

Análisis dinámicos en el Complejo ITER. Aplicación al Edificio RF Heating Building#15

Dynamic Analysis in the ITER complex. Application to the RF Heating Building#15

Fernando BRAVO NOTARIO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
FHECOR Ingenieros Consultores
Jefe de Equipo
fbn@fhecor.es

Blanca PALERM SABATER

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
FHECOR Ingenieros Consultores
Ingeniero de Proyecto
bps@fhecor.es

Ángel HERNÁNDEZ BASTERRA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
FHECOR Ingenieros Consultores
Ingeniero de Proyecto
ahb@fhecor.es

María José MARTÍN FERNÁNDEZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Ferrovial-Agroman S.A.
Design Coordinator
mjmartin@ferrovial.com

Alberto CABALLERO RUIZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Ferrovial-Agroman S.A.
Design Coordinator
alberto.caballero@ferrovial.com

Xavier ROS BATLLE

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Ferrovial-Agroman S.A.
Design Manager
xros@ferrovial.com

RESUMEN

Esta ponencia presenta el estado del arte del análisis sísmico de los edificios que componen el reactor experimental de Fusión Nuclear denominado ITER. Comienza con un rápido análisis de la importancia especial de este tipo de edificios para la obtención de los espectros de respuesta elástico, y aplica el cálculo sísmico a una de sus construcciones, el RF Heating Building#15. Dicho cálculo consta de un análisis espectral para el diseño y verificación de su estructura, y la obtención de espectros secundarios de respuesta en los distintos forjados a partir de acelerogramas artificiales para el análisis de vibración de los equipos que sobre él se apoyan.

ABSTRACT

This lecture comprises the state-of-art in the seismic analysis of the Buildings for the experimental reactor for Nuclear Fusion called ITER. Starting with a fast analysis of the special importance of this kind of buildings to get the elastic response spectra, and applying the seismic calculations to one of the constructions: the RF Heating Building#15. These calculations involve a spectral analysis for the design and verification of the structure. Additionally it is obtained the secondary spectrum from artificial accelerograms for the different slabs in order to verify the vibrations transmitted to the equipment above them.

PALABRAS CLAVE: ITER, estructura de acero, espectro, acelerograma, y forjado colaborante.

KEYWORDS: ITER, steel structure, response spectra, accelerogram, and composite slab.

1. La Fusión Nuclear

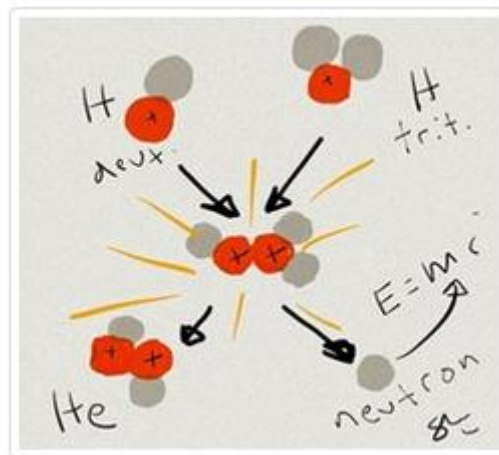


Figura 1. La reacción de Fusión.

La Fusión Nuclear es la reacción química que se da en el sol y en las estrellas. Consiste en la colisión de isótopos ligeros cargados eléctricamente (liberados de sus electrones) de deuterio y tritio, generando helio cargado eléctricamente y una gran cantidad de energía próxima a la equivalencia de Einstein: $E=m \cdot c^2$. Esta energía desprendida en la forma de neutrones que se desplazan a gran velocidad (energía cinética) será la que se pueda absorber generando electricidad:

Para que esta reacción tenga lugar se deben dar tres condicionantes: el primero es una altísima temperatura capaz de separar los electrones de los átomos de hidrógeno formando los isótopos de deuterio y de tritio en un fluido cargado eléctricamente denominado plasma; lo segundo es una gran cantidad de plasma rico en partículas para que exista un gran número de colisiones; y lo tercero es una máquina capaz de confinar ese plasma durante el tiempo suficiente para que se produzcan las colisiones y la generación de energía.

2. El proyecto ITER

En la Provenza francesa, al Sud-Este del país transalpino, se está construyendo el complejo ITER (por sus siglas en inglés, International Thermonuclear Experimental Reactor). Uno de los mayores proyectos internacionales en el que colaboran 35 países (China, la Unión Europea, India, Japón, Corea, Rusia, y Estados Unidos), cuyo objetivo es el de demostrar experimentalmente que la generación de electricidad a partir de la Fusión Nuclear es posible, tanto de una forma sostenible en el tiempo, como económicamente viable.

