

Caracterización de la respuesta sísmica de sistemas de construcción industrializada resistentes al sismo.

Parte 2. Ensayos sísmicos sobre unidades estructurales

*Seismic response characterization of earthquake-resistant industrialized construction systems.
Part 2. Seismic testing on structural units*

Miguel Ángel Vicente Cabrera^{*,a}, Jesús Mínguez Algarra^b, Álvaro Mena Alonso^c, Jorge Franco Rey^d, Daniel Miguel Yepes^e y Ana Carla Jiménez^f

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Dpto. Ingeniería Civil, Univ. de Burgos, Prof. Titular de Universidad, mvicente@ubu.es.

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Dpto. Ingeniería Civil, Univ. de Burgos, Prof. Ayudante Doctor, jminguez@ubu.es.

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Dpto. Ingeniería Civil, Univ. de Burgos, Estudiante de Doctorado, ama0104@alu.ubu.es.

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, ICONKRETE 2012, S.L., Director Técnico, jorge.franco@iconkrete.com.

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, ICONKRETE 2012, S.L., Responsable de Innovación, daniel.miguel@iconkrete.com.

^f Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, ICONKRETE 2012, S.L., Directora de Innovación, ana.jimenez@iconkrete.com.

RESUMEN

En este trabajo, se ha realizado un ensayo en mesa sísmica sobre un edificio de hormigón prefabricado de tres alturas a escala real, con el objeto de conocer la respuesta dinámica de la estructura frente a un sismo de referencia, así como validar el diseño de la mesa sísmica empleada. Los resultados muestran que el comportamiento del edificio es altamente satisfactorio, ya que se observa que la disipación energética se da únicamente en las zonas destinadas a tal fin, por lo que no se compromete la seguridad estructural. Además, el funcionamiento de la mesa también es satisfactorio.

ABSTRACT

In this work, shaking table testing has been realized on a real size, 3-storey, precast concrete building in order to understand the dynamic response of the structure against a particular earthquake, as well as check the design of the shaking table. Results show that the behavior of the building is suitable since it is observed that the energy dissipation occurs only in the areas designed to that goal, so structural security is not compromised. Besides, the performance of the shaking table is also correct.

PALABRAS CLAVE: ensayo sísmico, hormigón prefabricado, construcción industrializada.

KEYWORDS: seismic testing, precast concrete, industrialized construction.

1. Introducción

La construcción prefabricada representa un porcentaje muy importante de toda la construcción civil, dadas sus enormes ventajas desde el punto de vista constructivo. La reducción de plazos de ejecución, la mejora en la calidad de la obra (por la mejora de las condiciones de trabajo) y la reducción de las incertidumbres asociadas a la desviación geométrica y estructural de la solución

respecto del proyecto son algunas de las ventajas que aporta esta solución.

La prefabricación es especialmente eficiente en estructuras habitacionales, que generalmente se constituyen a base de unos pocos grupos de elementos estructurales diferentes (pilares, forjados, zapatas, muros, etc.), constituidos por muchas unidades idénticas. En particular, la prefabricación es especialmente interesante en países en vías de desarrollo, en los que puede ser

complejo encontrar una gran cantidad de mano de obra especializada.

Un buen número de estos países se encuentran en zonas sísmicas. Esto supone un inconveniente para la prefabricación, puesto que ésta está penalizada por la normativa internacional, otorgándole menores coeficientes de reducción (R) por disipación de energía. El problema no es tanto el elemento prefabricado en sí, como las uniones entre ellos, que suelen ser menos dúctiles.

En estos casos, la forma habitual de abordar el problema sísmico consiste en utilizar aisladores, amortiguadores, disipadores sísmicos etc. [1,2]. El problema estriba en que son soluciones muy costosas, solo aptas para grandes elementos estructurales (edificios altos o instalaciones muy singulares), y no son viables económicamente para la edificación más modesta.

Se hace necesario desarrollar sistemas de disipación de energía 'low cost' capaces de ser implementados en estructuras prefabricadas más modestas, sin que suponga un incremento de coste tal que haga económicamente inviable la obra.

Otro de los problemas habituales en el diseño de estructuras frente a sismo es que, éstas, suelen quedar inservibles una vez pasado el mismo y se hace necesario demolerlas. Si bien se trata de un avance frente a la situación de que la estructura colapse durante el sismo, el coste económico para la comunidad sigue siendo muy alto. En consecuencia, es muy interesante que los sistemas de disipación de energía 'low cost' eviten los daños en la estructura, de tal forma que éstas puedan seguir siendo habitables una vez pasado el episodio sísmico.

La investigación en respuesta sísmica de las estructuras, especialmente si son de hormigón, requiere de la realización de ensayos que suelen ser complejos y costosos. Por una parte, la realización de ensayos a escala de elementos estructurales de hormigón no suele ser una opción viable ni fiable. Por otra parte, la realización de ensayos sísmicos suele requerir de instalacio-

nes costosas. Por ello se han desarrollado metodologías alternativas, más sencillas de implementar y que permiten obtener información sobre la respuesta sísmica de la estructura, aunque de forma parcial.

