreto debido a un mal diseño o colocación del mismo<sup>1</sup>. En gran parte del mundo, la mayoría de puentes y edificios están hechos a base de CR<sup>2</sup>, y en general manifiestan algún tipo de daño como los ya mencionados. Desde el punto de vista económico y ambiental, es preferible reparar dichas estructuras que volverlas a construir, sobre todo si se dispone de un método de reparación que sea rápido, efectivo y simple; sin embargo, la elección de reparar o de volver a construir dependerá de cada caso en particular. Uno de los métodos que ha resultado efectivo es el uso de placas de acero en la parte de tensión en vigas de CR, sin embargo, se han encontrado ciertas desventajas, entre ellas se pueden mencionar problemas en el manejo e instalación (debido a su peso), sufren de corrosión, vienen en tamaño y longitud limitados, lo que hace difícil el tipo de junta a utilizar, se requiere de la utilización de grandes andamios para mantener las placas en su posición mientras se lleva a cabo el curado del adhesivo epóxico. Para solventar este tipo de problemas se han estado utilizando materiales compuestos a base de fibras, FRP (*Fibre Reinforced Polymer*) por sus siglas en inglés. Estos materiales tienen una gran relación de resistencia-peso y resistencia a la corrosión, dando como resultado una reducción en los costos de mantenimiento<sup>3,4</sup>. Este tipo de materiales se compone principalmente de dos partes: una matriz (resina epóxica) y un refuerzo embebido en ella, que pudiera ser fibra de vidrio, carbón o aramid<sup>5,6,7</sup>. La principal desventaja de este tipo de materiales pudiera ser su costo y que su modo de falla sea frágil<sup>8</sup>. De datos encontrados en la literatura, se menciona, para el caso particular de materiales a base de fibra de carbono (CFRP), que su costo es aproximadamente 10 veces más que el del acero laminado, pero que en costos globales de reparación constituye sólo el 20% del proyecto. En el presente proyecto, se propone la utilización de un material compuesto a base de resina epóxica y fibra de vidrio que se pueden adquirir en el mercado nacional y que puede colocarse in situ, y ser de cualquier longitud para evitar así problemas de colocación en las juntas a reparar. Además, aunque las placas a base de materiales compuestos han sido reconocidas como una opción importante para reforzar y/o reparar estructuras de CR, es necesario entender mejor aquellos factores que son importantes para su análisis y diseño, como lo es la longitud de anclaje. Este artículo presenta también un análisis con elemento finito, sobre el efecto de la longitud de anclaje para la recuperación y refuerzo de una estructura de concreto agrietada en flexión.

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

#### *Fabricación y prueba de especímenes de concreto:*

Se fabricaron 6 especímenes de concreto simple, de 15 x 15 x 50 cms. La mezcla fue a base de cemento Pórtland Tipo I y como agregado fino se utiliza arena natural de río, con una densidad de 2.38 y absorción de 3.50 %. El agregado grueso tuvo un tamaño máximo de ¾", con densidad específica de 2.60 y absorción de 1.2 %. Cada una de las vigas se sometió a flexión en cuatro puntos, como se muestra en la Figura 1. Puesto que se trata de vigas sin refuerzo, la falla esperada es de tipo frágil

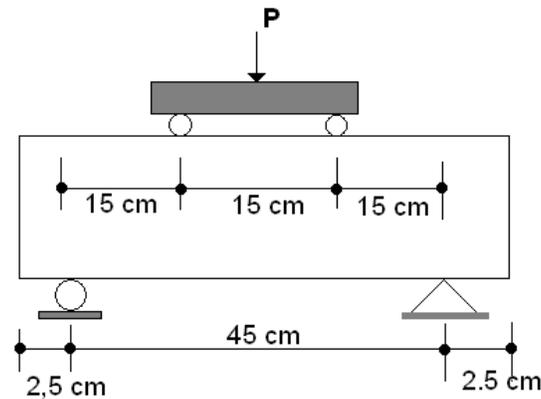


Figura 1. Condiciones de carga y apoyo para los especímenes de prueba, denominada flexión en cuatro puntos

Una vez que realizada la prueba a flexión, se procede a reparar cada una de las vigas con un material compuesto, tres con longitudes de anclaje ( $L_a$ ) de 4 y las tres restantes con 14 centímetros, considerando éstos como dos casos extremos. Para la definición de  $L_a$  y condiciones de carga en las vigas reparadas, ver Figura 2. Para calibrar el modelo de elemento finito se seleccionan los resultados de dos vigas, una por cada lote de tres, y que hayan tenido mejor comportamiento, sobre todo de adherencia.

