

Estudio del efecto de las vibraciones originadas por las campanas sobre la estabilidad de la torre de la Catedral de Toledo

ENRIQUE DAPENA GARCÍA (*)
JULIÁN VALERO CONDE (*)

RESUMEN La torre de la Catedral de Toledo está formada por dos cuerpos, el inferior de sección cuadrada, y el superior de sección octagonal coronados por un chapitel, con una altura total de 81 m. En ella existen dos campanarios, el inferior en el que la altura del eje de las campanas principales sobre el plano de la calle se sitúa a 42,30 m, y el superior en el que el apoyo de las campanas principales está a una altura aproximada de 51 m. Actualmente sólo se hacen funcionar las campanas de este 2º campanario, limitándose a dar las horas en combinación con el reloj, no volteando ninguna de ellas. Han aparecido grietas en algunos de los paramentos y en este artículo se recoge el estudio realizado para conocer la influencia que pueden tener las vibraciones originadas por las campanas, sobre la estabilidad de la torre.

A STUDY ON THE EFFECTS OF BELL VIBRATIONS ON THE STABILITY OF THE CATHEDRAL OF TOLEDO'S BELL TOWER.

ABSTRACT The bell tower of the Cathedral of Toledo, measuring 81 metres, is formed by two sections. The lower section is square and the upper section octagonal crowned by a spire. The tower has two belfries. The lower belfry lies at the level of the main bell axes situated at 42,30 metres above the level of the street and the upper belfry is situated at 51 metres above street level where the bell supports are to be found. Only the bells in the second belfry are being currently rung only to signal the hours in conjunction with the tower's clock. None of the bells are pealed. Several cracks have appeared on some of the tower's paraments, and this article sums up the conclusions of a study undertaken to investigate the influence that bell vibrations may have had on the tower's stability.

Palabras clave: Vibración; Torre; Campanario; Analizador de espectros.

1. INTRODUCCIÓN

Muchas actividades realizadas por el hombre pueden originar vibraciones que pueden ser potencialmente peligrosas para monumentos y en general estructuras antiguas, entre otras se pueden citar como causas permanentes el tráfico de carreteras y ferrocarril y como causas circunstanciales, la hinca de pilotes en las proximidades del edificio, o incluso la acción de otros tipos de maquinaria junto a estas estructuras.

Pero también pueden ser preocupantes las vibraciones originadas en el edificio por el desarrollo de la actividad para el que ha sido concebido. Este hecho, que en los edificios actuales que van a albergar maquinaria ya se tiene en cuenta, tanto en su proyecto como en el asiento de la máquina sobre la solera, se comienza a estudiar para el caso de

edificios antiguos, en particular para campanarios, que, si bien muchos de ellos llevan funcionando mucho tiempo sin que hayan aparecido grietas ni daños en la estructura, el problema puede plantearse ante un cambio de campanas, o de la forma de hacerlas sonar, provocando la aparición de grietas en las torres, cuya justificación en algunos casos es difícil de encontrar.

Las vibraciones que transmiten las campanas son debidas a que precisamente el sonido que emiten es motivado por la vibración de su masa, vibración que se puede transmitir a través de los apoyos que tienen en la estructura que las soporta.

Pero a priori parece más importante la vibración que puede tener por origen no la vibración de la campana en sí, sino las vibraciones transmitidas por el volteo de las campanas cuando este es el sistema utilizado para hacerlas sonar. Un estudio de este problema en algunos campanarios ingleses está recogido en el trabajo de Attewell et al. (1988).

En el caso de la torre de la Catedral de Toledo, foto 1, han aparecido grietas en algunos de los paramentos de la

(*) Drs. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio de Geotécnica, CEDEX, MOPTMA.



FOTO 1. Entrada principal y torre de la Catedral de Toledo.

misma, y aquí se recoge el estudio realizado para conocer la influencia que pueden tener las vibraciones originadas por las campanas, sobre la estabilidad de la torre.

Este estudio se proyectó en dos fases. El objeto de la primera consistía en conocer el nivel de vibración que tenía la torre durante el toque de campana. Si este nivel medido sobrepasaba los límites establecidos considerados peligrosos para la estructura, se pasaría a la segunda fase en la que se determinarían los niveles de vibración existente en cada uno de los elementos de la torre.

