

Ensayo sobre una estructura sismorresistente utilizando un simulador sísmico de 6 grados de libertad

Seismic Test on a Earthquake-Resistant Structure by Using a Seismic Simulator with Six Degrees of Freedom

Eduardo López Rodríguez^{1*}

Resumen

La simulación sísmica es hoy día el principal método para estudiar el comportamiento real de las estructuras frente a las acciones sísmicas sin necesidad de esperar a la ocurrencia de un evento sísmico real. Para llevar a cabo dicha simulación es necesario contar con el equipo básico para reproducir dichas acciones que es la mesa vibrante de varios grados de libertad. En el presente artículo se expone el proceso para la simulación sísmica de una estructura de ensayo real aplicando los parámetros de excitación definidos en la normativa de construcción sismorresistente NCSE-02. La utilización de mesas vibrantes de varios grados de libertad parece el método más adecuado para el ensayo de simulación sísmica considerando varios ejes de excitación.

Palabras clave: dinámica; simulador sísmico; NCSE-02; ingeniería sísmica;

Abstract

Nowadays, the seismic simulation is the main method to study the actual behavior of structures against seismic actions without waiting for the occurrence of a real seismic event. In order to carry out this simulation, it is necessary to have the basic equipment to reproduce these actions, such as the vibrating table with several degrees of freedom. This article exposes the process for seismic simulation of an actual test structure using the excitation parameters, which have been defined in the Earthquake-Resistant Construction Standard NCSE-02. The use of seismic simulator devices of several degrees of freedom seems to be the most appropriate method for testing simulated seismic excitation considering several axes.

Key Words: dynamic; seismic simulator; NCSE-02; earthquake engineering;

1. INTRODUCCIÓN

España, si bien, no está en un área con alta probabilidad de que se produzcan grandes terremotos, sí se localizan determinadas zonas con una actividad sísmica importante.

La Península Ibérica se encuentra situada en el borde sudoeste de la placa Euroasiática en su colisión con la placa africana.

Si observamos el mapa de peligrosidad sísmica, las regiones con mayor riesgo sísmico son Pirineos, la costa de Levante y Andalucía occidental.

El análisis experimental es hoy día el método más fiable de caracterizar el comportamiento dinámico de las estructuras, tanto para determinar los parámetros reales que definen la respuesta (rigidez y amortiguamiento), como para valorar y contrastar métodos de cálculo numérico.

El equipo básico a utilizar, especialmente para simular acciones sísmicas, es la mesa vibrante con movimiento servocontrolado de todos sus grados de libertad.

En el presente artículo se describe el proceso de ensayo dinámico sobre una estructura a escala real para verificar su comportamiento frente a las acciones sísmicas.

El ensayo se ha realizado en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, en las instalaciones de análisis

experimental del Área de Dinámica de Estructuras, proporcionando por un consorcio de empresas (SANDO CONSTRUCCIONES S.A., IELCO S.A., MESUREX S.A. y VERA S.A.), el espécimen a ensayar. La estructura está constituida por un sistema de paneles prefabricados de hormigón con capacidad sismorresistente ensamblado en su totalidad mediante uniones secas, desarrollado dentro del proyecto IESEI (Investigación sobre Edificación Sismorresistente, Energéticamente Eficiente e Inteligente en su Ciclo de Vida).

2. ENSAYO REALIZADO

El prototipo para el ensayo está formado por paneles prefabricados de hormigón armado que se ensamblan en el simulador sísmico formando una estructura de edificación prefabricada con dos niveles de forjado. El peso total del espécimen es de 10 t con una altura de unos 5,50 metros.

El ensayo realizado ha consistido en:

- Definición de las acciones sísmicas horizontales (longitudinales) para el emplazamiento de la estructura, conforme a la normativa española de construcción sismorresistente NCSE-02, generándose los acelerogramas compatibles con los espectros de respuesta, con duración, envolvente y número de acelerogramas según la normativa. Se generaron un total

* Autor de contacto: eduardo.lopez@cedex.es

¹ Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX – Ministerio de Fomento) Alfonso XII, 3-5, 28014 Madrid.