En primer lugar están los ensayos cuasi-estáticos o cíclicos, también llamados 'pushover', que consisten en la aplicación de una carga cíclica de muy baja frecuencia y bajo número de ciclos de amplitud creciente hasta rotura [3-6]. Este tipo de ensayos permite caracterizar la ductilidad de la estructura, así como analizar regiones muy concretas (uniones entre piezas, detalles constructivos singulares, etc.).

En segundo lugar están los ensayos pseudo-dinámicos, que son un tipo especial de ensayo cuasi-estático en el que se introducen desplazamientos en puntos determinados de la estructura [7]. La diferencia radica en que dichos desplazamientos no son conocidos antes de la prueba, sino que se calculan durante ésta mediante un software de integración paso a paso. Si bien en esencia es un ensayo estático, se trata de una técnica compleja de implementar, fundamentalmente porque se requiere equipos muy sofisticados de control adaptativo.

En tercer lugar están los ensayos en mesa sísmica o simulador sísmico, los cuales permiten introducir una verdadera excitación dinámica en la base de la estructura [8]. Es la técnica más realista para el ensayo sísmico de estructuras, ya que los desplazamientos se producen en la base a velocidad real y la estructura es solicitada por las fuerzas de inercia debidas a su propia masa. Sin embargo, se trata de un ensayo complejo por todo el equipamiento que requiere. También su interpretación es compleja porque en la respuesta sísmica intervienen un gran número de mecanismos estructurales. Por ello, este tipo de ensayos suelen ser el colofón a una campaña de ensayos mucho más extensa.

En este trabajo, se ha llevado a cabo un ensayo en mesa sísmica sobre un edificio de hormigón prefabricado a escala real, formado por dos paneles, dos forjados y una cubierta flexible. El objetivo es conocer la respuesta dinámica de

la estructura frente a sismo. En este caso, se ha tomado como referencia el sismo de 'El Centro' (1979, El Centro, California, USA). Adicionalmente, para la realización de este ensayo se ha hecho necesario diseñar una mesa sísmica unidireccional, específica para las necesidades de este trabajo de investigación, capaz de aplicar una aceleración de hasta $1 \cdot g$ a unidades estructurales de hasta 6 m de altura y hasta 40 ton de peso. El edificio, las cimentaciones, los elementos prefabricados, así como sus conexiones, han sido diseñados y calculados por ICONKRETE. Los elementos prefabricados han sido producidos por ZENET en su factoría de Escalonilla (Toledo). El ensayo ha sido realizado en el Laboratorio de Grandes Estructuras de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos.

La estructura del artículo es la siguiente: en la Sección 2 se presenta el programa experimental, en la Sección 3 se describen y comentan los resultados del ensayo y, finalmente, en la Sección 4 se muestran las conclusiones.

2. Programa experimental

En esta sección, se describen el edificio de hormigón prefabricado, la mesa sísmica y, finalmente, el procedimiento de ensayo.

2.1 Edificio prefabricado

Como se ha comentado, la unidad estructural que se ha ensayado es un edificio prefabricado de hormigón armado compuesto por dos paneles, dos forjados y una cubierta flexible; esto es, con un total de 3 alturas.

Los dos paneles están enfrentados a una distancia de 3.50 m entre caras interiores. Cada panel está fabricado con hormigón HA-30/F/20/IIa y armado con acero B 500 S, de acuerdo con los requerimientos de la Instrucción EHE-08. Sus dimensiones son 5.87 m de altura, 2.00 m de anchura y 0.16 m de espesor. Además, cada panel dispone de una zapata excéntrica de dimensiones 1.10 m x 0.30 m x 2.00 m fabricada con los mismos materiales. La zapata está rígida-

mente unida a los muros, prolongando la armadura del muro hasta su cara inferior. Los dos forjados se encuentran situados de tal forma que la cota de la primera planta con respecto al plano de apoyo es de 2.25 m, mientras que para la segunda planta es de 4.10 m. Cada forjado está constituido por una prelosa de celosía con la capa de compresión correspondiente, resultando en un canto total de 22 cm (8+14). Los forjados están fabricados, al igual que los paneles, con hormigón HA-30/F/20/IIa. En cuanto a las uniones panel-forjado, las prelosas se apoyan en los paneles sobre sendos perfiles L 150.150.15, los cuales están a su vez anclados con tacos tipo HILTI HST3-M16 cada 20 cm. Por su parte, la capa de compresión está conectada a los paneles verticales mediante barras $\varnothing 12$ que han quedado previamente embebidas en éstos. Cabe destacar que el forjado es autoportante, por lo que no se requiere ningún apeo durante el hormigonado. La cubierta está situada a una cota de 5.87 m; es decir, al nivel de la coronación de los paneles. Se trata de una cubierta ligera formada por chapa grecada de aluminio, la cual se encuentra atornillada a dos vigas transversales compuestas por perfiles IPE. Dichos perfiles están conectados a los paneles mediante una solución de gancho, a través de piezas auxiliares.

En la Figura 1, se observa la vista lateral del ensayo, junto con la definición geométrica de sus elementos principales.

