

# Identificación Dinámica de una Pasarela a partir de la Respuesta originada por Cargas de Servicio

Pedro Galvín, José Domínguez

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

*954487293 pedrogalvin@us.es*

## Resumen

Los parámetros modales caracterizan dinámicamente a un sistema mecánico. El análisis modal es el método clásico con el que se obtienen dichos parámetros, el cual requiere el conocimiento de tanto la respuesta de la estructura como de la excitación que la origina. Normalmente, las excitaciones a las que están sometidas las estructuras (puentes, altos edificios, etc.) no pueden ser medidas con exactitud. Sin embargo, buenas estimaciones de los parámetros modales pueden ser obtenidas a partir de la respuesta de la estructura a sus cargas de servicio (viento, tráfico, etc.) empleando análisis modal operacional (OMA). En este trabajo se describen los ensayos dinámicos realizados en una pasarela curva, de donde se obtienen los parámetros modales de la estructura. Se han identificado 9 modos de vibración en un rango de frecuencias de 0-30 Hz, y se han comparado los resultados experimentales con un modelo riguroso de elementos finitos.

**Palabras Clave:** Ensayos Dinámicos, Identificación Modal, Método de los Elementos Finitos.

## Abstract

The modal parameters describe the dynamic properties of a mechanical system. The classical modal analysis requires measurements of both the input force and the response. Normally, it is very difficult to measure the excitation on large structures (bridges, tall buildings, etc.). However, reasonable estimates of the modal parameters can be extracted from ambient vibration or output-only response (wind, traffic, humans, etc.).

The dynamic behaviour of a curved pedestrian bridge has been investigated by full-scale testing and theoretical models. Nine vibration modes have been identified in the frequency range of 0-30 Hz, by the following algorithms: Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFOD) and Stochastic Subspace Identification (SSI).

Ambient modal parameters estimation have been compared with a rigorous three-dimensional finite element model, showed very good agreement.

**Keywords:** Ambient vibration test, Modal Identification, Finite Element Method.

## 1. Introducción

Los parámetros modales (frecuencias naturales, modos de vibración y coeficientes de amortiguamiento) caracterizan dinámicamente a un sistema mecánico. El análisis modal, basado en la función de respuesta en frecuencia, es el método clásico con el que se obtienen dichos parámetros, el cual requiere el conocimiento de tanto la respuesta de la estructura como de la excitación que la origina.

Normalmente, las excitaciones a las que están sometidas las estructuras (puentes, altos edificios, plataformas offshore, etc.) no pueden ser medidas con exactitud. Sin embargo, estimaciones razonables de los parámetros modales pueden ser obtenidas a partir de la respuesta de la estructura a sus cargas de servicio (viento, tráfico, etc.) empleando análisis modal operacional (OMA) [1].

Una aplicación importante del análisis dinámico de estructuras es verificar su integridad estructural cuando se someten a incrementos de carga, o después de un terremoto o un choque de un vehículo [2]. También se usan los ensayos dinámicos para identificar algunos parámetros de las estructuras, como el módulo de Young, condiciones de apoyo o propiedades geométricas, que son usadas posteriormente en un modelo numérico [3]. Por último, mediante ensayos dinámicos se pueden obtener relaciones empíricas que pueden ser usadas para el diseño. Por ejemplo, a partir de estas relaciones se pueden obtener las frecuencias naturales de edificios [4] o las condiciones de daño en las que se encuentran las fachadas de muro de fábrica que deben ser conservadas por razones históricas en algunas ciudades, como Sevilla.

En este trabajo se describen los ensayos dinámicos realizados en un puente para uso peatonal, dentro del recinto de la Escuela de Ingenieros de Sevilla [5]. Mediante OMA se obtienen los parámetros modales de la estructura, empleando dos técnicas de identificación: Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (EFOD) e Identificación en el Subespacio Estocástico (SSI). Los resultados obtenidos experimentalmente se comparan con un modelo riguroso de elementos finitos (MEF).

## 2. Descripción del puente

La pasarela curva está dispuesta en el contorno exterior de la Plaza del Agua. Su anchura total es de 16,60 m y la longitud total, medida perpendicularmente entre estribos es de 32,60 m. La característica singular de este puente es la curvatura, con un radio en planta de 26 m en el borde interior y 42 m en el borde exterior.