El ITER es un reactor del tipo Tokamak, es decir, una máquina de forma toroidal con bobinas magnéticas que soportan y mantienen las fusiones en un plasma que se encuentra a temperaturas de 150 millones de grados centígrados (diez veces la temperatura del sol). Por lo tanto, los neutrones desprendidos en las reacciones de fusión colisionarán con las paredes de la vasija de confinamiento y estas absorberán su energía en forma de calor. Este calentará el vapor de agua en la central contigua, que se turbinará y se generará electricidad.

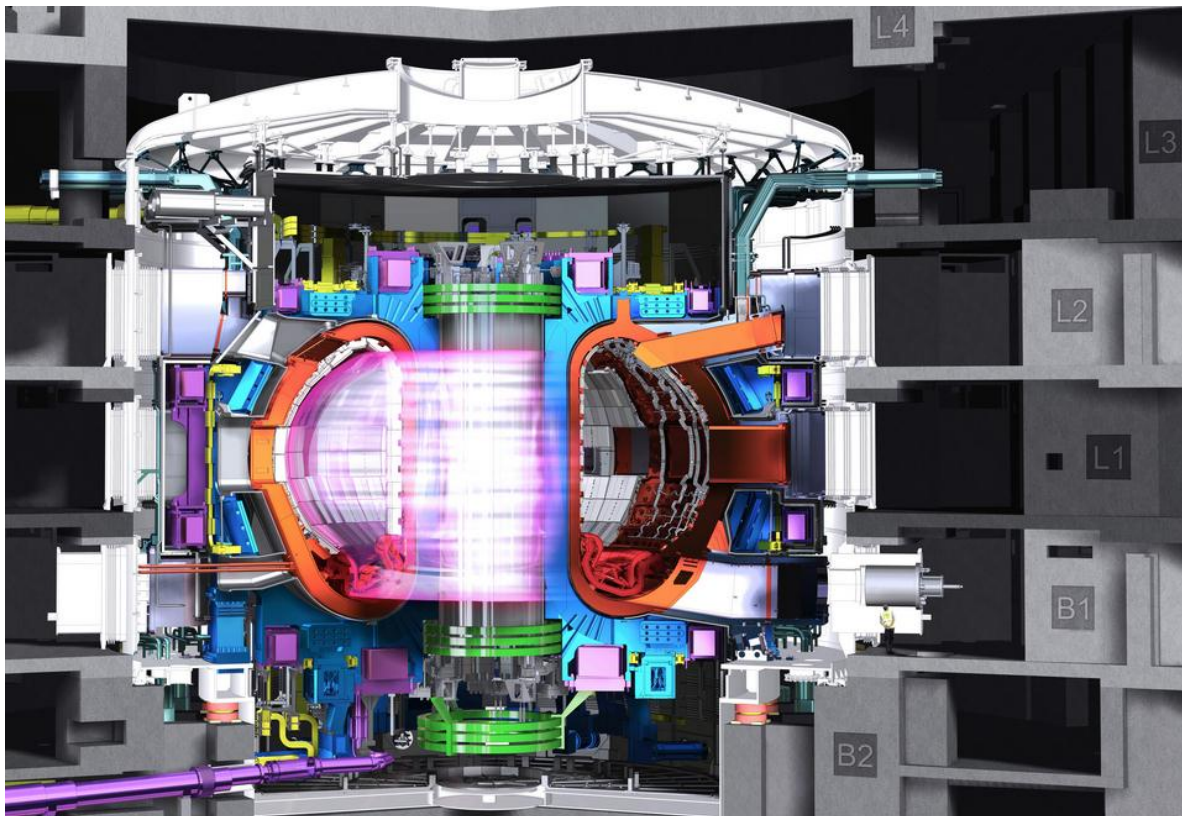


Figura 2. La vasija del ITER. Reactor del tipo Tokamak.

Este proceso requiere de una gran energía inicial capaz de calentar el gas hasta formar el plasma en las condiciones óptimas para que tengan lugar las colisiones. El objetivo del ITER consiste en obtener hasta 500MW de energía a partir de una aportación inicial de 50MW, es decir, una relación de 10 veces a 1 la energía suministrada. Además, este proceso será mantenido en el tiempo durante al menos 500 segundos que será el tiempo que dure el experimento final.

2.1. La construcción del ITER

El complejo ITER consta de treinta y nueve construcciones y áreas técnicas, cuya ejecución está actualmente en marcha en una explanada de 180 hectáreas cerca de la localidad de Cadarache (Francia).

El edificio principal que alberga la vasija o Tokamak está en el centro del complejo y se denomina Building#11. Si bien todos los edificios tienen una gran importancia y relevancia para la consecución del éxito del experimento, entre los que se encuentra: el edificio de diagnóstico (Building#74), el edificio de ensamblaje de la vasija (Building#13), la planta criogénica necesaria para el enfriamiento del núcleo (Buildings#51,#52 y #53), los edificios para la conversión electromagnética (Buildings#32,#33 y #38), la planta enfriadora (Buildings#67,#68 y #69), las áreas con instalaciones eléctricas, o el edificio para el calentamiento del plasma (Building#15).



