

Comportamiento de los monumentos de Sevilla bajo la acción de los terremotos

J. L. JUSTO ALPAÑES (*); A. JARAMILLO MORILLA (*); P. GENTIL GOVANTES (**)

RESUMEN Sevilla ha sufrido a lo largo de su historia importantes terremotos que han dañado sus monumentos. El tratamiento de modelos de estos monumentos mediante el método de elementos finitos, y la estimación probabilística del acelerograma, nos permiten estimar el daño y compararlo con el descrito en las crónicas. Podemos modificar el acelerograma de diseño hasta aproximar los daños estimados y descritos, y de esta manera mejorar la estimación del acelerograma. Esto nos permitirá predecir el daño producido por futuros terremotos y permitirá el diseño de los refuerzos necesarios. Tres monumentos, cuya antigüedad oscila entre los siglos XII y XV, han sido discretizados; cada uno de ellos ha sufrido terremotos que están muy bien documentados. Se ha usado el programa de elementos finitos SAP-90 y se han estudiado los contornos de máximas tracciones, compresiones y cortantes. También se han realizado ensayos en los materiales y se han alcanzado conclusiones sobre la aparición de daños.

THE BEHAVIOUR OF THE MONUMENTS OF SEVILLE UNDER THE ACTION OF EARTHQUAKES

ABSTRACT Seville has suffered, along its history, important earthquakes that have damaged its monuments. The working-out of models of these monuments by the finite element method, and the probabilistic estimate of the accelerogram, allow us to estimate the damage, and to compare it with the harm indicated in the chronicles. We can modify the design accelerogram so as to approach the estimated and reported damage, and, in this way, improve the estimate of this accelerogram. This will allow to foresee the harm produced by future earthquakes, and will permit the design of adequate strengthening. Three monuments from the XII till the XV Century have been discretized; each of them has suffered many well documented earthquakes. The finite element program SAP 90 has been used, and the contours of maxima tensile, compression and shear stresses have been studied. Also tests on the materials have been carried out, and conclusions about the appearance of damage have been reached.

Palabras clave: Terremotos; Elementos finitos; Ingeniería sísmica; Sismicidad histórica.

1. INTRODUCCIÓN

Sevilla ha sufrido a lo largo de su historia, importantes terremotos que han afectado a sus monumentos.

El estudio de sus efectos tiene un doble interés. Por un lado, la comparación del daño producido por los diferentes temblores en un mismo monumento puede ayudar en la evaluación de la Intensidad de cada uno de ellos. Por otro lado, la modelización del monumento por el método de elementos finitos (M.E.F.) y la estimación del acelerograma de diseño permiten el cálculo del daño y la comparación con el descrito en crónicas. Modificando el acelerograma de diseño podemos aproximar el daño previsto y el descrito y mejorar así el terremoto de proyecto. Esto permitirá la predicción del daño producido por terremotos futuros en nuestro monumento y el diseño de los refuerzos adecuados.

Vamos a revisar el daño producido por varios terremotos importantes sobre tres monumentos muy singulares: La Giralda, la Torre del Oro y la Catedral.

2. LOS TERREMOTOS

Revisaremos los efectos de los siguientes terremotos:

- Terremoto del 24 de agosto de 1356. Es el más antiguo terremoto de la Península Ibérica bien documentado. Su magnitud pudo ser similar a la del terremoto de Lisboa de 1755 y ha sido estudiado por Justo y Gentil, quienes han publicado un mapa de isosistas.

La intensidad (M.S.K.) En Sevilla fue de VIII.

- Terremoto del 24 de abril de 1431.
- Terremoto de Carmona del 5 de abril de 1504. Gentil y Justo han publicado un mapa de isosistas. La intensidad en Sevilla fue VIII.
- El terremoto de Málaga del 9 de octubre de 1680. La intensidad en Sevilla fue VI-VII.
- El terremoto de Lisboa del 1 de noviembre de 1755. La figura 1 compara las isosistas de este terremoto con las del seísmo del 28 de febrero de 1669.
- El terremoto que tuvo lugar el 20 de octubre de 1883.
- El seísmo de Andalucía del 25 de Diciembre de 1884. La intensidad en Sevilla fue de V-VI (Gentil, 1989).