El tablero del puente está formado por una losa de tres vanos de hormigón pretensado, de 0,65 m de espesor, dotada de unos acartelamientos en la zona de los apoyos intermedios. La posición de las pilas intermedias, formadas por fustes verticales de hormigón armado, está acondicionada por la anchura del canal, existiendo una

separación entre ejes de 20,80 m, medidos sobre la perpendicular. La posición de los estribos se ajusta a las formas de la Plaza del Agua.

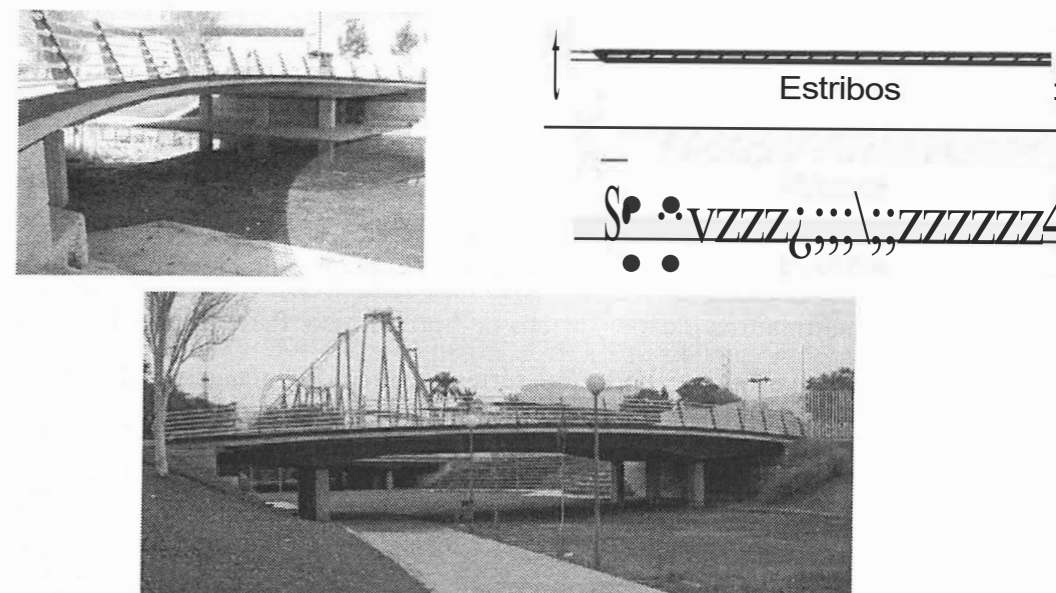


Figura.1. Pasarela curva sobre la Plaza del Agua. Secciones Tipo.

## 3. Modelo de Elementos Finitos

Antes de realizar el ensayo dinámico de la pasarela, se ha realizado un modelo riguroso de la estructura usando el Método de los Elementos Finitos. La losa ha sido modelada usando 2612 elementos Shell de 6 nodos, con 6 grados de libertad por nodo. Así mismo se han modelado los acartelamientos de la losa (zonas de mayor espesor) y los bordes del puente (zonas de menor espesor). Las pilas han sido modeladas usando 36 elementos Beam 30. Para el hormigón pretensado de la losa se ha supuesto un módulo de Young de 40 GPa, mientras que para el hormigón armado de las pilas se ha supuesto 35 GPa. Para ambos materiales se ha considerado un coeficiente de Poisson de 0.15.

Resolviendo el modelo se concluye:

- Gran parte de la respuesta dinámica del puente está asociada al movimiento vertical de la losa.
- Existe un conjunto de modos asociados al comportamiento local de los bordes de la estructura, formados por unas losas en voladizo de menor espesor.

Los resultados obtenidos del análisis dinámico del modelo se usan para determinar la posición de los acelerómetros en el ensayo de campo.