Figura 3. Planta general del complejo ITER. En rojo la posición del Building#15.

2.1.1. El RF Heating Building#15

El edificio “RF Heating Building#15” (RF=Radio-Frequency) se encuentra al sureste del Tokamak. En su interior se encuentran los equipos IC (Ion Cyclotron), LH (Lower Hybrid) y EC (Electron Cyclotron) necesarios para la generación del plasma.

Se trata de una estructura metálica, con unas dimensiones de 43.3m x 49.0m y 25m de altura. Formada por pórticos transversales separados 10.25m compuestos por tres vamos de 23+3+23m, apoyados sobre pilares, también metálicos, que nacen de zapatas que habitualmente tienen una dimensión de 3x3m y 0.80m de canto, conectadas mediante vigas riostras de 0.55x0.80m y todo ello conectado formando un diafragma por medio de una losa de cimentación de espesor 0.25m.

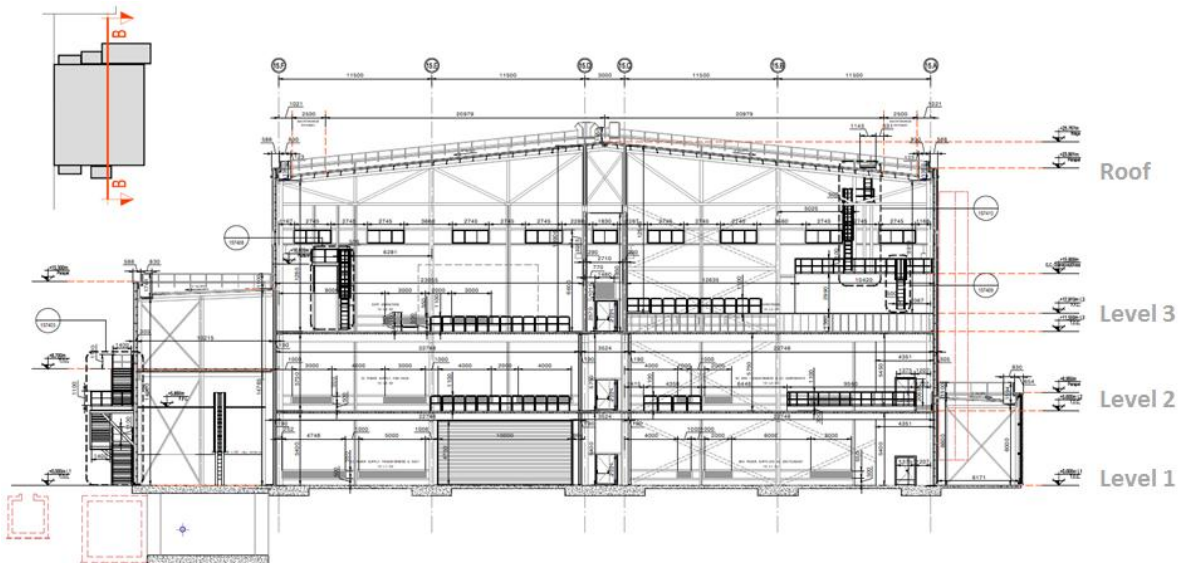


Figura 4. Construcción del RF Heating Building#15 (Noviembre de 2016).



Figura 5. Construcción del RF Heating Building#15 (Noviembre de 2016).

El concepto estructural es el de una nave metálica con cubierta en celosía soportada por pilares y rigidizada con cruces de San Andrés en las fachadas. En el interior, los pórticos se conectan a tres niveles. En el tercer nivel se encuentra la cubierta, a dos aguas, formada por celosías en las dos direcciones principales, con canto variable de entre 1.7 y 4.3m. Los otros dos niveles corresponden con los forjados mixtos de chapa colaborante de 0.20m de espesor total, cuya disposición de armadura permite proveer de una resistencia a fuego equivalente a REI-120 sin ninguna otra protección que la simple chapa del forjado de 1mm de espesor.

Actualmente este edificio se encuentra en fase de construcción de la estructura metálica principal.

3. La acción sísmica en el ITER

La localización del ITER a 40km al Noreste de Aix-en-Provence, se encuentra en una zona de sismicidad baja a moderada de acuerdo a la normativa francesa de aplicación, sobre una buena roca base caliza con velocidades de propagación de las ondas superior a los 1300m/s (lo que se considera suelo tipo A).