2. GEOMETRÍA DE LA TORRE-CAMPANARIO DE LA CATEDRAL DE TOLEDO

La Torre-campanario de la Catedral de Toledo, Fig. 1, comienza su construcción en 1380 y termina en 1440. Está

dividida en tres cuerpos cuyas dimensiones son las siguientes:

- 1.º Cuerpo: Sección cuadrada
altura: 47,80 m
ancho: 14,50 m
espesor del muro: 2,80 m
- 2.º Cuerpo: Sección octogonal
altura: 17,70 m
lado del octógono: 3,40 m
anchura ≈ 8 m
- 3.º Cuerpo: Chapitel
altura: 16,00 m

Altura total de la Torre: 81,28 m

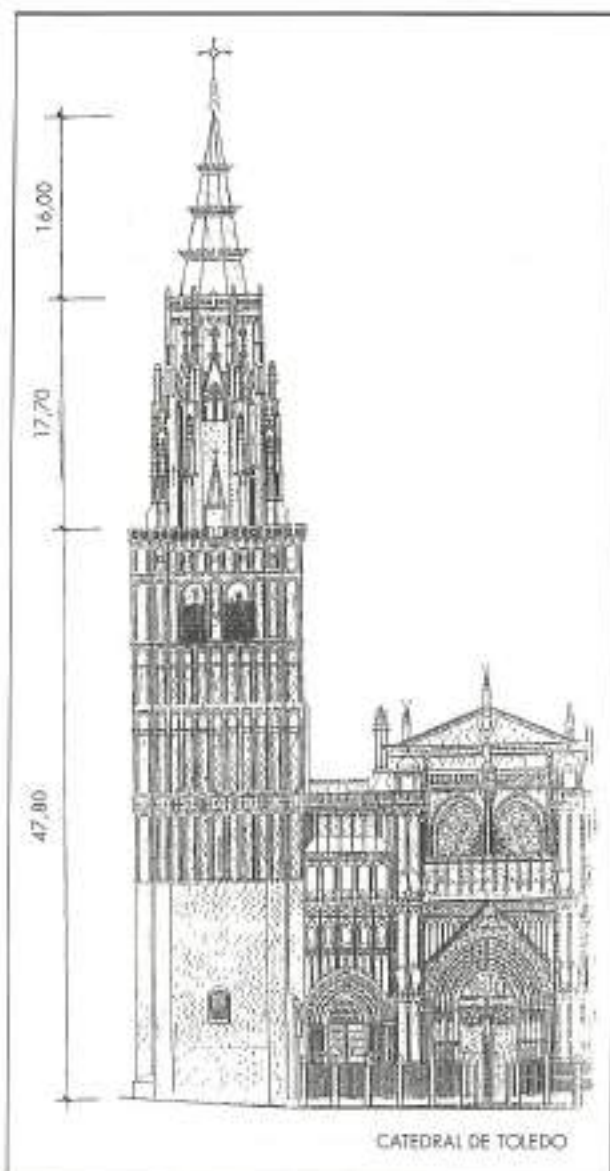


FIGURA 1. Torre-Canpanario de la Catedral de Toledo. Cara Oeste.

Un detalle de la zona superior de la torre, así como las secciones de las diferentes partes, se recogen en las Figs. 2 y 3.

Los problemas y restauraciones más importantes sufridas por la torre fueron las siguientes:

- 1660: Se quema el chapitel.
- 1775: Se unen los pináculos del W, S y SE con el cuerpo octogonal.
- 1804: Se unen los machones de la cara W y E (apoyo de campanas).
- 1855: Se destruyen los costados E y W.
- 1857: Se reconstruyen los costados E y W, y el chapitel.

3. SITUACIÓN DE LAS CAMPANAS EN LA TORRE

La torre tiene dos campanarios a dos alturas Fig. 4, cuya situación así como los datos de las campanas, son los siguientes:

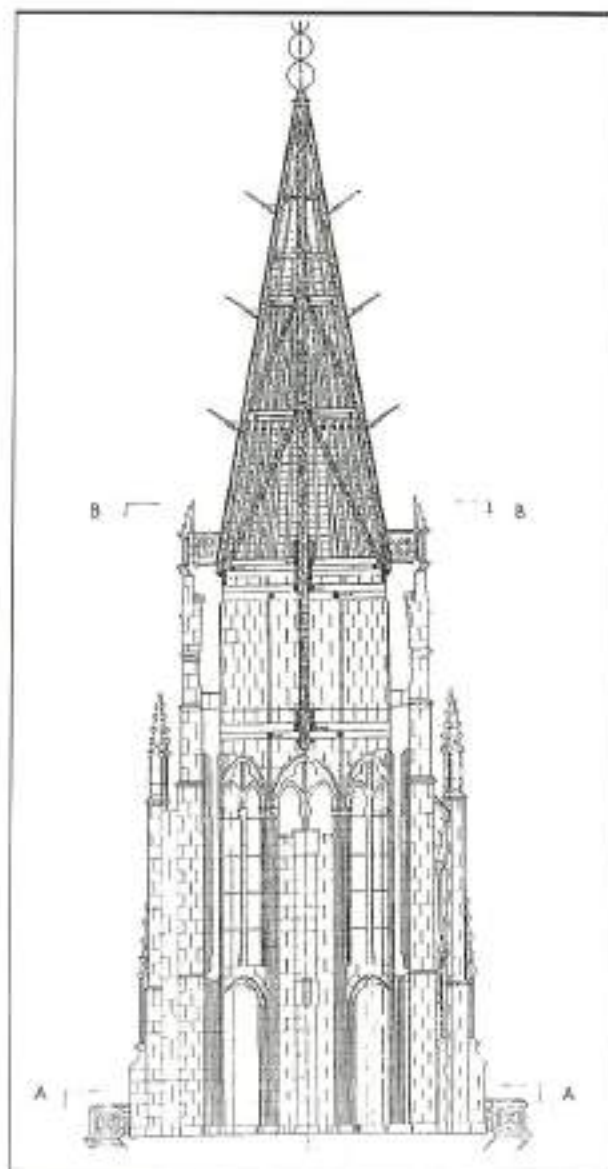


FIGURA 2. Detalle de la zona superior de la torre. Sección octogonal y chapitel.

1.º Campanario

- La altura desde la calle al eje de apoyo de las campanas: es de 42,80 m.
- En el centro se encuentra la Campana de S. Eugenio: altura: 3,36 m; diámetro: 9,8 m; peso: 17.747,58 kg; colocación: en 1753
- Campanas laterales: se desconoce su peso y dimensión. Su denominación así como su emplazamiento para un observador que mire de dentro afuera es la siguiente:
 - Cara Norte: Izquierda "Calderona" (1479)
 - Derecha "Encarnación" (1851)
 - sustituye a otra de 1597

