

CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE UNA TORRE-CAMPANARIO DEL SIGLO XVIII A TRAVÉS DE ENSAYOS DINÁMICOS

S. Ivorra, y J.R. Cervera

Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia. España.

RESUMEN

Una de las acciones características de los campanarios es la acción dinámica introducida por el volteo de sus campanas. Existe una gran diferencia entre los sistemas de volteo anglosajón, centroeuropeo y español, dado que este es el único sistema en el que las campanas giran 360° de forma continuada; a esta diferencia debe sumarse el hecho de que las campanas españolas están muy equilibradas, lo cual le confiere unas características diferentes a las del resto de sistemas de volteo. Se ha estudiado la influencia de éstas en la torre-campanario de la iglesia parroquial de Nuestra Sra. del Pilar en la localidad valenciana de Bon Repos i Mirambell. Las características fundamentales de esta torre son el material de construcción: fábrica de ladrillo, y su importante esbeltez

Palabras claves

Campana, Campanario, Acción dinámica, caracterización dinámica.

1. DESCRIPCIÓN DE LA TORRE

1.1 Introducción histórica

La colocación de la primera piedra para la construcción de la torre-campanario de la Iglesia Parroquial de la Virgen del Pilar de la localidad valenciana de Bonrepós y Mirambell fue el 2 de abril 1755 y quedó concluida el 8 de octubre de 1774. Su autor fue *Joan Baptiste Mingues*, descendiente de una de las familias de arquitectos autores de las más representativas torres de la geografía valenciana del siglo XVIII. Todo ello propicia que el modelo seguido en esta construcción es el característico de todos los campanarios construidos en esta época denominada del Barroco Valenciano.

La torre ha sufrido diferentes restauraciones a lo largo de su historia, la más importante fue tras la guerra de Independencia, los franceses quemaron la iglesia y dañaron seriamente la estructura de la torre. En el año 1874, según un informe del “mestre d’obres” custodiado en el Archivo del Reino de Valencia, se reparó completamente la torre. La última intervención de importancia se realizó en el año 1982, en la que se picó toda la fachada y se enlució de nuevo, se eliminaron humedades e impermeabilizaron cubiertas y cornisas, restituyéndose finalmente elementos ornamentales dañados por el paso del tiempo.

1.2 Descripción geométrica

Siguiendo el estilo característico del Barroco Valenciano, la torre se puede dividir en tres cuerpos claramente diferenciados. Un primer cuerpo o basamento es la caña de sustentación de la torre, es de sección cuadrada de 4.68 m de lado y muro de 1.45 m. En su interior se aloja la escalera de acceso al cuerpo superior y los accesos al coro de la iglesia. Este cuerpo tiene tres huecos en forma de aspilleras a diferentes alturas en dirección de la

fachada principal de la iglesia. Estos huecos tienen una altura de 1.2 m y una sección variable de 30 cm en el exterior y 60 en el interior.