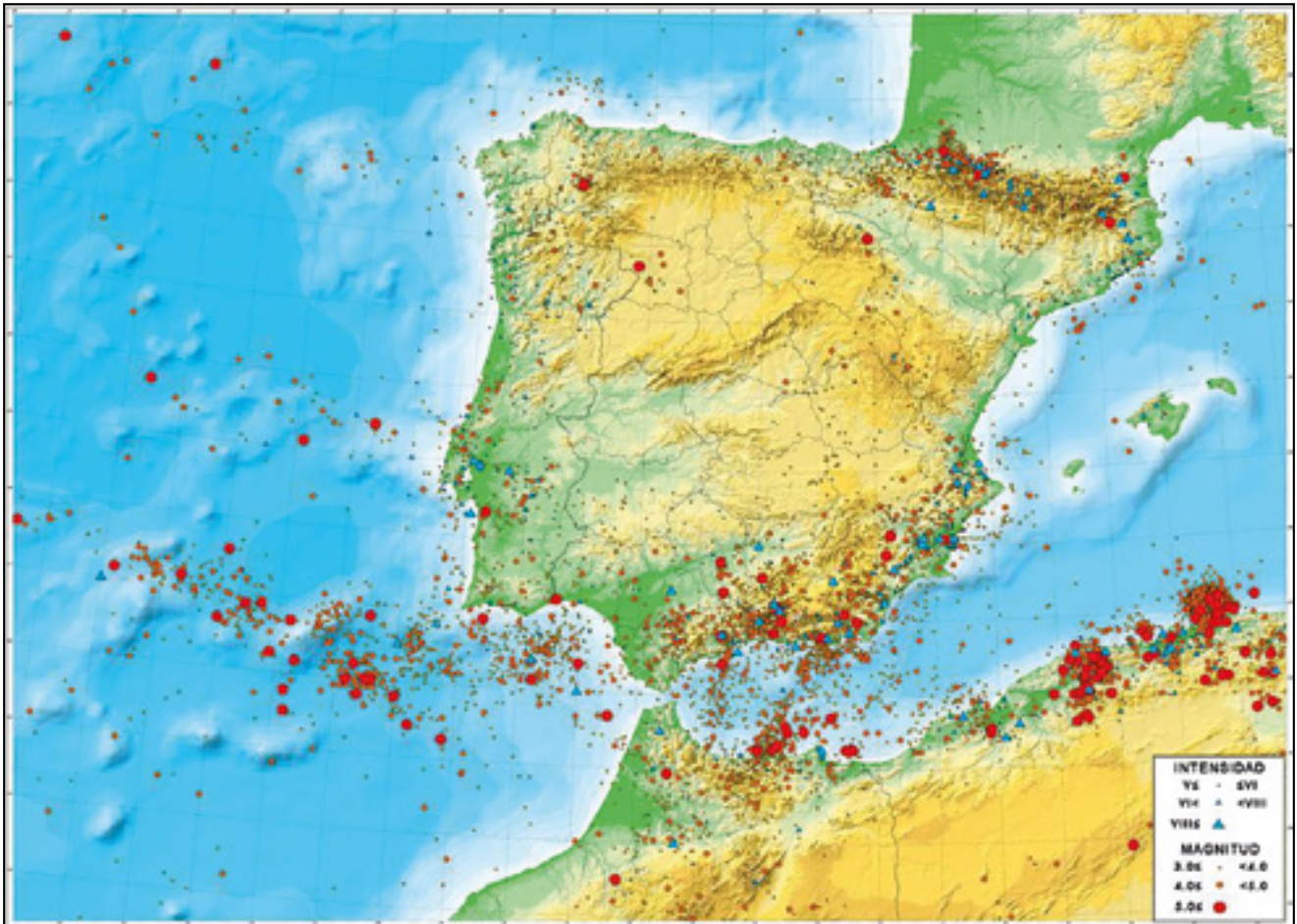


Figura 1. Mapa general de sismicidad en la Península Ibérica (Fuente IGN).



Figura 2. Prototipo de ensayo de paneles prefabricados.

de 12 acelerogramas de 32 segundos de duración cada uno.

- Realización de los ensayos de simulación sísmica horizontal en dirección longitudinal (paralela a los elementos prefabricados verticales).

El objetivo final del ensayo es la comprobación de la estructura tras el conjunto de movimientos a que se somete.



Figura 3. Detalle de la fijación del prototipo de ensayo al simulador sísmico.

2.1. Normativa

Para la definición de las acciones sísmicas se ha seguido la normativa española en vigor en esta materia, la NCSE-02.2002.- Norma de Construcción Sismorresistente.

En dicha normativa se define la acción sísmica en el emplazamiento mediante la aceleración sísmica base, la aceleración sísmica de cálculo y el espectro de respuesta normalizado de la aceleración.

Espectro normalizado de respuesta elástica para un amortiguamiento del 5% es:

$$\begin{aligned} \text{Si } T < T_A & \quad \alpha(T) = 1 + 1,5 * T/T_A \\ \text{Si } T_A \leq T \leq T_B & \quad \alpha(T) = 2,5 \\ \text{Si } T > T_B & \quad \alpha(T) = K * C/T \end{aligned}$$

siendo:

T	Periodo propio del oscilador (s).
K	Coefficiente de contribución.
C	Coefficiente del terreno.
T_A y T_B	Periodos característicos del espectro de respuesta.

Para la simulación se han definido cuatro espectros de respuesta y cuatro niveles de aceleración, adoptando los parámetros siguientes:

- Coeficiente de contribución: $K=1,00$
- Coeficiente de riesgo: Importancia Normal. $\rho=1,00$
- Coeficiente de suelo: Terreno intermedio. $C=1,50$
- Nivel de ductilidad: Sin ductilidad. $\mu = 1,00$
- Amortiguamiento: Estructura de hormigón sin compartimentar. $\Omega = 4,0 \%$
- Periodo de servicio: 50 años
- Periodo límite de la rama ascendente: $T_A = 0,15$ seg.
- Periodo límite de la rama horizontal: $T_B = 0,60$ seg.
- Ordenada máxima del espectro normalizado: $\alpha(T_0) = 2,50$
- Coeficiente de respuesta: $\beta = 1,09$

a) Espectro nº 1:

- Aceleración sísmica base: $ab/g = 0,10$
- Aceleración sísmica de cálculo: $ac/g = 0,12$

b) Espectro nº 2:

- Aceleración sísmica base: $ab/g = 0,15$
- Aceleración sísmica de cálculo: $ac/g = 0,18$

c) Espectro nº 3:

- Aceleración sísmica base: $ab/g = 0,20$
- Aceleración sísmica de cálculo: $ac/g = 0,23$

d) Espectro nº 4:

- Aceleración sísmica base: $ab/g = 0,23$
- Aceleración sísmica de cálculo: $ac/g = 0,26$

2.2. Acelerogramas

Para cada espectro de respuesta, se han generado tres acelerogramas compatibles, por lo que se han realizado un total de doce ensayos de simulación sísmica.

La generación de acelerogramas compatibles con los espectros de respuesta indicados, se ha realizado mediante la aplicación informática JAGUAR, incorporada en el sistema de control del Simulador Sísmico.

El rango de frecuencias abarca desde 0,2 Hz a 25 Hz, para el espectro de aceleración sísmica de cálculo 0,12 g, y 0,5 Hz a 25 Hz para el cuarto espectro (aceleración 0,26 g), debido a la limitación de desplazamiento del simulador en los ejes horizontales.

Los acelerogramas generados son de 32 segundos. Se ha aplicado una envolvente de máximos de aceleración con variación lineal en subida de 6,4 segundos, meseta de máximos de 9,6 segundos y tramo de descarga de 16 segundos. La normativa no indica la forma de dicha envolvente.

