

## **Vibraciones producidas por el tráfico en monumentos históricos: Palacio de Santa Cruz de Valladolid**

*ARROYO RODRIGUEZ, Félix; ARNAIZ AMADOR, Santiago; MONTOYA MORENO, Felipe; ALVAREZ DE RON GONZALEZ, Vicente; BAZACO BUSTAMANTE, Marta; SAN JUAN BLANCO, Manuel.*

*IMEIM, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad de Valladolid.*

*Paseo del Cauce s/n. Valladolid-47010*

*Tlf.: (983) 423000 ext. 4443. Fax: (983) 423310*

*CIDAUT. Parque Tecnológico de Boecillo.*

*Tlf.: (983) 552387 Fax: (983) 552379*

### **ABSTRACT**

Esta comunicación describe las medidas realizadas sobre el Palacio de Sta. Cruz, con el objeto de investigar el comportamiento de la estructura bajo las vibraciones inducidas por el tráfico. Este trabajo forma parte del Proyecto Piloto Urbano de Valladolid "Scientific research and heritage restoration", cofinanciado por la Comunidad Europea (Feder), el Ayuntamiento de Valladolid y la Junta de Castilla y León.

Se pretende desarrollar un sistema de medida de vibraciones en edificios históricos y sus alrededores, estudiar la transmisión de la vibración desde la carretera hasta el edificio y analizar el comportamiento dinámico de algún elemento constructivo por medio del método de elementos finitos. Se utilizó un transductor láser de velocidad para medir sobre diferentes puntos de la fachada y un servoacelerómetro triaxial sobre el suelo. El programa de elementos finitos ALGOR se usó para el cálculo teórico de frecuencias y modos de vibración de los elementos más importantes: pináculos y balaustrada.

### **1. INTRODUCCION**

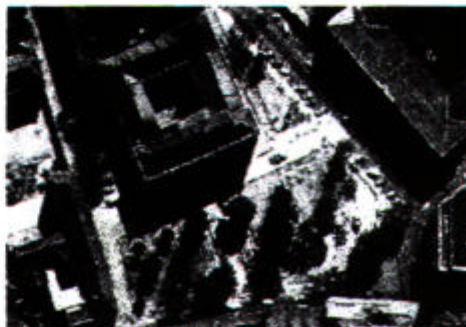
En el estudio de las vibraciones producidas por el tráfico en monumentos históricos es difícil separar sus efectos del deterioro que causan otros factores como la polución atmosférica, cambios de temperatura y otros agentes meteorológicos. Además, los edificios construidos en el pasado no fueron diseñados para soportar los niveles de vibración actuales (tráfico, trenes, maquinaria). No es fácil definir el comportamiento dinámico de un edificio en su conjunto, y se tiende al de partes individuales. En el Palacio de Santa Cruz: pináculo y balaustrada.

### **2. PALACIO DE SANTA CRUZ: EDIFICIO, ALREDEDORES Y TRAFICO**

Se encuentra en una zona de alta densidad de tráfico. El semáforo más cercano: esquina Sudeste, con una frecuencia de 50 segundos. De él proceden los vehículos que circulan por las calles delantera y lateral Este del Palacio. En el lado Oeste: aparcamientos. En fachada y zona lateral Este existen zonas ajardinadas, atenuando las vibraciones. (Fig. 1)

### **3. INSTRUMENTOS DE MEDIDA**

El principal elemento de medida es un vibrómetro láser con el que se mide la velocidad en dirección del rayo. Se basa en el efecto Doppler (interferencia



*Figura 1  
Palacio y alrededores.*

entre la señal y una de referencia). La señal incide sobre la superficie a medir su vibración y es reflejada de nuevo al emisor, donde se recombina con la referencia. La interferencia entre esas dos señales es proporcional a la velocidad de la superficie vibrante y a la longitud de onda del rayo. En nuestro caso, la piedra no refleja lo suficiente, con lo que fue necesario colocar una cinta reflectante. Dispone de tres rangos de medida de velocidad: 0-10, 0-100 y 0-1000 mm/s y el rango de frecuencia va desde continua hasta 100 KHz. En función del tipo de fuente, puede medir hasta distancias de 200 m, permitiendo medir puntos de difícil acceso con el uso de espejos. El ruido de fondo es similar al que produce un acelerómetro. Se eligió este sensor por la facilidad de medida y por no existir contacto directo con lo que se evitan daños a los monumentos.