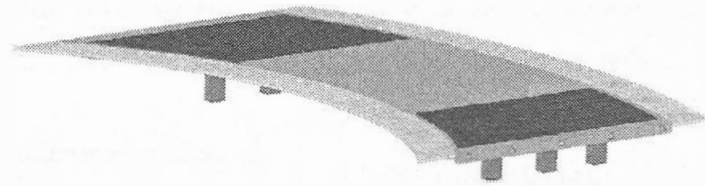


Figura 2. Modelo de Elementos Finitos

#### 4. Ensayo

Se mide la respuesta de la estructura en 35 puntos seleccionados mediante el modelo de EF, usando 9 acelerómetros piezoeléctricos de tipo sísmico. Para obtener la respuesta en los 35 puntos se llevaron a cabo cinco series de medidas, manteniendo en todas las series dos acelerómetros fijos usados como referencia. Normalmente, cuando se realizan ensayos para caracterizar dinámicamente grandes estructuras a partir de la excitación ambiente, no todas las localizaciones pueden ser medidas de una vez, por lo que hay que dividir el ensayo en varias series, manteniendo en todas ellas sensores fijos (acelerómetros de referencia). Estos acelerómetros tienen que ser colocados en posiciones óptimas en las que se espera que todos los modos de vibración puedan ser medidos.

Las medidas se realizaron durante los meses de marzo y mayo de 2004, estando la estructura solicitada por el viento y por el tráfico. La frecuencia de muestreo fue de 81.97 Hz, obteniéndose 40985 muestras para cada canal. Se registraron 500 segundos de respuesta por canal en cada serie de medida. En todos los registros se usó un filtro de paso alto de 0.7 Hz y un filtro antialiasing con una frecuencia de corte de 40 Hz.

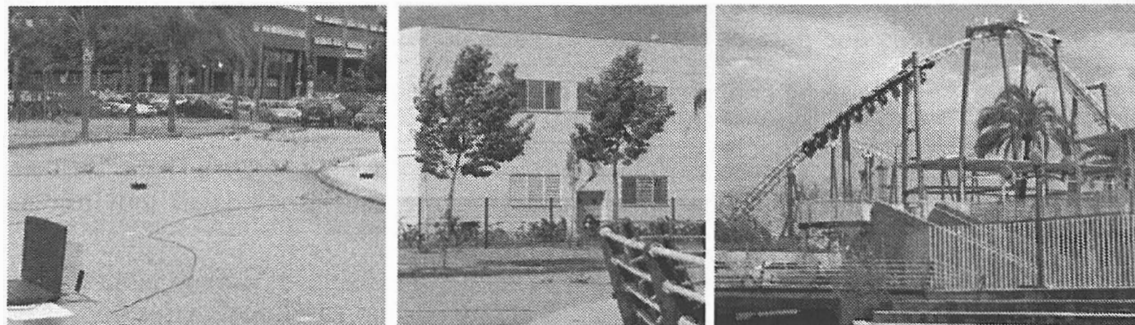


Figura 3. Excitaciones de la estructura: Tráfico, viento y atracciones de un parque temático cercano.

#### 5. Análisis de los Datos

Se han usado dos procedimientos para extraer los parámetros modales a partir de las vibraciones causadas por las condiciones ambiente, ambas basadas en las técnicas clásicas de análisis espectral [6, 7].

Una vez se completa la fase de identificación, los modos de vibración se comparan usando *MAC* (Modal Assurance Criterion). Los valores de *MAC* varían entre 0 y 1; un valor 1 implica una correlación perfecta entre los dos modos (un modo es múltiplo de otro) mientras que un valor 0 indica modos no correlacionados (modos ortogonales). Las dos técnicas de identificación empleadas son: Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (EFOD) [8] e Identificación en el Subespacio Estocástico (SSI) [9].

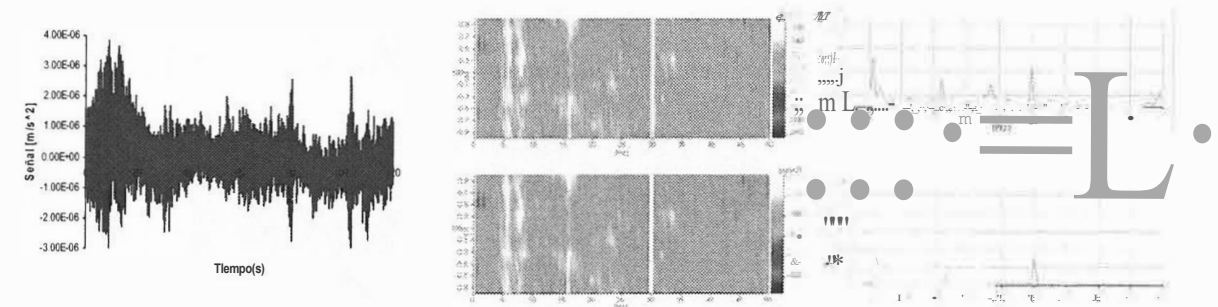


Figura 4. Señal adquirida por uno de los acelerómetros de referencia, evolución del espectro con el tiempo y espectro de las señales adquiridas por los acelerómetros de referencia

