

# Ensayo sobre endurecimiento de adhesivos estructurales sometidos a cargas dinámicas

A. RECUERO, J. P. GUTIÉRREZ, C. LÓPEZ, A. DE DIEGO  
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. C.S.I.C.

Los polímeros reforzados con fibras de carbono se están utilizando cada vez más para el refuerzo de estructuras de hormigón, reemplazando a los sistemas tradicionales de refuerzo con acero. Esto es debido a sus altas resistencia y rigidez específicas, resistencia a la corrosión, ligereza y facilidad de manejo y puesta en obra.

Este artículo presenta un estudio sobre el comportamiento de vigas de puentes reforzadas con bandas de CFRP mientras se mantiene el puente en servicio de manera que la estructura está sometida a cargas dinámicas con el adhesivo fresco. En los ensayos realizados se ha observado que las cargas dinámicas no afectan a la efectividad del refuerzo.

*Palabras clave: adhesivos, refuerzo de estructuras, ensayos experimentales, cargas dinámicas*

## Experimental test of structural adhesives subjected to dynamic loads while hardening

Carbon fibre reinforced polymers are increasingly replacing the steel reinforcing systems in the repair and strengthening of concrete structures thanks to their high strength/weight and stiffness/weight ratios, corrosion resistance, lightweight, and ease of handling and application. This paper presents a study on the behaviour of bridge concrete beams strengthened with CFRP sheets when the strengthening is made when traffic is acting so that the structure is subjected to dynamic loads while the adhesive is still fresh. No reduction in the effectiveness of the strengthening was observed in the tests.

*Key words: adhesives, strengthening of structures, experimental tests, dynamic loads*

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de materiales compuestos de fibra de carbono en el refuerzo de estructuras de hormigón constituye ya una auténtica alternativa al sistema convencional de refuerzo mediante encolado de chapas de acero, fundamentalmente en los refuerzos a flexión<sup>(1)(2)</sup>. La ligereza del material compuesto facilita su transporte y puesta en obra, empleándose medios auxiliares ligeros durante cortos periodos de tiempo, lo cual permite muchas veces ejecutar el refuerzo de puentes manteniendo la estructura en servicio.

En este trabajo se presenta un estudio experimental sobre el comportamiento de vigas de puentes reforzadas externamente mediante el pegado de bandas de polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP), cuando la actuación se realiza con el puente en servicio, de manera que está sometido a cargas dinámicas mientras el adhesivo está fresco.

En una primera etapa del trabajo se ha caracterizado el comportamiento del adhesivo ya curado como parte de la unión estructural. El modelo teórico de este comportamiento está basado en la teoría de daño de J. Lemaitre<sup>(3)</sup>. Se ha llevado a cabo un programa experimental para calcular los parámetros de la formulación.

A continuación se han realizado ensayos para determinar las propiedades mecánicas del adhesivo en las primeras horas de curado.

Finalmente se ha estudiado el efecto que tiene sobre el comportamiento de la unión la actuación de cargas durante el periodo de curado del adhesivo. Para ello se ha diseñado un ensayo, basado en el beam test, que se describe más adelante.

## 2. CARACTERIZACIÓN DEL ADHESIVO ESTRUCTURAL

Se ha llevado a cabo un programa experimental con el fin de

evaluar el comportamiento de una unión adhesiva estructural. Este comportamiento se rige por la evolución del daño en el adhesivo cuando se somete a cargas cíclicas. Esta ley (1) la describe J. Lemaitre en su particularización de las leyes de daño para interfases, y tiene la siguiente forma:

$$\dot{D} = \frac{\mu + 2}{3} \frac{1 - (1 - D_c)^3}{(1 - D)^2} \left( \frac{\sigma_{33}^2}{\sigma_R^2} + \frac{\tau_{13}^2 + \tau_{23}^2}{\tau_R^2} \right) \left( \frac{\sigma_{eq}^I}{\sigma_R} \right)^{\mu-1} \frac{\langle \dot{\sigma}_{eq}^I \rangle}{\sigma_R} \quad (1)$$

donde  $\dot{D}$  representa la evolución del daño en el tiempo,  $D_c$  es el daño crítico en el despegue,  $\sigma_R$  es la tensión última en tracción pura,  $\tau_R$  es la tensión última en cizalladura pura,  $\mu$  es el parámetro característico del comportamiento a fatiga,  $\sigma_{33}$  es la tensión normal a la interfase,  $\tau_{13}$  y  $\tau_{23}$  son las componentes de la tensión de cortante fuera del plano y  $\langle \dot{\sigma}_{eq}^I \rangle$  son los corchetes de Macauley. Para cada sistema es necesario determinar cuatro coeficientes:  $\sigma_R$ ,  $\tau_R$ ,  $\mu$ ,  $D_c$ <sup>(4)(5)</sup>.

La tensión última en tracción pura se calculó mediante el ensayo estándar ASTM D897, Standard Test Method for Tensile Properties of Adhesive Bonds<sup>(6)</sup>. Se obtuvo una resistencia a tracción media de 31.46 MPa.

