

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO REFORZADAS A CORTE CON LÁMINAS DE FIBRAS DE CARBONO**

M. Braun<sup>1,2,\*</sup>, E.I. Villa<sup>1</sup>, G. Fournier<sup>1</sup>, M. Miño<sup>1</sup> y C.Rocco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata.  
Calle 48 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigación Científicas y Técnicas (CONICET) CCT La Plata.  
Calle 8 N° 1467, (B1904CMC) La Plata, Buenos Aires, República Argentina

\* E-mail: matias.braun@ing.unlp.edu.ar

### **1. INTRODUCCIÓN**

En las últimas dos décadas, se han realizados grandes progresos en diversas técnicas de refuerzo de estructuras de Hormigón Armado (HA) existentes, o para la reparación de estructuras deterioradas. Entre estas técnicas podemos mencionar los refuerzos externos de láminas de fibras de carbono (LFC). Las principales ventajas que presentan este tipo de refuerzo están relacionadas a su bajo peso, y su alta resistencia, rigidez y durabilidad. Además, este material presenta muchas facilidades para el pegado superficial, ya que su flexibilidad permite adaptarse a la forma de la superficie de la estructura.

Numerosos autores han presentado resultados numéricos y experimentales, sobre vigas de HA reforzados con LFC sometidas a esfuerzos de flexión. En estos resultados se ha podido contrastar que los modelos numéricos son capaces de predecir con buena precisión la carga última a flexión, observando que el uso de este tipo de refuerzo puede duplicar la capacidad resistente a flexión de las vigas [1,2].

Sin embargo, cuando se incrementa la capacidad a flexión, puede darse en la estructura que la carga se acerque a la capacidad máxima de corte. Tålsjten [3] mostró mediante ensayos, que en estructuras con refuerzos a flexión se podían inducir fallos a corte. Dicho de otro modo, una estructura con un fallo frágil a corte puede ser reforzada de modo tal que cambie el modo de fallo por uno más dúctil [4]. Es importante destacar que en el diseño de viga se debe tener un cierto margen de seguridad contra el fallo por corte, ya que este tipo de fallo es más peligroso y menos predecible que el fallo por flexión [5].

Existen numerosos métodos para reforzar estructuras a corte, como refuerzos adicionales cubiertos con hormigón proyectado, o con sujeciones de acero, por mencionar algunos [6-8]. Otra alternativa a los métodos tradicionales es la adherencia superficial de láminas de fibras de carbono mediante resinas epoxídicas. Aunque las deficiencias por corte no son el único problema que enfrentan las estructuras, se hacen cada vez más frecuentes, y existe una gran necesidad de fortalecer y reacondicionar para aumentar la capacidad frente a este tipo de solicitaciones [9-11].

En este trabajo se presenta la validación de un modelo numérico con datos experimentales, extraídos de la literatura [11], de probetas de hormigón armado reforzadas en ambas caras laterales con LFC, adheridas con una resina epoxi. Se han analizados seis probetas ensayadas a flexión anti-simétrica. Algunas, han sido pre-fisuradas por una precarga, y

posteriormente reparadas con la inyección de resinas en el interior de las fisuras, y luego reforzadas con LFC. Para poder modelar el proceso de prefisuración de las vigas ha sido necesario desarrollar un código en MatLab que permite considerar la degradación de las propiedades mecánicas en el hormigón en función de la variable de daño.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

En el presente trabajo se ha modelado una estructura discretizando de manera diferenciada las barras de acero de refuerzo, el hormigón y el refuerzo de láminas de fibras de carbono (LFC). El comportamiento no lineal de cada uno de estos materiales ha sido simulado empleando los modelos constitutivos apropiados en cada caso, que se encuentran disponibles en la librería del código comercial Abaqus/Standard [12]. En esta sección se describen las leyes constitutivas empleadas para cada uno de los materiales involucrados en el análisis.

### 2.1. Barras de Acero

Las barras de acero utilizadas para el refuerzo longitudinal y transversal se han modelado asumiendo un comportamiento elasto-plástico. Por lo tanto, el modelo constitutivo del acero ha sido definido por la tensión de fluencia  $\sigma_y$ , la tensión de rotura  $\sigma_R$ , el Coeficiente de Poisson  $\mu_s$  y el Módulo de Young  $E_s$ .

Las barras de acero fueron modeladas con elementos tetraédricos de 8 nodos (C3D8) disponible en la librería del código comercial [12].

### 2.2. Hormigón

Como es sabido, el hormigón presenta distintos comportamientos cuando las solicitaciones son de tracción que cuando estas son de compresión. Por tal motivo, la caracterización mecánica del material requiere el conocimiento de la curva tensión-deformación en cada una de estas dos situaciones.