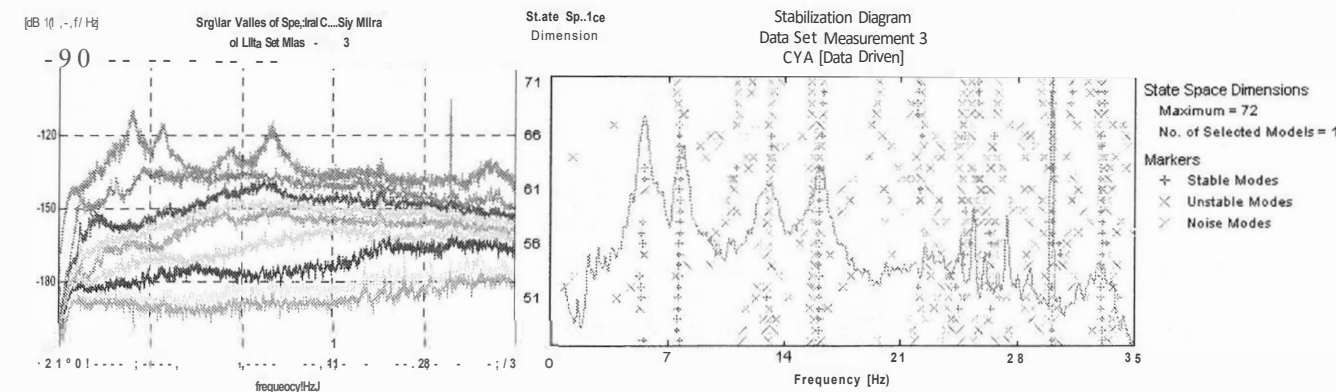


Figura 5. SVD y Diagrama de Estabilización de la medida 3

#### 6. Resultados

La tabla 1 resume los modos de vibración obtenidos por ambos métodos de identificación y los resultados del análisis numérico.

Tabla 1. Resultados

$f_{EFDD} (Hz)$	$f_{SS/Hz}$	$J_{MEF} (Hz)$	$EFDD(\%)$	$ss' (%)$
5.588	5.676	5.12	2.992	2.144
7.95	7.6	7.09	2.769	3.649
13.73	13.05	11.52	3.867	4.34
16.19	16.16	14.01	2.095	1.998
20.01	19.19	19.28	1.525	3.864
24.64	24.83	22.67	0.6556	4.051
25.97	25.92	24.99	0.4168	0.8781
29.52	29.6	28.35	2.183	2.138
30.02	30.21	30.12	0.02451	4.032

Se encuentra un excelente grado de acuerdo entre las medidas experimentales y el modelo numérico. La correlación obtenida mediante MAC es muy buena. En todos los casos, los coeficientes de amortiguamiento están por debajo del 5%.

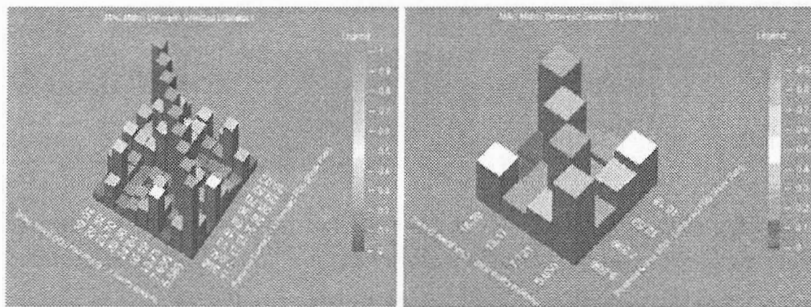


Figura 6 AutoMAC EFDD y MAC EFDD-SSJ (4 modos)

En las Figuras 7 y 8 se representan los modos de vibración obtenidos a partir de las dos técnicas de identificación usadas.

## 7. Conclusiones

Uno de los principales objetivos de este trabajo era el de probar la efectividad de esta técnica, empleada previamente por otros autores [2-6, 10-13], basada en la excitación de bajo nivel, para la obtención de los parámetros modales de las estructuras ensayadas.

