

# Identificación Dinámica de Elementos de Hormigón Armado Fisurados Reforzados Externamente con Fibras de Carbono

Pedro Galvín, José Domínguez, Mario Solís

*Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos sin.*

*954487293 pedrogalvin@us.es*

## Resumen

Las estructuras de hormigón armado pueden sufrir daños a lo largo de su vida causados, por ejemplo, por cargas subestimadas o imprevistas o condiciones medioambientales. Una técnica usada para reparar estructuras de hormigón armado consiste en la adhesión de láminas de fibras de carbono (CFRP) en la zona traccionada de éstas. En cualquier caso, una inspección regular de las estructuras hace posible una rápida detección del daño que minimiza los costes de reparación. Basándose en la pérdida de rigidez debida a la fisuración del hormigón, en este trabajo, se usan los cambios en las frecuencias naturales y los modos de vibración de seis vigas de hormigón armado ensayadas a flexión en cuatro puntos para determinar el daño en estructuras de hormigón reforzadas y sin reforzar.

**Palabras Clave:** Detección del daño, Ensayos dinámicos, Rigidez, Refuerzo de Vigas de Hormigón Armado.

## Abstract

Underestimated or accidental loads or environmental conditions may cause damage to reinforced concrete structures. A method used to repair and strengthen concrete structures consists on bond composite laminates to the surfaces of RC beams. Anyway, regular inspection of the structures makes possible an early detection of the damage, thereby minimising costs. The damage structures results in a stiffness reduction in the cracked sections. In this work, the changes in modal parameters are used for detecting damage in six RC beams strengthened with externally bonded CFRP plates.

**Keywords:** Damage detection, Dynamic testing, Stiffness, Strengthened RC beams.

## 1. Introducción

Las estructuras de hormigón armado pueden sufrir daños a lo largo de su vida causados, por ejemplo, por cargas subestimadas o imprevistas o condiciones medioambientales. En los últimos años la reparación, rehabilitación y mejora de las estructuras existentes ha estado entre los más importantes retos de la ingeniería. Una técnica usada para reparar estructuras de hormigón armado consiste en la adhesión de láminas de fibras de carbono (CFRP) en la zona traccionada de éstas.

En cualquier caso, parece ser necesaria una inspección regular de las estructuras para valorar su integridad y realizar una rápida identificación del daño que minimizará los costes de reparación. De este modo, muchos de los puentes construidos en los últimos

años han sido instrumentados registrándose continuamente la respuesta a sus cargas de servicio, de donde se puede identificar la presencia, ubicación y magnitud del daño a partir de cambios en las características estáticas y dinámicas de la estructura. En este trabajo se relaciona el cambio que sufren tanto las frecuencias naturales como los modos de vibración con el estado de fisuración de seis vigas de hormigón armado, estando cuatro de estas reforzadas con CFRP.

## 2. Ensayos

Se han sometido a un ensayo de flexión en cuatro puntos seis vigas de hormigón armado. Las vigas tenían unas dimensiones de 25 x 20 x 260, con dos barras de 6 mm de diámetro más una de 12 mm como armadura de tracción, y dos barras de 6 mm de diámetro como armadura de compresión. Se dispusieron estribos de 6mm de diámetro cada 20 cm. Las vigas fueron diseñadas para que el fallo estuviese controlado por la rotura del acero. 2 vigas no fueron reforzadas (denominadas VC1 y VC2). Cuatro vigas fueron reforzadas con laminado de fibras de carbono de 1.2 mm de espesor, 50 mm de ancho y una longitud igual a la luz de la viga (denominada VR). Muchas investigaciones han mostrado que anclando el laminado en los extremos con tejido de fibras en forma de "U" se consigue un retraso en el despegue, por lo que en tres de estas vigas se usó este tipo de anclaje para intentar evitar el fallo frágil, estando las fibras del refuerzo orientadas perpendicularmente al eje de la viga en una (denominada VRUV) (figura 3), paralelamente al eje en otra (denominada VRUH), y en el último caso se usó un refuerzo en ángulo ("doble L") (denominada VRA).