La normativa aplica un sismo de período de retorno 475 años (la probabilidad de que el evento de diseño ocurra es de un 10% en 50 años), sin embargo, lógicamente la importancia de los edificios que forman el ITER en su conjunto es muy alta, ya que albergan sustancias radiactivas (el núcleo o Tokamak puede albergar hasta un kilogramo de tritio con radiación cuatro o cinco veces por encima de lo que se considera un accidente nuclear). Es por ello que el ITER es considerado como un complejo con un grado de importancia alto, y por lo tanto, es necesario considerar una acción sísmica con períodos de retorno mayores.

Así se han definido según la IAEA los estándares SL-1 y SL-2 con valores de probabilidad anual de concurrencia de 1/100años y 1/10000años respectivamente [1].

El estándar SL-2 se define como la envolvente de dos sismos: el SMS (Sismo máximo de seguridad), asociado al SMHV (Sismo máximo históricamente probable, que fue medido en la falla de Durance y con una magnitud de 4.9-5.3), y el Paleosismo (el sismo correspondiente a las evidencias encontradas en la zona de Manosque con magnitud 6.5-6.7).

Site ITER – Rock – Reference Earthquakes

	SMS	PALEOSISMO
Magnitud M=	5.80	7.00
Distancia D=	7.1km	18.50km
Intensidad I=	9.23	10.53
Velocidad máxima Vmax=	17.1cm/s	22.8cm/s
Desplazamiento máximo Dmax=	3.7cm	10.3cm
Aceleración /Velocidad A/V=	16.37s ⁻¹	10.78s ⁻¹

Tabla 1. Características de los terremotos de referencia.

Design spectrum for rock soil - Cadarache

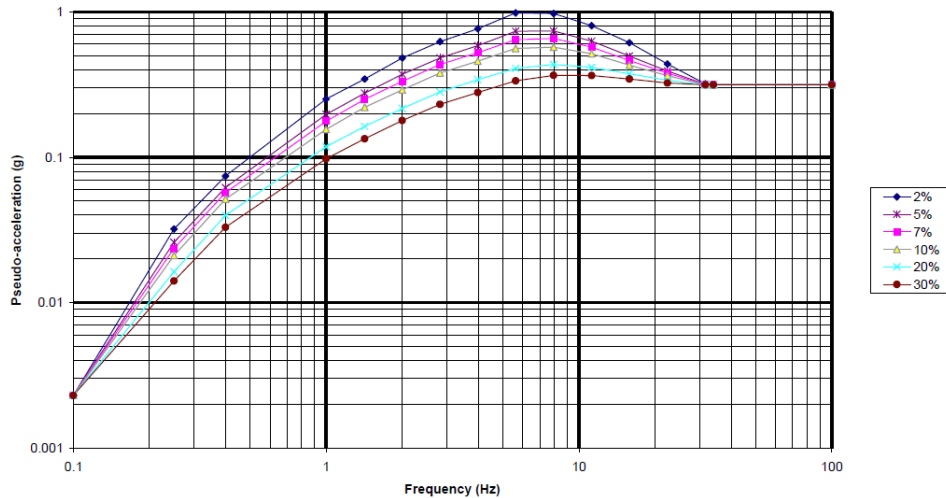


Figura 6. Espectro de respuesta dinámico del sismo SL-2.

Frequency (Hz)	Pseudo-Accelerations (g)					
	2%	5%	7%	10%	20%	30%
0.1	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023
0.25	0.0321	0.0260	0.0236	0.0211	0.0163	0.0141
0.4	0.0743	0.0619	0.0570	0.0515	0.0398	0.0330
1	0.2517	0.1971	0.1768	0.1558	0.1180	0.0976
1.42	0.3455	0.2765	0.2502	0.2209	0.1632	0.1341
2	0.4831	0.3731	0.3335	0.2912	0.2164	0.1791
2.82	0.6259	0.4829	0.4346	0.3808	0.2814	0.2314
3.98	0.7669	0.5877	0.5254	0.4590	0.3422	0.2795
5.62	0.9856	0.7373	0.6450	0.5604	0.4083	0.3360
7.94	0.9754	0.7388	0.6576	0.5726	0.4348	0.3658
11.22	0.8032	0.6303	0.5720	0.5161	0.4157	0.3653
15.84	0.6148	0.4979	0.4641	0.4309	0.3756	0.3451
22.38	0.4380	0.3920	0.3785	0.3644	0.3386	0.3240
31.62	0.3198	0.3181	0.3172	0.3161	0.3150	0.3150
34	0.3150	0.3150	0.3150	0.3150	0.3150	0.3150
100	0.3150	0.3150	0.3150	0.3150	0.3150	0.3150

Tabla 2. Valores de aceleración vs. Frecuencia del sismo SL-2.

Esta acción SL-2 es de aplicación no sólo al núcleo y los edificios con instalaciones radiactivas, sino también a aquellos edificios de importancia alta sin los cuales el funcionamiento del núcleo no sería posible. A estos edificios, se les denomina SR o “Safety Related”.