Las frecuencias naturales medidas tienen un excelente grado de acuerdo con las frecuencias obtenidas con el modelo de EF, y la comparación de los modos de vibración usando MAC resulta muy buena. Los modos próximos son identificados con relativa facilidad. Ambos métodos de identificación resultan válidos, necesitando el método de identificación en el dominio del tiempo (EFOD) menor tiempo de cómputo.

Trabajos futuros del Grupo de Estructuras de la Universidad de Sevilla serán la caracterización dinámica de otras estructuras singulares, como el Puente del Alamillo [13], el Puente de la Barqueta o la Pasarela de la Cartuja.

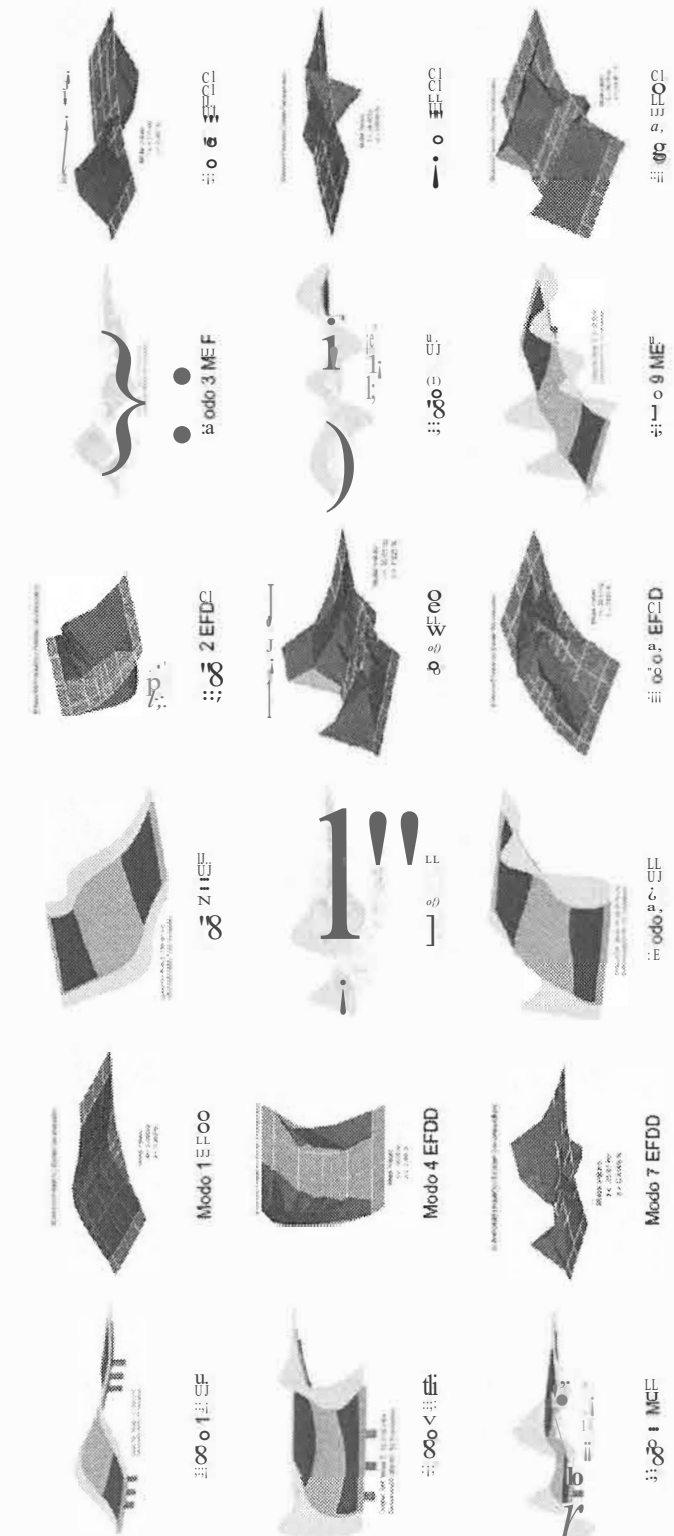


Figura 7. Comparativa MEF-EFDD



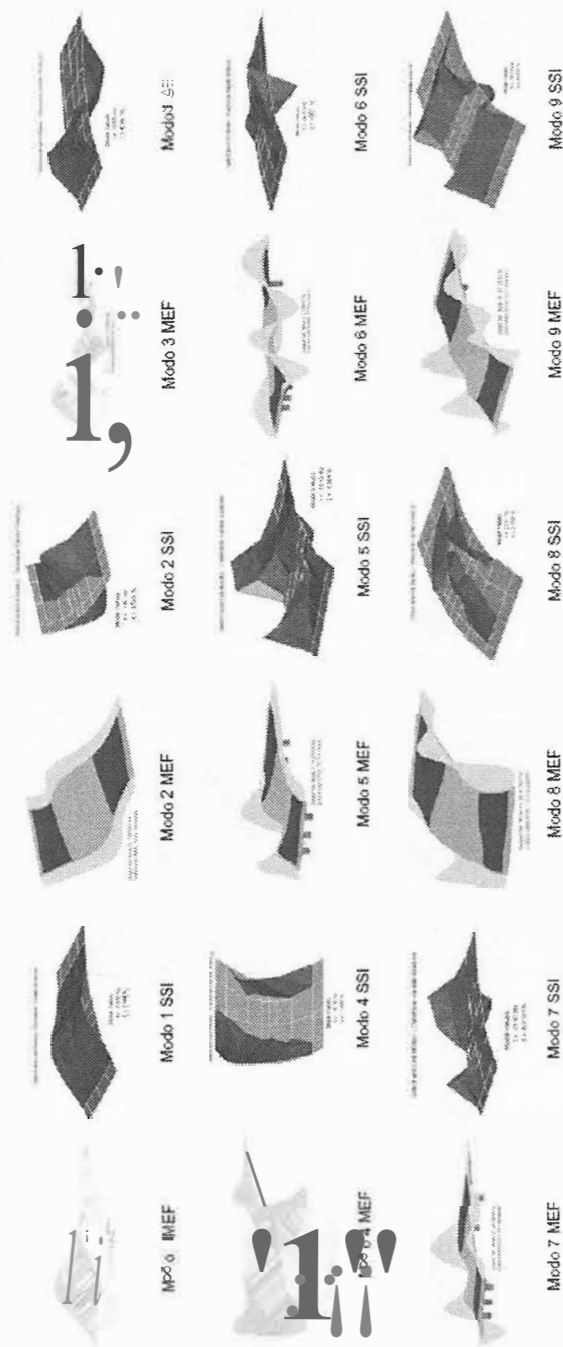


Figura 8 Comparativa MEF-SSI

## & Referencias

1. Bendat y Piersol, *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, Wiley&Sons, 1980.
2. J. Marulanda, P. Thomson, J. M. Caicedo, S. J. Dyke, *Monitoreo de Salud Estructural de Puentes Metálicos*, Proceedings of the First Colombian Workshop on Steel Structures, Cartagena, Colombia, Septiembre 26-28, 2001.

3. J. M. W. Brownjohn y P. Xia, *Dynamic Assessment of Curved Cable-Stayed Bridge by Model Updating*, Journal of Structural Engineering, v. 126, No. 2, Febrero 2000.