(*) Departamento de Mecánica de Medios Continuos. Universidad de Sevilla.

(**) Departamento de Física Aplicada. Universidad de Sevilla.

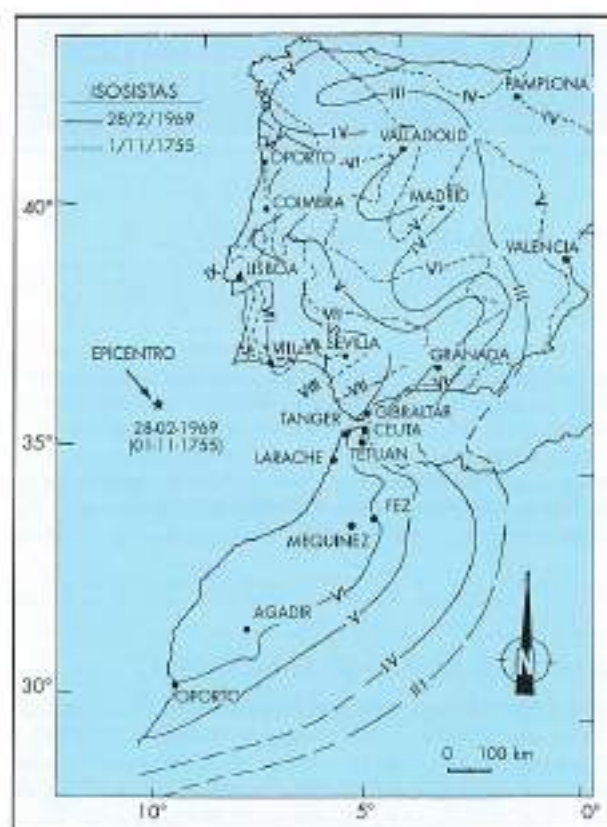


FIGURA 1. Superposición de los mapas de isosistas correspondientes a los terremotos del 1º de noviembre de 1755 (Lisboa) y el del 28 de febrero de 1969 (Elrabet et al., 1991).

- El terremoto del 28 de febrero de 1969 (Fig. 1). La intensidad en Sevilla fue VI (Gentil, 1989).

3. DAÑOS EN LOS MONUMENTOS

Sólo tres monumentos de Sevilla se analizarán aquí:

1. La Giralda, fue construida en ladrillo y piedra como minarete de la mezquita principal de Sevilla, y fue terminada en 1198 tal como queda reflejada en el lado izquierdo de la figura 2. Una rampa interior permite ascender hasta el piso más alto de la torre. Las esferas doradas que ramataban la torre, cayeron durante el terremoto que tuvo lugar en 1356, cuando Sevilla ya era cristiana. La torre se reparó provisionalmente, quedando como se indica en el lado derecho de la figura, y tras la restauración de Hernán Ruiz adquirió el aspecto indicado en el centro, cuando alcanzó la altura de 93,93 m incluyendo la figura de bronce superior.
2. La Torre del Oro (fig. 3). Fue construida en 1221 con solo los dos cuerpos inferiores e incorporada a la muralla de defensa de Sevilla. Es otro ejemplo destacado de la arquitectura almohade. El tercer y más alto cuerpo fue añadido en 1760 con la restauración que siguió al terremoto de Lisboa. La altura es de 36,75 m.
3. Tras la conquista de Sevilla por los cristianos en 1248 la mezquita principal se convirtió en Catedral. En 1434 el estado de la vieja mezquita era tan malo (debido en parte al terremoto de 1356) que se decidió construir una nueva

Catedral. La construcción duró un siglo. Es la catedral gótica más grande y la tercera Iglesia mayor del mundo (tras San Pedro de Roma, y San Pablo de Londres).

Vamos a analizar ahora los daños producidos por los diferentes terremotos en estos tres monumentos.