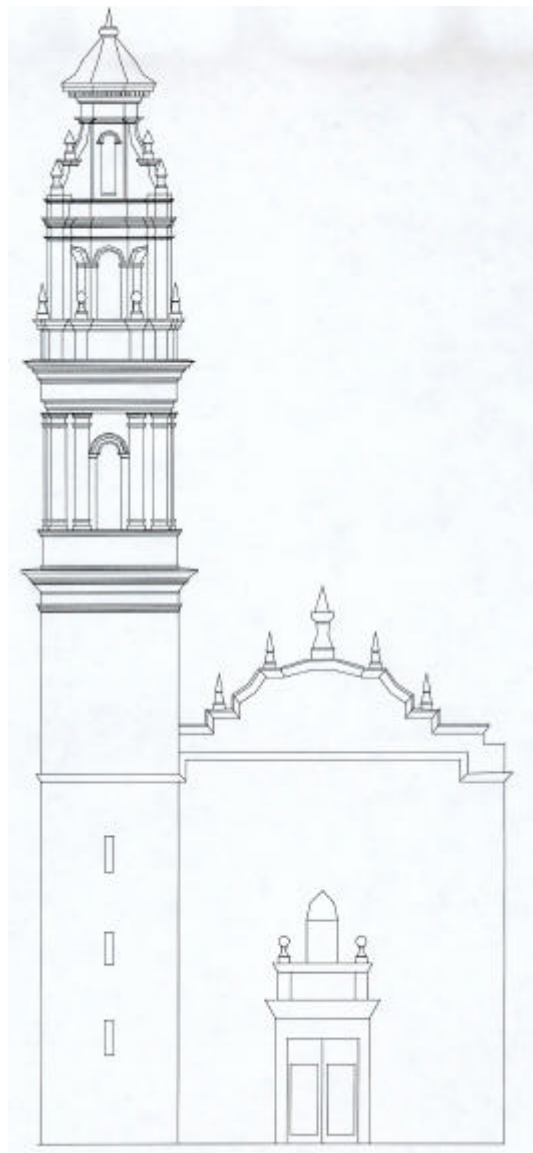


Figura 1: Fachada principal de la Iglesia.

Asimismo existe otro hueco a una altura de 16.6 m donde en alguna época existía un reloj, este hueco es de sección cuadrada y de 1.4 m de lado. El segundo cuerpo o campanario propiamente dicho es el cuerpo donde se alojan las campanas; termina a una altura de 26.6 m.

En el existen cuatro ventanas exactamente iguales en cada una de la fachadas, en ellas van alojadas las cuatro campanas que componen el juego de esta torre:

Tabla 1: Campanas existentes en la torre

Posición	Nombre	Peso N
Fachada sur (principal)	Virgen. del Pilar	6310
Fachada norte	Jesús	500
Fachada oeste	San Juan Bautista	3170
Fachada este	San Vicente Ferrer	1540

El tercer cuerpo, remate de la torre, es una parte de la estructura completamente ornamental que termina a una altura de 37.19 m. Presenta dos cambios de sección bien definidos, hasta 31.59 m tiene un esquema octogonal, para pasar de nuevo en el remate final a la sección cuadrada. El acceso a estos últimos cuerpos, únicamente para reparaciones se realiza a través de una escalera de gato adosada a los muros interiores del segundo cuerpo.

El material predominante en toda la construcción es fábrica de ladrillo, característico también en una gran parte de las construcciones valencianas de la época. En la base del edificio hasta una altura de 1.5 m el material del que está realizada la torre es de piedra caliza. A partir de ensayos no destructivos se han identificado las características mecánicas de los materiales.

2. ANÁLISIS DINÁMICO DE LA ESTRUCTURA

2.1 Fuerzas introducidas por el volteo de campanas.

Una de las acciones exteriores predominantes en una torre campanario es la excitación introducida por el volteo de campanas. Dentro de los tres grandes grupos en que podrían dividirse los sistemas de volteo en el mundo: anglosajón, centroeuropeo y español, este último es el que introduce unas fuerzas sobre la estructura mucho menores debido a que el desequilibrio de sus campanas es mucho menor. En los dos primeros sistemas éstas oscilan alrededor de su eje con ángulos de batida variables entre los 60-180° en el centroeuropeo y los 360° para el anglosajón; en el sistema español las campanas giran de un modo continuo alrededor de su eje. En los dos primeros sistemas de volteo, los yugos de las campanas son únicamente soportes para las campanas, mientras que en el español los yugos son superpesados actuando como contrapeso, permitiendo valores de desequilibrio variables tan solo entre 2 – 11 cm.