Previamente se determinaron las propiedades del hormigón y el acero de las armaduras, resultando la resistencia del hormigón 30MPa con un módulo de deformación de 28GPa, y la resistencia del acero 500MPa con un módulo de elasticidad de 210GPa. El módulo de elasticidad del laminado es 165GPa. En la figura 1 se indica la sección de la viga ensayada y la configuración del ensayo.

Se han aplicado pasos de carga hasta que se ha llegado a la rotura de la viga (Tabla 1). Después de cada descarga, se realizó un análisis modal del sistema y se ha observado el estado de fisuración de la viga. Para realizar el análisis modal se usaron 6 acelerómetros

piezoeléctricos, dispuestos cada 46 cm. Para obtener los parámetros modales de la viga se ha usado la técnica de Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (FDD) [1].

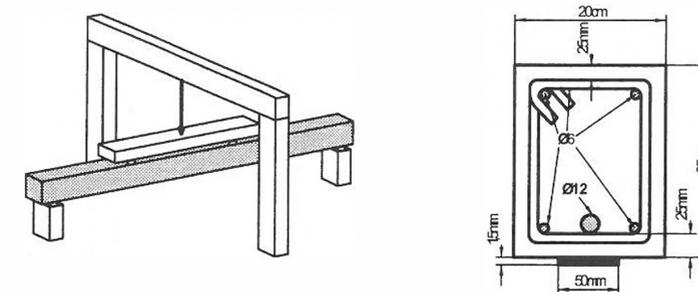


Figura J. Configuración del ensayo y sección de la viga.

Tabla J. Carga (kN) alcanzada en cada paso

Paso de Carga	VCJ	VC2	VRUH	VRA	VRUV	VR
0	0	0	0	0	0	0
1	5	10	15	10	10	10
2	10	15	18	15	15	15
3	15	20	21	18	20	20
4	20	25	38	20	25	25
5	34	30	58	22	30	30
6	40	35	68.22	25	35	35
7	42	40		28	40	40
8	44			33	45	45
9				38	50	50
10				45	55	
11				48		
12				53		
13				68.09		

La evolución de las frecuencias naturales y los modos de vibración con los diferentes estados de daño se representan en la Tabla 2 y en la Figura 2, para todas las vigas. Todos los modos de vibración han sido normalizados con respecto al desplazamiento modal máximo.

Tabla 2. Evolución de la primera frecuencia natural (Hz)

Paso de Carga	VCJ	VC2	VRUH	VRA	VRUV	VR
0	43.17	43.77	44.90	43.58	43.34	41.83
1	42.51	43.34	44.09	42.96	43.14	41.70
2	42.39	42.76	43.60	42.53	42.80	40.62
3	42.27	41.64	43.51	42.17	42.63	39.55
4	38.73	40.77	40.32	42.14	42.17	39.38
5	37.60	39.78	39.18	42.09	41.05	39.22
6	32.41	35.44	27.63	41.30	40.51	38.51
7	30.02	32.99		40.87	40.26	38.27
8	27.70			40.11	40.33	37.81
9				40.02	40.20	34.96
10				39.92	37.64	
11				38.64		
12				37.67		
13				29.17		