3.1. LA GIRALDA

Las bolas doradas que había en lo más alto de la torre estaban unidas mediante un espigón de hierro, fijado a la parte superior de la misma, pesando de acuerdo con diferentes citas, desde 575 a 1725 kilos (Jiménez y Cabeza, 1988). El espigón resistió el empuje del viento durante siglo y medio, lo cual indica que estaba correctamente construido. El vástago fue cizallado por el terremoto que tuvo lugar en 1356, y las bolas cayeron. La crónica del Arzobispo D. Rodrigo indica que "la torre casi cayó".

Gálvez (v. Ortiz de Zúñiga, 1975) se refiere al terremoto que ocurrió en 1504 en los siguientes términos: "La torre se movió tan fuertemente de un lado a otro que las campanas tocaron solas cinco o más veces, y las cuatro esquinas de la torre se abrieron; y alguna gente dice que vio como un ángel abrazaba a la torre para que no cayera". Esta cita se escribió

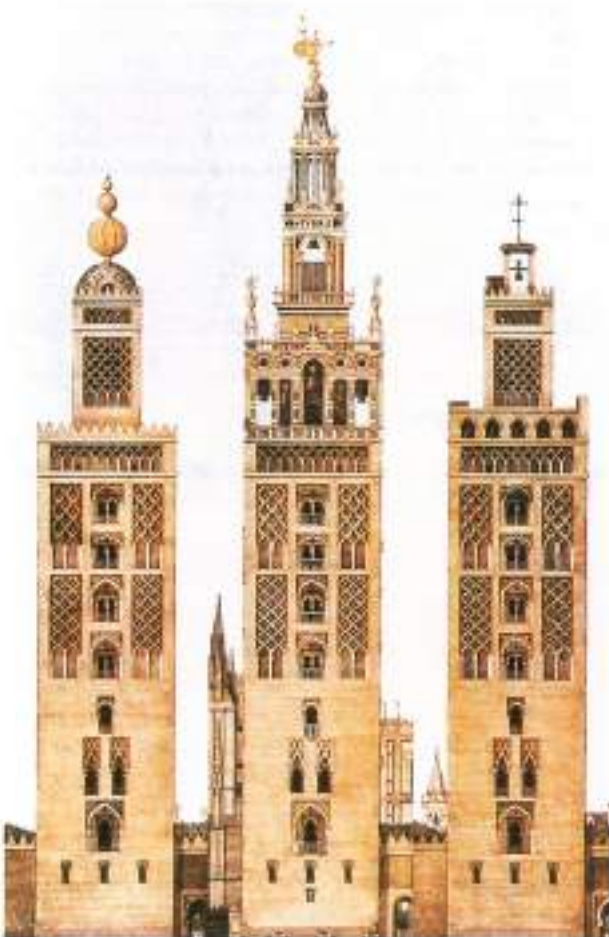


FIGURA 2. Estados de la Giralda en diferentes épocas:
a) Al final de la construcción de 1198 como observatorio y alminar.
b) Tras la restauración de Hernán Ruiz en 1558 y la última de 1890.
c) Después de la restauración realizada tras la caída de las esferas doradas a consecuencia del terremoto de 1356.



FIGURA 3. La Torre del Oro hoy, mostrando los destrozos producidos por el terremoto de Lisboa.

entre el 21 de Junio y el 26 de Julio de 1504, aproximadamente tres meses después del terremoto, y la fantástica descripción sobre el ángel podría reflejar el miedo producido por el terremoto.

Antes del terremoto de Lisboa, el aspecto de la torre era el indicado en la figura 1b. Hay dos informes muy detallados sobre el estado de la torre después de dicho terremoto. El primero fue escrito el día 3 de Noviembre, dos días después del terremoto, y las principales conclusiones están recogidas en la figura 4. Cuando se escribió el informe, el sismo principal y los cinco primeros postsismos se habían producido ya. La segunda cita tiene fecha del 15 de diciembre, cuando todos los postsismos habían tenido lugar. Esta cita coincide fundamentalmente con la primera, pero en ella se detallan y se explican mucho más los daños (los pilares habían caído o estaban desplomados) y las reparaciones del penúltimo cuerpo.