En resumen, los doce acelerogramas generados para el eje longitudinal se definen en las siguientes tablas:

Tabla 1. Ensayos de simulación sísmica de 0,12 g

Acelerograma	1	2	3
Frecuencia mínima (Hz)	0,2	0,2	0,2
Frecuencia máxima (Hz)	25	25	25
Desplazamiento máximo (mm)	34,79	28,37	34,02
Aceleración máxima (m/s ²)	1,19	1,21	1,12

Tabla 2. Ensayos de simulación sísmica de 0,18 g

Acelerograma	1	2	3
Frecuencia mínima (Hz)	0,3	0,3	0,3
Frecuencia máxima (Hz)	25	25	25
Desplazamiento máximo (mm)	36,69	29,96	29,50
Aceleración máxima (m/s ²)	1,67	1,60	1,98

Tabla 3. Ensayos de simulación sísmica de 0,23 g

Acelerograma	1	2	3
Frecuencia mínima (Hz)	0,4	0,4	0,4
Frecuencia máxima (Hz)	25	25	25
Desplazamiento máximo (mm)	33,95	33,22	30,92
Aceleración máxima (m/s ²)	2,22	2,26	2,32

Tabla 4. Ensayos de simulación sísmica de 0,26 g

Acelerograma	1	2	3
Frecuencia mínima (Hz)	0,5	0,5	0,5
Frecuencia máxima (Hz)	25	25	25
Desplazamiento máximo (mm)	31,55	29,16	25,29
Aceleración máxima (m/s ²)	2,42	2,58	2,55

En las siguientes figuras se recogen algunos de los espectros de respuesta de la aceleración obtenidos y los acelerogramas correspondientes.

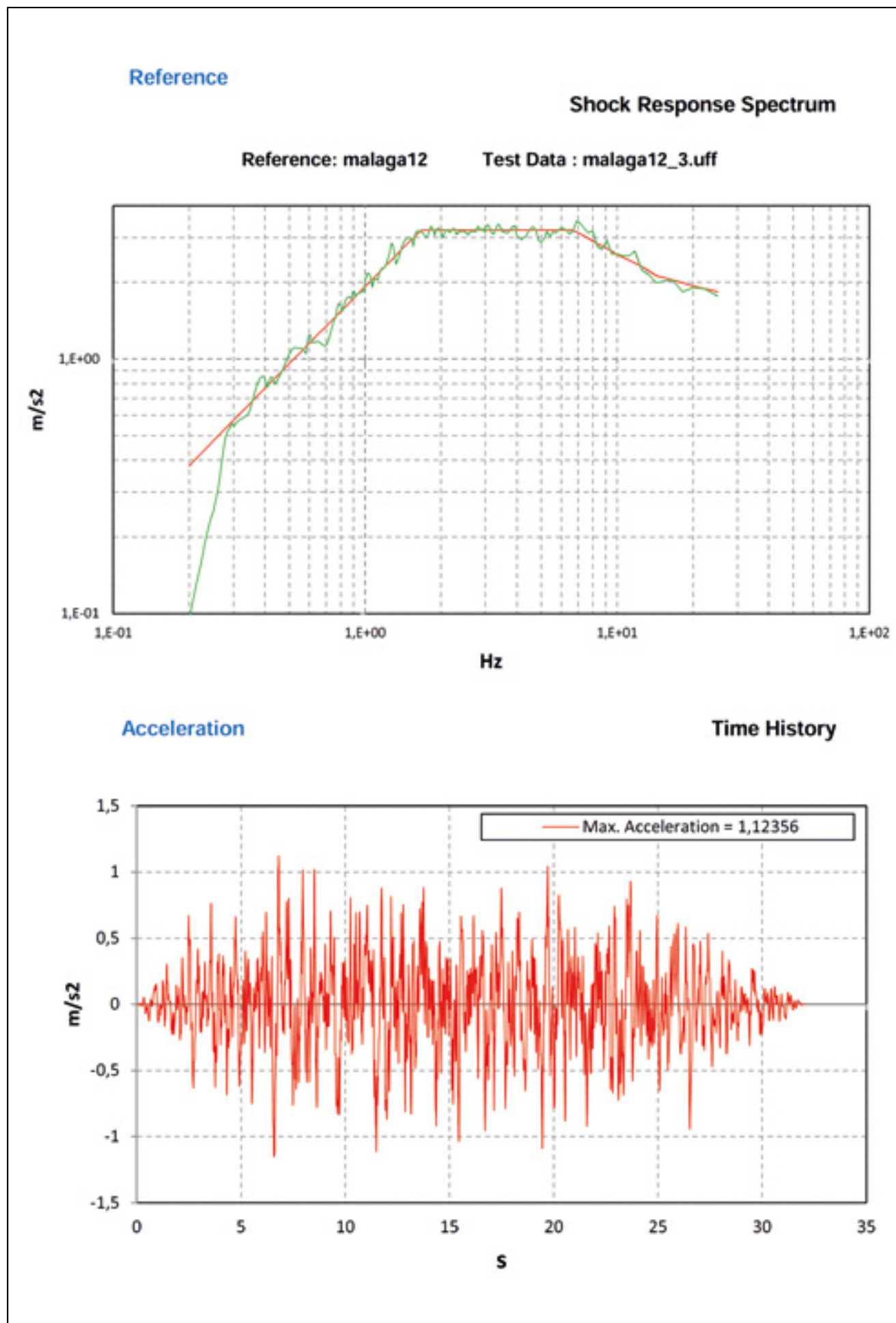


Figura 4. Espectro de respuesta y acelerograma. Simulación sísmica horizontal 0,12g.

