

ENSAYOS SÍSMICOS SOBRE EDIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN INDUSTRIALIZADA

SEISMIC TESTS ON INDUSTRIALIZED CONSTRUCTION BUILDINGS

Jesús Mínguez Algarra⁽¹⁾, Miguel Angel Vicente Cabrera⁽²⁾, Dorys González Cabrera⁽³⁾, Álvaro Mena Alonso⁽⁴⁾, Jorge Franco Rey⁽⁵⁾

¹ Universidad de Burgos, Burgos, España, jminguez@ubu.es

² Universidad de Burgos, Burgos, España, mvicente@ubu.es

³ Universidad de Burgos, Burgos, España, dgonzalez@ubu.es

⁴ Universidad de Burgos, Burgos, España, amena@ubu.es

⁵ Iconcrete 2000 S.L. Madrid, España, jorge.franco@iconcrete.com

RESUMEN

La edificación modular de viviendas, fundamentada en el uso intensivo de componentes estructurales prefabricados —tales como cimentaciones, paneles estructurales de fachada y forjados—, ofrece numerosas ventajas desde el punto de vista constructivo, entre las que destacan la reducción significativa del tiempo de ejecución y un mayor control sobre la calidad final del producto.

Esta tipología constructiva resulta especialmente competitiva en países con recursos limitados, donde la disponibilidad de mano de obra cualificada para sistemas convencionales puede representar una dificultad considerable.

No obstante, su aplicación en zonas de elevada actividad sísmica sigue siendo reducida, debido principalmente a que este tipo de estructuras presentan una elevada rigidez y una limitada ductilidad, lo que genera importantes esfuerzos durante los eventos sísmicos. Por otro lado, las soluciones tradicionales basadas en dispositivos disipadores de energía suelen implicar costes elevados, lo cual restringe su implementación a gran escala en regiones con bajos recursos económicos. En este contexto, se hace imprescindible el desarrollo de soluciones de disipación energética de bajo costo que, además, puedan ser sustituidas con facilidad tras la ocurrencia de un sismo.

En el Laboratorio de Grandes Estructuras de Obra Civil de la Universidad de Burgos se han llevado a cabo ensayos sísmicos a escala real sobre unidades estructurales completas —constituidas por cimentaciones y paneles estructurales prefabricados, así como por forjados—, con el propósito de evaluar la capacidad de disipación de energía del conjunto

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema, junto con los dispositivos de disipación desarrollados, garantiza bajos niveles de carga horizontal equivalente, lo que se traduce en menores esfuerzos sobre los elementos prefabricados y, en consecuencia, en un reducido nivel de daño estructural.

Palabras clave: Ensayos sísmicos, construcción industrializada, diseño sísmico.

ABSTRACT

Modular housing construction, based on the intensive use of prefabricated structural components —such as foundations, structural façade panels, and floor slabs—, offers numerous advantages from a construction standpoint, including significantly shorter execution times and improved control over the final product quality.

This approach is particularly competitive in countries with limited resources, where finding skilled labor for conventional construction methods can pose considerable challenges.

However, its application in seismic regions remains limited, mainly because such structural systems tend to exhibit high stiffness and low ductility, which result in significant seismic forces. Moreover, conventional solutions relying on seismic dampers or similar devices are often prohibitively expensive, making large-scale implementation unfeasible in low-income areas. Therefore, it becomes essential to develop low-cost energy dissipation systems that can also be easily replaced after an earthquake.

At the Large Civil Engineering Structures Laboratory of the University of Burgos, full-scale seismic tests have been conducted on complete structural units composed of prefabricated foundations, structural panels, and floor slabs, with the objective of assessing the overall energy dissipation capacity of the system

For this purpose, a unidirectional shaking table was designed and built, capable of applying accelerations of up to 1 g to structural elements up to 10 meters high and weighing up to 40 tons.

The results indicate that the system, including the specifically designed dissipation devices, ensures low equivalent horizontal load levels, which in turn lead to reduced stresses on the prefabricated components and consequently to minimal structural damage.