Se han desarrollado diversos métodos para la evaluación de las fuerzas verticales y horizontales introducidas por las campanas al voltear. Tras la realización de diferentes ensayos sobre las campanas de esta torre se pudieron deducir las características más importantes de cada una de las campanas: desequilibrio, velocidad de giro, inercia y peso. Mediante un planteamiento matemático se han calculado los valores de las fuerzas horizontales y verticales máximas actuantes sobre los soportes. Estos resultados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Características de las campanas de la torre

Nombre	h desequilibrio m	Velocidad de giro rad/s	Fuerza horizontal máx. N	Fuerza vertical máx. N	Peso N
Virgen. del Pilar	0.016	2.82	114	6432	6310
San Juan Bautista	0.02	3.35	98	3300	3170
San Vicente Ferrer	0.015	4.19	46	1590	1540
Jesús	0.032	4.92	47	552	500

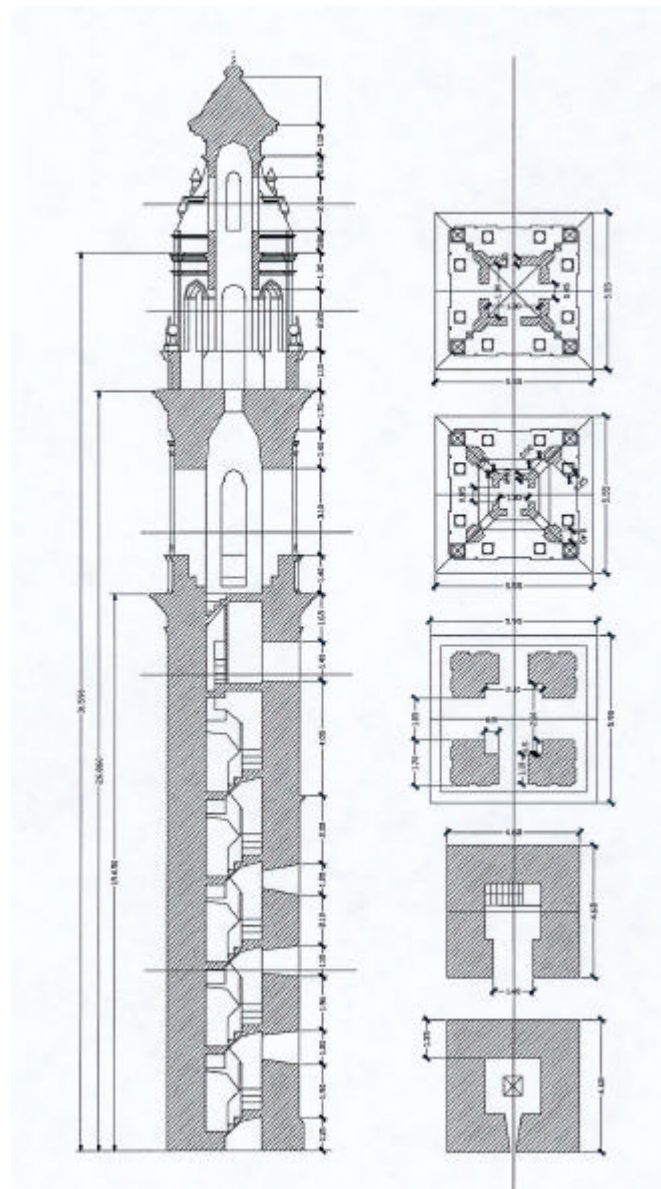


Figura 2: Sección de la torre por la fachada principal.

Para el caso de campanas con motores de vuelo continuo, puede plantearse una formulación simplificada de la acción introducida por el volteo de campanas mediante el tratamiento de esta como un péndulo simple concentrando toda la masa en el centro de gravedad del péndulo, por tanto las expresiones de las fuerzas horizontales y verticales serán:

$$\text{Fuerza horizontal: } F_H(t) = F_H \cdot \text{sen}(\omega_0 \cdot t + p) \quad (1)$$

$$\text{Fuerza vertical: } F_V(t) = 1 - F_V \cdot \text{cos}(\omega_0 \cdot t) \quad (2)$$

donde F_V = Fuerza horizontal máxima, F_H = Fuerza horizontal máxima, ω_0 = Velocidad angular constante (rad/s)

2.2 Modelo numérico para la realización del análisis dinámico

La realización del modelo numérico se ha basado en la detallada información geométrica de la estructura. Para la caracterización del material del que está construida la

torre se ha procedido mediante la determinación de las características dinámicas de la torre y un ajuste posterior.