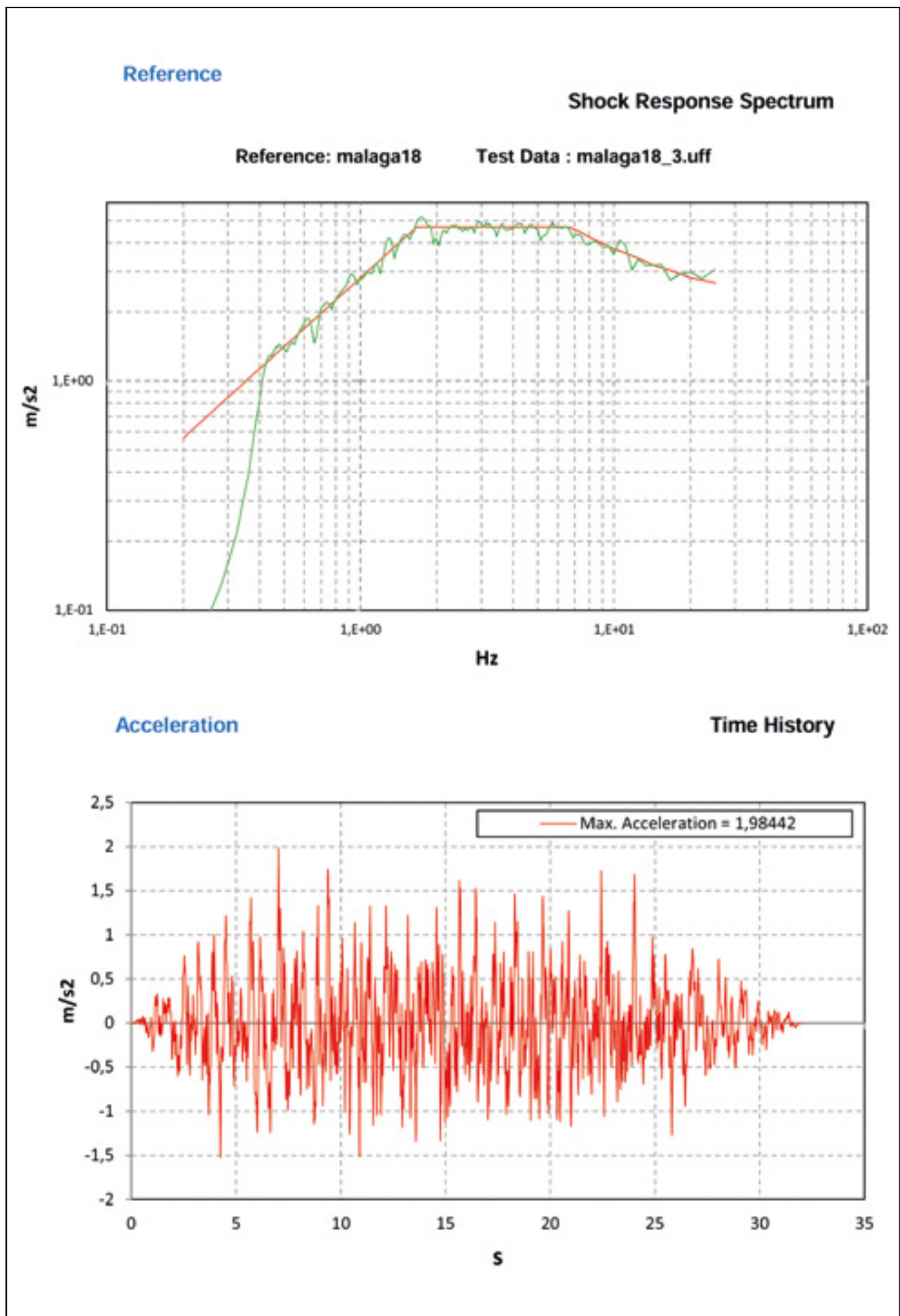


Figura 5. Espectro de respuesta y acelerograma. Simulación sísmica horizontal 0,18g.