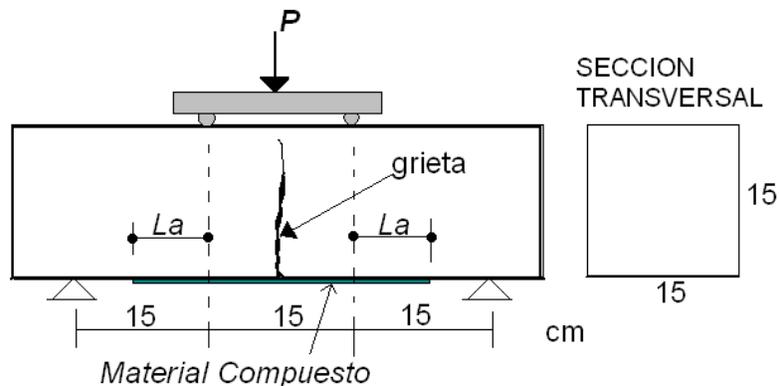


Figura 2. Condiciones de carga y apoyo para la viga en flexión.  $L_a$  es Longitud de anclaje..

**Fabricación del material compuesto:**

Un material compuesto es aquel que está formado por fibras de vidrio y resina epóxica. Las fibras son las encargadas de soportar la carga aplicada al compuesto y la resina, que además de

servir como aglutinante y protector, transfiere la carga de fibra a fibra. La figura 3 muestra el ejemplo de material compuesto.

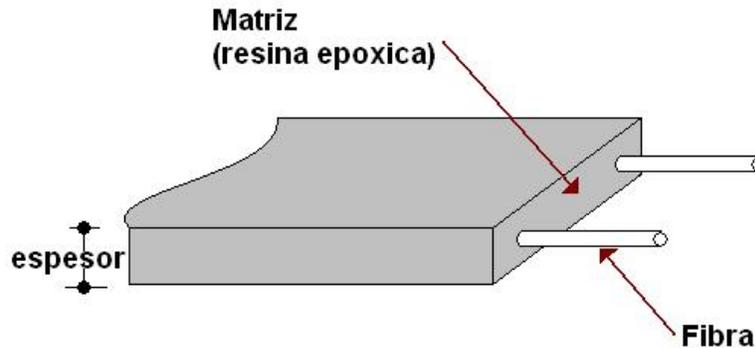


Figura 3. Una lámina de material compuesto se compone de fibra, orientada en cualquier dirección, y de una matriz. El espesor es muy delgado.

Para poder obtener una orientación definida para la fibra, se utiliza fibra de vidrio conocida comercialmente como *petatillo*, de donde se extrae manualmente cada una de las fibras usadas como refuerzo. Para la matriz se adiciona una resina comercial, usada comercialmente en la industria de la construcción para unir concreto nuevo a concreto viejo. Viene en presentación de un litro, y su rendimiento aproximado es de 3 a 3.5 m<sup>2</sup>/litro, con espesor de 10-12 mm. Dicho rendimiento se incrementa para el caso de materiales compuestos, ya que se manejan espesores de 2 a 4 mm. Para formar el material compuesto sobre la viga dañada, se limpia perfectamente la superficie de concreto, a fin de que exista una buena adherencia entre éste y el material compuesto. Con brocha de mano, se aplica una primea capa de resina epóxica, de aprox. un milímetro de espesor. Posteriormente se colocan las fibras, las cuales fueron previamente alineadas sobre una malla de fibra de menor resistencia, con el propósito de mantener una separación uniforme del refuerzo principal (las fibras del petatillo). Una vez colocada la fibra, se aplica de nuevo otra capa de resina, hasta completar el espesor deseado del compuesto, de 2 a 3 mm. Dicho material tarda en secar aproximadamente de 12 a 16 horas, y 24 horas para alcanzar sus propiedades finales de rigidez. En la Figura 4 se muestra una fotografía del aspecto que adquieren las vigas reparadas con este procedimiento.