Keywords: Seismic tests, industrialized construction, seismic design.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción prefabricada tiene un peso creciente en la edificación civil gracias a ventajas como la rapidez de ejecución, la mejora en la calidad y la reducción de desviaciones respecto al proyecto. Es especialmente útil en viviendas, donde se repiten pocos tipos de elementos estructurales.

En países en desarrollo, donde la mano de obra especializada es limitada, la prefabricación resulta aún más atractiva. Sin embargo, en zonas sísmicas presenta dificultades, ya que las normativas reducen los coeficientes de disipación de energía debido a la menor ductilidad de las uniones.

La forma habitual de abordar el problema sísmico consiste en utilizar aisladores, amortiguadores, disipadores sísmicos etc. (Takeuchi et al., 2015) y (Parastesh et al., 2015). 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.

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 instalaciones 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 (Yang et al., 2016) (Zoubek et al., 2013) (Lu et al., 2018) (Holden et al., 2003). 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 (Bournas et al., 2013). 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 (García et al., 2010). 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-g a unidades estructurales de hasta 6 m de altura y hasta 40 ton de peso.

2. OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objetivo principal analizar la respuesta dinámica de una estructura prefabricada de hormigón armado sometida a excitaciones sísmicas, mediante la realización de ensayos a escala real sobre una unidad estructural completa.

De manera específica, los objetivos particulares que se persiguen son evaluar el comportamiento sísmico de un edificio prefabricado de tres alturas, con el fin de determinar su capacidad de disipación de energía y su nivel de seguridad estructural frente a un sismo de referencia. Validar el diseño y funcionamiento de una mesa sísmica unidireccional especialmente desarrollada para la investigación, capaz de aplicar aceleraciones de hasta 1-g sobre estructuras de gran tamaño y peso. Caracterizar la respuesta dinámica del sistema estructural, mediante la medición y análisis de parámetros tales como desplazamientos, aceleraciones y cargas actuantes durante el ensayo. Comprobar la eficacia de las uniones prefabricadas, identificando las zonas de mayor concentración de esfuerzos y los mecanismos de disipación de energía. Contribuir al desarrollo de soluciones constructivas industrializadas que permitan mejorar el comportamiento sísmico de estructuras prefabricadas, con especial atención a aquellas de bajo coste y fácil implementación en países con recursos limitados.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Edificio prefabricado

La unidad ensayada es un edificio de hormigón armado con dos paneles, dos forjados y una cubierta ligera, alcanzando tres alturas.

- Paneles de 5.87 m de altura, 2.00 m de ancho y 0.16 m de espesor, con zapatas rígidamente unidas.
- Forjados de prelosa con capa de compresión (22 cm de canto total).
- Cubierta ligera de chapa grecada sobre vigas IPE.

