

Simulación numérica del volteo de campanas tradicional en España.

S. Ivorra⁽¹⁾ E. Segovia⁽¹⁾, R. Irlles⁽¹⁾ F. Pallarés⁽²⁾

Departamento de Ingeniería de la Construcción. Universidad de Alicante. Apartado 99. 03080 -Alicante. 96 590 34 00 ext. 1119. Sivorra@ua.es.

⁽¹⁾ *Departamento de física aplicada. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de vera s/n 46010 Valencia.*

Área Temática: Mecánica Computacional

Resumen

Este trabajo presenta la evaluación de las fuerzas de inercia originadas durante la oscilación de una campana tradicional española. El modelo numérico se ha realizado con ANSYS e incluye todos los elementos que configuran la propia campana, se ha realizado con elementos sólidos considerando un comportamiento elasto-plástico bajo grandes movimientos. Este modelo evalúa el comportamiento el doble péndulo compuesto por campana y badajo. Los modelos analíticos tradicionales ignoran el efecto del badajo a la hora de evaluar las fuerzas de inercia. Este modelo incluye como singularidad que el eje de oscilación de la campana no coincide con el eje de oscilación del badajo. El movimiento del badajo en el interior de la campana esta condicionado por la propia geometría del bronce, por lo cual éste pivota en su interior. El análisis realizado ha sido dinámico, considerando un contacto asimétrico entre badajo y bronce. Los resultados obtenidos para el sistema Español se han comparado con los obtenidos para el sistema Centroeuropeo.

Palabras Clave: Campana, fuerzas de inercia, yugo, péndulo doble, badajo.

Abstract

This document presents the evaluation of the inertia forces originated during the swinging of a bell by the Spanish system. The numerical model is made with ANSYS code and it includes all the elements that form the bell, modelled by means of solid elements with elasto-plastic behavior under big displacements. This model considers the double pendulum formed by the bell and clapper. Traditional analytical models ignore the effect of clapper. A singular characteristic of this model is that the axis bell swing does not coincide with the axis clapper swing, being jointed this to the bell by means of a kneecap. The movement of the clapper is conditioned by the movement and the geometry of the brass, since it pivots in its interior. The analysis carried out was dynamic, considering an asymmetric contact between the brass and the clapper. Results of inertial forces with clapper are compared with the Central European system of swinging bells.

Keywords: Bell, Inertia forces, Spanish system, double pendulum, yoke, clapper.

1. Introducción

La bibliografía centroeuropea [1-2] y anglosajona [3-4] describe las fuerzas de inercia originadas por las campanas al oscilar. El conocer estas fuerzas es básico para el diseño

de sus estructuras portantes: campanarios. La mayor parte de estos trabajos se basan en planteamientos analíticos que obvian la masa del badajo debido a que sus campanas no suelen disponer de un yugo superpesado como ocurre en el sistema tradicional español [5]. Se pretende en este trabajo estudiar una campana de forma completa a fin de evaluar si en el sistema español la masa del badajo es despreciable o, en caso contrario, conocer el valor de estas nuevas fuerzas de inercia. Asimismo, y dada la habitual rotura de badajos en campanas tradicionales, se pretenden cuantificar el valor de los esfuerzos que se presentan en este elemento como consecuencia de su impacto en el bronce.

2. 2. Geometría de la campana analizada.

El modelo real de partida analizado posee un diámetro de boca de campana de 56 cm, una altura de bronce de 53 cm y una altura del yugo de 74 cm. Las características geométricas de esta campana se muestran en la figura 2.