La torre es una estructura tipo B de acuerdo con la escala M.S.K. Durante el terremoto de 1356 cayeron elementos exentos (daños tipo 3). En el de 1504 las grandes campanas sonaron solas y aparecieron grietas en los muros (daños tipo 3). La intensidad, en ambos casos podría estar comprendida de VII a VIII. Finalmente el terremoto de Lisboa produjo grietas en las paredes y pérdidas de unión entre diferentes partes de la construcción, esto añadido a lo que sabemos de los efectos destructivos del terremoto en el resto de Sevilla (Gentil, 1989) da claramente intensidad VIII.

El terremoto de Andalucía de 1884 produjo algunos daños y el que tuvo lugar el 28 de Febrero de 1969 produjo la caída de uno de los jarrones de azucenas, hechos en bronce (fig. 2 y 4). Este es daño tipo 1.

3.2. LA TORRE DEL ORO

No hemos encontrado ninguna referencia a daños en la torre, hasta el terremoto de Lisboa. Sin embargo, en el in-



FIGURA 4. Sección de la Giralda mostrando las conclusiones del informe del 3 de noviembre de 1755.

forme realizado en 1757 sobre los daños causados por este evento, se indica que "en el pasado se han hecho diversas reparaciones a las bóvedas inferiores y a las superiores... y la torre está zunchada y atirantada".

En septiembre de 1757 la torre fue visitada conjuntamente por tres Maestros Mayores. A pesar de todo ello no llegaron a ponerse de acuerdo en sus conclusiones y presentaron dos informes diferentes. Uno de los Maestros Mayores describe el daño mostrado en la figura 3, que él atribuye a dos hechos, la "debilidad de los cimientos" y la nueva causa debida al terremoto. Recomendó la demolición de la torre en

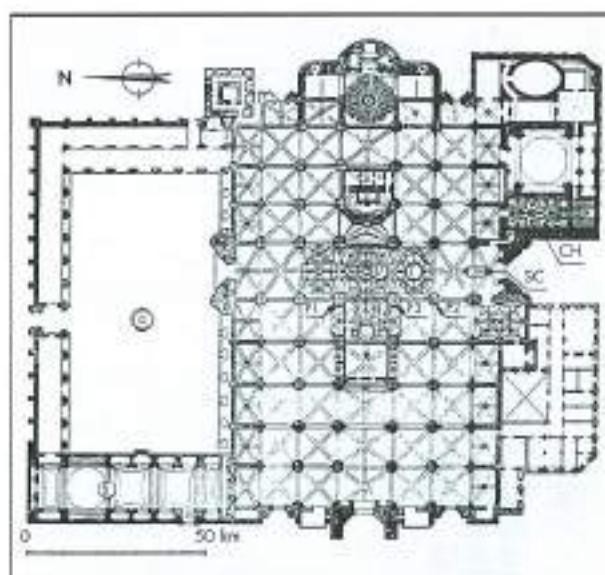


FIGURA 5. Plano de la Catedral. D = Cúpula. T = Transepto. C = Coro. CH = Capilla de los Cálices. S = Iglesia del Sagrario. SC = Puerta de San Cristóbal.

base a su estado y aduciendo también razones urbanísticas. Afortunadamente los otros dos Maestros mantuvieron que este destacado monumento podría repararse. La estructura es tipo B, el daño descrito corresponde a la clase 3 de la escala M.S.K., y la Intensidad asignada es VIII.

Durante el terremoto del 28/2/69, la pequeña cúpula que remata la torre fue desplazada de su base (I=VI).

3.3. LA CATEDRAL

Gentil describe los daños producidos por los terremotos de 1481 y de 1504 en la catedral que, por entonces, estaba en proceso de construcción.