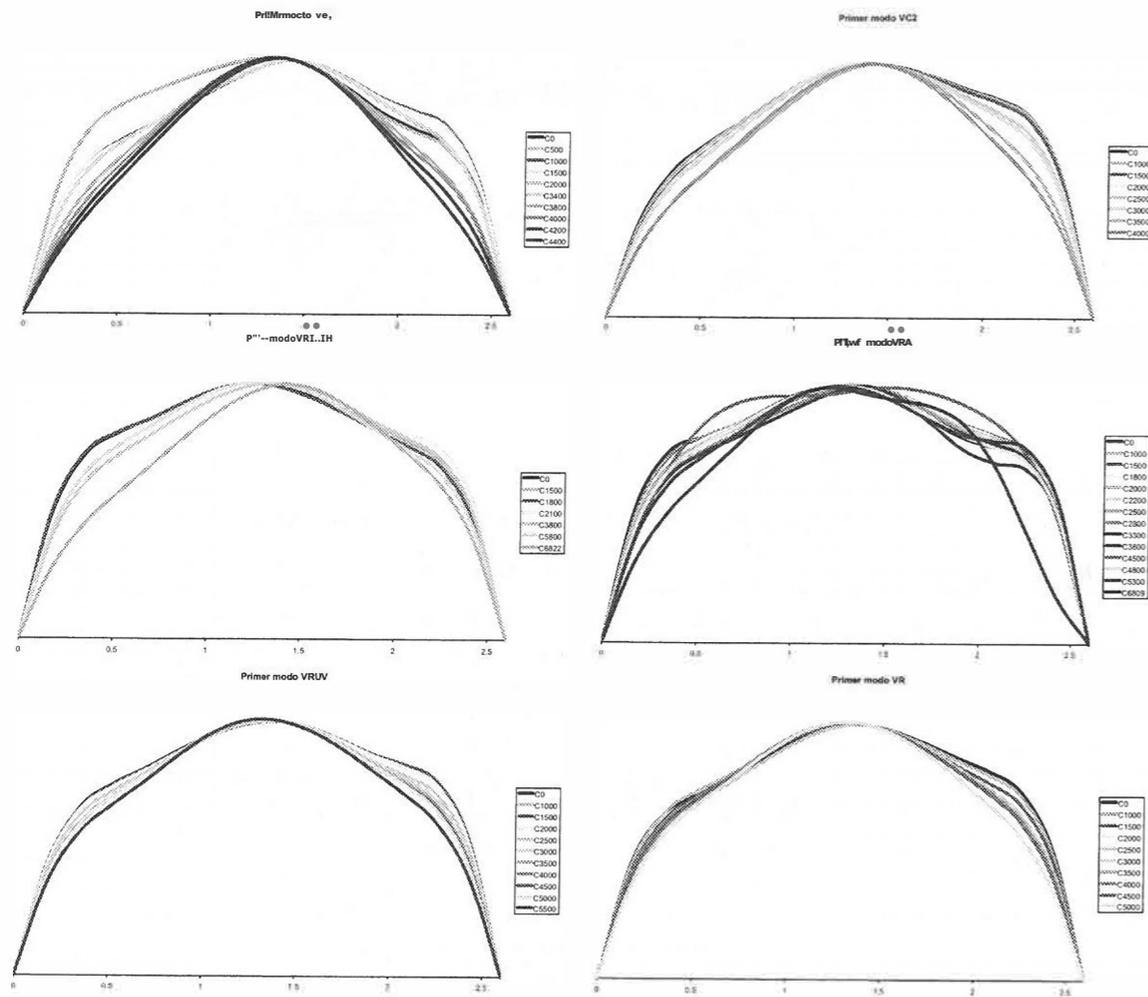


Figura 2. Variación del primer modo de vibración.

En las vigas no reforzadas se observa una mayor variación en la forma de los modos a medida que el estado de daño aumenta, lo cual se debe a la mayor abertura de las fisuras.

### 3. Determinación de la Rigidez

Algunos estudios intentan determinar el daño mediante el cambio que sufren las frecuencias naturales del sistema [2]. Aunque las frecuencias naturales son sensibles a la fisuración que sufre la viga de hormigón, la inclusión de los modos de vibración en el proceso de detección del daño produce un resultado más preciso, y más sensible a daños moderados [3].