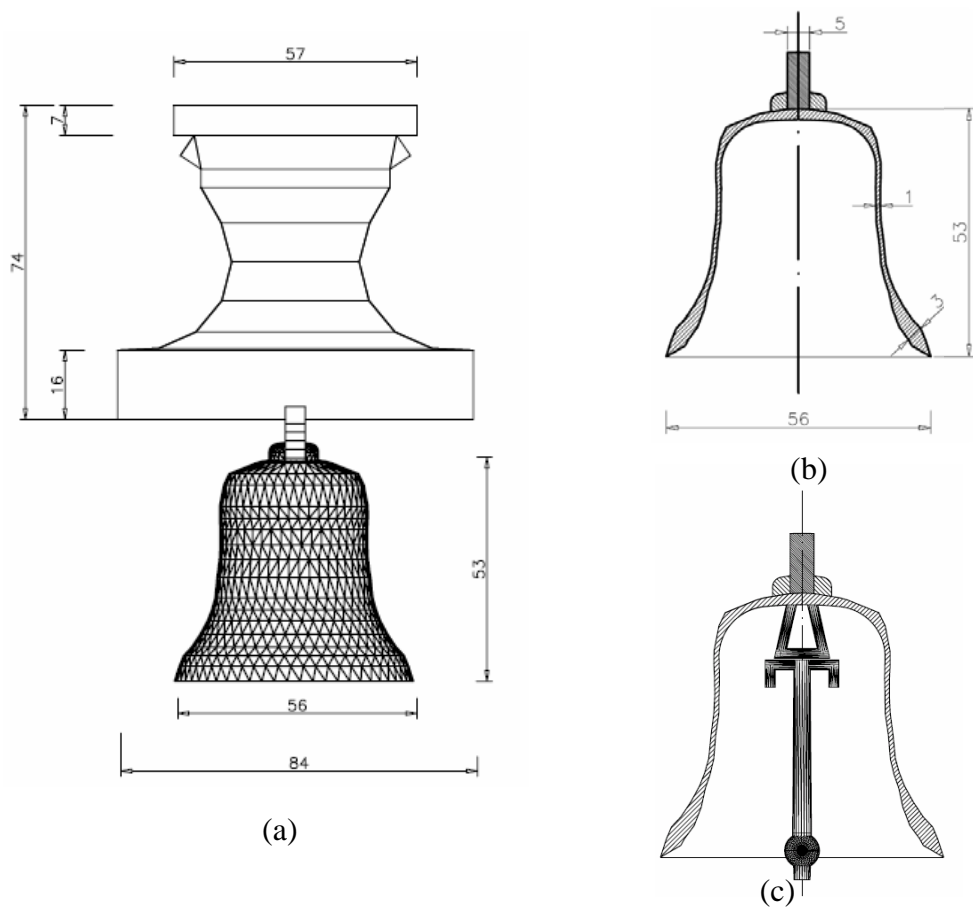


Figura 2. Características geométricas de la campana con yugo español.

3. Modelo numérico

Se han realizado dos modelos numéricos, ambos en ANSYS CODE [6], en los que se han modelizado a escala real las geometrías de una campana con yugo superpesado – tradicional español- y una campana con yugo ligero –tradicional del sistema centroeuropeo-. En ambos casos las características de los materiales han sido idénticas (Tabla 1):

Tabla 1. Características de los materiales.

	Yugo	Bronce	Acero (badajo)
Módulo de Young (MPa)	13300	107800	205800
Coefficiente de Poisson	0.3	0.34	0.3
Peso específico (kg/m3)	720	8000	7850

La tabla 2 describe el volumen del problema analizado y la tabla 3 el tipo de elemento finito utilizado en cada parte de la campana.

Tabla 2. Características de los materiales.

	Sistema español	Sistema Centroeuropeo
Nodos	60226	35764
Elementos	36675	20107
Tipos de materiales	6	6

Tabla 3. Elementos finitos tipo utilizados.