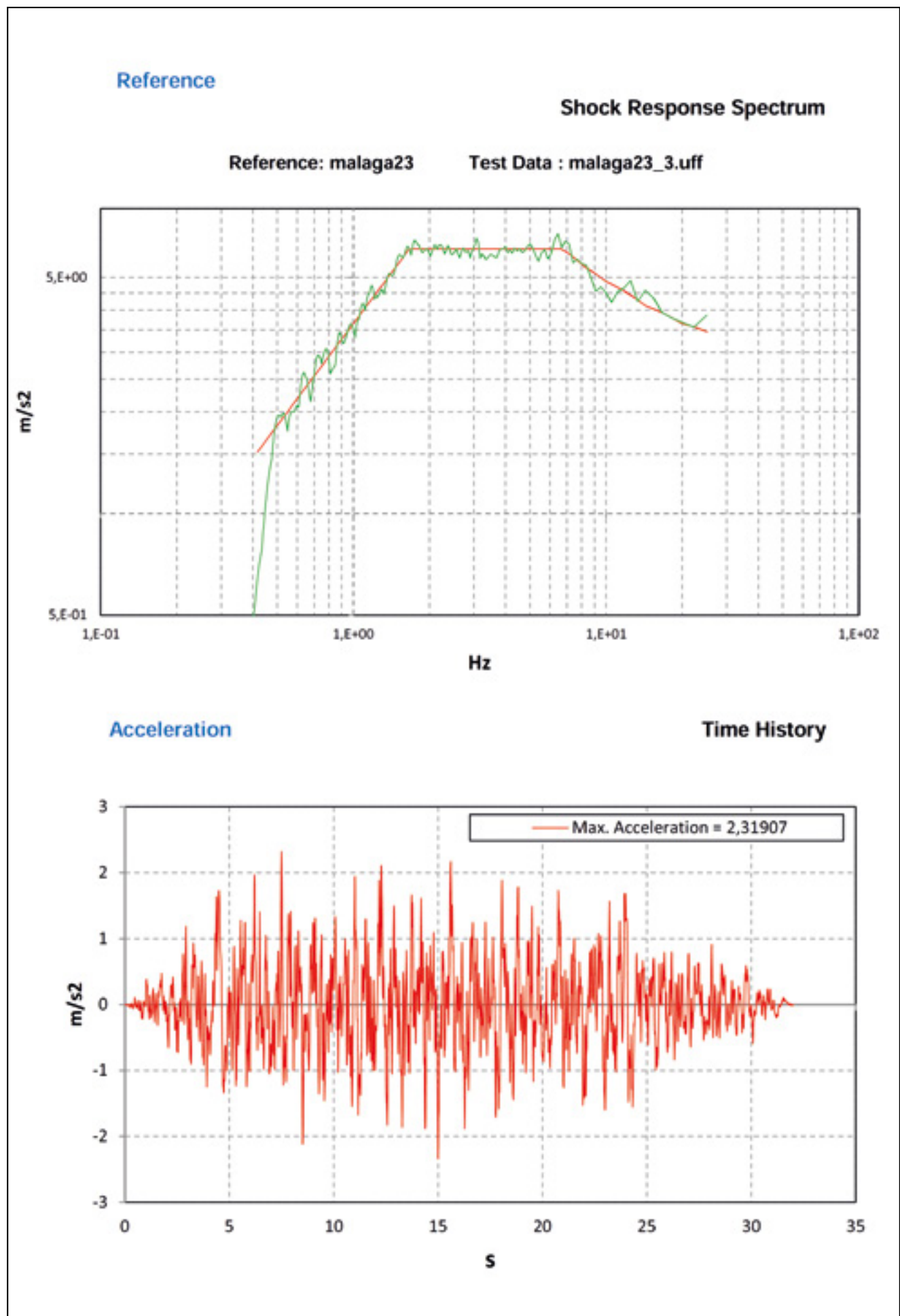


Figura 6. Espectro de respuesta y acelerograma. Simulación sísmica horizontal 0,23g.

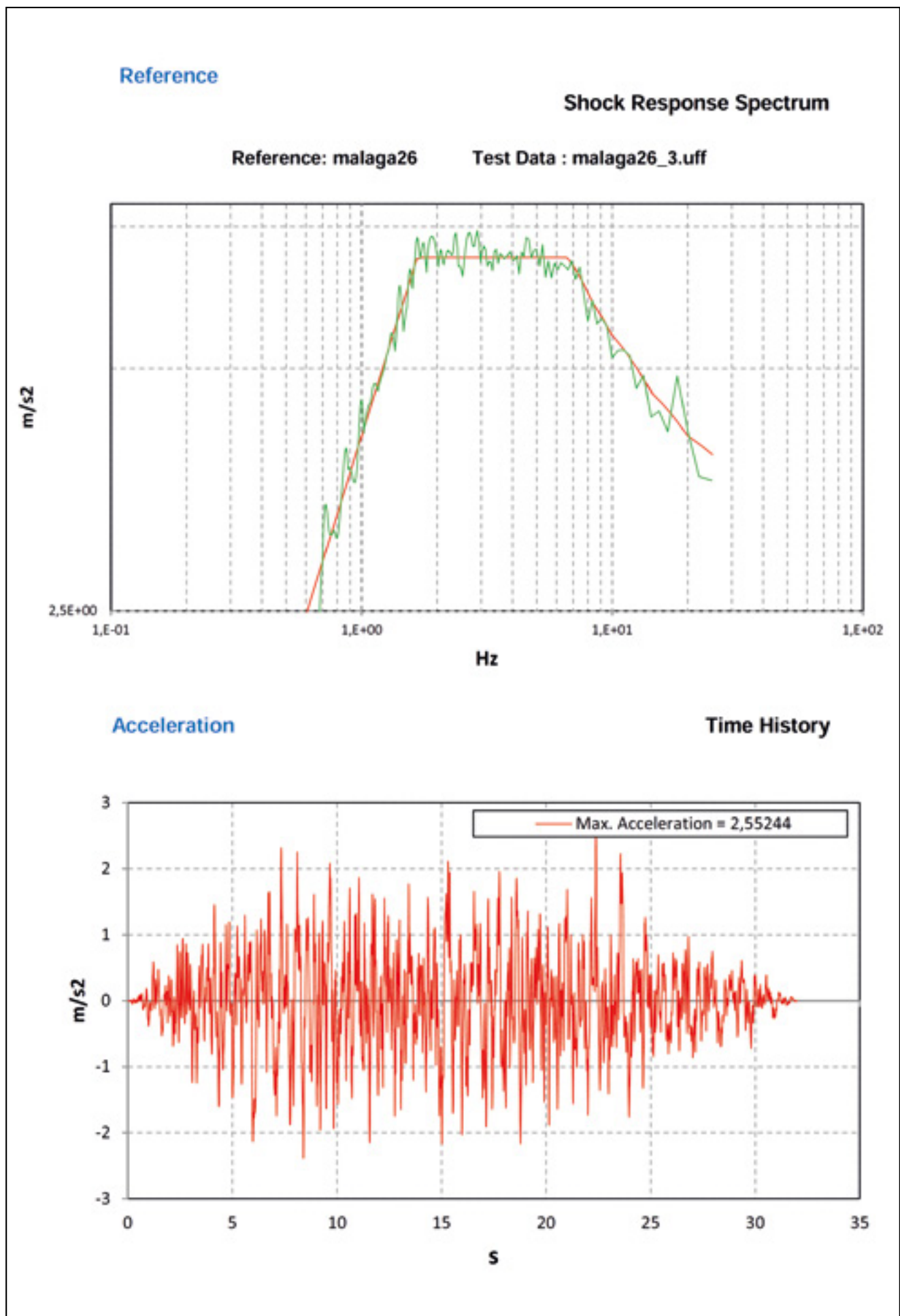


Figura 7. Espectro de respuesta y acelerograma. Simulación sísmica horizontal 0,26g.

3. MÁQUINA DE ENSAYO

Para la realización de este ensayo se ha utilizado el simulador sísmico de 6 grados de libertad instalado en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX.

Básicamente un simulador sísmico consta de una mesa cuadrada con alta rigidez movida por actuadores que hacen que se mueva según un movimiento predeterminado. Los actuadores utilizados en este caso son del tipo electrohidráulico y su movimiento es servocontrolado para lograr una respuesta en frecuencia fiable.

a) Dimensiones y grados de libertad

Mesa de paneles de acero de 1 cm de espesor, reforzada en las zonas de introducción de cargas por los actuadores.