Por otro lado se define la acción SL-1, o sismo básico de operación. Se corresponde con un valor igual al SL-2 dividido entre 3, y es de aplicación en el resto de edificios denominados NSR (“Non-safety related”, cuyo fallo tendría un impacto menor en el núcleo), y todos los componentes que conforman el complejo ITER.

4. Aplicación del cálculo modal espectral al RF Heating Building#15

Para el cálculo de la estructura del edificio se emplea el software de elementos finitos SAP2000, que permite el cálculo de elementos en régimen elástico y dinámico, así como de análisis modal espectral y cálculos en el dominio del tiempo como es el caso de la aplicación de acelerogramas artificiales o el análisis de un caso de pulsión como en un evento de explosión.

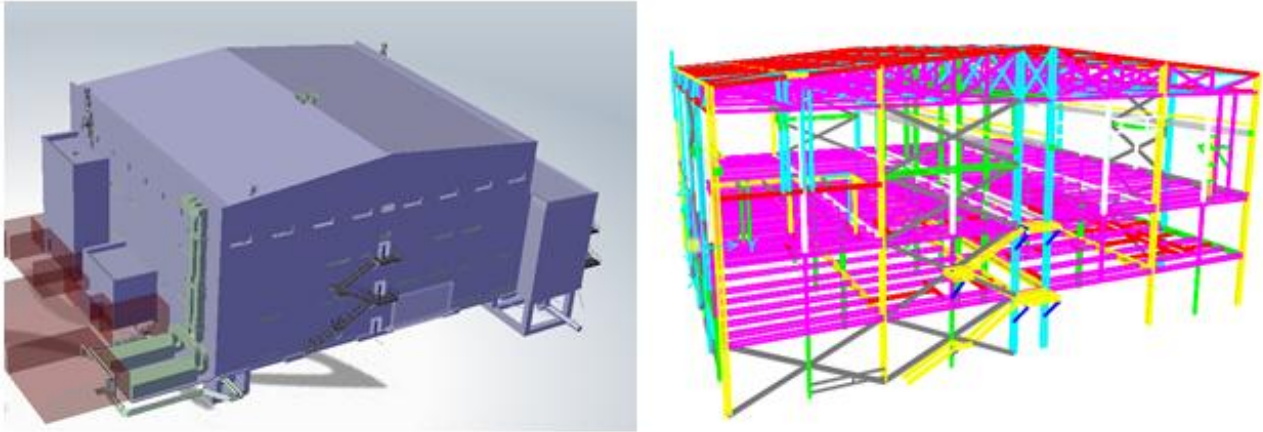


Figura 7. Vista renderizada del modelo de Catia del Building#15 (cortesía de Iter Organization) y comparación con el modelo de cálculo en SAP2000.

El análisis espectral se realiza de conformidad con lo especificado en el Eurocódigo 8 [2], pero empleando el método de Newmark para la combinación direccional de los distintos sismos tal y como exige la guía de la Agencia de Seguridad Nuclear francesa ASN [3].

$$\begin{aligned}
 &+ |R_x| \pm 0.4 |R_y| \pm 0.4 |R_z| \\
 &\pm 0.4 |R_x| + |R_y| \pm 0.4 |R_z| \\
 &\pm 0.4 |R_x| \pm 0.4 |R_y| + |R_z|
 \end{aligned}$$

El amortiguamiento considerado en esta estructura, ejecutada completamente atornillada, es del 7% de acuerdo al código ITER.

Dado que los dos niveles intermedios (level L2 y level L3) se ejecutan mediante forjados mixtos de chapa colaborante con un espesor de losa de 0.20m, se aplica sobre el modelo un diafragma plano en ambos forjados para simular el efecto de arriostramiento horizontal que este genera.