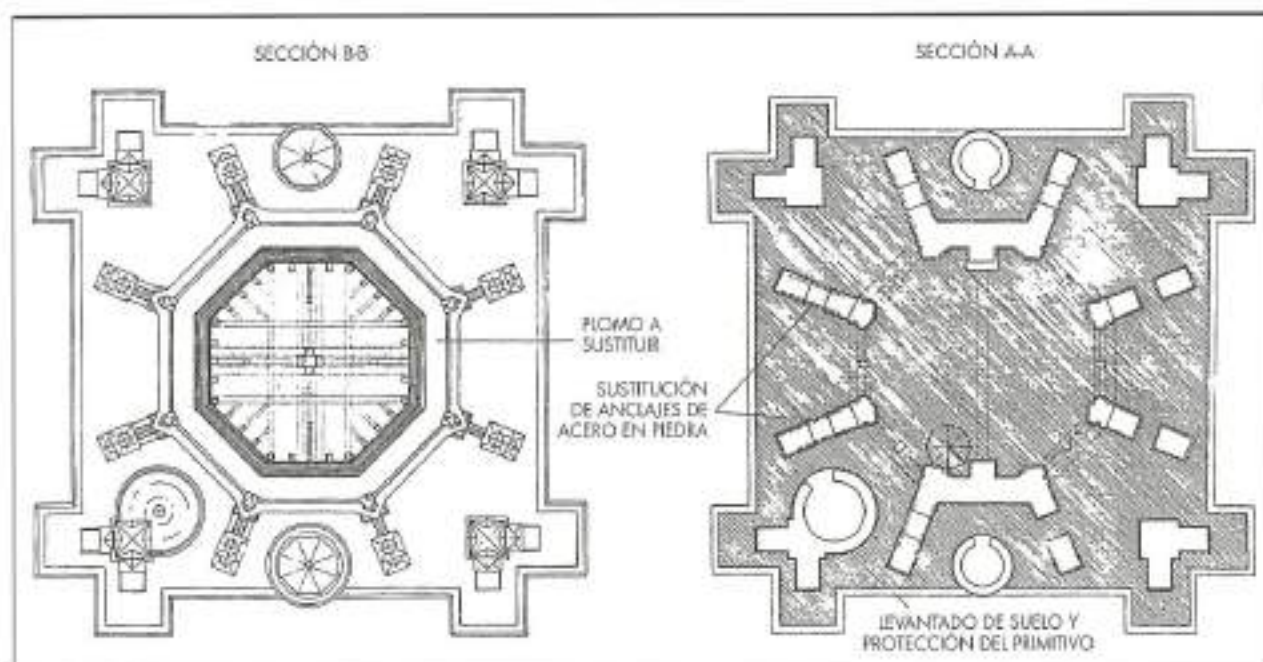


FIGURA 3. Secciones A y B de la Fig. 1. Sección A: Cuerpo octogonal. Sección B: Capítulo.

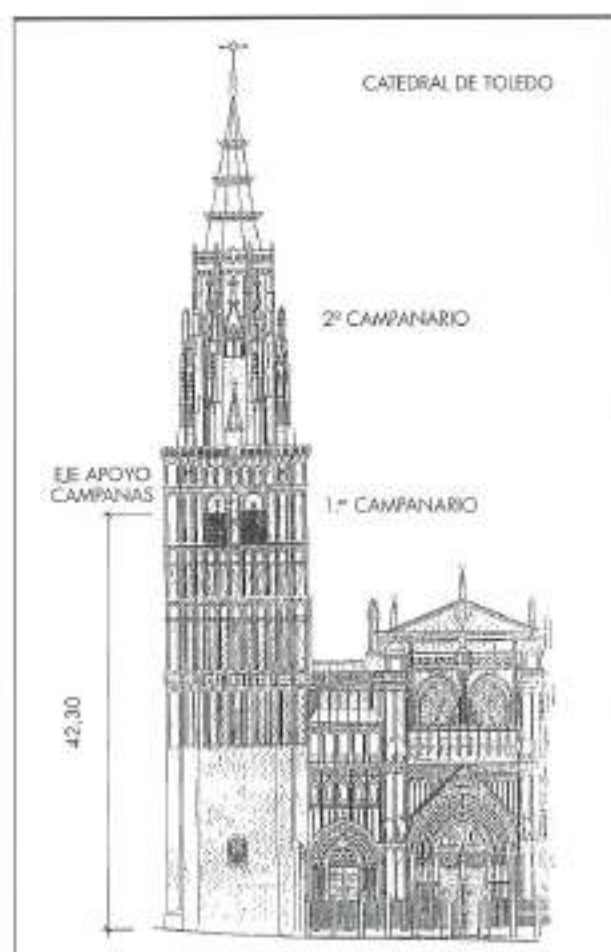


FIGURA 4. Situación de los campanarios.

- Cara Este: Izquierda "San Juan" (1345)
Derecha "Santa Leocadia" (1731)
- Cara Sur: Izquierda "Ascensión" (1345)
Derecha "San Ildefonso" (1760)
- Cara Oeste: Izquierda "Resurrección" (1545)
Derecha "San Felipe" (1680)
en 1851 se cambió por la actual

2º CAMPANARIO

Está situado en el cuerpo octogonal. Todas las campanas están colocadas en el centro, siendo las de mayor peso las siguientes:

- 1ª Campana: "San Sebastián" (1681), sustituye a otra análoga de 1557.
- 2ª Campana: "del Santo" (1982), sustituye a "Fonseca" (1514). Encima de éstas se encuentra la "Matraca" de madera.

Los apoyos de las campanas S. Eugenio, S. Sebastián y del Santo, están orientados en el mismo plano E-W.

Aunque en otro tiempo se tocaban todas las campanas y algunas podían voltearse, actualmente sólo se ponen en funcionamiento las situadas en el 2º campanario, que únicamente tocan en combinación con el reloj, para dar las campanadas cada cuarto de hora con una de ellas, y las horas y medias con la otra.

Las medidas realizadas por la mañana permitieron observar las vibraciones transmitidas a la estructura de la torre, cuando sonaron las doce, que es el momento en el que la vibración de la campana se mantiene durante un mayor período de tiempo.

4. ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos estaban encaminados a determinar el nivel de vibraciones que se transmitían de las campanas a la torre en el nivel de servicio actual de aquellas.

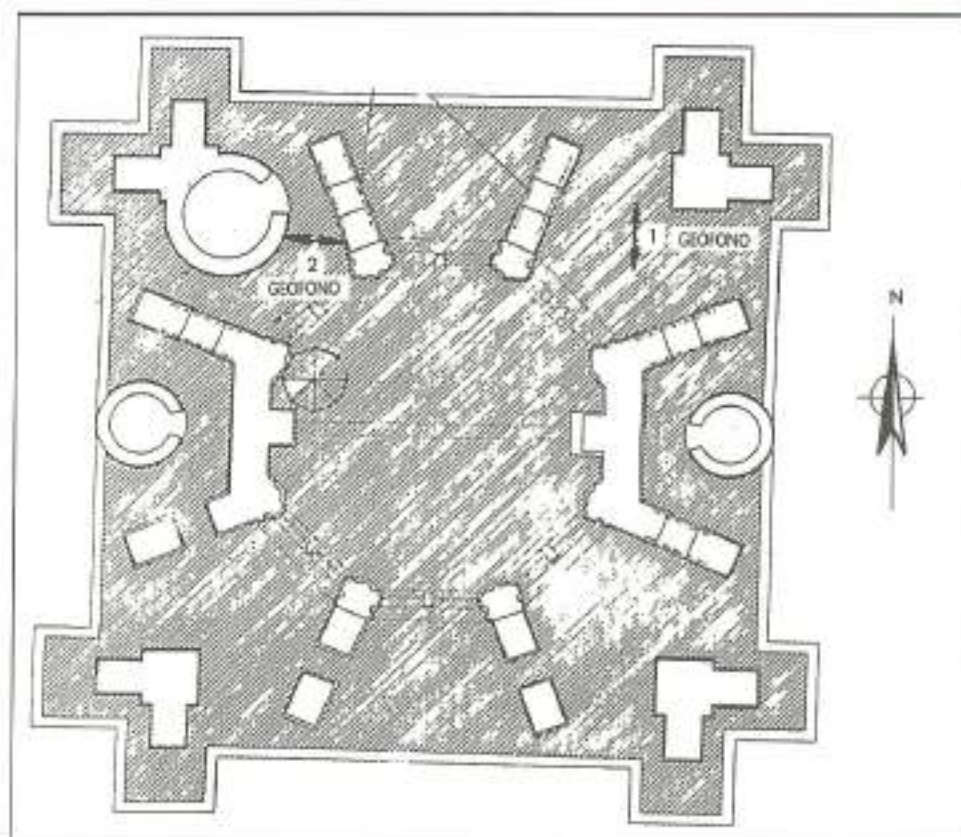


FIGURA 5. Situación en planta de los geófonos utilizados para captar las vibraciones.

Como se ha mencionado, solamente se utilizaban las dos campanas del 2º campanario situado en la zona más alta de la torre, y el interés se centraba en conocer el nivel de vibraciones de esta zona superior. En concreto se pretendía medir el nivel de vibración en la zona alta del primer cuerpo de la torre de sección cuadrada, y sobre el que está situado el 2º cuerpo de sección octogonal que, además tenía una arquitectura muy ligera.

El equipo utilizado solamente permitía realizar mediciones sobre superficies horizontales, por lo tanto las medidas efectuadas lo fueron sobre la solera del 2º campanario donde se levanta el 2º cuerpo octogonal, que corresponde al techo del primer cuerpo de la torre de sección cuadrada. La disposición en planta de los puntos de medida se muestra en la Fig. 5.

Los ensayos fueron realizados el 15 de Marzo de 1991, por el equipo de Geofísica del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

El ajuste de los aparatos se realizó al sonar las once, y las medidas se hicieron al sonar las doce.

La metodología seguida en la realización del ensayo fue la siguiente. La vibración horizontal originada por el toque de las campanas fue captada por dos geófonos de 1 Hz de frecuencia natural modelo SS-1 Ranger de Kinemetric y con una sensibilidad de voltaje de 160,6 V/m/sg el sensor nº 1 y 143,1 V/m/sg el sensor nº 2. Las señales temporales de los dos transductores fueron grabadas en un registrador de cinta magnética modelo Racal, la del sensor 1 en el canal 2 y la del sensor 2 en el canal 3. Como el nivel de vibración medido era muy bajo el voltaje de las señales de entrada al registrador también lo era, por lo que fue necesario amplificar

la señal al realizar la grabación de forma que la señal de salida del registrador (output) era 10 veces mayor que la de entrada (input).