Peso: 5.500 Kg en vacío

Dimensiones: 3 m x 3 m x 0,8 m

Grados de libertad: 6 grados de libertad (g.d.l.), 3 desplazamientos y 3 giros

Sistema de soporte estático centrado por pistón neumático, con rótulas esféricas

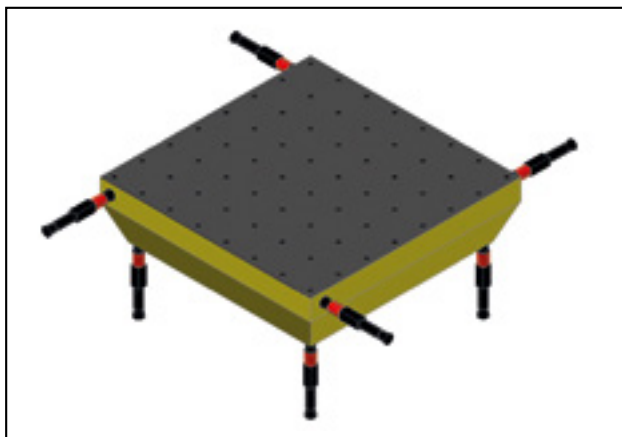


Figura 8. Representación de la mesa sísmica con la ubicación de los 8 actuadores electrohidráulicos.

b) Actuadores

Horizontales: 4 Actuadores de 146,8 kN de carga máxima.

Desplazamiento dinámico: 203,3 mm

Desplazamiento estático: 292,1 mm

Servoválvula de tres etapas con servocontrol y circuito de pilotaje. Caudal máximo de la servoválvula: 260 l/m

Características de movimiento horizontal para un modelo de 10 t:

Aceleración pico: ± 1 g, para $f > 2$ Hz

Velocidad pico: $\pm 0,8$ m/s, para $2 \text{ Hz} > f > 1,2 \text{ Hz}$

Desplazamiento pico: $\pm 0,1$ m, para $f < 1,2 \text{ Hz}$

Aceleración máxima horizontal, mesa vacía: 2,5 g, para $f > 5 \text{ Hz}$

Verticales: 4 Actuadores de 146,8 kN de carga máxima.

Desplazamiento dinámico: 101,6 mm

Desplazamiento estático: 139,7 mm

Servoválvula de tres etapas con servocontrol y circuito de pilotaje. Caudal máximo de la servoválvula: 260 l/m

Características de movimiento vertical con un modelo de 10 t:

Aceleración pico: ± 2 g, para $f > 6,5 \text{ Hz}$

Velocidad pico: $\pm 0,8$ m/s, para $6,5 \text{ Hz} > f > 1,5 \text{ Hz}$

Desplazamiento pico: $\pm 0,05$ m, para $f < 1,5 \text{ Hz}$

Aceleración máxima vertical, mesa vacía: 5 g, para $f > 15 \text{ Hz}$.

c) Hidráulica

Presión de operación: 207 bares (20,7 MPa, 207 atm).

Dos bombas en paralelo. Caudal máximo: 700 l/m.

Red hidráulica principal en tubería de acero de 10 cm de diámetro.

Red independiente de pilotaje de servoválvulas.

Red independiente de drenaje de actuadores y servoválvulas.

Sistema de acumuladores de pistón en la red hidráulica principal, de un volumen aproximado de 160 litros

d) Cimentación

Cimentación flotante por masa de inercia de 700 t

Apoyo sobre 16 cojines neumáticos de 45 t de carga máxima cada uno

Amortiguadores telescópicos entre masa de inercia y losa de apoyo. Independencia estructural entre losa de apoyo y estructura existente.

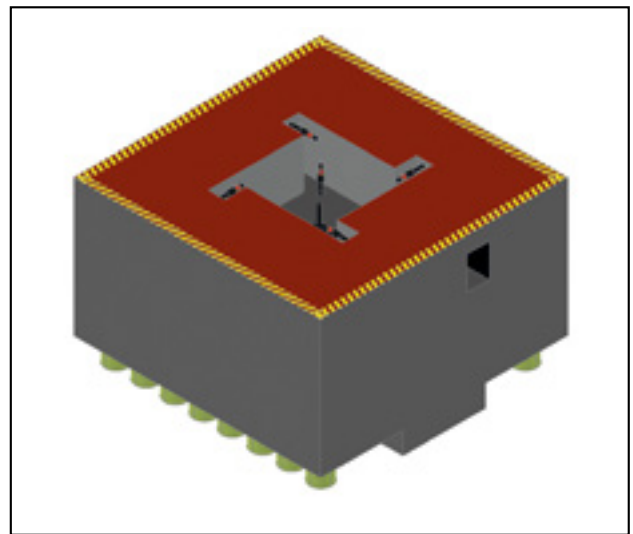


Figura 9. Representación de la masa de reacción de la mesa sísmica.

e) Puente-Grúa

Capacidad: 16 t. Altura libre máxima en el gancho 5,5 m

f) Características del modelo a ensayar

Peso máximo: 10 t

Momento volcador: 30 m t. Momento torsor: 10 m t.

Intervalo de frecuencias de uso: 0-60 Hz

Tipos de señal utilizable: Señal senoidal con barrido de frecuencias, señal aleatoria, seguimiento de señal temporal grabada en el disco del ordenador, síntesis de señales

temporales a partir de funciones frecuenciales (espectro de respuesta o densidad espectral de potencia).

Tipos de control: Dos bucles de control: Bucle interior, de definición de la señal de error de las servoválvulas, de tipo analógico con señal compuesta triple (desplazamiento, velocidad y aceleración), y compensación por grados de libertad.