La excitación necesaria para la realización del ensayo dinámico ha provenido de la acción de su campana mayor: Virgen del pilar, girando a una velocidad de 25 rev/min (2.62 rad/s). El valor de esta acción dinámica, para un periodo de 2.3 s, puede observarse en la Fig. 3.

A través de una monitorización mediante acelerómetros de baja frecuencia –rango 0.025-800 Hz-, se ha podido obtener el espectro de respuesta presentado en la Fig. 4. A partir de gráfico se puede deducir que la primera frecuencia natural de la estructura se encuentra a 0.725 Hz en la dirección N-S, dirección en la que gira la campana mayor. Asimismo a partir de esta monitorización se ha podido determinar que el amortiguamiento viscoso de la torre es de 0.01456.

A la vista de estos resultados el valor del coeficiente de amplificación dinámica para el caso de la campana Virgen del Pilar tiene un valor unitario, dado que la relación existente entre la primera frecuencia natural de la torre y la frecuencia de la excitación es de: 1.61. El valor máximo de la fuerza horizontal introducida por la campana es de tan solo 114 N, por ello las deformaciones producidas por este valor son de muy pequeño valor.

Conocidos estos parámetros junto el peso específico del material 14120 N/m², se ha procedido mediante un proceso iterativo a ajustar el valor del módulo de elasticidad medio del material en toda la torre; en este proceso de ajuste se ha buscado la coincidencia entre la primera frecuencia natural del modelo con la primera frecuencia natural determinada experimentalmente. La tabla 3 presenta un resumen del proceso.

Tabla 3: Resultado del proceso de ajuste

Valores de partida		Resultado del proceso de ajuste	
Peso específico N/m ³	Primera frecuencia natural (Hz)	Amortiguamiento viscoso	Modulo de elasticidad medio N/m ²
14120	0.725	0.01456	1,100E+09

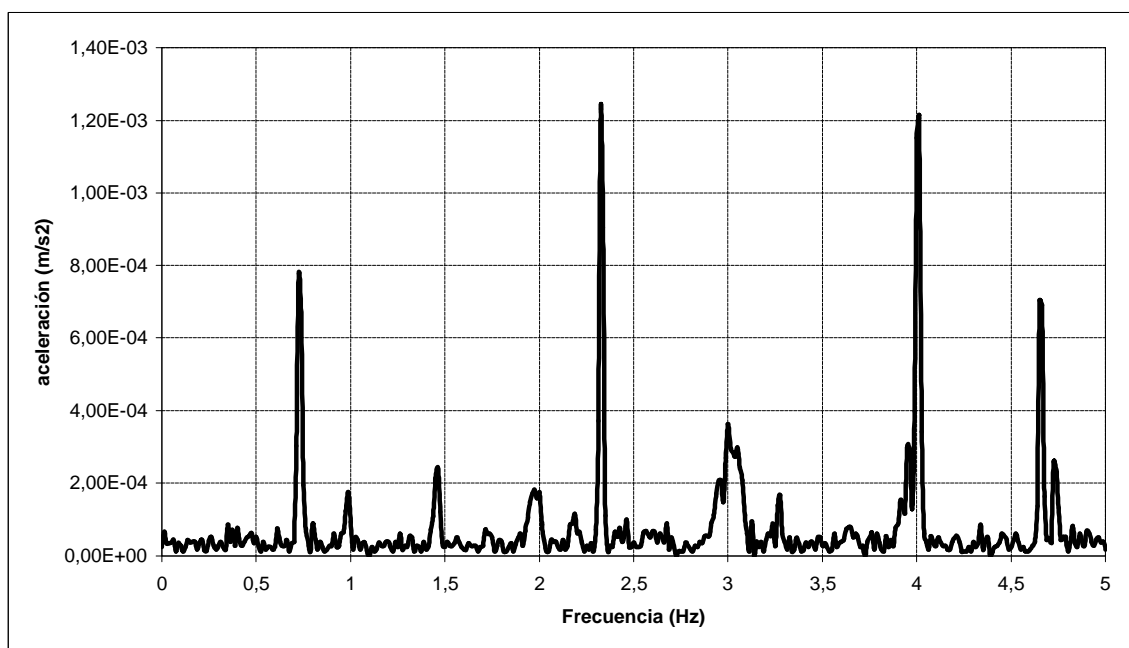


Figura 3: Espectro de respuesta de la torre frente a una excitación dinámica.

