

Análisis del efecto de amplificación sísmica por suelos en las normativas NCSE-02 y Eurocódigo 8: aplicación al terremoto de Lorca del 11 de Mayo de 2011

Analysis of the soil amplification factor in NCSE-02 and Eurocode-8 regulations: applications to the 11th May, 2011 Lorca earthquake

Carlos Corsino Fernández^{1*} y Julián García-Mayordomo²

Palabras clave

espectro de respuesta;
Lorca;
NCSE-02;
EC-8;

Sumario

Los terremotos son uno de los peligros geológicos que más pérdidas humanas y daños materiales han producido en la historia de la humanidad. La ingeniería sísmica tiene como objeto el estudio del comportamiento dinámico del terreno con el fin de diseñar estructuras y edificaciones adaptadas a los efectos desencadenados por los sismos.

Dentro de este propósito, una de las labores más importantes ha sido el estudio del efecto amplificador del movimiento sísmico por las características de los suelos, que puede aumentar considerablemente los daños producidos aun cuando la magnitud del terremoto no sea muy elevada.

En el presente artículo se aborda el estudio del efecto amplificador de los suelos según dos normativas sismorresistentes de carácter oficial en España: la vigente Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02) y la norma europea Eurocódigo 8 (EC-8). En primer lugar se analizan los criterios de clasificación de suelos y cómo afectan estos al coeficiente de factor de suelo según una normativa u otra en el cálculo de las acciones sísmicas de diseño, y en particular a los espectros de respuesta. A continuación se comparan los resultados de aplicar ambas normativas a escenarios geológicos típicos donde el criterio de clasificación de una norma u otra puede dar lugar a diferencias notables en el espectro de respuesta.

Finalmente, se aplican las dos normativas a un caso real: el terremoto de Lorca del 11 de Mayo de 2011. Los espectros de respuesta resultantes de aplicar una u otra normativa se comparan con el espectro de respuesta del registro acelerométrico del terremoto principal en la estación de Lorca, con el objetivo de discutir cuál de ellas se ajusta mejor a él.

Keywords

response spectrum;
Lorca;
NCSE-02;
EC-8;

Abstract

Earthquakes are one of the geological hazards which have produced more human and material losses in the history of mankind. Seismic engineering has the purpose of studying the soil dynamic behavior in order to design structures and buildings adapted to the effects triggered by earthquakes.

Within this purpose, one of the most important tasks has been the study of the amplifying effect of seismic movement due to ground characteristics, which is often a major cause responsible of the damage produced by earthquakes, even when their magnitude is not very high.

In this article, the soil amplifying effect is considered according to two official sismorresistant regulations in Spain: the current Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02) and the European regulation Eurocode 8 (EC-8). First, soils classification different criteria is analyzed and how this affects the soil factor and, particularly, the design seismic action in the form of response spectra. Subsequently, we compared the result of applying both regulations to typical geological scenarios where the application of either regulation may cause notable differences.

The second part of the paper deals with the comparison of NCSE-02 and EC-8 applied in the frame of a real case: the 11th May, 2011 Lorca earthquake. We compare the response spectra from both regulations to the actual response spectra derived from the accelerometric record of the earthquake at the Lorca station, and discuss which one fits it better.

1. INTRODUCCIÓN

Los daños producidos por los terremotos están muy relacionados con las características geotécnicas del terreno y

su respuesta dinámica. Por ello, la consideración del efecto amplificador del movimiento debido al terreno es una cuestión clave en la ingeniería sísmica, ya que controla finalmente la acción a tener en cuenta en el diseño de estructuras sismorresistentes.

Las normativas de construcción sismorresistente proporcionan una serie de criterios y pautas para tener en cuenta este efecto amplificador, sin tener que recurrir a estudios

* Corresponding author: corsino.carlos@gmail.com

¹ Iberoamericana de Hidrocarburos, S. A., Monterrey, México.

² Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España.

específicos de emplazamiento de elevado coste. Resulta interesante, por tanto, comparar las dos normas sismorresistentes oficiales disponibles en España, la NCSE-02 y el EC-8, así como aplicarlas a un caso real reciente, como es el terremoto de Lorca ocurrido el 11 de Mayo de 2011.

2. NORMATIVAS ESPAÑOLA (NCSE-02) Y EUROPEA (EUROCÓDIGO-8)

2.1. NCSE-02

La “Norma de Construcción Sismorresistente Española” (Ministerio de Fomento, 2002) es la normativa oficial de obligado cumplimiento en España. En ella se establece un mapa de peligrosidad sísmica en términos de aceleración horizontal en unidades g (fracción de la gravedad) (figura 1), denominada aceleración básica a_b . Se define como un valor característico de la aceleración horizontal de la superficie del terreno, en función del municipio del país, correspondiente a un período de retorno de 500 años. El mapa también muestra un coeficiente de contribución K , que considera la influencia en el espectro de respuesta de la ocurrencia de grandes terremotos en la zona de Azores-Gibraltar.