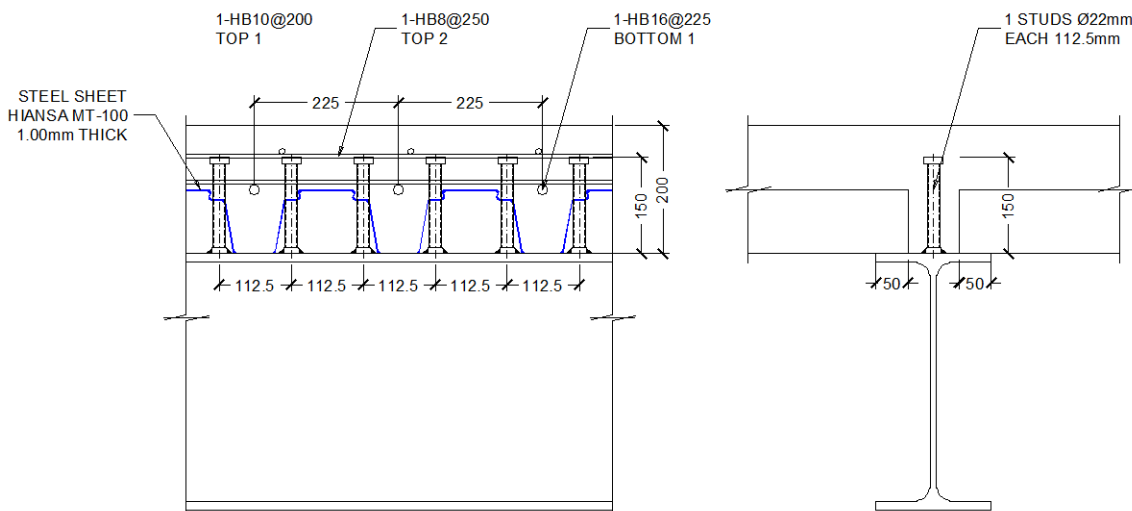


Figura 8. Forjado colaborante tipo Hiansa MT-100 conectado mediante studs.

La masa sísmica total del edificio a considerar en el cálculo es de 51370kN, y se han obtenido 600 autovalores para lograr que la masa movilizada en el cálculo espectral supere en las direcciones principales el 90% tal y como exige la normativa. Los principales modos de vibración son:

	Período	% Masa movilizada
Principal modo dirección X=	0.944s.	18.49%
Principal modo dirección Y=	1.243s.	64.56%
Principal modo dirección Z=	0.704s.	12.31%

Tabla 3. Períodos fundamentales de vibración en cada dirección y masa movilizada asociada.

El factor de comportamiento empleado en el cálculo es $q=1.50$ para la estructura metálica y $q=1.00$ para la cimentación (ambos valores corresponden con ductilidad baja o DCL según Eurocódigo8). Si bien una estructura con arriostramientos en fachada puede alcanzar grados de disipación de energía mayores (hasta $q=4.0$), en el Building#15 en el que la estructura principal se dimensiona para soportar cargas de explosión externa con un nivel de daños reducido, un factor bajo proporciona las siguientes ventajas: reducción en el tamaño de las conexiones no dimensionadas a capacidad, limitación del daño ocasionado por el terremoto de diseño, amplia capacidad post-crítica de la estructura,...

Finalmente se obtiene una estructura portante formada generalmente por pilares HEM-500, en el contorno del edificio, con HEB-450 en las esquinas y HEB-500 en el interior. Las cruces de San Andrés son tubo cuadrado SHS-250x12. Y las vigas mixtas en los forjados varían en función de las cargas de equipos que tengan encima siendo en algunas zonas del tipo HEM-650 con vigas secundarias IPE-600.

5. Obtención de Espectros secundarios de respuesta a partir de acelerogramas artificiales

Los acelerogramas artificiales de acuerdo al Eurocódigo 8 [2] se emplean para el cálculo y dimensionamiento de estructuras de manera similar a los espectros de respuesta. Sin embargo, este tipo de cálculos también se emplea en el análisis de las vibraciones transmitidas por la estructura durante los eventos sísmicos a los equipos y estructuras secundarias existentes dentro de los edificios.

Para este cálculo se deben realizar los siguientes pasos:

- Obtención de tres acelerogramas diferentes para cada dirección. Estos tres acelerogramas se considerarán representativos si el espectro medio obtenido a partir de los tres acelerogramas supera en todos sus puntos el 90% del espectro elástico de respuesta en el rango que va de $0.2 \cdot T_1$ hasta $2.0 \cdot T_1$ (siendo T_1 el período correspondiente al modo de vibración fundamental de la estructura). En el caso de aplicación T_1 se corresponde con los valores indicados en la tabla 3.
- Aplicación de los acelerogramas al modelo de cálculo combinándolos de acuerdo al método de Newmark antes indicado, obteniendo los espectros secundarios de respuesta en los nudos de la estructura que son objeto del estudio.
- En conformidad con la Regulatory Guide RG1.122 emitida por la NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) se debe aplicar un decalaje a los espectros de respuesta secundarios de $\pm 15\%$ para tener en cuenta la incertidumbre en el modelo respecto de la interacción suelo-estructura.