El modelo numérico se ha construido mediante elementos finitos de ocho nodos, manteniendo estrictamente la geometría de la torre. Las únicas acciones actuantes sobre la estructura consideradas han sido el peso propio del material y la excitación introducida por la campana Virgen del Pilar. Dada la tipología estructural predominante en este tipo de estructuras en la cual la transmisión de esfuerzos se realiza a través de compresión, la influencia del peso propio de la estructura es muy importante, dado que su valor es de $1.4 \cdot 10^7$ N, frente a los 114 N introducidos por la fuerza horizontal originada por el volteo de la campana.

En la Fig. 4, puede observarse la modelización, junto con un detalle de la zona de campanas y el remate de la torre.

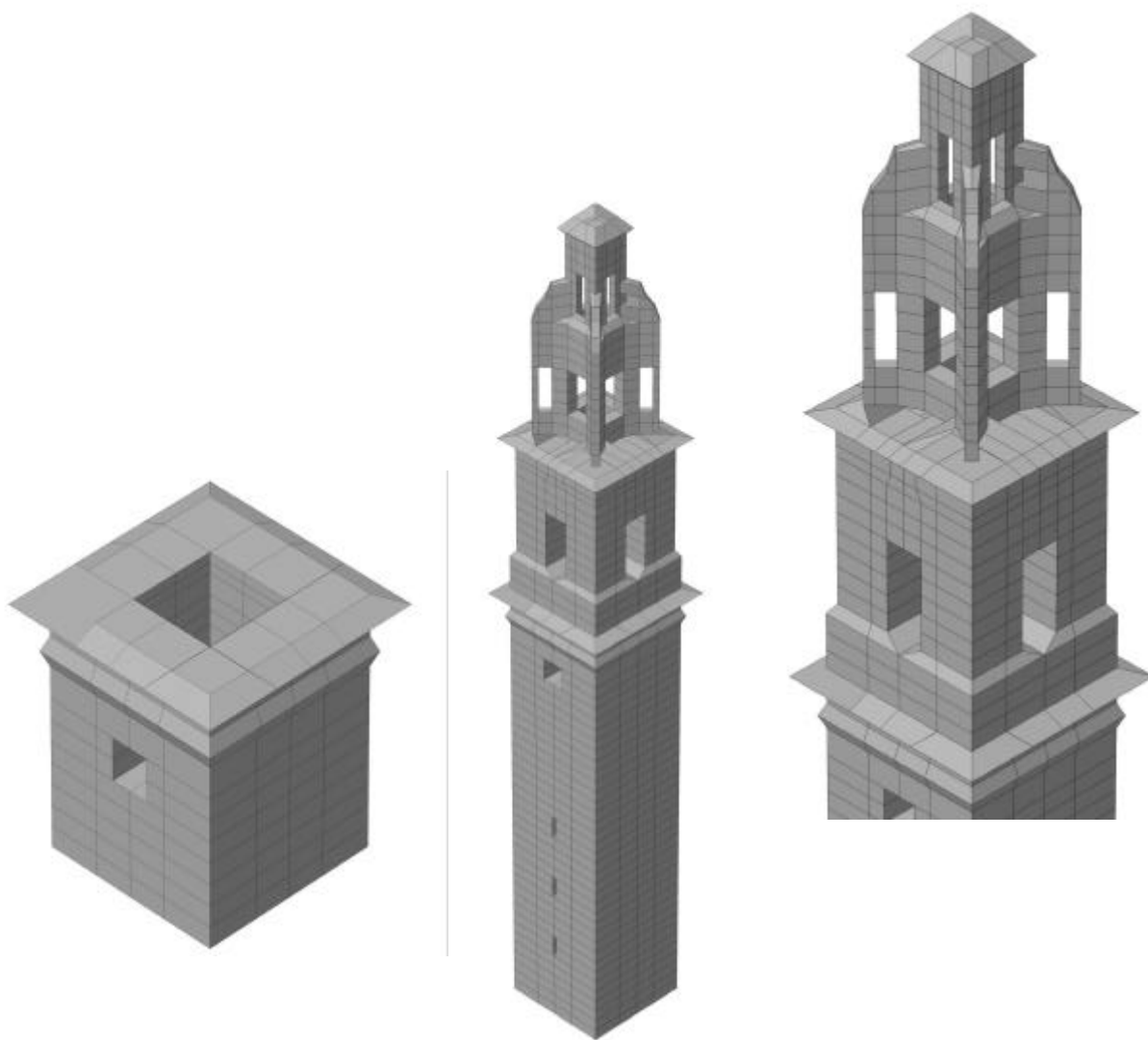


Figura 4: Modelización mediante elementos finitos.

3. CONCLUSIONES

Las campanas del sistema de volteo español se encuentran muy equilibradas y además giran 360° de forma continua, es por ello que su tratamiento difiere del planteado para los sistemas de volteo anglosajón y centroeuropeo. A partir de un ensayo no destructivo y la posterior aplicación de sus resultados para el ajuste a través del análisis dinámico permiten la

determinación del módulo de elasticidad medio de la estructura. Una vez se ha completado el modelo numérico se pueden evaluar la influencia de otras campanas, con otras velocidades de giro y otras dimensiones sobre la estructura inicialmente planteada. Este estudio puede marcar las directrices de una futura restauración de las campanas.

La influencia sobre esta torre del volteo de sus campanas es despreciable frente al peso propio de la estructura dado que éstas se encuentran muy equilibradas, son pequeñas (pequeño peso) y las velocidades de giro que poseen se encuentran relativamente alejadas de las frecuencias propias de la torre. Los resultados obtenidos pueden ser importantes para conducir la restauración de las campanas. En estos momentos son numerosas las torres de