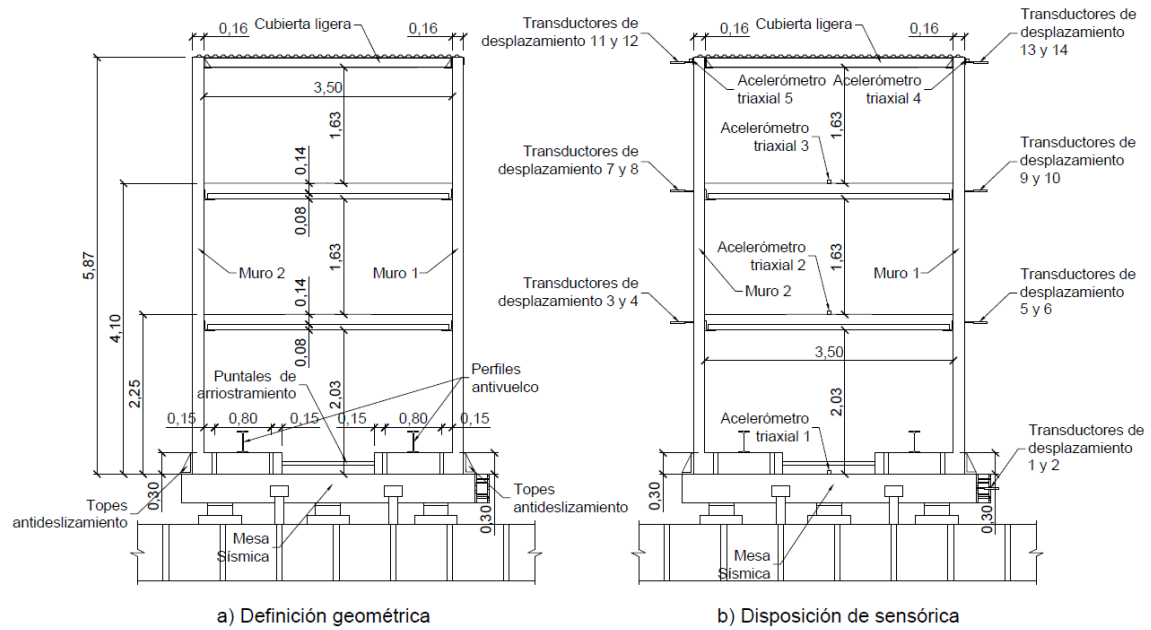


Figura 29. Definición geométrica de los principales elementos de ensayo y disposición de sensórica.

3.2 Mesa sísmica

La mesa diseñada es unidireccional, con losa de fundición de 4.14 m x 2.87 m, apoyada en seis soportes de neopreno.

- Actuador dinámico MTS de 1,000 kN y 250 mm de recorrido.
- Sistema de guiado longitudinal y antivuelco.
- El edificio se apoyó libremente sobre la mesa, con topes y vigas metálicas de seguridad.



Figura 30. Mesa sísmica, junto con su utillaje principal

3.3 Procedimiento de ensayo

Se aplicó el acelerograma del sismo de *El Centro* (orientación 220°), transformado en señal desplazamiento-tiempo para el control del actuador.

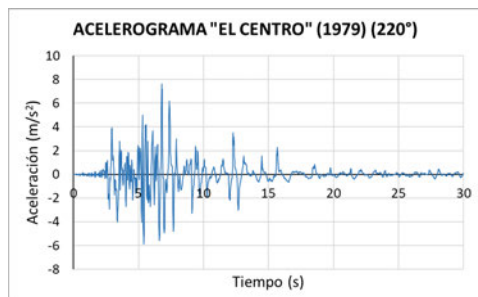


Figura 31. Acelerograma del sismo empleado.

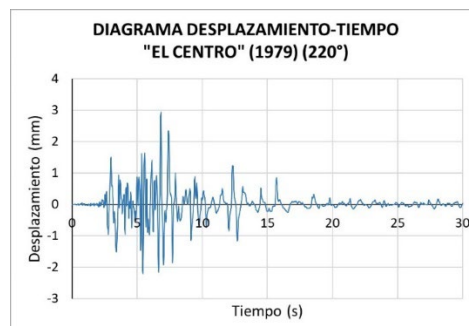


Figura 32. Diagrama desplazamiento-tiempo corregido del sismo empleado

Se midieron:

- Carga y desplazamiento del actuador.
- Desplazamientos horizontales de mesa y edificio.
- Aceleraciones en mesa, forjados y cubierta.



Figura 33. 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 sensórica 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/m², 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.

4. 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.

4.1 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.

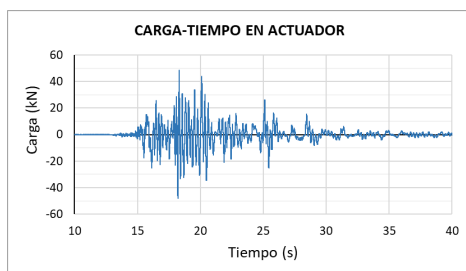


Figura 34. Diagrama carga-tiempo en actuador.

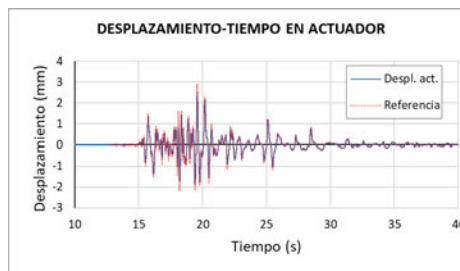


Figura 35. Diagrama desplazamiento-tiempo en actuador

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.