Durante este último temblor, el edificio sufrió daños severos, y se agrietó por muchas partes. Dos años más tarde, el 10 de octubre de 1506 se terminó la cúpula (fig. 5) y el templo se concluyó en mayo de 1507. Como el temblor había disminuido la estabilidad de algunos pilares, la cúpula cayó el 28 de diciembre de 1511, destrozando las bóvedas del crucero y del coro (figura 5). En un informe elaborado en 1513 sobre los efectos del terremoto, se proponía reparar los pilares afectados, especialmente el pilar P1 (figura 5).

Los daños producidos por el terremoto de Lisboa han sido descritos en detalle por Gentil: daños en los arcos diagonales, delante de la Capilla de los Cálices y de la puerta de San Cristóbal (figura 5), en ambos casos con piedras rotas y sueltas; las pirámides y balaustradas de las terrazas habían caído sobre las bóvedas las cuales presentaban daños en el crucero, en la entrada del coro y en algunos otros lugares. La balaustrada de la terraza del templo anexo de El Sagrario estaba parcialmente ruinosa.

La estructura es tipo B. Los daños pueden ser de clase 4 para el terremoto de 1504 y de clase 3 para el de Lisboa, y la intensidad VIII en ambos casos. Durante el terremoto de Málaga la catedral no recibió daños, pero "El Sagrario" sí sufrió algunos. En 1882 el arquitecto informó del mal estado de algunos pilares y bóvedas en el crucero y la terraza. Durante el temblor de 1883, el pilar P1, que entonces estaba

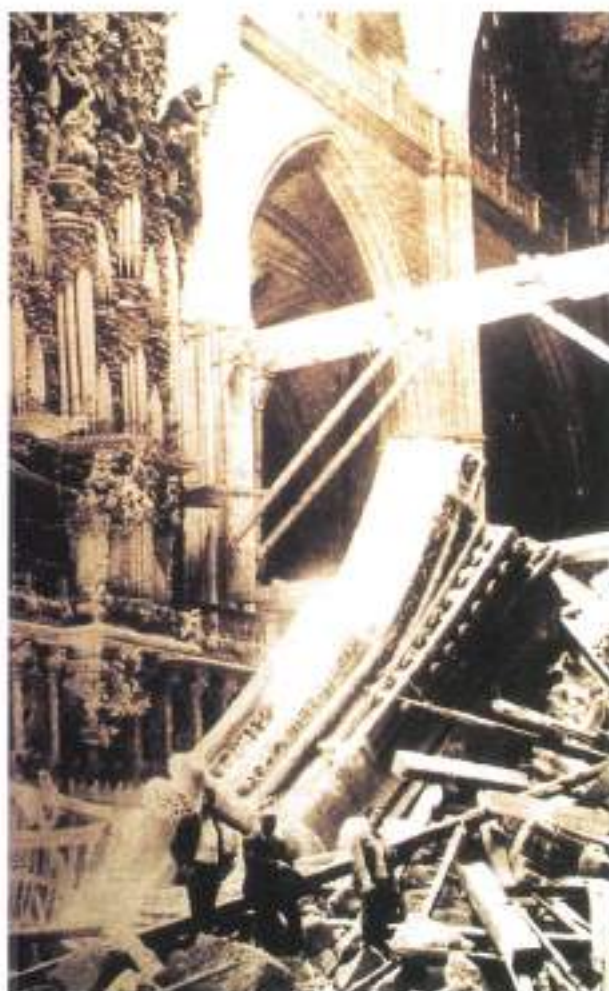


FIGURA 6. Caída de la cúpula en 1888.

siendo reparado, sufrió alguna apertura de algunos aumentos en las grietas que ya tenía; Intensidad de V a VI.

Con respecto al Terremoto de Andalucía del 25 de diciembre de 1884 un periódico escribe el día 27 acerca de los desastrosos efectos en la catedral: el debilitamiento de la cúpula y las grietas del pilar P2 aumentan. Como resultado de esto, el primero de agosto de 1888 cayeron el pilar P3 (figura 5) y la cúpula (figura 6).

Finalmente, Justo describe el daño de ligero a moderado producido en la iglesia de El Sagrario por el terremoto de Benavente (23/4/1909) y el temblor del 10/3/51, y el daño también de ligero a moderado en la catedral, producido por el terremoto de 28/2/69.