2.2 Mesa sísmica

Con el objetivo de llevar a cabo este ensayo, se diseñó y fabricó una mesa sísmica unidireccional específica para este ensayo.

La mesa sísmica está compuesta por una losa de fundición y tiene unas dimensiones en planta de 4.14 m x 2.87 m. Se apoya sobre un total de 6 aparatos de apoyo cilíndricos de neopreno zunchado de 350 mm de diámetro y 137 mm de altura.

Para aplicar las cargas dinámicas, la mesa sísmica está dotada de un actuador dinámico de doble efecto tracción-compresión, MTS, de 1,000 kN de carga y 250 mm de recorrido total.

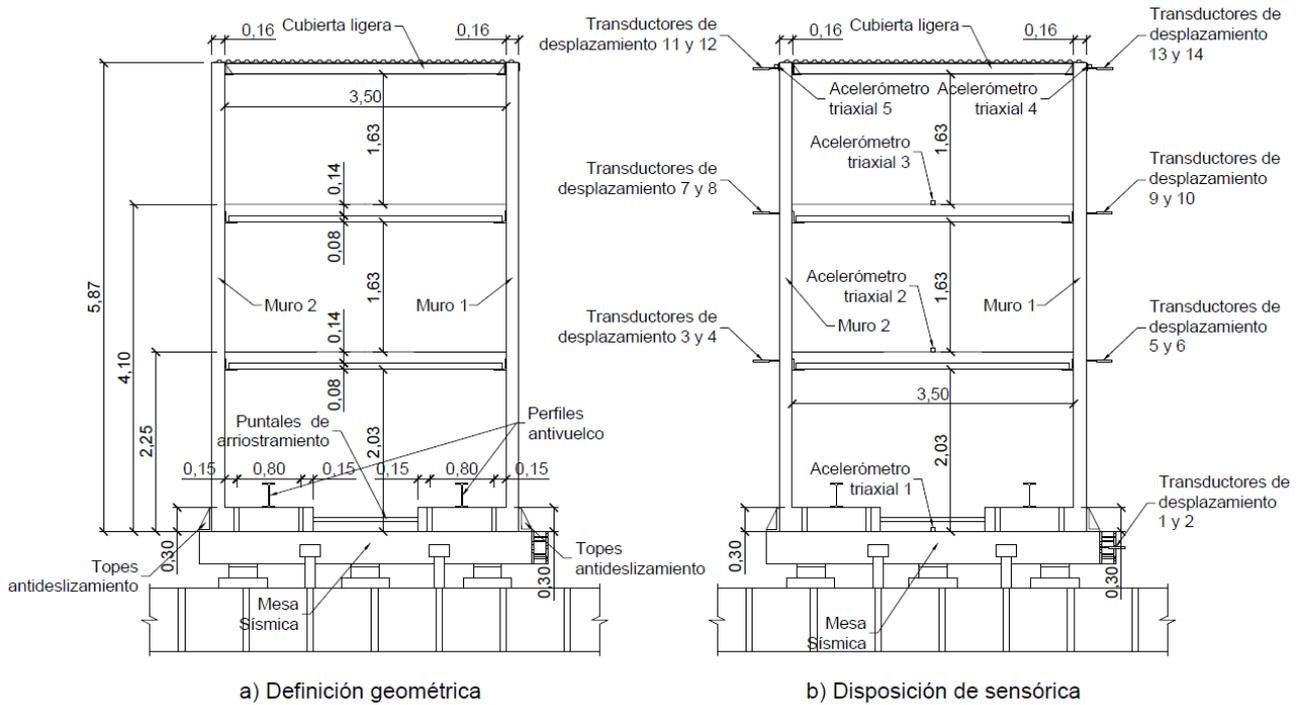


Figura 1. Definición geométrica de los principales elementos de ensayo y disposición de sensórica.

Este actuador se encuentra en posición horizontal, conectado a la mesa sísmica a la altura de su plano medio y unido al muro de reacción del laboratorio. Adicionalmente, la mesa dispone de un sistema de guiado longitudinal para evitar movimientos transversales no deseados y de un sistema antivuelco.

El edificio se encuentra simplemente apoyado sobre la mesa sísmica durante el ensayo. Al objeto de evitar un eventual deslizamiento y/o vuelco del mismo durante el ensayo se ha diseñado un sistema de topes estructurales y vigas metálicas antivuelco.

En la Figura 2, se muestra una imagen de la mesa sísmica en la que se observan todos los elementos descritos anteriormente.

2.3 Procedimiento de ensayo

El ensayo consiste en la aplicación de una serie de cargas de naturaleza dinámica. Para ello, se ha tomado como referencia el sismo de ‘El Centro’ (1979, El Centro, California, USA). En concreto, se ha empleado el acelerograma correspondiente a una orientación de 220°, puesto que se trata de la más desfavorable en términos de aceleraciones máximas (Figura 3). Los datos han sido obtenidos del USGS (*U.S. Geological Survey, U.S. Department of Interior, U.S. Government*).



Figura 2. Mesa sísmica, junto con su utillaje principal.