Para obtener la rigidez de la viga en cada sección se ha implementado el método propuesto por J. Maeck en su tesis doctoral conocido como Cálculo Directo de Rigidez

(DSC) [4]. Según Maeck, se puede obtener la rigidez de la viga usando la relación básica que existe entre el momento flector y la curvatura.

$$EI = - \frac{M}{\chi}$$

El problema de autovalores del sistema no amortiguado puede escribirse como:

$$K\langle J \rangle = \omega^2 M \langle J \rangle$$

donde  $K$  es la matriz de rigidez,  $M$  es la matriz de masa analítica,  $\langle J \rangle$  son los modos de vibración obtenidos experimentalmente y  $\omega$  son las frecuencias naturales. Para cada modo, las fuerzas de inercia en cada sección pueden ser calculadas como el producto de la masa y la aceleración ( $\omega^2 \langle J \rangle$ ). Suponiendo conocida la distribución de masas, se pueden obtener los momentos a lo largo de la viga debidos a las fuerzas de inercia mediante consideraciones de equilibrio.

Las curvaturas se obtienen a partir de los modos de vibración medidos usando para ello un proceso de penalización que tiene en cuenta las inexactitudes inherentes de los datos experimentales. Los resultados se muestran en las figuras 3 y 4.

Para validar los resultados experimentales, se comparan (Tabla 3) los valores de la rigidez medidos en la sección media de la viga con los calculados usando las propiedades de la sección homogeneizada, para el estado inicial y para el previo a la rotura de la viga. El valor de la rigidez final teórica corresponde al que tendría la viga cuando se ha llegado a la rotura. En todos los casos, se obtiene un grado de acuerdo excelente.

Tabla 3. Valores de la rigidez en el estado inicial y en el estado último

	Teóricos	VCJ	VC2	VRUH	VRA	VRUV	VR
$E I_{inicial} (Nm^2)$	$8.6 \times 10^6$	$8.7 \times 10^6$	$8.9 \times 10^6$	$9.4 \times 10^6$	$9.9 \times 10^6$	$9.2 \times 10^6$	$8.3 \times 10^6$
$E I_{final} (Nm^2)$	$1.4 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$2.9 \times 10^6$	$2.9 \times 10^6$	$2.7 \times 10^6$	$5.7 \times 10^6$	$4.8 \times 10^6$

En la figura 4 se observa la evolución de la rigidez en las distintas secciones de la viga para cada paso de carga. Se omiten las secciones de la viga cerca de los apoyos, en las que el momento es nulo, lo que produce unos resultados inexactos, representándose la

zona de momento estático constante. A partir de estas representaciones se puede inferir el desarrollo de la fisuración de la viga, provocando la aparición de fisuras en una sección una pérdida de rigidez de ésta. Se ha constatado esta afirmación comprobando, en las vigas ensayadas, la aparición de grietas en las zonas predichas por el método propuesto.