Figura 4. Especto final de la viga reparada con material compuesto. En términos de porcentaje de refuerzo, es equivalente al 0.2%.

#### **MODELACIÓN NUMÉRICA (ELEMENTO FINITO).**

El método de elementos finitos es una técnica numérica de aproximación, cuyos resultados dependen del tipo y cantidad de elementos finitos que se utilicen en el modelado de estructuras. Esto es, si se utilizan pocos elementos los resultados difieren de los reales, y conforme se utilicen más de ellos la solución se aproximará a la real, sin embargo, el costo computacional es grande y no permite llevar a cabo eficientemente el ensaye numérico en la prueba de las variables involucradas en el fenómeno de estudio. Para encontrar el número de elementos finitos apropiado, se realizan dos tipos de prueba: una de convergencia, y otra, de comparar resultados con los reales, si estos están disponibles. La prueba de convergencia consiste en ir incrementando poco a poco el número de elementos finitos, hasta que algún resultado de interés en el análisis no cambie notoriamente. Para el presente trabajo, el modelo de Elementos Finitos se calibró mediante los resultados obtenidos en un ensaye experimental.

Para la modelación con elemento finito se utiliza un software comercial, el cual dispone de un elemento tridimensional con el que se puede modelar el agrietamiento en el concreto, tanto a tensión como a compresión. El modelo de elementos finitos utilizado se muestra en la Figura 6. Por cuestiones de simetría, se analiza un cuarto de la viga. A fin de evitar problemas de convergencia al momento en que la fibra se desprende del concreto, se aplican desplazamientos como cargas.

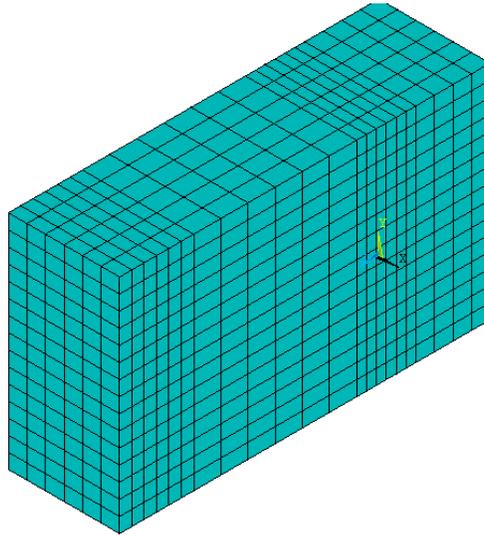


Figura 6. Malla utilizada para el modelo de elemento finito. Elementos SOLID65.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Después de aplicada la carga a flexión sobre las vigas reparadas, se comparan resultados respecto a la carga soportada en las vigas no dañadas. En la Figura 7 se muestran los siguientes resultados: La línea A-C muestra la resistencia por flexión de una viga de concreto simple. Los puntos extremos de la curva, 1 y 2, corresponden a la resistencia recuperada por esas vigas una