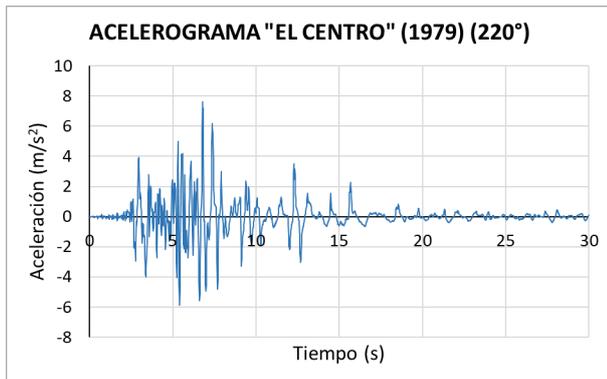


Figura 3. Acelerograma del sismo empleado.

El acelerograma se transforma en una señal desplazamiento – tiempo que es la que se introduce al software de gestión del actuador dinámico (Figura 4). La curva desplazamiento – tiempo se obtiene, en primer lugar, por doble integración del acelerograma y posteriormente se ajusta experimentalmente mediante la medida real de la aceleración en la mesa sísmica y su correlación con el acelerograma que se desea obtener.

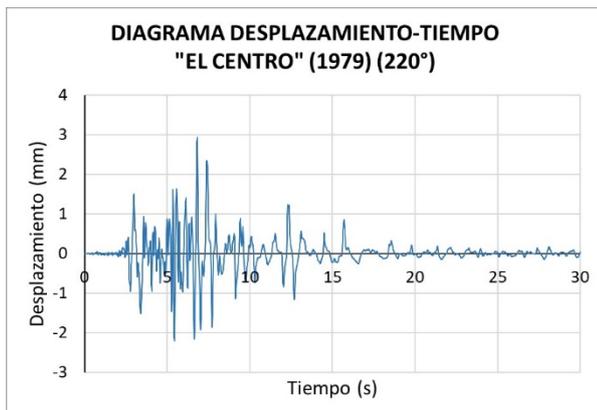


Figura 4. Diagrama desplazamiento-tiempo corregido del sismo empleado.

Además, para caracterizar la respuesta sísmica del sistema es necesario medir una serie de parámetros. Los parámetros medidos han sido la carga y el desplazamiento del actuador, los desplazamientos horizontales de la mesa sísmica, los desplazamientos horizontales del edificio a la altura de los forjados y la cubierta, las aceleraciones de la mesa, y las aceleraciones del edificio a la altura de los forjados y la cubierta.

Las aceleraciones se han medido en las tres direcciones del espacio.

En cuanto a la sensórica dispuesta, para medir la carga se ha empleado la célula de carga MTS que posee el actuador dinámico anteriormente mencionado, con un rango de $\pm 1,000$ kN y precisión de 0.1 kN. La medida del desplazamiento del actuador se ha realizado mediante el transductor incorporado en el actuador, marca MTS, con un rango de ± 250 mm y una precisión de 0.01 mm. Todos los desplazamientos horizontales se han medido utilizando un total de 14 transductores de desplazamiento de tipo LVDT, de 100 mm de recorrido y con una precisión de 0.01 mm.



Figura 5. Disposición del ensayo previa a su inicio.

Las aceleraciones se han medido con un total de 5 acelerómetros triaxiales MEMS DC, con un rango de frecuencias de 0-700 Hz, una

precisión de 0.001 g y un valor máximo de aceleración de 2 g . La disposición exacta de toda la sensorica descrita se muestra en las Figura 1. Además, en la Figura 5 se observa una imagen del ensayo momentos antes de su comienzo.

Adicionalmente, se ha considerado una carga muerta de 1.50 kN/m^2 , que simula las cargas permanentes de la estructura más la fracción frecuente de la sobrecarga de uso, que puede estar presente en la estructura durante un evento sísmico. Dicha carga se ha materializado mediante depósitos de agua tipo GRG tal y como se observa en la Figura 5.

3. Resultados y discusión

En esta sección, se muestran los resultados más relevantes que permiten caracterizar la respuesta sísmica del sistema; es decir, la carga y el desplazamiento del actuador, los movimientos horizontales de la mesa y el edificio, y las aceleraciones de la mesa y el edificio.

3.1 Carga y desplazamiento del actuador

En las Figuras 6 y 7, se muestran los diagramas carga-tiempo y desplazamiento-tiempo del actuador. Estos diagramas son muy útiles a efectos de verificación del comportamiento del actuador. En el segundo de ellos, se ha comparado la señal de entrada (es decir, el diagrama desplazamiento-tiempo descrito en la Sección 2) con la respuesta real del actuador.

Se aprecia claramente que, salvo en el caso de algunos máximos relativos, en los que el actuador no es capaz de reproducir plenamente, su comportamiento es satisfactorio.