Debido a las dificultades que supone la determinación experimental de sus propiedades mecánicas, es una práctica habitual describir el comportamiento del hormigón a partir de su resistencia a la compresión uniaxial  $\sigma'_c$ . En el caso analizado este trabajo, el valor de  $\sigma'_c$  es 28.5 MPa.

La tensión de rotura a tracción  $\sigma_t$  se ha obtenido a partir de:

$$\sigma_t = 0.33\sqrt{\sigma'_c} \text{ MPa} \quad (1)$$

mientras que el módulo de elasticidad inicial del hormigón,  $E_c$ , ha sido relacionado con la resistencia a compresión mediante la siguiente ecuación:

$$E_c = 4700\sqrt{\sigma'_c} \quad (2)$$

El Coeficiente de Poisson del hormigón sometido a compresión,  $\mu_c$ , se encuentra en la mayoría de los casos en el rango comprendido entre 0.15 y 0.22, adoptando para el presente estudio un valor de 0.20. Para definir el comportamiento a compresión, se ha empleado la curva tensión-deformación propuesta por Saenz [13]. Debido a que la resistencia del hormigón para diferentes combinaciones de estados multiaxiales de tensiones es distinta en cada caso, en este trabajo se ha empleado la función de fluencia de Lubliner *et al.* [14], con la modificación propuesta por Lee y Fenves [15] que tiene en cuenta la evolución de la resistencia a tracción y a compresión.

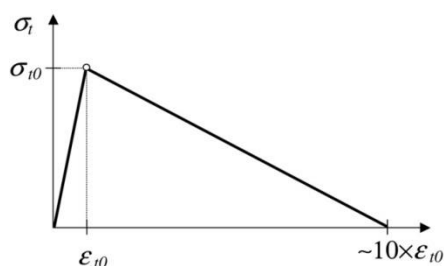


Figura 1: Curva tensión-deformación bilineal.

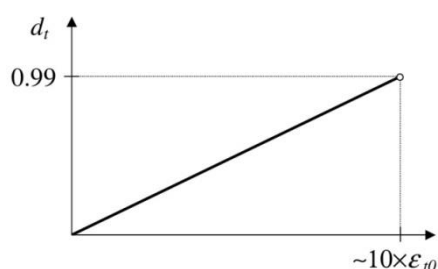


Figura 2: Evolución de la variable de daño.

Para definir el comportamiento a tracción se ha adoptado una ley bilineal, en la que la deformación de rotura es aproximada como 10 veces la deformación correspondiente a la tensión máxima [12]. En la Fig. 2 puede verse la ley lineal de evolución de daño adoptada en el presente trabajo.

Por último, para que quede completamente detallada la ley constitutiva, se han definido las variables  $\omega_t$  y  $\omega_c$  que establecen el comportamiento del hormigón frente a ciclos de carga y descarga uniaxial. En la Fig. 3 puede observarse una interpretación de estas variables. En este trabajo se ha adoptado  $\omega_c = 1$ , lo que implica que la rigidez a compresión se recupera al cerrarse la fisura, y  $\omega_t = 0$  de manera que la rigidez a tracción no se recupera cuando se desarrolla daño a compresión. El hormigón ha sido discretizado empleando elementos tetraédricos de 8 nodos (C3D8), con un mallado estructurado y regular.