4. APLICACIONES DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Se han usado el M.E.F. dinámico SAP90. Los cálculos primeros se han hecho suponiendo un estado de tensión plana sobre la Giralda, la Torre del Oro y la Catedral. La componente EW de la aceleración registrada en Lisboa durante el terremoto que tuvo lugar el 28 de febrero de 1969 se ha usado como dato de entrada (input). Como se indica en la figura 1 este terremoto fue bastante similar al de Lisboa, aunque con mucha menor Magnitud. Por desgracia no dispo-

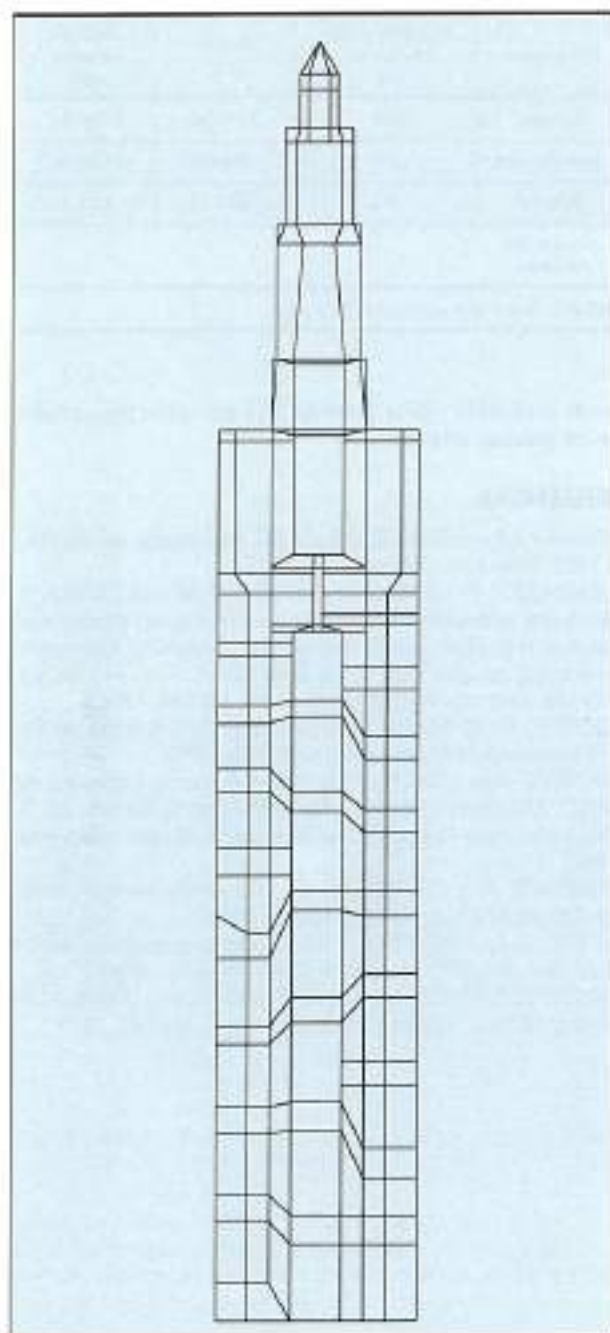


FIGURA 7. Discretización de la Giralda.

nemos de registro en Sevilla. Se ha aplicado un factor de 5,7 al acelerograma para llegar al acelerograma que correspondería a la Intensidad VIII de acuerdo con nuestros estudios preliminares sobre riesgo sísmico.

La figura 7 muestra la discretización simplificada de la Giralda, donde se han eliminado algunas aberturas y para tener esto en cuenta, el módulo de Elasticidad de los elementos correspondientes se ha disminuido. La figura 8 muestra la discretización de la Torre del Oro; se ha simplificado estableciendo una simetría que en realidad no es completa (comparar con la figura 3). Finalmente la figura 9 muestra la discretización de la catedral.