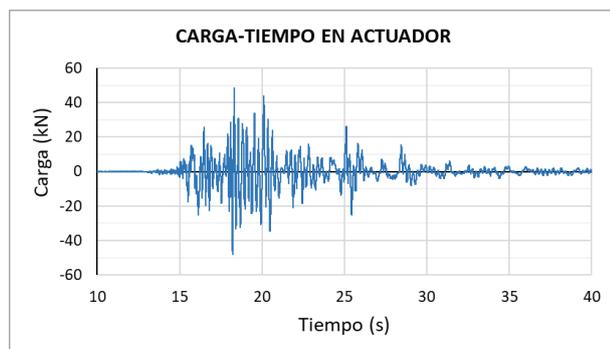


Figura 6. Diagrama carga-tiempo en actuador.



Figura 7. Diagrama desplazamiento-tiempo en actuador.

En cuanto a los valores representativos de los diagramas, la carga máxima alcanzada en valor absoluto es de 48.42 kN , mientras que el desplazamiento máximo en valor absoluto es de 2.56 mm .

3.2 Desplazamientos horizontales de la mesa y el edificio

En las Figuras 8 a 11, se muestran los diagramas con los desplazamientos. En cada uno de ellos se representa el valor promedio de los desplazamientos medidos por los transductores correspondientes (Figura 1). Es decir, para el desplazamiento de la mesa se han tomado los datos del LVDT-1 y el LVDT-2, para el desplazamiento del forjado 1 se han considerado los datos del LVDT-3, LVDT-4, LVDT-5 y LVDT-6, y así sucesivamente.

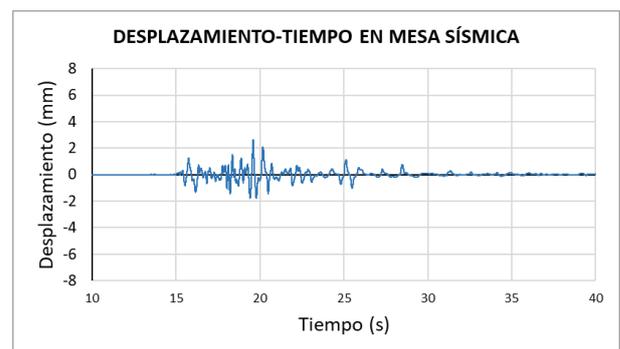


Figura 8. Desplazamiento-tiempo en mesa sísmica.

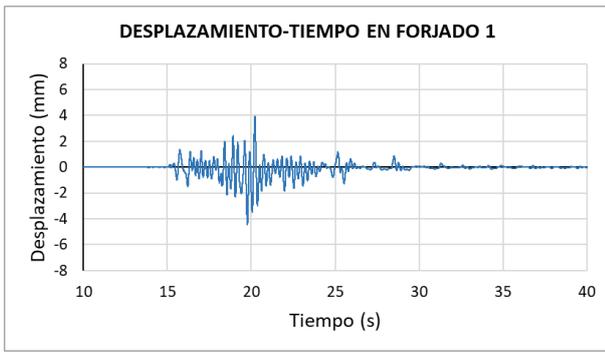


Figura 9. Desplazamiento-tiempo en forjado 1.

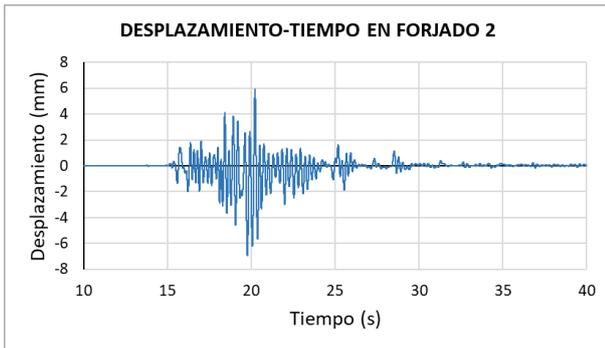


Figura 10. Desplazamiento-tiempo en forjado 2.

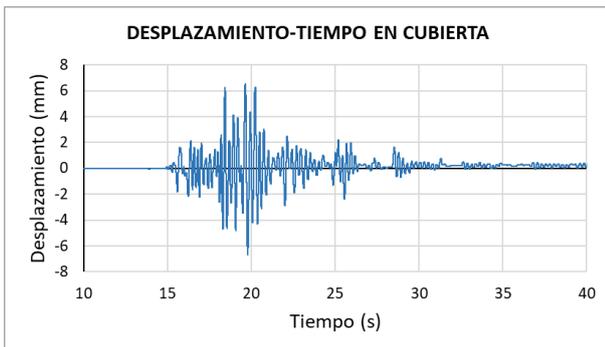


Figura 11. Desplazamiento-tiempo en cubierta

Estas figuras muestran algunos resultados interesantes. Por un lado, se observa que los desplazamientos de la mesa son muy similares a los del actuador. Esto es un indicador claro de la calidad del ensayo, puesto que las pérdidas dinámicas no son especialmente relevantes, lo cual es de destacar dado el complejo sistema formado por el edificio, el actuador, el utillaje y el muro de reacción. De hecho, el desplazamiento máximo de la mesa es de 2.62 mm, un valor muy similar al máximo equivalente del actuador.