Se usaron también tres servoacelerómetros QA-1400 Q-Flex montados perpendicularmente sobre un soporte de acero. Este se fijaba al suelo con cera y a otros elementos con un cemento especial. También se usaron un osciloscopio, una mesa antivibratoria sobre la que colocábamos el emisor, un martillo de goma y un camión que incrementaba la energía vibratoria. Se utilizó también un Analizador B & K 2144 en su opción FFT y en tiempo real. El set up de medida fue: promedio lineal, ventana Hanning, filtro pasa altas de 0.7 Hz.

#### **4. RESULTADOS**

Se realizaron una serie de ensayos para determinar la influencia de diferentes factores en la medida con el transductor láser. Se comprobaron las distancias óptimas e intermedias y se observó como en el primer caso la señal es más estable. Las medidas deben ser corregidas por el ángulo de incidencia, pero para ángulos mayores de 60° las medidas no son correctas. Se comprobó también que las frecuencias propias del trípode estaban en el rango de excitación del tráfico, por lo que se sustituyó por una mesa antivibratoria.

Se cuantificaron las vibraciones en el palacio con excitación natural (vehículos circulando con normalidad) y excitación forzada (tránsito de un camión). Las medidas fueron realizadas en las mañanas (mayor densidad de tráfico) en los meses de Agosto y Noviembre de 1994.

##### **4.1. Fuente**

Para determinar las frecuencias propias de las vibraciones del suelo producidas por el paso de vehículos, se realizaron ensayos controlados con un coche y una moto a diferentes velocidades y revoluciones del motor, midiendo con el servoacelerómetro sobre la carretera. La Fig. 2. muestra los resultados con un coche parado a diferentes r.p.m.

##### **4.2. Transmisión**

Se estudió la atenuación de la señal desde las dos calles con circulación hasta la estructura del palacio midiendo el nivel de vibración en tres direcciones perpendiculares cada 8 metros desde las calles al palacio. La Fig. 3. muestra los resultados al pie del edificio.

##### **4.3. Recepción**

Se cuantificó la vibración soportada por el palacio midiendo los valores PSD de la aceleración sobre diferentes puntos del perímetro con ayuda del servoacelerómetro. La señal procedente del transductor láser incidiendo sobre distintas alturas de la fachada del palacio se registraba en uno de los canales del analizador y en el otro, la procedente de la componente vertical de la aceleración del suelo, para determinar la relación entre ellas.

Como la energía que llegaba al edificio era insuficiente para excitar las frecuencias propias, fue necesario excitarlo artificialmente. Se estudiaron elementos individuales como balcones, marcos de ventanas y columnas excitando con un martillo de goma. Además, se hizo pasar un camión del servicio de limpieza por delante del palacio (en el camino sin circulación) de forma que la excitación fuese mayor que la del tráfico habitual. Por último, con el mismo camión parado y delante de la puerta, se puso en funcionamiento su mecanismo con media carga. En esta situación, el edificio no era sólo excitado vía suelo, sino también a través del aire. La Fig. 4. muestra las medidas en este caso.

#### **5. METODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)**

La mayor dificultad a la hora de confeccionar un modelo que se ajuste a la situación real recae en determinar las propiedades del material y en definir las condiciones de contorno. Como material se consideró la piedra caliza con una densidad volumétrica de 50000 N/m<sup>3</sup>, un módulo de Poisson ( $\nu$ ) de 0.3 y un módulo de Young (E) de 2.10<sup>8</sup> N/m<sup>2</sup>. Tanto para el pináculo como para la balaustrada, se tomaron como condiciones las de empotramiento en sus extremos.