Tipo	Modelo	Malla	Ubicación en el modelo
solid92	Sólido	Tetraédrica	Yugo, bronce, esfera de acero del badajo
beam188	Lineal	lineal	Caña del badajo, conexión badajo-badajera, conexión badajera-bronze, conexión badajo-esfera
TARGE170	Contacto	Tetraédrica	Contacto entre esfera del badajo y bronce
CONTA174	Contacto	Tetraédrica	Contacto entre esfera del badajo y bronce

Con el fin de ajustar la posición del ángulo en el que el badajo golpea a la campana, se ha definido entre la unión campana-badajo un elemento rótula a través del cual y tras un proceso iterativo se han obtenido los valores de amortiguamiento de la unión para cada uno de los casos analizados. Este elemento simularía los elementos tradicionales de conexión entre ambos tales como correas de cuero y/o cuerdas de materiales diversos.

En la figura 3 y la tabla 4 muestran las características generales del elemento de conexión utilizado.

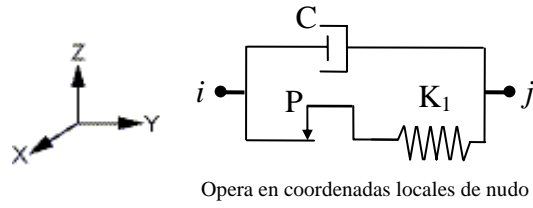


Figura 3. Esquema general del elemento de conexión entre bajado y badajera.

Tabla 4. Características mecánicas de la rótula de unión entre badajo y badajera.

Tipo	K1 (N·m/rad)	P (N·m)	C: Amortiguamiento de la rótula. (N·m/(rad/s))
Sistema Español	45	0.39	1.5
Sistema Centroeuropeo	45	0.39	0.2

La figura 4 muestra la geometría y el mallado obtenido para cada modelo.

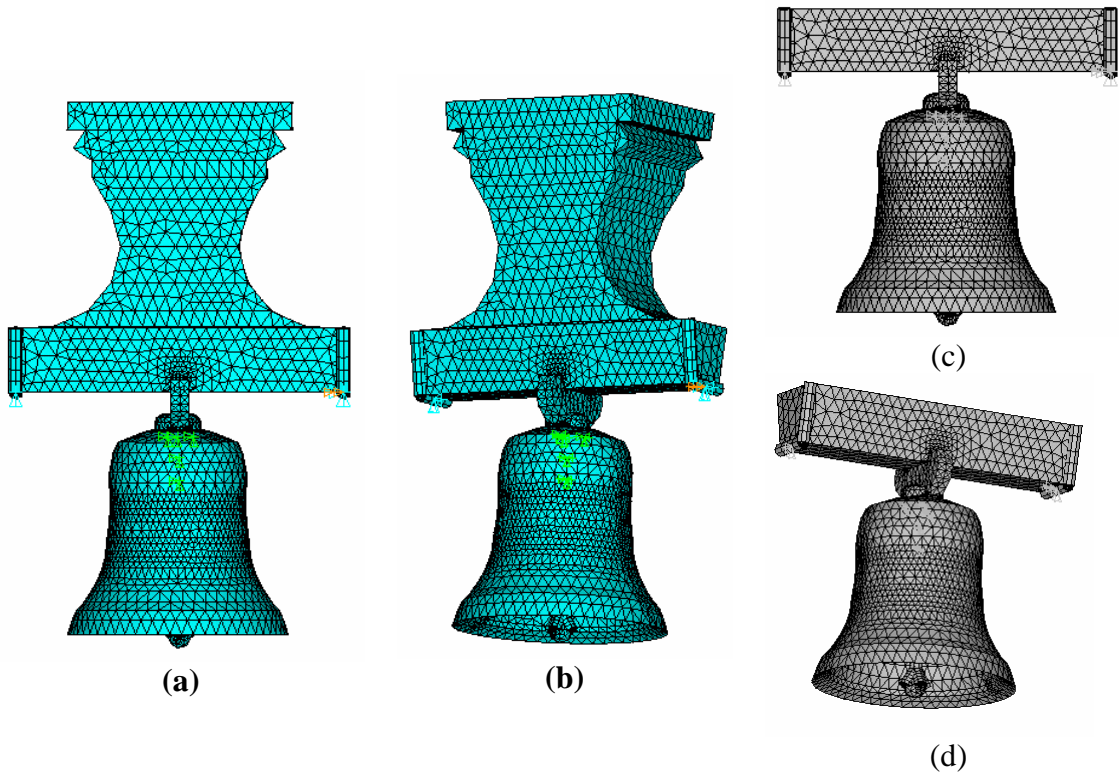


Figura 4. Modelo 3D. (a,b) Sistema Español. (c,d) Sistema centroeuropeo.