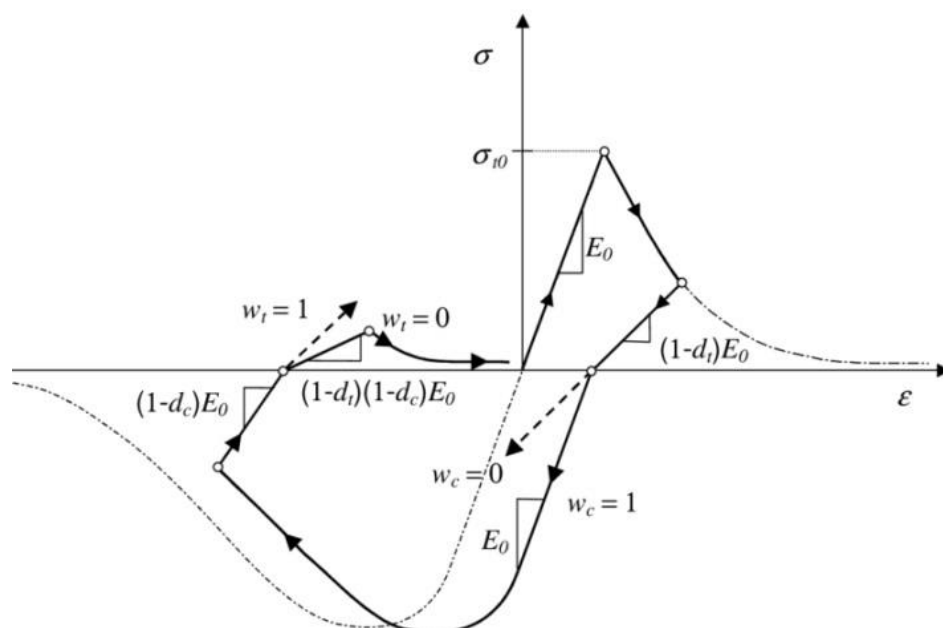


Figura 3: Ciclos de carga uniaxial (tracción-compresión-tracción).

### 2.3. Laminados de Fibra de Carbono

En este trabajo se ha empleado un análisis macroscópico para modelar el comportamiento general de los componentes estructurales que constituyen el material compuesto. Se ha considerado un comportamiento ortotrópico empleando la hipótesis de tensiones planas.

El criterio de inicio de daño empleado se basa en la teoría de Hashin [16], que define el punto a partir del cual comienza a existir una degradación de la rigidez. En este modelo se asume una curva de ablandamiento de tipo lineal, de manera que el comportamiento queda definido en función de las correspondientes Energías Específicas de Fractura.

### 3. CASOS ESTUDIADOS

En la Fig. 4 se presenta la configuración del ensayo, y la disposición de las barras de refuerzo, y láminas de material compuesto. Las probetas de los casos analizados tienen la misma sección transversal ( $150 \times 250 \text{ mm}^2$ ) y la distancia del tramo central sometido a corte de 700 mm.

El refuerzo principal (longitudinal) consiste en seis barras de acero de 13 mm de diámetro, colocadas como refuerzo superior e inferior, en cantidades iguales. Los estribos son de 5 mm de diámetro y con una separación de 100 mm. Se han dispuesto de modo que el vano central se encuentra libre de estribos.

Se aplicaron láminas dobles con orientaciones  $0^\circ + 90^\circ$ , en las caras laterales de la viga. Además, se dispuso una lámina con las fibras orientadas en la dirección del eje de la viga, en las superficies superior e inferior.

La probeta A fue inicialmente dañada por una pre-carga, y posteriormente reparado mediante la inyección de resina epoxi en los elementos totalmente dañados y después se reforzaron con LFC. La probeta B fue ligeramente dañada por una pre-carga y después se reforzaron con LFC. En el caso C en cambio se reforzaron desde el principio.

Para el modelado de las casos en los que existe prefisuración, se desarrolló un código en MatLab que permite desarrollar distintos materiales, de modo que se considera la degradación de las propiedades mecánicas del hormigón de acuerdo a la variable de daño asociada a cada elemento.

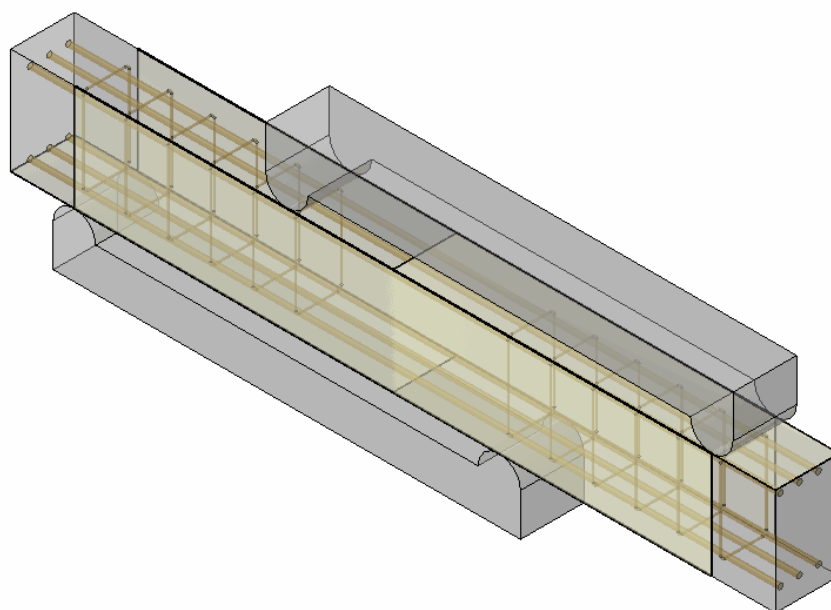


Figura 4: Configuración de ensayo y disposición de la armadura de refuerzo.