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los registros de velocidad efectuados fueron analizados mediante un Analizador de Espectros, SD-380.

En las figuras 6 y 7 se muestran las amplitudes y espectros de las vibraciones horizontales máximas obtenidas al tocar las campanas, expresadas en voltios. Para transformar las señales eléctricas (voltios) en unidades de velocidad (mm/sg) hay que tener en cuenta el factor de amplificación de las señales al grabarlas y la sensibilidad de voltaje de los transductores, por lo que el valor máximo de la velocidad medido, en el dominio del tiempo, ha sido:

• Sensor nº 1:

$$V(\text{mm/sg}) = \frac{0,0771}{10 \times 0,1606} = 0,048$$

• Sensor nº 2:

$$V(\text{mm/sg}) = \frac{0,015}{10 \times 0,1431} = 0,010$$

En cuanto al análisis en el dominio de la frecuencia, los valores espectrales máximos han sido:

• Sensor nº 1:

$$f = 34,5 \text{ Hz} \Rightarrow V(\text{mm/sg}) = 0,00061$$

$$f = 108,5 \text{ Hz} \Rightarrow V(\text{mm/sg}) = 0,00137$$

FIGURA 6. Espectro y amplitud de la vibración horizontal captada por el sensor nº 1 y grabado en el canal 2 del registrador.

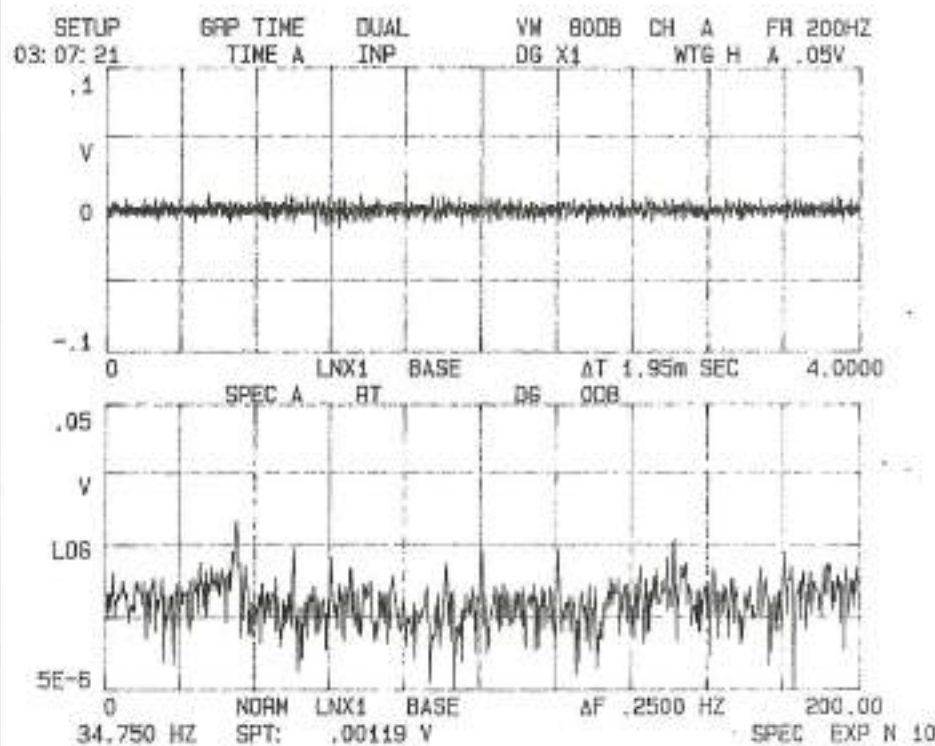
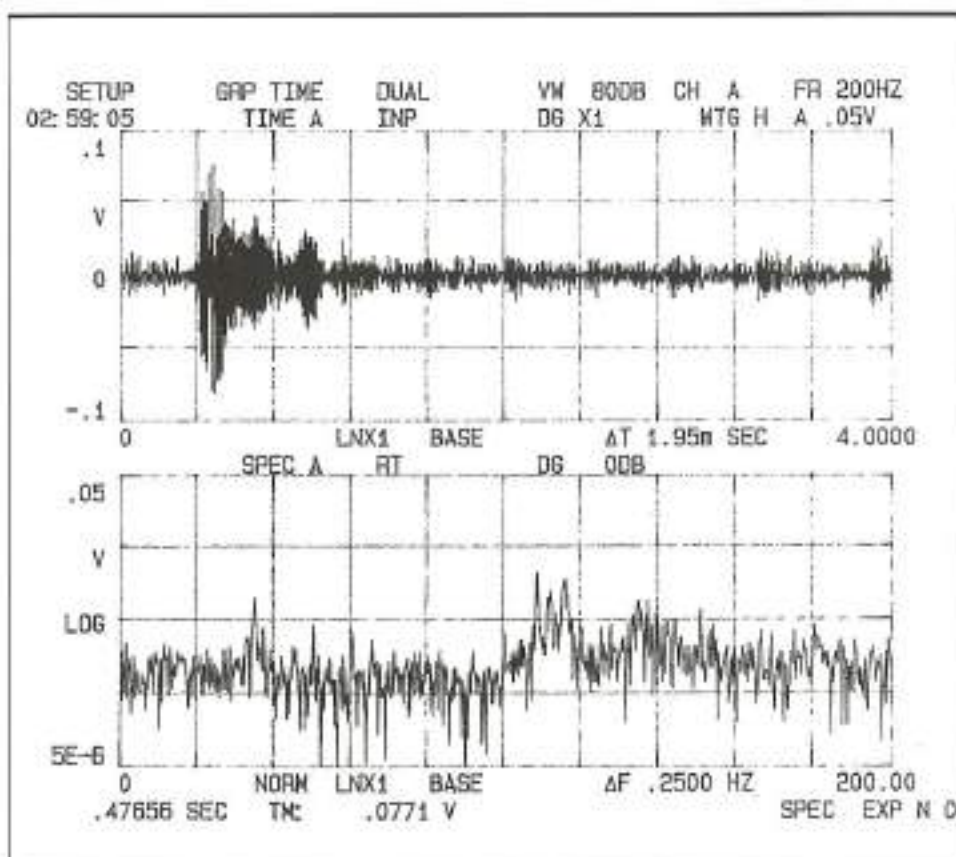