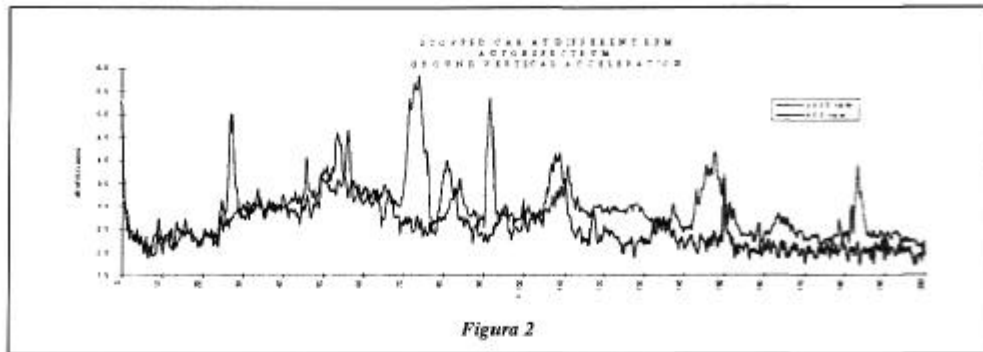


Figura 2

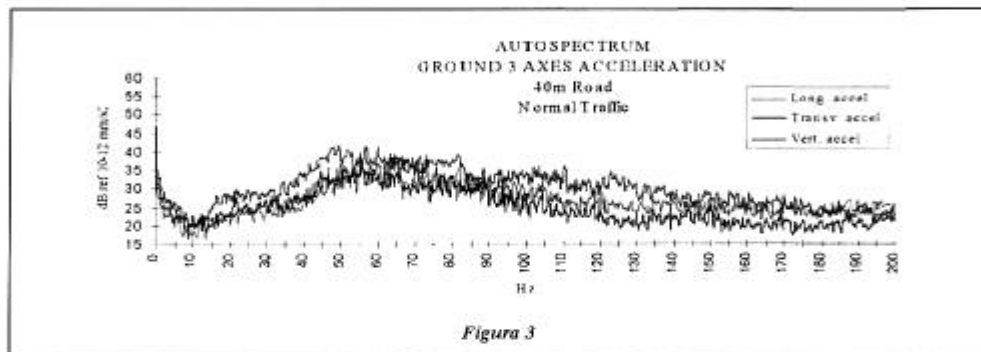


Figura 3

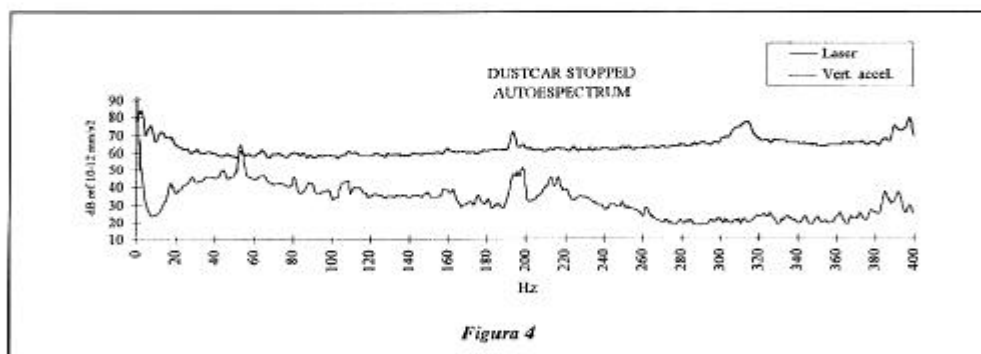


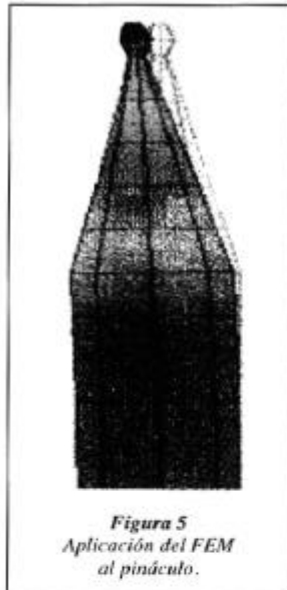
Figura 4

En el análisis se empleó el paquete ALGOR, mediante el cual se obtuvieron los modos para el pináculo (Fig. 6.) a 2 Hz (primer modo de flexión asociado con el segundo por la ortogonalidad), 6.1 Hz (segundo modo de flexión también doble), 9.2 Hz (primer modo de torsión) y 9.4 Hz (tercero de flexión). Para la balastrada (Fig. 5.) a 6.02 Hz (primero de flexión), 6.28 Hz (segundo de flexión), 6.42 Hz (modo longitudinal) y 13.17 Hz (tercero de flexión).