Bucle exterior, de control numérico, de equalización de las funciones de respuesta en frecuencia cruzadas entre grados de libertad por inversión de la matriz de funciones de respuesta y aplicación de la matriz inversa a las señales temporales iniciales.

g) Adquisición de datos

El conjunto de variables físicas medidas se almacena en un disco de ordenador, previa su digitalización. El sistema JAGUAR permite definir, en un mismo programa de ensayo, la señal utilizada en el control y las características de la toma de datos. Se ha definido un muestreo de 0,002 segundos, tanto en la definición de la señal como en la adquisición, y el resultado se ha sometido a un filtro paso bajo anti-aliasing automático. El sistema "hold-scan" de que dispone el equipo garantiza una diferencia de tiempo despreciable entre lecturas de diferentes canales.

El ordenador utilizado tanto para el control numérico de la mesa como para la adquisición y procesado de los datos medidos es un ordenador con sistema operativo Linux.

La comunicación analógico-digital, así como los circuitos de acceso directo a memoria (DMA) y acondicionadores de alta precisión para los canales de control se reúnen en una unidad, modelo JAGUAR, conectada a la CPU del ordenador. El almacenado y procesado posterior de los datos medidos se ha realizado en la misma unidad, a través del programa de control.

Características de control

La utilización de actuadores servohidráulicos supone la definición de un ciclo de servocontrol para cada uno de ellos, con la correspondiente señal temporal de consigna y los adecuados parámetros de optimización.

Un simulador sísmico necesita una respuesta correcta en una banda de frecuencia relativamente ancha, lo que supone una necesidad de cambiar de variable física de control en función de la frecuencia.

En este equipo se utiliza el concepto de control triple, por el que se obtienen numéricamente las variables cinemáticas aceleración, velocidad y desplazamiento para cada actuador (a partir de una cualquiera de ellas, que es la señal de consigna correspondiente) y se comparan con las variables físicas medidas instantáneamente.

La instrumentación de control de la mesa permite medir el desplazamiento (LVDT) y la aceleración, obteniéndose la velocidad a partir de ellas por un circuito electrónico analógico en tiempo real.

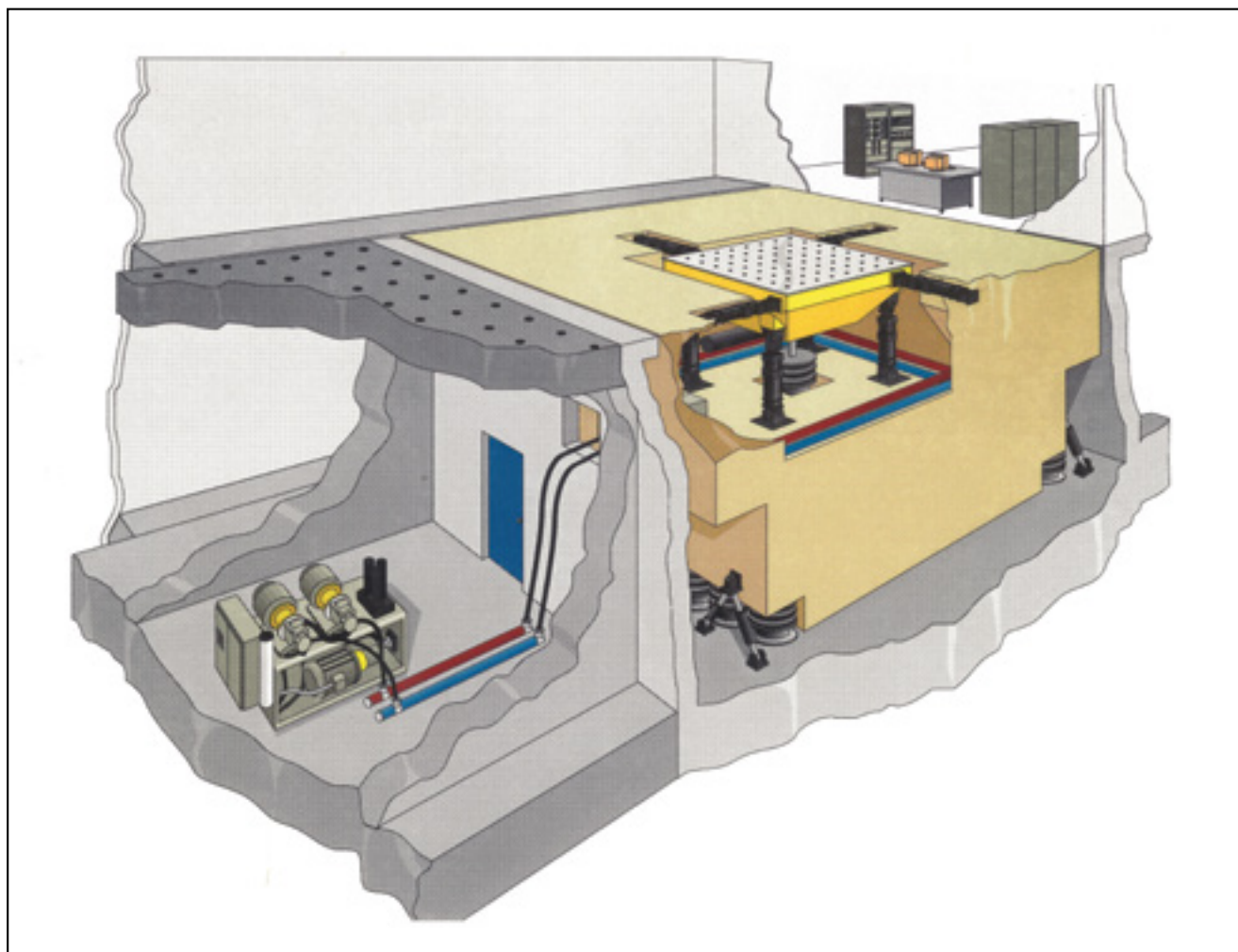


Figura 10. Esquema del Simulador Sísmico completo.

Los tres valores de error así obtenidos se combinan mediante los factores de ganancia adecuados para definir la señal de mando del grado de libertad correspondiente.

Técnicas de compensación

La función primordial de un simulador sísmico es la reproducción fiel del movimiento impuesto por una o varias señales de consigna, independientemente de las características dinámicas propias del equipo que se esté ensayando.