Por otro lado, en cuanto a los desplazamientos del edificio, se observa que los diagra-

mas aumentan de forma prácticamente homotética desde el forjado 1 hasta la cubierta. En este sentido, los desplazamientos máximos en valor absoluto son de 3.88 mm (forjado 1), 5.90 mm (forjado 2) y 6.66 mm (cubierta). Se ha comprobado que el daño generado por el sismo se produce principalmente en las uniones panel-forjado, ya que no se observa fisuración en otras zonas del edificio. La mayor parte de la disipación energética del sistema se lleva a cabo a través de la formación de rótulas en dichas uniones.

3.3 Aceleraciones de la mesa y el edificio

En las Figuras 12 a 15, se muestran los diagramas con las aceleraciones medidas. En el caso de las aceleraciones de la cubierta del edificio, dado que se han dispuesto dos acelerómetros (AC-4 y AC-5), se han considerado los valores medios.

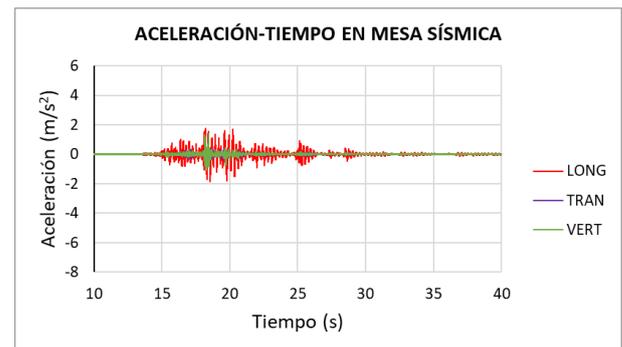


Figura 12. Aceleración-tiempo en mesa sísmica.

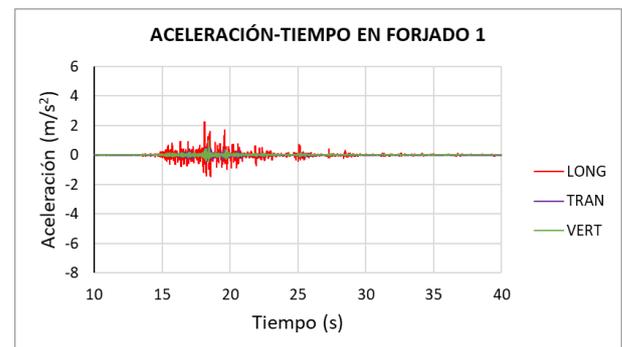


Figura 13. Aceleración-tiempo en forjado 1.

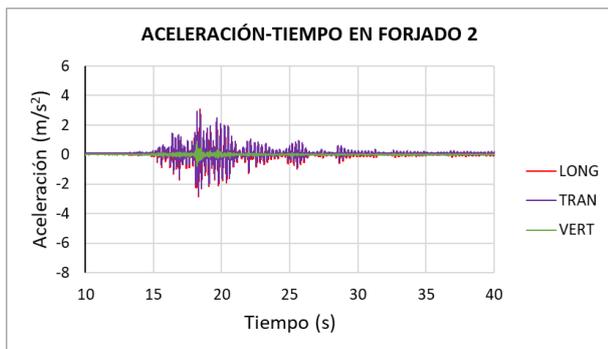


Figura 14. Aceleración-tiempo en forjado 2.

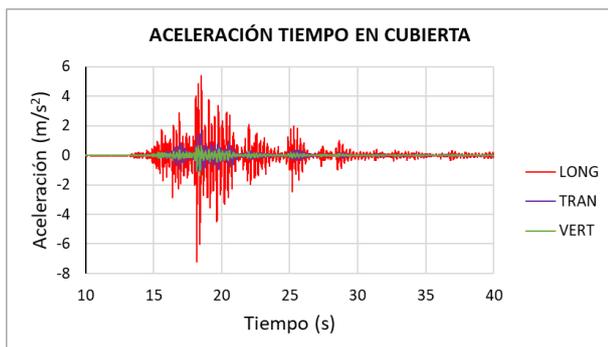


Figura 15. Aceleración-tiempo en cubierta.

Se pueden realizar algunos comentarios acerca de los resultados obtenidos. En primer lugar, se puede observar un fenómeno de amplificación dinámica, por el cual la aceleración resultante en la estructura es mayor que la aceleración del movimiento que se ha aplicado en su base; es decir, en la mesa sísmica. Además, se aprecia que esta amplificación crece con la distancia al plano de apoyo. En concreto, la aceleración longitudinal máxima absoluta en la mesa es de 1.83 m/s^2 , mientras que en el edificio los valores máximos son de 2.26 m/s^2 en el forjado 1, 3.06 m/s^2 en el forjado 2 y, finalmente, 7.24 m/s^2 en la cubierta.

En cuanto a las aceleraciones medidas en las otras direcciones del espacio (transversal y vertical), se observa que tienen menor relevancia. Únicamente en el caso del forjado 2 las aceleraciones transversales son del mismo orden que las longitudinales. Una posible explicación a este hecho es que el sismo introducido puede estar excitando algún modo de vibración de la estructura cuya deformada implica un cierto movimiento transversal en ese nivel de la estructura.