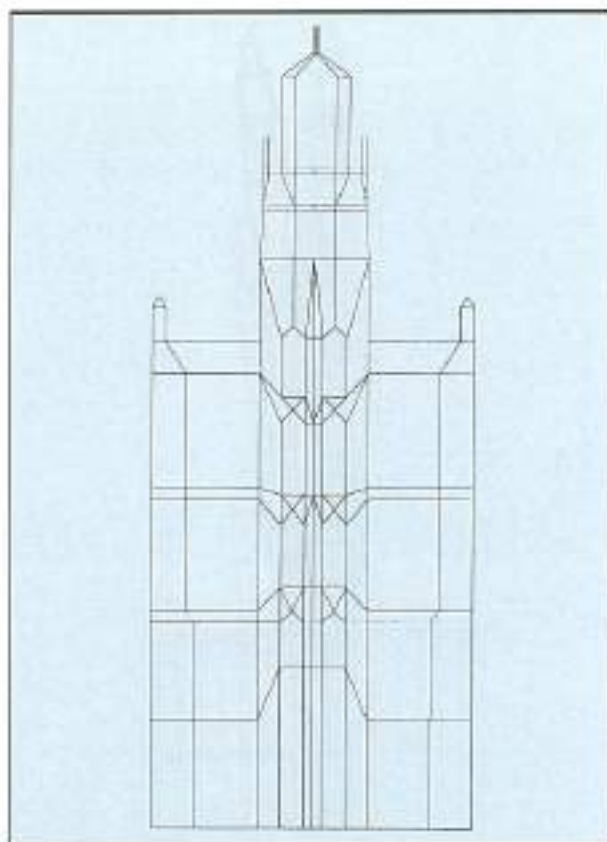


FIGURA 8. Discretización de la Torre del Oro.

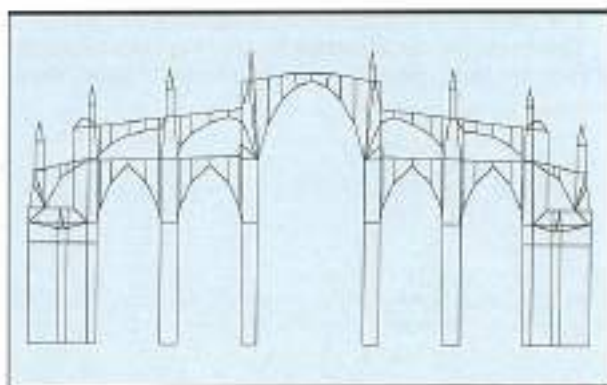


FIGURA 9. Discretización de la Catedral.

Respecto a la Giralda, se han llevado a cabo dos estudios dinámicos: uno considerando la torre fijada a la superficie del terreno y el segundo discretizando también un bloque de cimientos bajo la torre (figura 10). En este segundo caso los desplazamientos son mayores y los esfuerzos menores. Se ha medido un módulo de 3.158 Mpa en los materiales que forman la Giralda.

Se han obtenido los siguientes resultados en los tres monumentos: máximo desplazamiento, y contornos de mayor y menor tensión principal, de tensiones normales horizontal y vertical, y de esfuerzos cortantes. La tabla 1 recoge los principales resultados.