### 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Fig. 5 se comparan los patrones de fisuración experimentales y numéricos de la probeta A, para la situación en la que ésta no tiene refuerzos de LFC. Como puede observarse el modelo de elementos finitos es capaz de capturar el fenómeno estado de fisuración de la probeta.

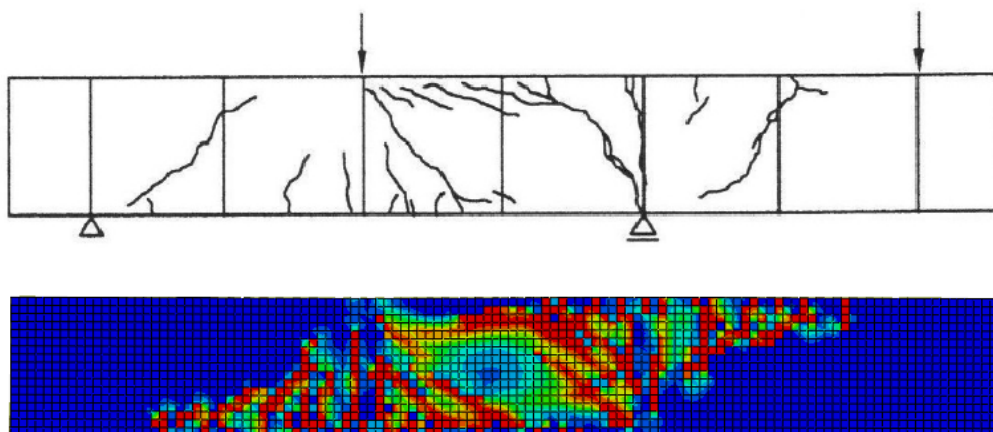


Figura 5: Comparación del patrón de fisuración obtenidos numérica y experimentalmente.

En la Fig. 6 se presentan las curvas fuerzas vs desplazamiento, para los distintos casos analizados. Además se han incorporado los valores de carga de rotura, obtenidos experimentalmente. En estos resultados se puede destacar la buena concordancia que existe entre resultados numéricos y experimentales para el caso de la viga sin refuerzo, donde el modelo predice una carga de rotura de 152 kN, mientras que experimentalmente se obtuvo 142.2 kN. Además, se observa que al incorporar los refuerzos de LFC aumentan tanto la carga de rotura como la ductilidad de la viga. También se evidencia que bajos niveles de prefisuración no generan grandes cambios en el comportamiento mecánico de la viga. Mientras que un proceso de prefisuración elevado, reduce considerablemente la eficiencia del refuerzo, además de bajar su rigidez.