la Comunidad Valenciana en la que los yugos metálicos se sustituyen por yugos de madera – usualmente con mayores desequilibrios- con el fin de recuperar las antiguas formas y sonidos, asimismo se sustituyen los motores de oscilación continua por otros nuevos denominados de impulsos. De este estudio pueden deducirse, para esta torre, valores límites de las velocidades de giro de las campanas con el fin de evitar un influencia importante del coeficiente de amplificación dinámico.

4. BIBLIOGRAFÍA

1. Bachmann, H. et alter, (1995). Vibrations problems in structures: practical guidelines, Basel, Birkhäuser Verlag Basel
2. Binda, L., et alter; (2000). Investigation procedures for de diagnosis of historic masonries, Construction and Building materials; Vol. 14, p. 199-233. Elsevier Science Ltd
3. Bonato, P. et alter., (2000) Cross-time frequency techniques for the identification of masonry buildings; Mechanical Systems and Signal Processing;, v. 14; n° 1, p. 91-109.
4. Cerioni, R., et alter; (1995), Use of incompatible displacement modes in a finite element model to analyze the dynamic behavior of unreinforced masonry panels; Computers & Structures,, , Vol. 57 No.. 1, p. 47-57 Elsevier Science Ltd
5. Heyman, J., Therefall, B.D. Inertia Forces due to Bell Ringin, International Jounal of Mechanical Sciences, 18, pg. 161-164
6. Niederwanger (1997). Structural Repair of Damaged Old Bell Towers Based on Dynamic Measurements. Structural studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings. Ed. Sanchez. Computational Mechanical Publications. Southampton.
7. Schutz, K. G. (1994). Dynamische Beanspruchung von Glockentürmen. Bauingenieur 69, p. 211-217. Springer-Verlag.
8. Wilson, J.M., Selby A., (1993). Engineering a Cathedral, London, Thomas Telford Ltd
9. Wimmer, Majer y Niderwanger, (1990). Dynamic behaviour and numerical simulation of old bell towers, Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings (Edited by C. A. Brebbia), Computational Mechanics Publications, Southampton.