4.2 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.

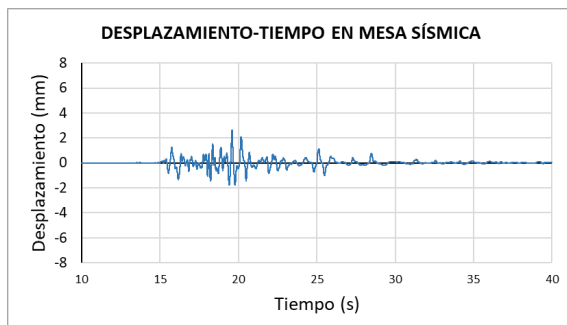


Figura 36. Desplazamiento-tiempo en mesa sísmica

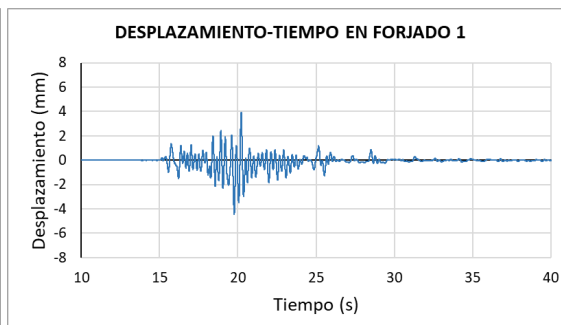


Figura 37. Desplazamiento-tiempo en forjado 1.

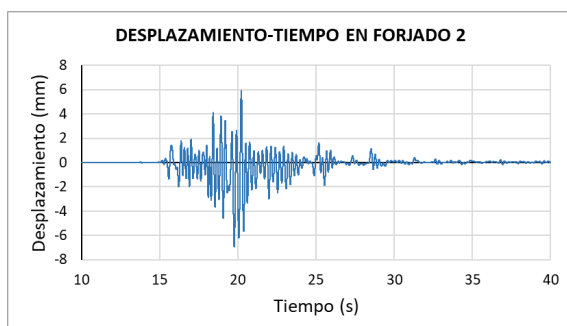


Figura 38. Desplazamiento-tiempo en forjado 2.

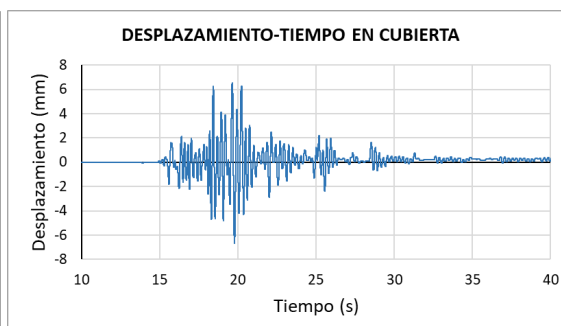


Figura 39. Desplazamiento-tiempo en cubierta

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 diagramas 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.

4.3 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.

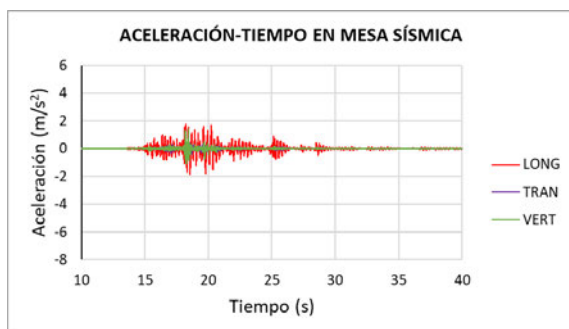


Figura 40. Aceleración-tiempo en mesa sísmica.