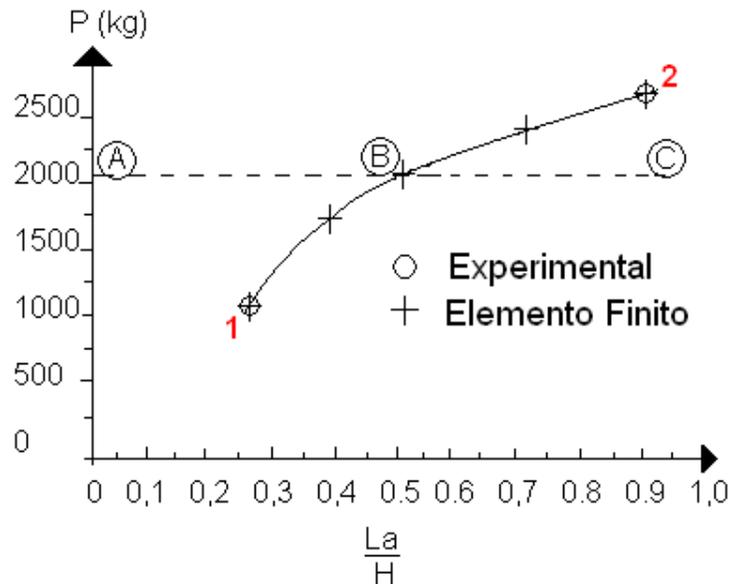


Figura 7. Relación entre resistencia recuperada y  $L_a/H$ . La línea punteada indica la resistencia original de la viga de concreto.

vez que son reparadas con material compuesto. En particular, el extremo 1 corresponde a una viga con material compuesto con una longitud de anclaje  $L_a$  de 4 cms., mientras que el punto 2 corresponde a una con  $L_a$  de 14 cms. La coincidencia que se observa entre resultados experimentales y con elemento finito, se debe a que se usaron los resultados experimentales para calibrar el modelo numérico. Obtenido este, se realizaron los ensayos correspondientes y se obtiene el resto de la curva, de donde se encuentra que para una relación aproximada de  $L_a/H$  de 0.5 se puede recuperar la resistencia original de la viga, marcado como punto B en la grafica. Se observa que más allá de este valor es posible superar la resistencia original, sin embargo el modo de falla cambia ya que se llega a que el concreto sufre aplastamiento en la parte que esta a compresión sin producirse delaminación, lo que para estructuras puestas en servicio no sería conveniente, ya que podría producirse una falla repentina. En las Figuras 8 y 9 se muestran el patrón de agrietamiento en elemento finito para las vigas reparadas con  $L_a$  de 4 y 14 centímetros, respectivamente.

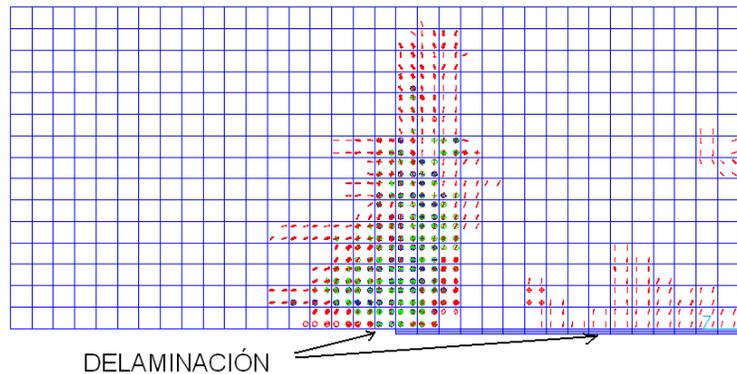


Figura 8. Patrón de agrietamiento para una viga reparada con longitud de anclaje de 4 cm.



Figura 9. Patrón de agrietamiento para una viga reparada con longitud de anclaje de 14 cm.

En la grafica de la Figura 10 se muestra el historial de la carga  $P$  contra desplazamiento vertical medido en uno de los puntos de aplicación de la carga. Dichos desplazamientos se midieron experimentalmente mediante fotografía, tomadas con una cámara digital con resolución de 8 mega píxeles, para la viga reparada con  $L_a$  de 14 cm., en la que se observa un comportamiento dúctil durante el proceso de desprendimiento del material compuesto y de agrietamiento por compresión. Este hecho es muy importante, ya que para el análisis estructural se podría considerar esta etapa adicional.