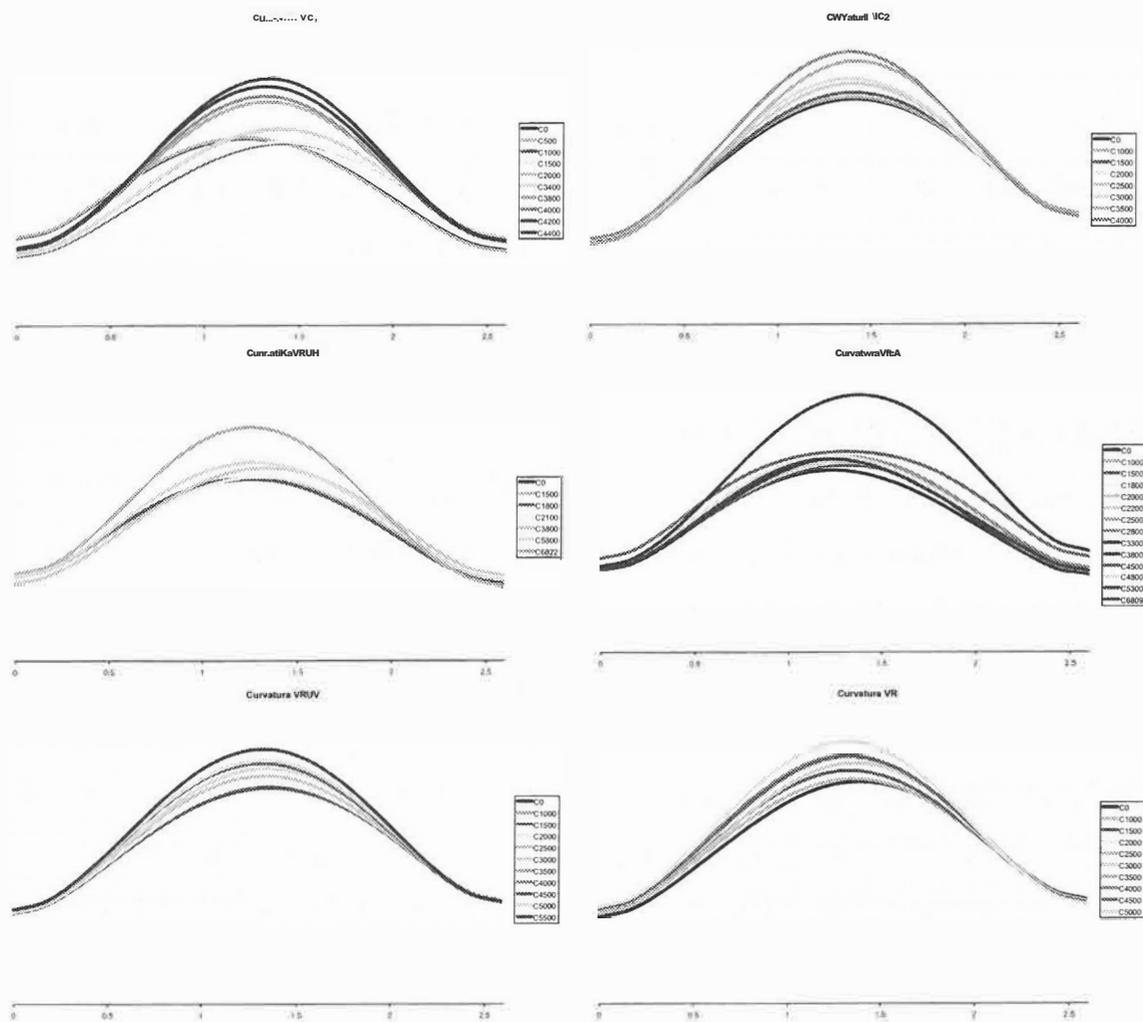


Figura 3. Curvatura en cada sección para cada paso de carga.

A partir de la figura 4 se puede comparar el comportamiento de una viga reforzada y de una no reforzada. En ambos casos se produce una disminución brusca de la rigidez de la viga cuando se produce la fisuración, lo que provoca una disminución de las frecuencias naturales (Figura 5). También puede observarse otro descenso brusco de las frecuencias naturales cuando el acero de las armaduras alcanza la plastificación. En las vigas reforzadas este descenso aparece cuando la carga aplicada es mayor. El incremento en la

capacidad de carga del elemento es del orden del 60%, siendo en todos los casos un modo de fallo frágil. De un modo extremadamente frágil fallaron las vigas denominadas VR y VRUV, lo cual puede indicarse del alto valor de la rigidez en el estado de carga previo al fallo.