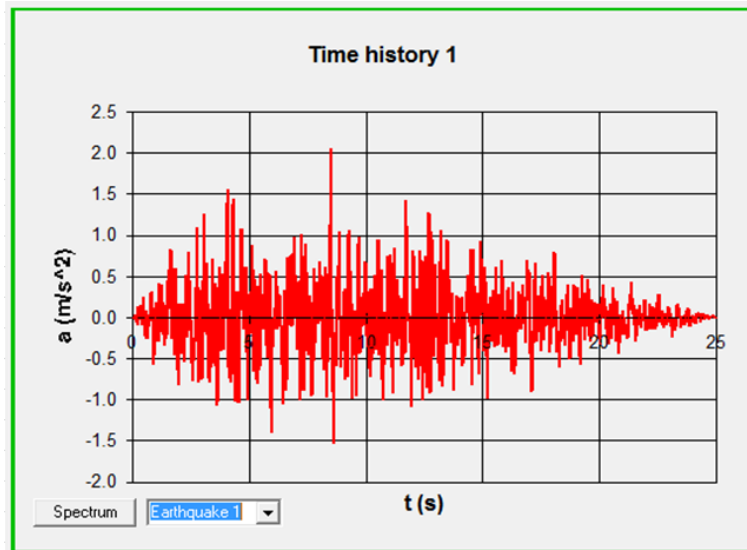


Figura 9. Acelerograma artificial obtenido a partir del espectro de respuesta de la estructura.

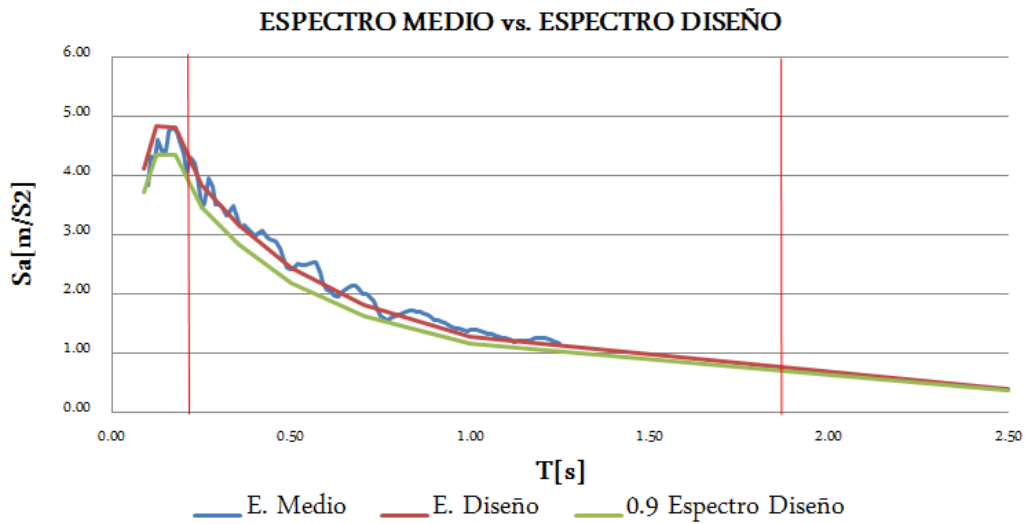


Figura 10. Comparación del espectro medio de los acelerogramas con el espectro de diseño.

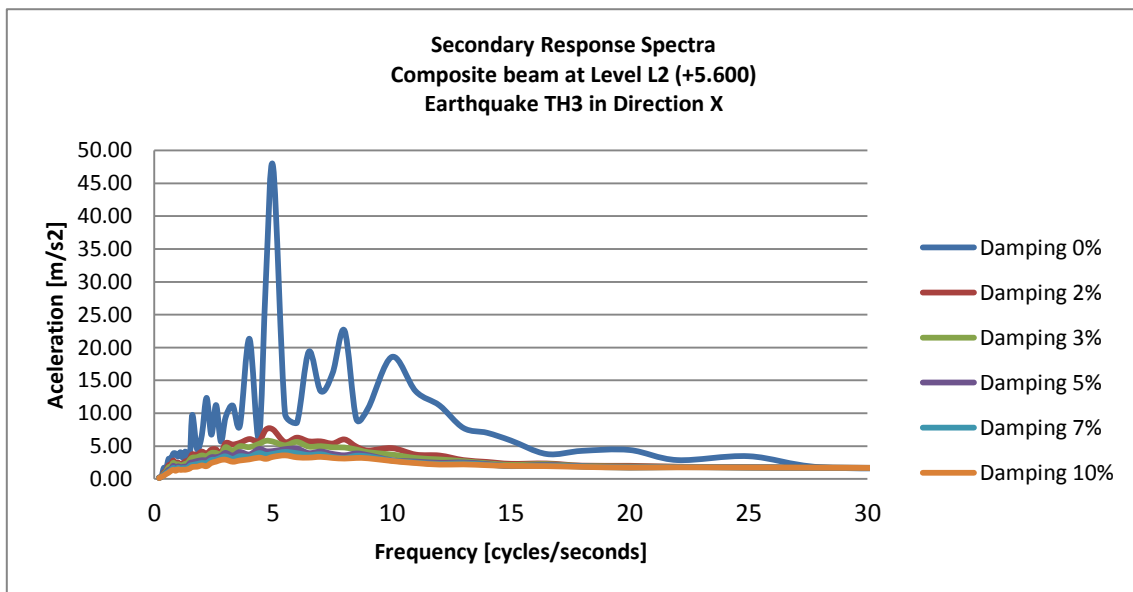


Figura 11. Espectro secundario de respuesta de una viga mixta del nivel L2 (cota +5.600)