La tensión última en cizalladura pura se obtuvo mediante el ensayo ASTM D3983 Standard Test Method for Measuring Strength and Shear Modulus of Adhesives by the Thick-Adherent Tensile-Lap Specimen<sup>(6)</sup>. En los ensayos se obtuvo una resistencia a cizalladura media de 20.3 MPa con una deformación media de fallo de 0.38. El módulo de cizalladura medio fue de 0.4 GPa.

A partir de los resultados de los ensayos de cizalladura se calcularon las curvas de daño (Fig. 1), y a partir de éstas se obtuvo un valor crítico del daño  $D_c$  entre 0.75 y 0.80.

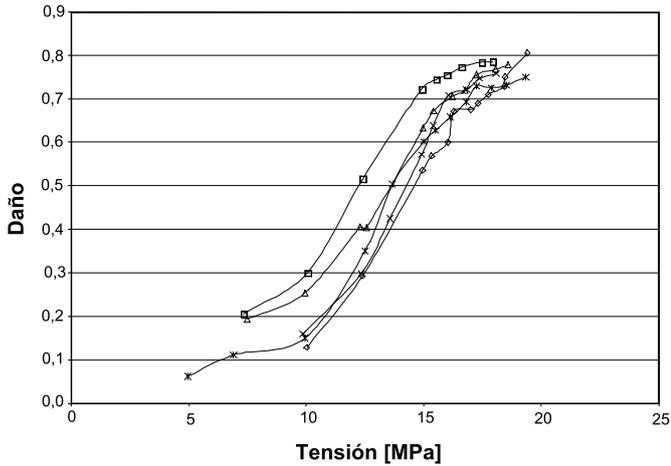


Fig 1: Curvas de daño de la unión adhesiva para las 5 muestras ensayadas

Con el fin de obtener el exponente característico de la no linealidad de la unión adhesiva se realizaron ensayos de fatiga con una frecuencia de 10 Hz, para evitar efectos viscoelásticos, y con un ratio de tensiones de  $R=0.1$ . Se obtuvo un valor de  $\mu$  alrededor de 8.

### 3. CARACTERIZACIÓN DEL ADHESIVO DURANTE EL CURADO

Con el fin de caracterizar el comportamiento de la unión adhesiva durante las primeras horas de curado se han realizado ensayos de cizalladura (ASTM D3983) para distintos tiempos de curado (Figs. 2 y 3).

### 4. ENSAYO TIPO BEAM-TEST

Para estudiar el comportamiento de la unión material compuesto– adhesivo–hormigón, especialmente en las zonas de anclaje <sup>(7,8)</sup>, se ha diseñado un ensayo sobre probetas similares a las utilizadas en el beam test para determinar la adherencia de las armaduras de acero en el hormigón <sup>(9)</sup>. Las probetas están formadas por dos bloques paralelepípedicos de hormigón armado unidos en su parte superior por una rótula de acero y en su parte inferior por la banda de CFRP objeto del estudio (Fig. 4). La banda se pega en la cara inferior de los dos bloques a lo largo de toda la probeta después de preparar la superficie de hormigón eliminando la capa superficial de mortero. Con el adhesivo fresco, se somete la probeta durante 24 horas a una carga dinámica que provoca un deslizamiento relativo entre el hormigón y la banda y posteriormente se realiza el ensayo estático hasta rotura de estas probetas y de otras iguales pero que han permanecido en reposo durante el curado del adhesivo.

En los ensayos dinámicos se ha tomado como variable el deslizamiento relativo máximo hormigón-banda y se ha determinado el máximo deslizamiento que puede producirse sin deteriorar la unión adhesiva. En estos casos, el comportamiento en el ensayo estático posterior es igual al de las probetas con curado en reposo, y la rotura se produce por fallo del hormigón en las zonas de anclaje de la banda de CFRP (Fig. 5).

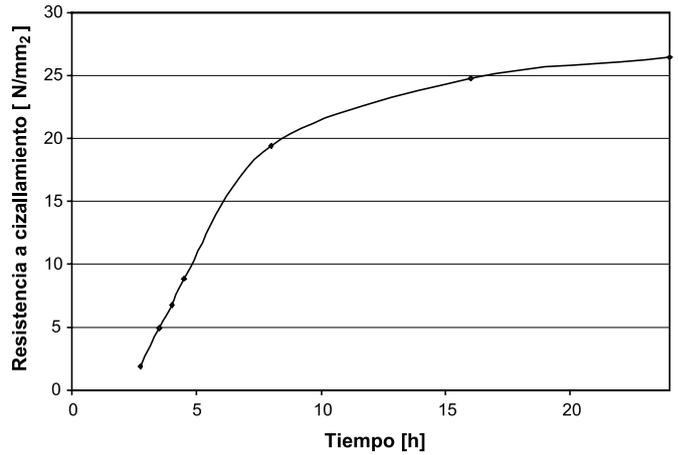


Fig. 2: Curva resistencia/tiempo con curado a 35°C.