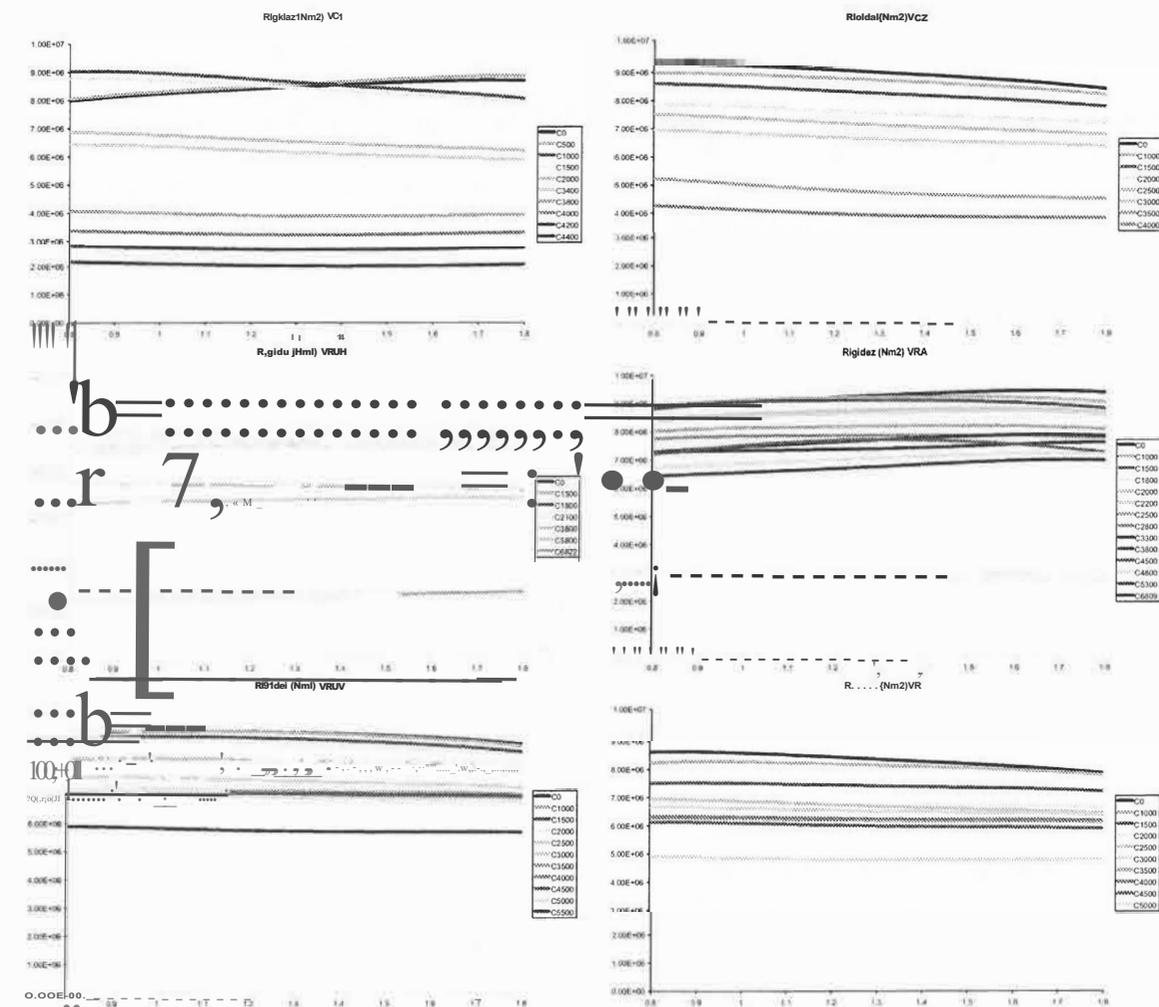


Figura 4. El en cada sección para cada paso de carga.

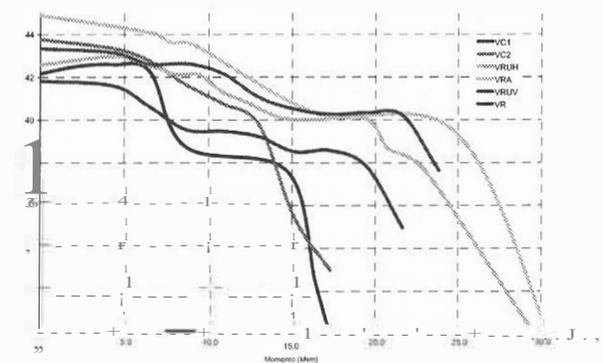


Figura 5. Variación de la primera frecuencia natural con la carga

En las vigas reforzadas aparecen más fisuras, más juntas y más uniformemente distribuidas que en las vigas no reforzadas (Figura 6), lo que conlleva a que no se produzcan descensos bruscos de la rigidez como ocurre en las vigas no reforzadas cuando se inicia la fisuración.

