

# REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO CON LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO (CFRP)

Eva Oller<sup>1</sup>, Antonio R. Mari<sup>2</sup> y Jesús M. Bairán<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departament Enginyeria de la Construcció e-mail: [eva.oller@upc.edu](mailto:eva.oller@upc.edu), <sup>2</sup>Departament Enginyeria de la Construcció e-mail: [antonio.mari@upc.edu](mailto:antonio.mari@upc.edu), <sup>3</sup>Departament Enginyeria de la Construcció e-mail: [jesus.miguel.bairan@upc.edu](mailto:jesus.miguel.bairan@upc.edu)

**Palabras Clave:** refuerzo, materiales compuestos, polímeros reforzados con fibras (FRP), laminados, hormigón armado.

**Resumen:** *El uso de los materiales compuestos en el campo del refuerzo estructural ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años gracias a sus elevadas relaciones resistencia/peso y rigidez/peso, que permiten reducir costes de mano de obra respecto al empleo de otros materiales más convencionales. Los polímeros reforzados con fibras (FRP) se pueden aplicar como refuerzo de estructuras de hormigón armado o pretensado a flexión, cortante o confinamiento. Independientemente del tipo de refuerzo, uno de los principales inconvenientes o condicionantes en el dimensionamiento es el fallo por el desprendimiento prematuro del refuerzo, antes de alcanzar la resistencia última del mismo, por la concentración de tensiones en la interfase entre el laminado y el soporte.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde su aparición en los años noventa, la adhesión de laminados de polímeros reforzados con fibras (FRP) a estructuras de hormigón armado o pretensado se ha convertido en una de las técnicas más recurrentes en el refuerzo a flexión, cortante o confinamiento.

A continuación se presentan los trabajos que se están llevando a cabo en el Departamento de Ingeniería de la Construcción relativos al refuerzo a flexión y cortante con laminados FRP.

## 2. REFUERZO A FLEXIÓN

### 2.1 Dimensionamiento a flexión evitando el desprendimiento prematuro del refuerzo

Según el estado del arte relativo al refuerzo a flexión de estructuras de hormigón armado mediante la adhesión de laminados FRP, en la gran mayoría de ensayos experimentales, se produce el desprendimiento prematuro del refuerzo (ver Figura 1) antes de que se alcance la carga última asociada a una rotura clásica. Esta rotura prematura puede iniciarse a lo largo del vano, debido a la existencia de fisuras de flexión y/o cortante (intermediate crack (IC) debonding), o bien en el extremo del laminado debido a la concentración de tensiones generada por la discontinuidad de esa zona (plate end (PE) debonding).

En Oller [1] se desarrolla un método para el dimensionamiento del refuerzo a flexión con FRP que evita que se produzca el desprendimiento prematuro del laminado. Este método se basa en la aplicación de la teoría de la Mecánica de Fractura No Lineal para obtener la fuerza rasante máxima que se puede transferir entre laminado y hormigón, bien entre dos fisuras adyacentes o bien entre el extremo del laminado y la fisura más próxima. La fuerza rasante máxima transmitida entre dos fisuras adyacentes establece un límite en el cortante último actuando en la fisura más solicitada. El cortante último que produce el desprendimiento del

laminado se puede obtener para cualquier valor del momento flector actuando en la fisura más solicitada. Estos valores de cortante y momento flector definen un diagrama de interacción asociado al desprendimiento del refuerzo (ver Figura 1).

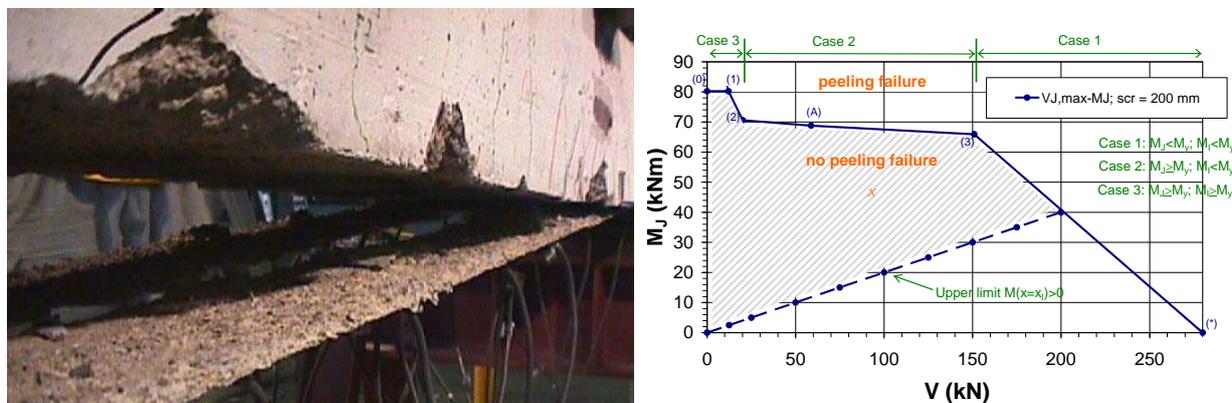


Figura 1. Desprendimiento prematuro del laminado en una viga reforzada a flexión con laminados CFRP [1]. Diagrama de interacción cortante-momento flector.