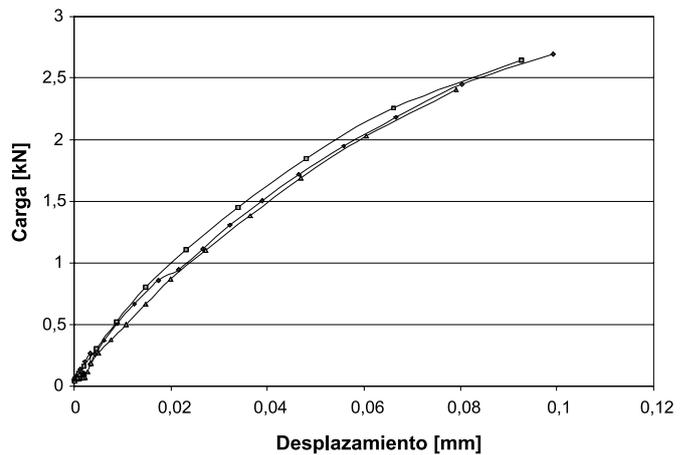


Fig. 3: Curva carga/deslizamiento en probetas curadas 4 horas a 35°C



Fig. 4: Probeta en disposición de ensayo estático

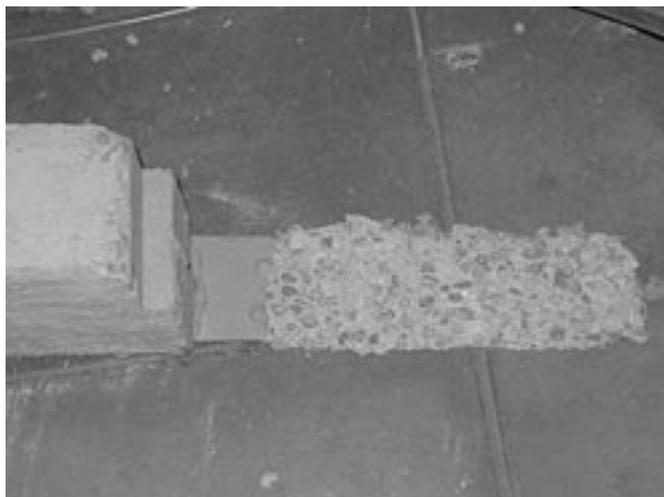


Fig. 5: Rotura de una probeta

En las aplicaciones reales el deslizamiento hormigón-banda producido es muy inferior por lo que no es de esperar ningún deterioro en el comportamiento de la unión adhesiva por el hecho de efectuar el refuerzo con los puentes en servicio.

## 5. CONCLUSIONES

Los ensayos realizados en la primera parte del estudio permiten la definición de una ley de comportamiento, basada en la Teoría del Daño de J. Lemaitre, para los adhesivos que forman parte de una unión estructural.

Se ha diseñado también un ensayo que permite de manera sencilla estudiar el comportamiento de la unión CFRP-adhesivo-hormigón

en las zonas de anclaje. Este ensayo se ha utilizado para analizar la influencia de cargas dinámicas que actúen sobre la estructura durante el periodo de curado del adhesivo, y no se ha observado ningún deterioro en la efectividad del refuerzo por esta causa.

## AGRADECIMIENTOS

Estos trabajos forman parte del Proyecto de Investigación MAT2000-0971-C02-01, financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, que realizan conjuntamente el Instituto Eduardo Torroja y el Departamento de Mecánica Estructural de la Universidad Politécnica de Madrid.

## BIBLIOGRAFÍA

1. L. Van Den Eimde, L. Zhao, F. Seible. «Use of FRP composites in civil structural applications». *Construction and Building Materials* 17, 389-403 (2003).
2. H. Saadatmanesh, A.M. Malek, «Design guidelines for flexural strengthening of RC beams with FRP plates», *Journal of composites for construction*, ASCE, Vol. 2, No. 4, 158-164. (1998).
3. J. Lemaitre, «A course on damage mechanics», Springer, 1996
4. P.D. Chalkley, W. K. Chiu. «An improved method for testing the shear stress/strain behavior of adhesives», *International Journal Adhesion and Adhesives*, Vol. 13, No. 4, 237-242. (1996).
5. C. Blanchard, A. Chateauminois, L. Vincent. «A new testing methodology for the assessment of fatigue properties of structural adhesives». *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 16, No. 4, 289-299. (1996).
6. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Material, vol. 15.06 Adhesives.
7. L.Bizindavyi, K.W. Neale, «Transfer lengths and bond strengths for composites bonded to concrete», *Journal of composites for construction*, ASCE, Vol. 3, No. 4, 153-160. (1999).
8. J.M. Sena Cruz, J.A.O. Barros, R. Faria, «Assessing the embedded length of epoxy-bonded carbon laminates by pull-out bending tests», *Composites in constructions*, Figueiras et al (eds). 217-222. (2001).
9. Norma UNE-36740 «Determinación de la adherencia de las barras y alambres de acero para armaduras de hormigón armado». (1998).

Recibido: 1.2.03

Aceptado: 30.11.03