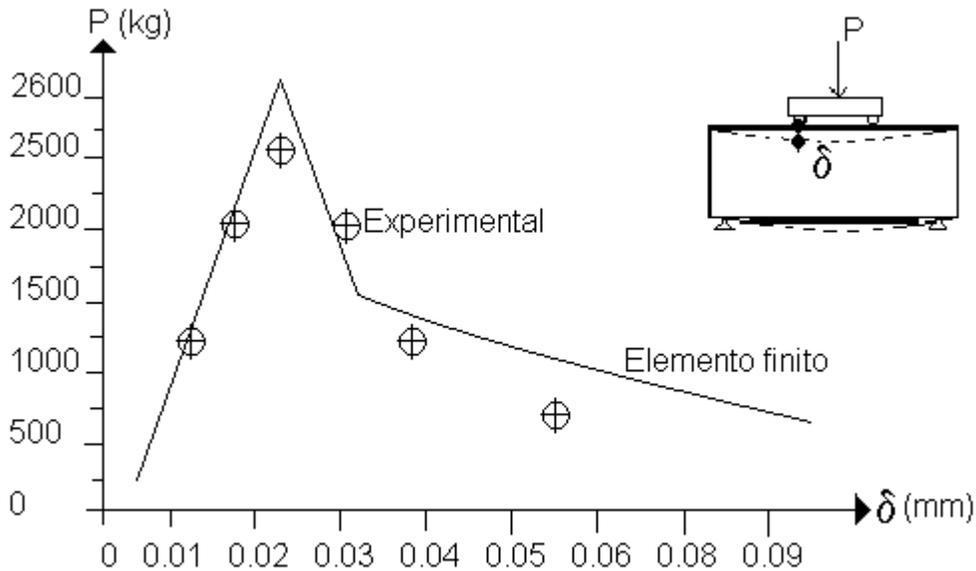


Figura 10. Curvas carga-desplazamiento para vigas reparadas con material compuesto con  $L_a$  de 14 cm.

## CONCLUSIONES

1. Ha efecto de que el material compuesto desarrolle su capacidad como material de refuerzo, es necesario que la longitud de anclaje sea como mínimo 0.5 veces el peralte para elementos de CR sometidos a flexión.
2. Es posible incrementar el rango de comportamiento elástico para elementos de concreto en flexión.
3. Se incrementa la rigidez a flexión así como la resistencia.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Sinaloa, por su apoyo para la realización de este trabajo, a través del proyecto PROFAPI -2008, así como al gobierno del Estado de Sinaloa, a través de proyecto CECyT.

## REFERENCIAS

1. B. Adhikary, H. Mutsuyoshi and M. Sano, "Shear strengthening of reinforced concrete beams using steel plates bonded on beam web: experiments and analysis", *Construction and Building Materials*. **14** (2000): pp. 237-244.



**3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008**  
**Chihuahua; Chih. México**  
**Del 12 al 14 de Noviembre**



2. M. Chajes, T. Thomson and C. Farschman, “Durability of concrete beams externally reinforced with composite fabrics”, *Construction and Building Materials*. **9** (1995): pp. 141-148.
3. L. Ascione and L. Feo, “Modeling of composite/concrete interface of RC beams strengthened with composite laminates”, *Composites Part B:Engineering*. **31**(2000): pp. 535-540.
4. A. Ferreira, A. Marques and J. Sá, “Analysis of reinforced concrete with external composite strengthening”, *Composites Part B:Engineering*, **31** (2000): pp.527-534.
5. E. Sherwood and K. Soudki, “Rehabilitation of corrosion damage concrete beams with CFRP laminates –A pilot study”, *Composites Part B: Engineering*, **31** (2000): pp. 453-459.
6. A. Khalifa and A. Nanni, “Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites”, *Construction and Building Materials*. **16** (2002): pp.135-146.
7. N. Haritos and A. Hira, “Repair and strengthening of RC flat slab bridges using CFRPs”, *Composite Structures*, **66** (2004): pp. 555-562.
8. G. Li and A. Ghebreyesus, “Fast repair of damage RC beams using UV curing FRP composites”, *Composites Structures*, **72** (2006): pp. 105-110.