Al dimensionar, después de calcular el área de laminado necesaria para reforzar a flexión, se debe verificar que no se produce el desprendimiento del laminado en ningún punto. Por ello, se debe asegurar que el esfuerzo cortante y el momento flector en cualquier sección deben estar dentro del diagrama de interacción asociado al desprendimiento del refuerzo. Además, se debe verificar el extremo del laminado, comprobando que la fuerza rasante transmitida entre este punto y la fisura más cercana debe ser menor que el valor máximo teórico. Si esta condición no se verifica, se producirá un desprendimiento local en el extremo del laminado. Este desprendimiento local no implica el desprendimiento completo del refuerzo. Para saber si este efecto es localizado o no, se debe analizar el elemento entre las dos primeras fisuras en el extremo del laminado y si resulta necesario se debe reajustar el valor del cortante último que evita el fallo debido al efecto de las fisuras existentes al inicio del refuerzo.

La fiabilidad de este método se ha verificado con éxito prediciendo la carga última obtenida en los ensayos recopilados en la base de datos de Oller [1] de vigas reforzadas a flexión con laminados FRP que fallaron prematuramente.

## 2.2 Análisis del comportamiento de elementos de hormigón armado reforzados con laminados FRP mediante modelos no lineales y evolutivos

En el diseño del refuerzo estructural resulta fundamental evaluar de forma ajustada el comportamiento estructural del elemento antes y después de la intervención, para conseguir una solución que verifique los requisitos de resistencia, funcionalidad y durabilidad con el mínimo coste de intervención.

La respuesta estructural de los elementos de hormigón armado y pretensado se ve afectada por el comportamiento no lineal y diferido de los materiales que lo componen. Este comportamiento depende de la fisuración, fluencia, retracción, plastificación y deterioro de los materiales a lo largo de su vida útil. Por ello, los modelos elástico-lineales no resultan adecuados para analizar la capacidad residual de estructuras sometidas a un cierto nivel de daño ni para evaluar con rigor los efectos de una posible intervención. Además, el refuerzo estructural puede implicar modificaciones en la geometría, armadura, apoyos, esquema

estructural, cargas y deformaciones impuestas en la estructura que deben ser contempladas por el modelo, junto al comportamiento no lineal y diferido.

Para predecir el comportamiento estructural de elementos de hormigón reforzados a flexión con laminados FRP, se ha aplicado un modelo de análisis no lineal y evolutivo en el tiempo, previamente desarrollado por los autores, donde se ha implementado el criterio de dimensionamiento anteriormente descrito para evitar el desprendimiento prematuro del FRP. Este modelo se ha validado con ensayos experimentales realizados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras en el marco de la tesis doctoral de Oller [1] y con otras campañas experimentales (Marí et al. [2]). Se han obtenido muy buenos resultados a nivel de flechas, deformaciones, reacciones, esfuerzos, modos de rotura, y se ha evaluado correctamente la eficiencia de las soluciones de refuerzo propuestas.

Pese a no ser una técnica ampliamente contrastada, la experimentación existente ha demostrado que si se pretensan los laminados, se consigue mejorar su efectividad, al aprovechar en mayor medida su capacidad resistente y mejorar las condiciones de servicio (la aplicación del FRP pretensado aumenta la carga de fisuración, cierra fisuras existentes, reduce flechas). Por ello, el modelo de análisis no lineal se ha validado también para elementos de hormigón armado reforzados con laminados pretensados, analizando una campaña experimental de vigas reforzadas mediante esta técnica (Woo et al. [3]). Se ha obtenido una buena correlación entre los resultados numéricos y experimentales a nivel de carga, flechas y deformaciones en el laminado.

### **3. REFUERZO A CORTANTE**

Experimentalmente se ha probado y está bien establecido que el refuerzo con laminados FRP es un sistema eficiente para incrementar la resistencia última a esfuerzo cortante de elementos de hormigón armado. Sin embargo, así como los mecanismos resistentes a flexión están bien establecidos, no ocurre igual en el caso del cortante, y en particular para el refuerzo mediante laminados FRP. Por una parte, la viga a reforzar puede estar previamente fisurada. Por otra parte, esta viga se someterá a un cortante superior al valor resistido por la viga sin reforzar, con lo cual pueden producirse transferencias bruscas de tensiones del armado original al refuerzo, cambios de orientación de las bielas comprimidas y fisuras adicionales, entre otros fenómenos.