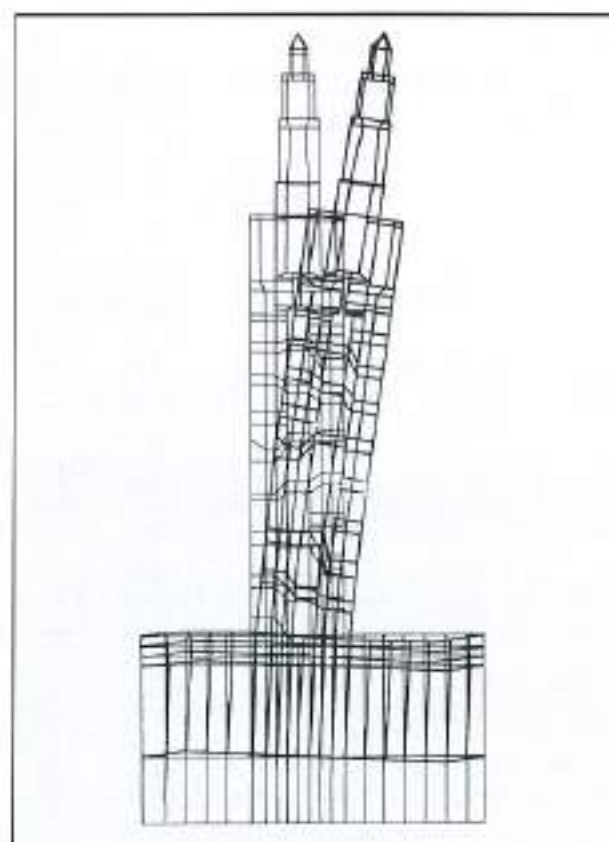


FIGURA 8. Discretización de la Torre del Oro.

Las compresiones máximas son siempre admisibles.

Los resultados son alentadores, pero hay todavía mucho trabajo por hacer. Hemos realizado cálculos tridimensiona-

Monumento	Desplazamiento horizontal mm	Tensión kPa	Tensión cortante kPa
Giralda	423	2340 (a)	1030 (a)
Torre del Oro	13	206 (a)	124 (a)
Catedral	15	693 (a)	674 (a)
a = permisible e = excesivo			

TABLA 1. Resultados principales [máximos].

les de la Giralda y de la Torre del Oro que serán presentados en un próximo artículo.

REFERENCIAS

- "Crónica del arzobispo don Rodrigo", continuada desde 1242 a 1395. Biblioteca Colombina, Sevilla.
- ELMRABET, T.; LEVRET, A.; RAMDANI, M. and TADILI, B. "Historical seismicity in Morocco: Methodological aspects and cases of multidisciplinary evaluation", *Seismicity, Seismotectonics and Seismic Risk of the Ibero-Maghrebian Region*, pp. 115-129, Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 1991.
- GENTIL, P. "El Riesgo Sísmico de Sevilla", Servicio de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 1989.
- GENTIL, P. y JUSTO, J. L. "Terremoto de Carmona de 1504", *Sismicidad Histórica de la Península Ibérica*, pp. 9-16, Asociación Española de Ingeniería Sísmica, Madrid, 1983.
- JIMÉNEZ, A. y CABEZA, J. M. "Turris Fortissima", Colegio Oficial de Aparejadores, Sevilla, 1988.
- JUSTO, J. L. y GENTIL, P. "El terremoto peninsular del 24 de agosto de 1356", *Ingeniería Civil*, 1990, 74, 34-40.
- ORTIZ DE ZÚÑIGA, D. "Anales Eclesiásticos y Seculares de la muy Noble...". Ciudad de Sevilla, 5 vol., Madrid, 1975.



Dragados

Acceso Norte a Buenos Aires. Autopista Panamericana



*Ampliación Dársena Sur.
Puerto de Valencia*

*Presa de Vadomojón.
Baena, Córdoba*



EQNet

CALIDAD
Dragados

INGENIERIA CIVIL



- Agronomía
- Obras Hidráulicas
- Ingeniería Sanitaria
- Estudios y Proyectos Medioambientales
- Ingeniería de Costas
- Ordenación del Territorio y Desarrollo Regional
- Geología y Minería
- Ingeniería del Transporte

INFORMES Y PROYECTOS, S.A.,
es una empresa de Ingeniería y Consultoría con más de 25 años
de experiencia en los campos de la Ingeniería Civil, Industrial,
de Recursos Naturales y de Tratamiento de Residuos.



General Díaz Portes, 49 - 28001 MADRID Tel. (91) 402 55 04 - 402 50 12 Fax (91) 402 13 91
Plaza Fernando Lesseps, 33 - 08029 BARCELONA Tel. (93) 415 00 17 Fax (93) 218 65 35
DELEGACIONES EN: SEVILLA, ZARAGOZA, GUON, GALICIA, MURCIA Y VALENCIA