FIGURA 7. Espectro y amplitud de la vibración horizontal captada por el sensor nº 2 y grabado en el canal 3 del registrador.

• **Sensor nº 2:**

$$f = 34,75 \text{ Hz} \rightarrow V(\text{mm/sg}) = 0,00083$$

Es decir, la frecuencia 34-35 Hz aparece en ambos espectros mientras que la de 108,5 Hz sólo se manifiesta en el del sensor que capta la vibración mayor. Esto induce a pensar que es posible que la señal del sensor nº 2 es prácticamente el "ruido de fondo" y la frecuencia de 108,5 Hz es la más excitada por el toque de la campana en el rango analizado.

Comparando el máximo valor medido de la velocidad, $V = 0,048 \text{ mm/seg}$, con cualquiera de los criterios aplicables a edificios antiguos, monumentos, o edificios sensibles a las vibraciones que señalan la magnitud de las vibraciones mínimas para que puedan provocarse fenómenos de inestabilidad (DIN 4150, 1975, 1983; KONON et al., 1985; ATTEWELL, 1986 y ATTEWELL et al., 1988), se comprueba que las magnitudes medidas son del orden de 50 a 100 veces más pequeñas que el criterio más estricto en las condiciones más desfavorables.

En estas condiciones, no se consideró necesario la ejecución de la 2ª fase del estudio.

6. CONCLUSIONES

La torre de la Catedral de Toledo está formada por dos cuerpos, el inferior de sección cuadrada, y el superior de sección octogonal, coronados por un chapitel, con una altura total de 81 m.

En ella existen dos campanarios, el inferior en el que la altura del eje de las campanas principales sobre el plano de la calle se sitúa a 42,30 m, y el superior en el que el apoyo de las campanas principales está a una altura aproximada

de 51 m. Actualmente sólo se hacen funcionar las campanas de este 2º campanario, limitándose a dar las horas en combinación con el reloj, no volteando ninguna campana.