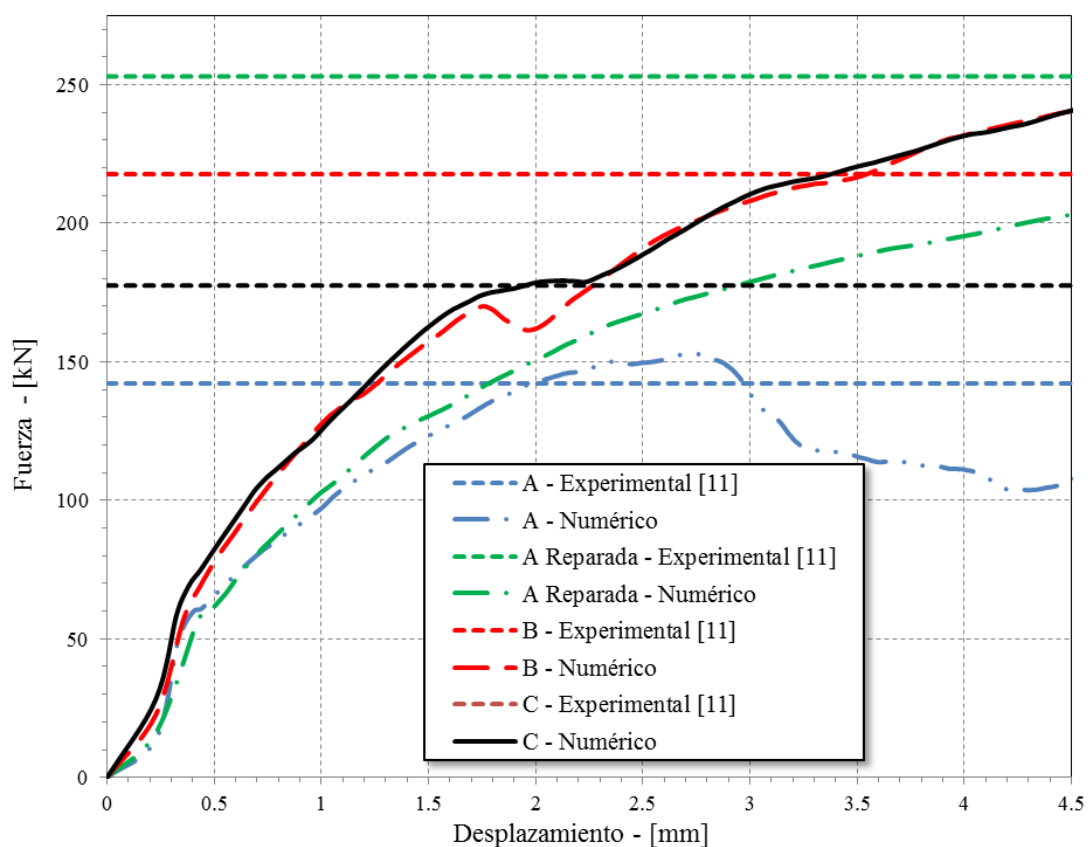


Figura 6: Curvas fuerza desplazamiento obtenidos numérica y experimentalmente.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha llevado a cabo un modelo de análisis por elementos finitos, de vigas de hormigón armado reforzadas a solicitaciones de corte, con láminas de fibras de carbono.

Se han analizados cuatro situaciones: una viga sin refuerzo, viga intacta con refuerzo, y vigas reforzadas con bajo y alto nivel de prefisuración. Para estos últimos dos casos, se ha desarrollado un código en MatLab que permite modelar la degradación de las propiedades mecánicas en el hormigón en función de la variable de daño.

Los resultados obtenidos muestran una buena concordancia con los resultados experimentales extraídos de la literatura.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hu, H.T., Lin, F.M. and Jan Y.Y., *Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics*. Composites Structures, 63:271-281, 2004.
- [2] Hu, H.T., Lin, F.M., Liu, H.T., Huang, Y.F. and Pan, T.C., *Constitutive modelling of reinforced concrete and prestressed concrete structures strengthened by fiber-reinforced plastics*. Composites Structures, 92:1640-1650, 2010.
- [3] Täljsten, B., Plate bonding, strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fiber reinforced plastics. PhD thesis, Lulea Univ. of Technology, Lulea, Sweden, 1994.
- [4] Collins, R. and Roper, H., Laboratory investigation of shear repair of reinforced concrete beams loaded in flexure. ACI Materials Journal, 97:149-159, 1990.
- [5] Al-Sulaimani, G.J., Sharif, A., Basunbul, I.A., Baluch, M.H. and Ghaleb, B.N., Shear repair for reinforced concrete by fiberglass plate bonding. ACI Structural Journal, 91:485-464, 1994.
- [6] Pellegrino, C. and Modena, C., Fiber-reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams with transverse steel reinforcement. Journal of Composite for Construction, 6:104-111, 2002.
- [7] Micelli, F., Annaiah, R. and Nanni, A., Strenghtening of short shear span reinforced concrete T joists with fiber-reinforced plastic composites. Journal of Composites for Construction, 6:264-271, 2002.
- [8] Diagana, C., Li, A., Gedalia, B, and Delmas, Y., Shear strengthened effectiveness with CFF strips. Engineering Structures, 25:507-516, 2003.
- [9] Carolin, A. and Täljsten, B., Theoretical study of strengthening for increased shear bearing capacity. Journal of Composites for Construction, 9:497-506, 2005.
- [10] Carolin, A. and Täljsten, B., Experimental study of strengthening for increased shear bearing capacity. Journal of Composites for Construction, 9:488-496, 2005.
- [11] Yoshiyuki, M., Kiyoshi, M., Koji, T. and Hiromichi S., A study on shear reinforcement of reinforced concrete beams externally bonded with carbon fiber sheets. Composite Interfaces, 5:285-295, 1997.
- [12] ABAQUS, *User's Manual Version 6.13*, Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc, 2014.
- [13] Sanz, L.P., *Discussion of Equation for the stress-strain curve of concrete*. ACI Journal Proceedings, 61:1229-1235, 1964.
- [14] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. and Oñate, E., *A Plastic-Damage Model for Concrete Structures*. Journal of Engineering Mechanics, 25:229-329, 1989.
- [15] Lee, J. and Fenves, G.L., *Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures*. Journal of Engineering Mechanics, 124:892-900, 1998.
- [16] Hashin, Z., *Failure criteria for unidirectional fiber composites*. Journal of Applied Mechanics, 47:329-334, 1980.