3.1. Análisis realizados

Los análisis efectuados en ambos casos han sido:

- Análisis estático no-lineal con contacto y grandes movimientos hasta colocar la campana desde su posición de reposo a una posición de inicio del volteo vertical. Para ello se ha introducido un giro de -0.9219 rad sobre uno de los apoyos de la campana.
- Análisis dinámico no lineal con contacto en el que se ha considerado un comportamiento elasto-plástico para el caso del bronce y badajo. Oscilación libre amortiguada.

4. Resultados y discusión

Con el fin de realizar una comparativa de ambos sistemas en oscilación libre amortiguada, se han obtenido los valores de la variación temporal de las fuerzas horizontales y verticales sobre cada apoyo. A partir de los modelos numéricos pueden presentarse de forma preliminar varias conclusiones relativas a las fuerzas de inercia originadas por las campanas al voltear sobre sus apoyos (Figura 7)

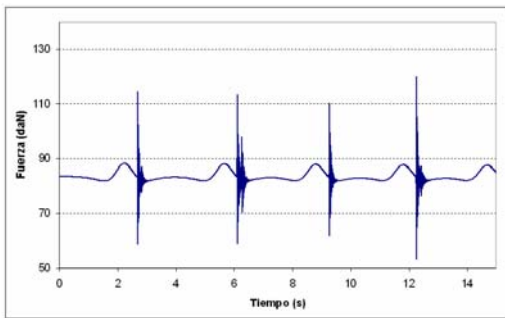


Figura 5a. Fuerza horizontal en cada apoyo. Oscilación libre. Sistema Español

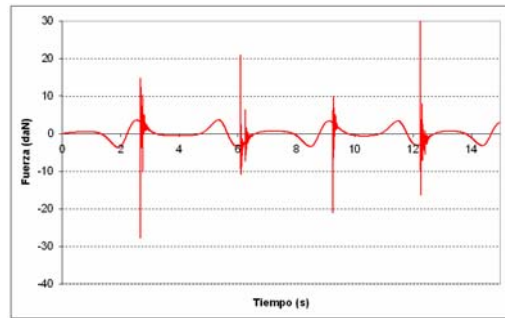


Figura 5b. Fuerza vertical en cada apoyo. Oscilación libre. Sistema Español

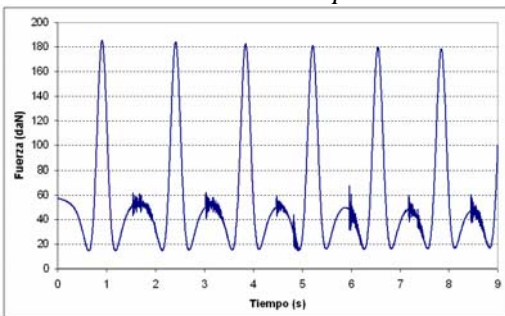


Figura 5c. Fuerza horizontal en cada apoyo. Oscilación libre. Sistema centroeuropeo

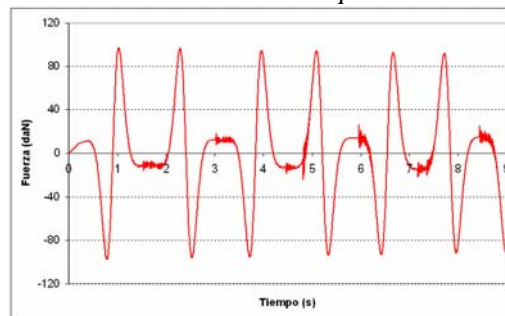


Figura 5d. Fuerza vertical en cada apoyo. Oscilación libre. Sistema centroeuropeo