Desgraciadamente siempre se produce una interacción entre dicho equipo y la mesa, de forma que el conjunto electrónica-actuadores-mesa-equipos ensayados responde como un sistema dinámico aproximadamente lineal, cuya respuesta en frecuencia depende de cualquiera de los sumandos.

Las técnicas de compensación definen qué variaciones deben hacerse en la electrónica para equilibrar las variaciones impuestas por el resto de los sumandos. El resultado es una función de respuesta que debe aproximarse a la unidad en todas las frecuencias.

Existen dos tipos de compensación: analógica y numérica. La primera se utiliza para resolver problemas como:

- Acoplamientos geométricos cruzados.
- Momentos volcadores: en equipos con centros de gravedad altos.
- Momentos de rotación: en equipos con centros de gravedad desplazados horizontalmente respecto al movimiento horizontal al que está siendo sometido.
- Balances de fuerzas: debido a que el número de actuadores es mayor que el de grados de libertad y a la gran rigidez de la mesa, pequeños errores en la posición de un determinado grado de libertad pueden provocar grandes fuerzas internas en el sistema mesa-actuadores.

La compensación numérica se utiliza para compensar los efectos que las características modales de mesa y equipos tienen sobre la interacción entre ambas. La forma de compensar tanto en fase como en amplitud consiste en modificar previamente la señal temporal de control de acuerdo con la función de respuesta en frecuencia del sistema.

Transductores

Las variables utilizadas en el control de la mesa vibratoria son la aceleración y el desplazamiento, midiéndose mediante once acelerómetros de tipo capacitivo, en el primer caso, y ocho LVDT en el segundo (uno por eje de actuador). La velocidad se calcula analógicamente mediante circuitos integradores y diferenciadores, en cada caso.

La respuesta del equipo ensayado se obtiene mediante acelerómetros triaxiales, instalados en la parte superior, plancha y forjado bajo respectivamente.

4. RESULTADOS OBTENIDOS.

El proceso de vibración consistió en doce ensayos de simulación sísmica de 32 segundos en el eje longitudinal.

Las señales temporales utilizadas en el movimiento del simulador se han obtenido mediante un programa de generación numérica de acelerogramas compatibles con espectros de respuesta dados, por un proceso iterativo de ajuste de líneas espectrales (10 octavas entre 0,2 Hz y 25 Hz) y una modulación envolvente de máximos en el tiempo para una duración de 32 segundos.

La reproducción de las señales temporales obtenidas es la adecuada para una simulación adecuada del movimiento de base en la mesa, así como la atenuación de acoplamientos entre grados de libertad de la estructura ensayada, teniendo en cuenta la masa de la misma (10 t) y la altura del centro de gravedad respecto al simulador.

Finalmente, no se apreciaron daños en la estructura ensayada tras una inspección detallada.



Figura 11. Vista del prototipo tras el ensayo.

5. CONCLUSIONES

La utilización de mesas vibrantes de varios grados de libertad parece el método más adecuado para el ensayo de simulación sísmica considerando varios ejes de excitación.

Se ha ensayado mediante simulación sísmica el modelo a escala real de una construcción edificatoria sismorresistente de dos niveles de forjado, de acuerdo con la Normativa Sísmica NCSE-02, con determinación del espectro de respuesta de la aceleración en movimiento horizontal.

Mediante la aplicación informática correspondiente (JAGUAR), se han generado doce acelerogramas compatibles con los cuatro espectros de respuesta especificados (tres acelerogramas por espectro), de 32 segundos de duración y aceleración pico máxima de 2,58 m/s² en horizontal.

Se ha comprobado la correcta reproducción del espectro exigido por la normativa en los apoyos del equipo. La banda de frecuencias utilizable en la mesa vibratoria es la adecuada para la especificación usada, salvo muy bajas frecuencias en movimiento horizontal, que induce desplazamientos superiores a la capacidad de la mesa (+/- 50 mm).

No se han producido daños apreciables en la estructura durante la reproducción de los sismos.

6. AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo ha sido posible gracias a la colaboración de todos los miembros integrantes del área de Dinámica de Estructuras del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, en especial a

D^a Ana Cóbrecas Álvarez, D. Francisco Navarro Colom y D. Miguel Ángel Andreu Martín con cuyo esfuerzo se pudo culminar el objetivo del proyecto.

Igualmente, hay que agradecer a las empresas SANDO CONSTRUCCIONES S.A., IELCO S.A., MESUREX AERONAUTICS S.A. y CONSTRUCCIONES VERA S.A., además de los centros tecnológicos Habitec, Citic y el grupo investigador HUM064 de la Escuela de Arquitectura de Málaga que han confiado en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales para llevar adelante este ensayo.

7. REFERENCIAS

Paz, M. (2002). *Dinámica Estructural. Teoría y cálculo*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.

Ministerio de Fomento (2002). NCSE-02. Norma de Construcción Sismorresistente. Madrid: Ministerio de Fomento (Gobierno de España).

Clough, R. W., y Penzien, J. (1993). *Dynamics of Structures*. Nueva York (EE UU): Mc Graw-Hill.

Ra, D., y Penzien, J. (1972). Structural Research Using an Earthquake Simulator. *Proceedings of the Structural Engineers Association of California Conference, Monterey, California (octubre)*.

Newmark, N. M., y Rosenblueth, E. (1976). *Fundamentos de la ingeniería sísmica*. Ciudad de México (México): Diana.

De Silva, C. W. (2007). *Vibration, Monitoring, Testing, and Instrumentation*. Boca Raton (FL/EE UU): CRC Press. (Taylor & Francis Group).

Instituto Geográfico Nacional (2015). Mapas de sismicidad. Disponible en <https://www.ign.es/>.

Puertos y navegación

Líneas de actividad

Diseño portuario

Explotación portuaria

Seguridad marítima

Estructuras y materiales

Medio ambiente

.....

Fields of Activity

Maritime Port Engineering

Port Managing

Maritime Safety

Structures and Materials

Environment



Más información en

<http://www.cedex.es>

CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación
de Obras Públicas