Existen grietas en los paramentos de la Torre cuyo origen está en estudio. Una de las causas podría ser las vibraciones transmitidas por las campanas al cuerpo de la torre al tañer.

Se han medido las vibraciones en el cuerpo de la torre, durante el toque de campanas recogiendo un valor máximo de la velocidad de $V = 0,048 \text{ mm/sg}$ que es del orden de 50 a 100 veces menor que el considerado necesario para poder provocar daños en las estructuras.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a los Doctores en Ciencias Geológicas, Profesor D. Francisco Mingarro Martín y Dña. María del Carmen López de Azcona, sin cuya colaboración e interés no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- ATTEWELL, P. B. (1986): Noise and vibration in civil engineering. Mun. Eng. Instr. Civ. Engrs., London, 3, June, pp. 139-158.
- ATTEWELL, P. B. et al. (1988): Low amplitude mechanical vibrations and structures. Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and historical Sites, Marinos and Koukis (eds), pp. 1189-1201.
- DIN 4150 (1975, 1983): Vibrations in buildings. Influence on constructions.
- KONON, W. et al. (1985): Vibrations criteria for historic buildings. Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 111, nº 3, September, 1985, pp. 208-215.



TEGOVAKON®

TEGOSIVIN®

Entre nuestras referencias figuran:

Casa Milà (La Pedrera)
Barcelona

Puerta de Alcalá
Madrid

Pórtico y Fuente de Platería
Catedral de Santiago

Monasterio N.º Sra. de las Cuevas
Isla de la Cartuja

Torre de Hércules
La Coruña

Consolidantes e hidrofugantes de la piedra
Para la conservación del patrimonio monumental



TH. GOLDSCHMIDT SA

Comte d'Urgell 240-3-C
08036 Barcelona

Teléfono (93) 419 00 44 Fax (93) 410 75 16

En vez de millones de agujeros



Mejor ahorrarse millones: **ZEMDRAIN***

La nueva Lámina ZEMDRAIN garantiza una superficie de hormigón de alta calidad.

ZEMDRAIN reduce la relación agua/cemento en la superficie del hormigón, mejorando sustancialmente la resistencia a compresión y reduciendo la porosidad superficial. Todo ello contribuye a mejorar la resistencia a la abrasión en la superficie y a reducir la profundidad de carbonatación.

La Lámina ZEMDRAIN elimina por completo las coqueras, proporcionando una mayor resistencia a la erosión y a los ciclos hielo-deshielo. Por consiguiente ZEMDRAIN asegura unas obras mucho más resistentes y duraderas, es por tanto especialmente indicado en la construcción de obras públicas expuestas a medios agresivos como depuradoras, presas, canales, puentes, etc.

Utilizar ZEMDRAIN **ahora** evitará el deterioro del hormigón en el futuro, y por tanto todos los costes que acarrea su reparación.

Ahorre millones con ZEMDRAIN. Solicite nuestro dossier técnico, donde le informaremos detalladamente, enviándonos la pestaña adjunta.

BETTOR®

PRODUCTOS QUÍMICOS
PARA LA CONSTRUCCIÓN

Bassers 13-15 - 08184 PALAU DE PLEGAMANS (BCN)
Tel. (93) 864 86 01 - Fax (93) 864 84 83



Por favor remitanme una más amplia información de ZEMDRAIN

Si la.....
Empresa.....
Cargo.....
Dirección.....
Población.....
Código Postal.....
Tel.....

* Marca registrada de DuPont para láminas de encofrados

Una colaboración en firme: OLEXOBIT AD



BP les ofrece ahora un producto líder en el mercado de **betunes modificados**: **OLEXOBIT AD**. Diseñado para aplicaciones que requieren una mejora significativa de las propiedades del ligante en casos de una demanda de alta exigencia.

La tecnología punta y distribución de **OLEXOBIT AD**, ha sido posible gracias a la investigación y experiencia de una compañía líder en el suministro de **betunes modificados** desde hace más de 10 años y a la tecnología de nuestra Planta de Castellón, la más moderna de España.

Son muchos kilómetros enfrentándonos a los problemas y encontrando las soluciones que nuestros clientes necesitan, por eso, la colaboración profesional que siempre tendrá trabajando con BP es una garantía.

BP Bitumen,
una colaboración profesional.



BP. EN MOVIMIENTO

**Rehabilitación del
PALACIO CARLOS V,
en la Alhambra
de Granada.**