Otra forma de caracterizar la respuesta sísmica de un sistema es a través del espectro de respuesta elástica, que relaciona el periodo natural de vibración de una estructura con las aceleraciones máximas que un determinado sismo es capaz de generar en dicha estructura. Habitualmente, en la normativa sísmica de cada país se incluyen espectros de respuesta elástica de referencia, considerando un índice de amortiguamiento respecto al crítico del 5%. En el caso de España, en la NCSE-02 [9] se recoge el mostrado en la Figura 16, que se puede ajustar en función de la peligrosidad sísmica y del tipo de terreno de la zona de estudio. En este caso, en el eje de ordenadas no aparece la aceleración, sino ' $\alpha(T)$ ', que representa el cociente entre la aceleración máxima absoluta de un oscilador elástico lineal ' S_a ' y la máxima aceleración del movimiento que se aplica en su base ' a '. Por ello, conociendo el valor de ' a ', resulta sencillo cambiar a unidades de aceleración absoluta.

Alternativamente, conocido el acelerograma de un sismo es posible obtener su espectro de respuesta. En este caso esto se ha llevado a cabo mediante el software AcelSin (J.A. Agudelo, Estructurando.net). En este caso, el eje vertical del espectro de respuesta es la aceleración.

En la Figura 17 se comparan el espectro de respuesta del sismo aplicado, con el espectro de respuesta de referencia de la norma NCSE-02. Para que la comparación sea posible es necesario modificar el eje vertical de este espectro de respuesta, pasando de ' $\alpha(T)$ ' a aceleración. Para ello se ha multiplicado dicho espectro por 1.83 m/s^2 que es la aceleración máxima absoluta de la mesa.

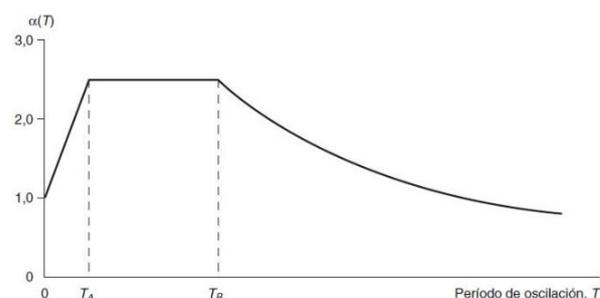


Figura 16. Espectro de respuesta elástica dado por la norma NCSE-02.

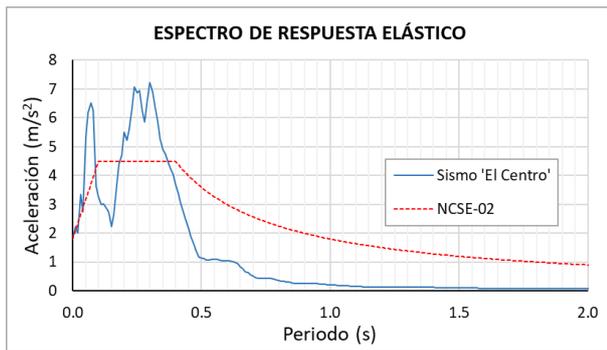


Figura 17. Espectro de respuesta elástica del sismo aplicado y comparación con el de la norma NCSE-02.

Se pueden extraer algunas conclusiones interesantes a partir de esta figura. En primer lugar, la máxima aceleración que es capaz de generar este sismo es de 7.22 m/s^2 para una estructura con un período natural de vibración de 0.3 s ; es decir, con una frecuencia natural de 3.33 Hz . Por tanto, se trata de un valor prácticamente idéntico a la máxima aceleración en la cubierta del edificio, que es de 7.24 m/s^2 . En consecuencia, esto indica que el edificio está sometido a los pésimos esfuerzos dinámicos que es capaz de generar el sismo de ‘El Centro’. Este aspecto es muy relevante, ya que se demuestra que el sismo de referencia elegido genera la respuesta pésima sobre la estructura. En segundo lugar, de lo anterior se deduce que la frecuencia natural del edificio se encuentra en el rango de $3.33\text{-}4.00 \text{ Hz}$; es decir, en el entorno del máximo del espectro de respuesta elástica (rango de periodos de $0.25\text{-}0.30 \text{ s}$). Finalmente, se observa que el espectro del sismo de ‘El Centro’ no se encuentra dentro de la envolvente del espectro de referencia de la norma NCSE-02, sino que es más agresivo. En el caso de la norma española, para el rango de periodos en el que se encuentra el edificio de estudio, se supone una amplificación de la aceleración de respuesta del sistema de 2.5 veces la aceleración en la base (4.53 m/s^2 frente a 1.81 m/s^2). Sin embargo, se observa que para el espectro del sismo de ‘El Centro’, dicha amplificación alcanza 4 veces la aceleración en la base (7.22 m/s^2 frente a 1.81 m/s^2). Por lo tanto, se trata de un evento muy singular que excede el espectro de respuesta

de la norma NCSE-02. No obstante, cabe destacar que tampoco es su intención, puesto que este tipo de sismos no son nada frecuentes en España.