4. M. Navarro, F.J: Sánchez, T. Enomoto, F. Vidal, M. Fetiche, *Evaluación del Comportamiento dinámico de estructuras de hormigón a partir de medidas de ruido ambiental*, 2º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 1-4 de Abril 2003 Málaga (España).
5. J.A.Llombart, *Pasarelas sobre el Canal Norte, en el recinto para la EXP0-92 de la isla de La Cartuja (Sevilla)*, Hormigón y Acero, No. 180, 1991.
6. D. J. Ewins, *Modal Testing*, Research Studies Press Ltd., 2000.
7. Bendat y Piersol, *Random Data, Analysis and Measurement Procedures*, Wiley&Sons, 1986.
8. 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.
9. P. Van Overschee y B. De Moor, *Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation, Applications*, Kluwer Academic Publ., 1996.
10. 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.
11. B. Peeters y G. Roeck, *Reference-Based Stochastic Subspace Identification for Output-Only Modal Analysis*, Mechanical System and Signal Processing, 13(6), 855-878, 1999.
12. P. Reynolds y A. Pavic, *Modal Testing of a Sports Stadium*, 20th International Modal Analysis Conference (IMAC XX), Los Angeles, USA, February 2002.
13. J. Casas, *Full-Scale Dynamic Testing of The Alamillo Cable-Stayed Bridge in Sevilla (Spain)*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, v.24,35-51, 1995.

## 9. 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.