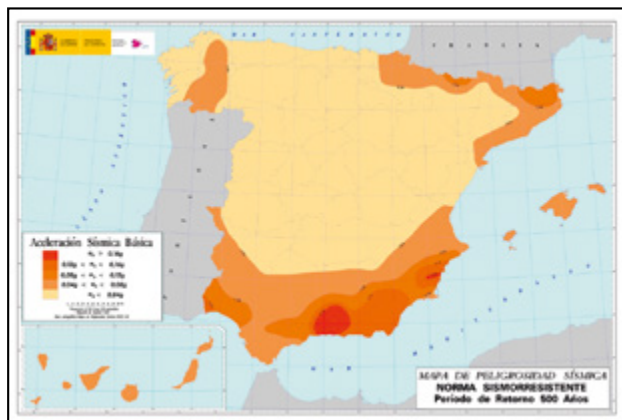


Figura 1. Mapa de Peligrosidad Sísmica de España (Ministerio de Fomento, 2002).

La NCSE-02 clasifica los terrenos en cuatro categorías, en base a la velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales V_s de cada uno de dichos terrenos. Cada uno se caracteriza por un coeficiente de terreno, C , desde más duro (tipo I) a más blando (tipo IV).

El coeficiente C de cálculo del terreno se determina estimando el espesor de las diferentes capas existentes en los 30 primeros metros bajo la superficie.

El efecto de amplificación sísmica por suelos, S , se considera en la ecuación para determinar la aceleración de cálculo a_c :

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$$

Donde ρ es el coeficiente de riesgo, según la importancia del tipo de edificación, y S el coeficiente de amplificación del terreno, que sigue unas fórmulas establecidas dependiendo de si a_c es menor a 0,1 g, mayor a 0,4 g, o tiene un valor intermedio entre ambos valores.

Los valores de a_b están normalizados para un terreno duro (idealizado como tipo II), por lo que el coeficiente S incrementa o disminuye la a_c cuando el terreno es más blando o más duro, respectivamente.

La NCSE-02 define un espectro de respuesta elástica de la aceleración, correspondiente a un oscilador lineal simple con un amortiguamiento de referencia del 5% respecto al crítico, que pretende definir las características del movimiento sísmico en la superficie del terreno. Los tramos en que divide cada espectro normalizado vienen dados por diferentes expresiones, las cuales están gobernadas por los siguientes parámetros:

$\alpha(T)$ = valor del espectro normalizado de respuesta elástica

T = período propio del oscilador en segundos

K y C = coeficientes de contribución y de terreno

T_A y T_B = períodos característicos del espectro de respuesta

El cálculo del espectro para una zona de España determinada se debe realizar escalando el espectro normalizado de la norma a la aceleración de cálculo que resulte de aplicar los parámetros ρ y S que correspondan a la importancia de la estructura y el coeficiente de amplificación del terreno en el emplazamiento, respectivamente.

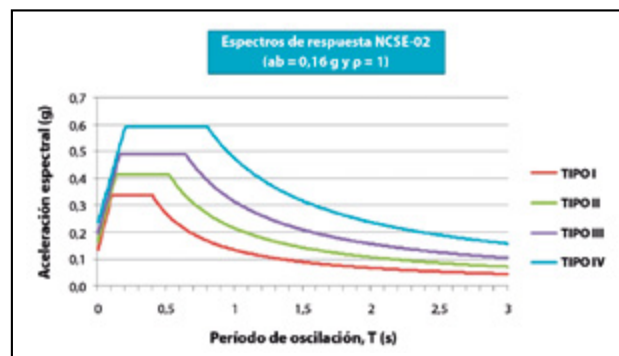


Figura 2. Ejemplo de espectros de respuesta de la NCSE-02 para una a_b de 0,16 g y $\rho = 1$. Cada curva representa cómo varía la aceleración espectral con el período de vibración en cada tipo de terreno, suponiendo que los 30 primeros metros son del mismo tipo.

2.2. EUROCÓDIGO-8 (EC-8)

Los Eurocódigos son un conjunto de normas europeas para la ingeniería aprobadas por el Comité Europeo de Normalización (CEN). En el “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings” (CEN, 2004), los terrenos se clasifican en cinco grupos, en base a la velocidad media de propagación de las ondas elásticas transversales V_s de dichos terrenos, desde más duro (tipo A) a más blando (tipo D).

Para establecer la acción sísmica de diseño el EC-8 define la aceleración máxima horizontal en roca (ag_R), valor que se tomará de un documento anejo particular para cada país europeo. Este parámetro va acompañado de un factor adimensional γ_i que considera el grado de importancia de la estructura. Esta aceleración está normalizada para terrenos tipo A (roca). En caso de que se considere un período de retorno diferente a 475 años, se deberá escalar la ag_R a dicho factor de importancia, para obtener la aceleración de diseño ag .

El EC-8 evalúa el efecto de la amplificación por suelos mediante el factor de amplificación S , que está normalizado

según el tipo de terreno y de terremoto de diseño considerado. El EC-8 establece dos tipos de espectro de respuesta, Tipo I o Tipo II según la magnitud del terremoto esperable más probable para el periodo de retorno que se analice en cuestión. El primero hace referencia a una magnitud de ondas superficiales (M_s) superior a 5,5, y el segundo a una (M_s) inferior a 5,5.