Los espectros secundarios de respuesta obtenidos en el cálculo del RF Heating Building#15 proporcionan valores pico en el vector de aceleraciones máximas de hasta los 7.17m/s^2 de aceleración a frecuencias de 5.5Hz en las vigas del forjado colaborante del nivel L2 (cota $+5.600$) una vez combinadas las tres direcciones del mismo. Este tipo de datos, junto con los espectros secundarios, permite el análisis de vibraciones y estabilidad de los equipos existentes sobre este forjado.

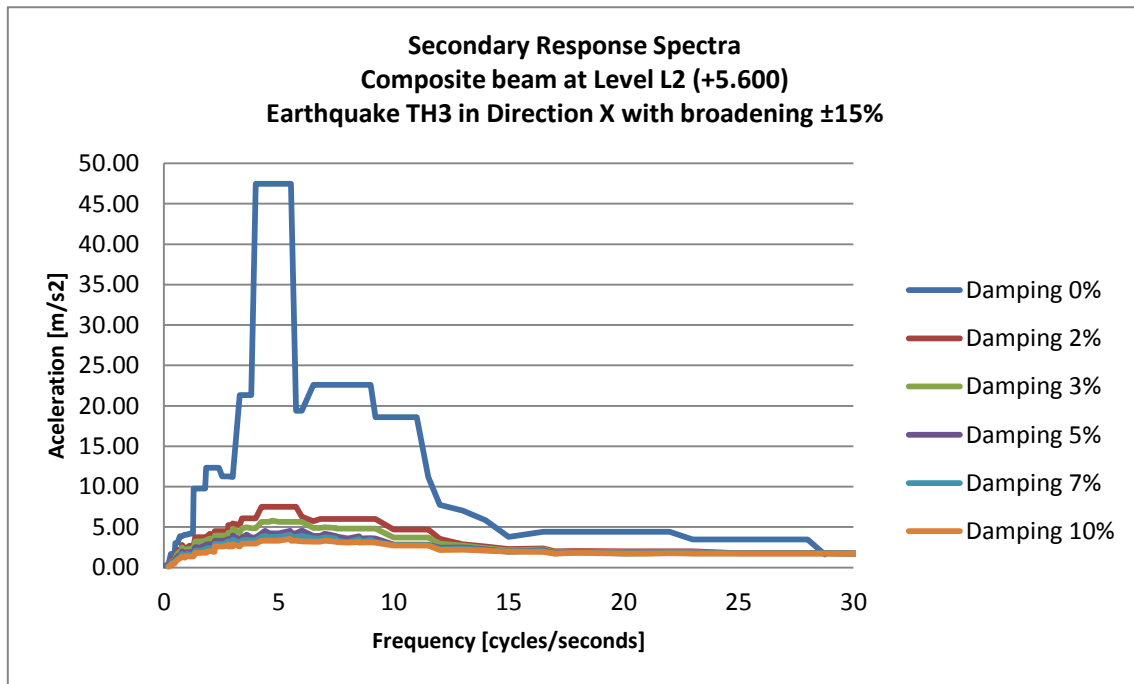


Figura 12. Decalaje del espectro secundario de respuesta de la figura 11.

Agradecimientos

Se agradece el gran trabajo realizado por todos los integrantes de la UTE VFR (Vinci-Ferrovial-Razel) para la cual trabaja la también UTE de ingeniería-arquitectura Fhecor-COT. Sin ellos todo el trabajo realizado en los edificios no nucleares no habría sido posible.

También se agradece a la propiedad compuesta por ITER Organization y FusionForEnergy (F4E) y a todos los organismos que trabajan en el complejo ITER, ya que sin ellos uno de los mayores proyectos en marcha a nivel mundial sería imposible.

Referencias

- [1] G.P. Girard, G. Grünthal, M. Nicolas, Design Earthquakes for ITER in Europe at Cadarache, 23rd Symposium on Fusion technology, Venice (Italy), 20-24 sept 2004.
- [2] European Comitee for Standarization, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, December 2004.
- [3] Nuclear Safety authority guidelines (ASN), Guides de l'ASN: Prise en compte du risque sismique à la conception des ouvrages de génie civil d'installations nucléaires de base à l'exception des stockages à long terme des déchets radioactifs, ASN/GUIDE/2/01, 2006.
- [4] Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, Monografía M-14 Recomendaciones para el proyecto y construcción de forjados mixtos de Chapa Nervada (F.M.C.N), ACHE Comisión 5 GT 5/6, Madrid, 2008.