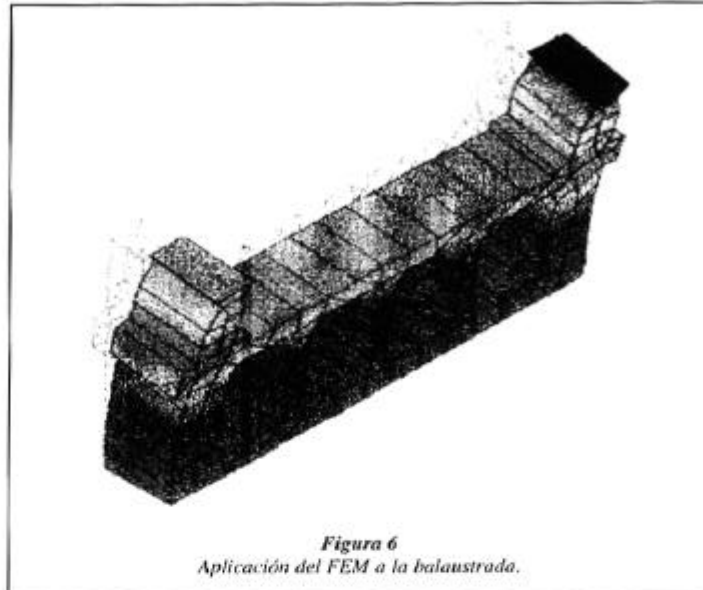
## 6. CONCLUSIONES

### 6.1. Fuente

De los resultados obtenidos puede desprenderse que la vibración inducida por el tráfico depende del régimen de giro del motor. El primer pico de la aceleración vertical del suelo aparece en el segundo armónico del motor (el primero suele estar equilibrado). La mayor energía vibratoria se produce con el paso de vehículos a baja velocidad pues tardan más en pasar. Los coches parados con el motor encendido tienen mayor influencia por no distribuir la energía con un rango de frecuencias como los que están en movimiento.



*Figura 5*  
*Aplicación del FEM*  
*al pináculo.*



*Figura 6*  
*Aplicación del FEM a la balaustrada.*

### 6.2. Transmisión

La mayor amplitud corresponde a la componente vertical del suelo a unos 75 Hz (2500 r.p.m.). Las amplitudes de frecuencias mayores a 65 Hz decaen rápidamente con la distancia desde la calle. Las componentes longitudinal y transversal tienen valores similares.

### 6.3. Recepción

La energía vibratoria que llega al palacio procedente del tráfico normal es insuficiente para excitarlo. Las frecuencias propias encontradas (2 Hz, 7 Hz y 313 Hz) no se encuentran cerca de las del tráfico. Es recomendable conocer las frecuencias naturales de los elementos del palacio para evitar posibles daños. Las frecuencias calculadas del pináculo y de la balaustrada están fuera del rango peligroso (desde 30 Hz). Se ve cómo a 13 Hz y 193 Hz la estructura transmite la señal sin filtrar pero sin amplificar, como ocurre a 313 Hz (resonancia).

## 7. BIBLIOGRAFIA

- (1) Rainer, J.H. Effect of vibration on historic buildings: an overview.
- (2) Sedovic, W. Assessing the effect of vibration on historic buildings.
- (3) Bata, M. Effects on buildings of vibration caused by traffic.
- (4) Watts, G.R. The effects of traffic induced vibrations on heritage buildings further case studies.
- (5) House, D.E. Traffic induced vibrations in buildings.
- (6) Cervera, L. Arquitectura del Colegio Mayor de Santa Cruz de Valladolid.
- (7) Montoya, F. Auscultación dinámica de monumentos mediante un vibrómetro láser: Resultados en el Acueducto de Segovia.