Para esta campana, oscilando según el sistema centroeuropeo, el efecto del golpe de badajo es despreciable frente a las fuerzas introducidas por el propio desequilibrio de la campana. En el caso Español este efecto no es nada despreciable. A pesar de disponer un peso de conjunto mucho mayor, las campanas del sistema español introducen unas fuerzas sobre los apoyos mucho menores que para el caso centroeuropeo.

El considerable efecto del golpe de badajo con la campana genera sobre la caña del badajo unas tensiones de fatiga que serán necesario considerar a la hora de su dimensionado (Figura 6). Estas tensiones, en oscilación libre amortiguada, son del orden del doble en el caso del sistema español.

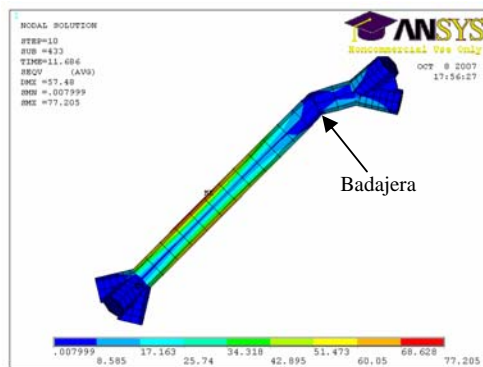


Figura 6a. Tensión equivalente de Von Mises (10-MPa). Con yugo de madera. Caída libre.

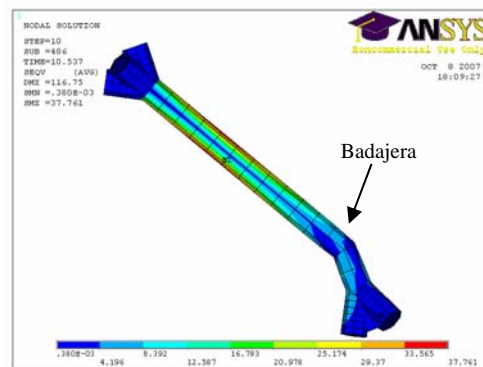


Figura 6b. Tensión equivalente de Von Mises (10-MPa). Sin yugo de madera. Caída libre.

5. Conclusiones

- (1) Se comprueba que la hipótesis asumida por [2, 4], en la que se desprecia el peso del badajo, para el planteamiento analítico de las fuerzas de inercia originadas por el volteo de campanas es válido para el sistema centroeuropeo, no para el español.
- (2) Tanto las fuerzas verticales como horizontales introducidas sobre los apoyos son muy superiores en el caso centroeuropeo.

3. Referencias

1. DIN 4178: “Glockentürme: Berechnung und Ausführung”; 1986
2. Müller, F.P., Statische und dynamische Probleme beim Bau von Glockentürmen, Deutsche Bauzeitung, Heft 12, 1- 4. (1963).
3. Heyman, J., Therelfall B.D., Inertia Forces due to bell-Ringing, International Journal of Mechanical Science. Pergamon Press. 1976;18: 161-164.
4. Selby, A. R. and Wilson J. M., 1997. Dynamic behaviour of masonry church bell towers, Worldwide Advances in Structural Concrete and Masonry. In: Proceedings of the CCMS Symposium, Chicago, ASCE, New York, 188-199.
5. Ivorra, S.; Palomo, M.J., Verdú, G., Zasso, A. (2006). Dynamic forces produced by swinging bells. Meccanica, 41:47–62
6. ANSYS theory reference 11.0. ANSYS Inc., 2004.

4. Agradecimientos

Proyecto de la Generalitat Valenciana número GV06/135.