En la actualidad, no se dispone de un modelo consensuado que evalúe la contribución del laminado FRP a la resistencia a cortante. El análisis de una base de datos recopilada por los autores demuestra la dispersión existente en los resultados obtenidos analíticamente para el cortante último según las recomendaciones vigentes más utilizadas.

Para comprender y cuantificar los mecanismos resistentes a cortante de vigas reforzadas con FRP, se está desarrollando una campaña experimental en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción con el fin de contribuir a diseñar refuerzos con estos materiales que sean realmente eficaces y económicos.

#### **3.1 Campaña experimental de vigas de hormigón armado reforzadas a cortante con laminados de fibra de carbono**

La campaña experimental, en desarrollo, consiste en un total de 20 ensayos sobre dos series de cinco vigas de sección transversal en T y de 5,80 m de longitud. La sección transversal de las vigas presenta un canto total de 550 mm y un ancho de ala de 600 mm. El espesor de alma es de 200 mm y el de ala 150 mm.

La diferencia entre las dos series de vigas radica en la cuantía de armadura longitudinal inferior dispuesta. Se distinguen entre dos series: A (cuantía alta) con dos filas de  $2\phi 16+2\phi 20$  y M (cuantía media) con dos filas de  $4\phi 16$ . Los cercos de cortante son  $\phi 6$  separados 140 mm en los 3,08 m centrales y 240 mm en el resto de las vigas. Las vigas se refuerzan a cortante mediante laminados de fibra de carbono en forma de U de ancho 50 mm y espesor medio 0,2 mm. Se distinguen entre dos cuantías en función de la separación entre ejes de los laminados: cuantía baja (240 mm) y cuantía alta (120 mm).

En relación a los materiales, el hormigón es HA-25/B/12/IIa y el acero de las armaduras es B500 SD. Los laminados están formados por fibras de carbono embebidas en una matriz de resina epoxi. Las fibras tienen un módulo de elasticidad nominal de 230 GPa y una deformación última nominal de 1,478%.

Sobre cada viga se realizan dos ensayos a cortante. En el primer ensayo, se aplica una carga puntual a una distancia de 1,48 m desde el apoyo izquierdo, que se corresponde aproximadamente a 3 veces el canto útil. El apoyo derecho se dispone de modo que queda un tramo biapoyado de 3,30 m de luz. En el segundo ensayo se modifica la posición de los apoyos y de la carga puntual de modo que la configuración resulta simétrica en relación a la del primer ensayo, aplicando la carga en la zona no dañada por el primer ensayo.

Se han realizado predicciones analíticas y numéricas para los ensayos experimentales. Las predicciones analíticas se han realizado siguiendo las recomendaciones existentes más utilizadas (Fib Bulletin 14, ACI-440 y TR-55). Las predicciones numéricas se han obtenido mediante un modelo numérico de análisis no-lineal, llamado IFENSSA (Inter Fiber Equilibrium based Nonlinear Sectional and Structural Analysis), desarrollado en el entorno del grupo de trabajo (Mohr et al. [4]). El modelo permite simular la interacción de esfuerzos normales, flexión y cortante considerando el equilibrio interno entre fibras y la compatibilidad de deformaciones en sentido bidimensional. El modelo es aplicable a problemas planos y se basa en una simplificación de un modelo general, aplicable a problemas 3D, previamente desarrollado en el grupo de trabajo. Se observa que las recomendaciones existentes proporcionan valores poco conservadores de la componente de resistencia a cortante del FRP. Tanto los resultados numéricos como los analíticos indican que se consigue la rotura por cortante, que es la deseable.

En el momento de redacción de la presente ponencia, la campaña experimental se encuentra en desarrollo. Sin embargo, en las fechas de la jornada se habrán finalizado los ensayos y se dispondrá de resultados analizados.

## REFERENCIAS

- [1] Oller, E. (2005): Peeling failure in beams externally strengthened by plate bonding. A design proposal, PhD. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament Enginyeria de la Construcció.
- [2] Marí, A. R., Oller, E., Bairán, J. M. (2011): Predicting the response of FRP-strengthened reinforced concrete flexural members by non-linear. *Journal of Composites for Construction*, in press.
- [3] Woo, S., Nam, J., Jay Kim J., Han, S., and Joo Byun, K. (2008): Suggestion of flexural capacity evaluation and prediction of prestressed CFRP strengthened design. *Engineering Structures*, 30 (2008), pp. 3751-3763.
- [4] Mohr S., Bairán J. M., and Marí A. R.. (2010): A frame element model for the analysis of reinforced concrete structures under shear and bending, *Engineering Structures*, 32 (2010), pp. 3936-3954.