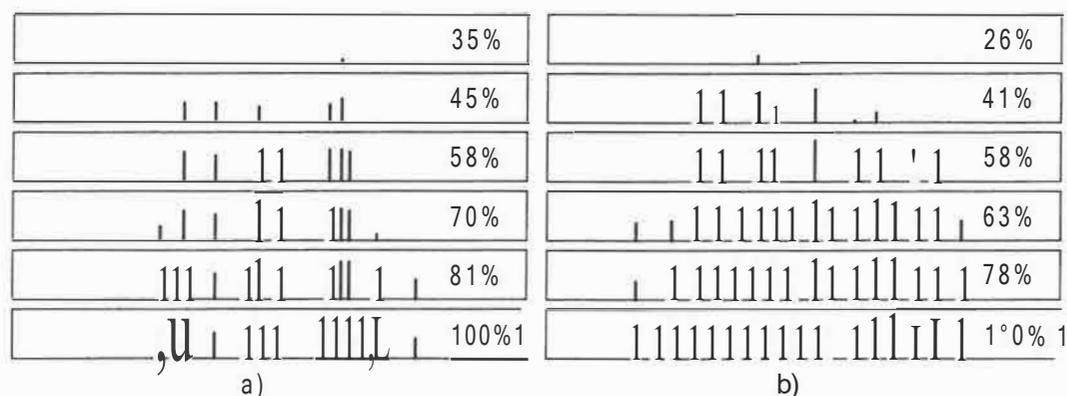


Figura 6 Desarrollo de la fisuración: a) Viga no reforzada y b) Viga reforzada

Para ambos tipos de vigas, el inicio de la fisuración ocurre a una carga similar, produciéndose en ese momento un descenso de la primera frecuencia natural del 2 por ciento aproximadamente.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se ha comprobado la influencia del estado de fisuración de vigas de hormigón armado con la variación de las propiedades dinámicas. La técnica empleada permite determinar la rigidez de la viga de hormigón en el estado inicial y cuando la viga ha sufrido daño. El método hace uso de los modos de vibración experimentales y de las frecuencias naturales medidas para obtener la rigidez a partir de la relación existente en cada sección de la viga entre momento y curvatura. La técnica es sensible al daño moderado, lo que permite identificar el inicio de la fisuración.

En las vigas reforzadas con laminado de CFRP aparecen más fisuras, más juntas y más uniformemente distribuidas, lo cual se refleja en las curvas de variación de la rigidez obtenidas.

#### 5. Referencias

1. R. Brincker, L. Zhang y P. Andersen, *Modal Identification of Output-Only Systems using Frequency Domain Decomposition*, Smart Materials and Structures, v. 10, 441-445, 2001.
2. Cawley P., Adams R.D., *The locations of defects in structures from measurements of natural frequencies*, Journal of Strain Analysis, Vol. 14, No. 2, pp. 49-57, 1979.
3. Doebling S.W., Farrar, C.R., Prime M.B., *A summary review of vibration-based damage identification methods*, The Shock and Vibration Digest, Vol. 30, No. 2, pp. 91-105, 1998
4. J. Maeck, *Damage Assessment of Civil Engineering Structures by Vibration Monitoring*, Katholieke Universiteit Leuven, Marzo 2003.

#### 6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los proyectos DPI2001-2377-C02-01 del Ministerio de Ciencia y Tecnología y por el proyecto *Evaluación de efectos dinámicos del ferrocarril* del Ministerio de Fomento. La ayuda para su financiación por parte de los citados Ministerios es reconocida mediante estas líneas.