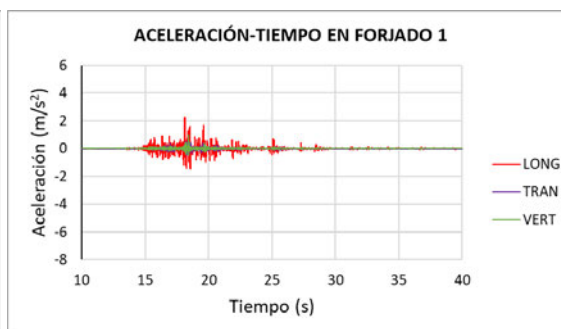


Figura 41. Aceleración-tiempo en forjado 1.

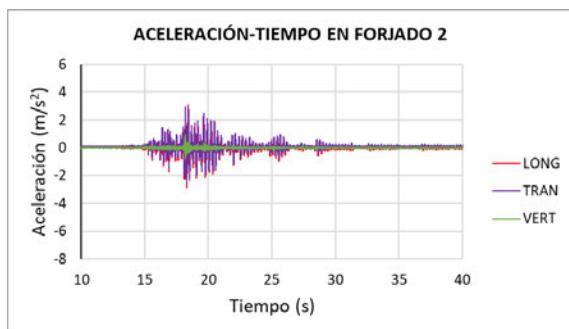


Figura 42. Aceleración-tiempo en forjado 2.

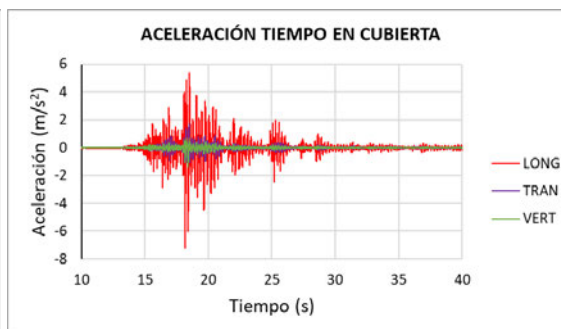


Figura 43. Aceleración-tiempo en cubierta.

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 (Ministerio de Fomento, 2009) 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.

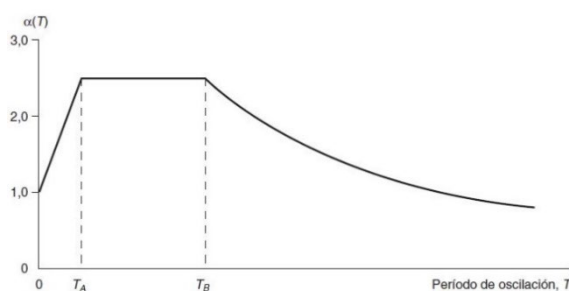


Figura 44. Espectro de respuesta elástica dado por la norma NCSE-02.

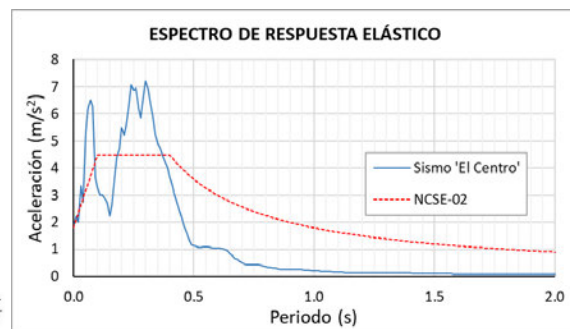


Figura 45. Espectro de respuesta elástico del sismo aplicado y comparación con el de la norma NCSE-02.

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 elástico (rango de períodos 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 períodos 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.

5. 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 $1\text{-}g$ 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 pésimos 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 BIBLIOGRÁFICAS

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.002>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.001>
- 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 <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.045>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.028>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.041>
- Holden, T., Restrepo, J., and Mander, B. (2003). "Seismic Performance of Precast Reinforced and Prestressed Concrete Walls." *J. Struct. Eng.*, 129(3), 286–296. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:3\(286\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:3(286))

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.046>
- García, R., Hajirasouliha, I., and Pilakoutas, K. (2010). "Seismic Behavior of Deficient RC Frames Strengthened with CFRP Composites." *Engineering Structures*, 32(10), 3075–3085. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.05.026>
- NCSE-02, "Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación" (2009). Ministerio de Fomento, Gobierno de España. https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/0820200.pdf