4. Conclusiones

En este trabajo, se ha llevado a cabo un ensayo en mesa sísmica sobre un edificio de hormigón prefabricado a escala real, formado por dos paneles, dos forjados y una cubierta flexible. El objetivo es conocer la respuesta dinámica de la estructura frente a un sismo de referencia. En este caso, se ha considerado el sismo de ‘El Centro’ (1979, El Centro, California, USA) con una orientación de 220° .

Para ello, se ha diseñado previamente una mesa sísmica unidireccional, capaz de aplicar una aceleración de hasta $1 \cdot g$ a unidades estructurales de hasta 6 m de altura y hasta 40 ton de peso. En cuanto al procedimiento de ensayo, consiste en la aplicación del acelerograma correspondiente al sismo de referencia. Sin embargo, dado que el ensayo se realiza con control en desplazamiento, fue necesario realizar un tratamiento numérico del acelerograma del sismo para transformarlo en un diagrama desplazamiento-tiempo.

Los parámetros medidos durante el ensayo han sido la carga y el desplazamiento del actuador, los desplazamientos horizontales de la mesa sísmica, los desplazamientos horizontales del edificio a la altura de los forjados y la cubierta, las aceleraciones de la mesa, y las aceleraciones del edificio a la altura de los forjados y la cubierta.

Las principales conclusiones que se pueden obtener a partir de los resultados son:

- La mesa sísmica ha mostrado un comportamiento satisfactorio, siendo capaz de reproducir el sismo de diseño de forma fidedigna.
- En cuanto a los desplazamientos del edificio, se observa que aumentan de forma prácticamente homotética desde el forjado 1 hasta la cubierta.

- La mayor parte de la disipación energética del sistema se lleva a cabo a través de la formación de rótulas en las uniones panel-forjado. De hecho, no se ha observado fisuración significativa en otras zonas críticas de la estructura, como el arranque de los paneles.
- Se observa un fenómeno de amplificación dinámica, por el cual la aceleración longitudinal resultante en la estructura es mayor que la aceleración aplicada en la mesa. Además, se aprecia que esta amplificación crece con la distancia al plano de apoyo. En cuanto a las aceleraciones medidas en las otras direcciones del espacio (transversal y vertical), se observa que tienen menor relevancia.
- De acuerdo con el espectro de respuesta del sismo aplicado, la máxima aceleración que es capaz de generar dicho sismo es de 7.22 m/s^2 para una estructura con un período natural de vibración de 0.3 s , que coincide con la máxima aceleración en la cubierta del edificio, que es de 7.24 m/s^2 . En consecuencia, esto indica que el edificio está sometido a los peores esfuerzos dinámicos que es capaz de generar el sismo de 'El Centro'.

Por lo tanto, este trabajo ha permitido validar el funcionamiento de la mesa sísmica diseñada por los autores. Además, también se ha comprobado que el comportamiento del edificio ensayado frente a un sismo especialmente desfavorable es muy bueno, presentando disipación energética únicamente en las zonas destinadas a tal fin, de forma que no se compromete su seguridad estructural.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida por la empresa ICONKRETE 2012, S.L., dentro del proyecto europeo EUROSTAT-EUREKA SEISMPRECAST.

Referencias

[1] Takeuchi, T., Chen, X., and Matsui, R. (2015). "Seismic performance of controlled spine frames with energy-dissipating members." *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 51–65.

[2] Parastesh, H., Hajirasouliha, I., and Ramezani, R. (2014). "A new ductile moment-resisting connection for precast concrete frames in seismic regions: An experimental investigation." *Engineering Structures*, 70, 144–157.

[3] Yang, K-H, Seo, E-A, and Hong, S-H (2016). "Cyclic flexural tests of hybrid steel–precast concrete beams with simple connection elements." *Engineering Structures*, 118, 344–356.

[4] Zoubek, B., Isakovic, T., Fahjan, Y., and Fischinger, M. (2013). "Cyclic failure analysis of the beam-to-column dowel connections in precast industrial buildings." *Engineering Structures*, 52, 179–191.

[5] Lu, C., Dong, B., Pan, J., Shan, Q., Hanif, A., and Yin, W. (2018) "An investigation on the behavior of a new connection for precast structures under reverse cyclic loading." *Engineering Structures*, 169, 131–140.

[6] Holden, T., Restrepo, J., and Mander, B. (2003). "Seismic Performance of Precast Reinforced and Prestressed Concrete Walls." *J. Struct. Eng.*, 129(3), 286–296.

[7] Bournas, D.A., Negro, P., and Molina, F.J. (2013). "Pseudodynamic tests on a full-scale 3-storey precast concrete building: Behavior of the mechanical connections and floor diaphragms." *Engineering Structures*, 57, 609–627.

[8] García, R., Hajirasouliha, I., and Pilakoutas, K. (2010). "Seismic Behavior Of Deficient RC Frames Strengthened With CFRP Composites." *Engineering Structures*, 32(10), 3075–3085.

[9] NCSE-02, "Norma de Construcción Sismo-resistente: Parte general y edificación" (2009). Ministerio de Fomento, Gobierno de España.