Se define un espectro de respuesta elástica para las componentes horizontales y verticales de la acción sísmica que define las características del movimiento en la superficie del terreno. Los tramos en que se construye cada espectro están definidos por diferentes expresiones, las cuales están controladas por los siguientes parámetros:

$S_e(T)$ = valor del espectro normalizado de respuesta elástica

T = período propio del oscilador en segundos

a_g = aceleración de diseño calculada

S = factor de amplificación del suelo

η : índice de amortiguamiento

T_b , T_c y T_D = períodos característicos del espectro de respuesta, normalizados según se considere el terremoto de Tipo I o II.

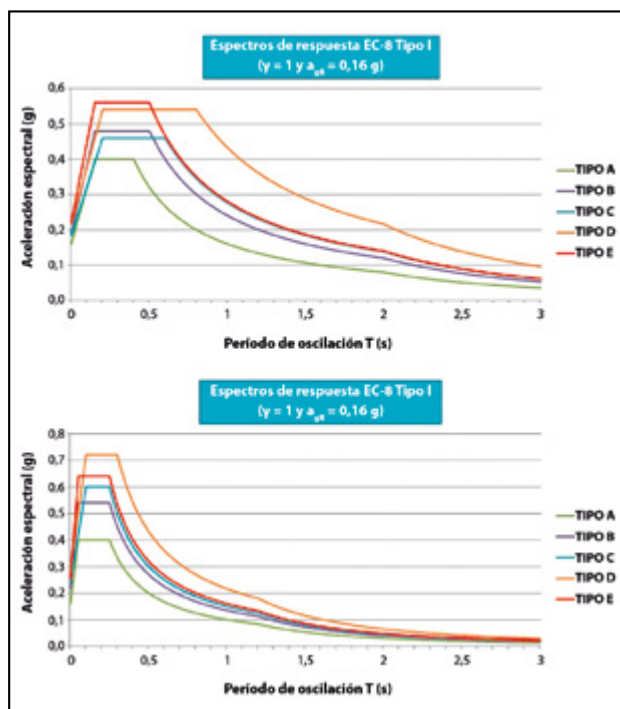


Figura 3. Espectros de respuesta Tipo I (arriba) y Tipo II (abajo) del EC-8 para una a_{gR} de 0,16 g y un $\gamma = 1$. Los tramos de aceleración espectral constante son más elevados y cortos en el Tipo II ya que para este tipo de sismos los coeficientes de amplificación S son mayores y los períodos característicos de vibración son menores.

3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA NCSE-02 Y EL EC-8

Existen diferencias entre la NCSE-02 y el EC-8 tanto en la clasificación de suelos como en la forma que adoptan sus espectros de respuesta. Esto hace que los resultados de aplicar una u otra normativa varíen según el caso estudiado. En la **tabla 1** se muestra la comparación de los parámetros que controlan los espectros de respuesta para las dos normativas.

Tabla 1. Parámetros de los espectros de respuesta para la NCSE-02 y el EC-8

Categoría	Ec-8	Ncse-02
Peligrosidad sísmica	$M_s > 5,5 \rightarrow$ Tipo I $M_s < 5,5 \rightarrow$ Tipo II	K (factor de contribución, efecto de terremotos grandes lejanos)
Períodos de oscilación característicos	3 períodos: normalizados según tipo I o II	2 períodos: función de K y C
Período de retorno (probabilidad)	475 años	500 años
Aceleración de diseño/cálculo	Función de γ . Normalizada para terrenos tipo A (roca)	Función de p y S . Normalizada para terrenos tipo II (rígido)
Definición del terreno	Discreta	Continua

3.1. Comparativa de configuraciones de suelos

En la práctica es muy frecuente encontrar configuraciones de suelos muy diferentes en los 30 primeros metros bajo la rasante. Variando la proporción de los espesores de cada tipo de terreno encontrados en dichos 30 metros superficiales, se pueden obtener factores de suelo muy diferentes según se aplique la NCSE-02 o el EC-8.

El EC-8 define un tipo de suelo, E, consistente en un suelo C o D de espesores entre 5 y 20 metros de material granular suelto, sobre un basamento rocoso. Por el contrario, la NCSE-02 no contempla este tipo de suelo. Esta diferencia entre las dos normas causa un contraste en el carácter discreto o continuo en la definición del terreno. Veamos varios casos:

a) Suelo IV+I o D y E

Suelo formado por un terreno **tipo I** (roca) y otro suprayacente **tipo IV** (muy blando), según la NCSE-02. En caso de aplicar el EC-8, una configuración similar de suelos podría dar las siguientes posibilidades:

- **Tipo A** si los 30 metros están constituidos enteramente por roca.
- **Tipo E** si los 5-20 primeros metros de los 30 están constituidos por suelo granular suelto y los restantes metros por roca.
- **Tipo D** si más de los 20 metros superficiales están constituidos por suelo granular suelto.

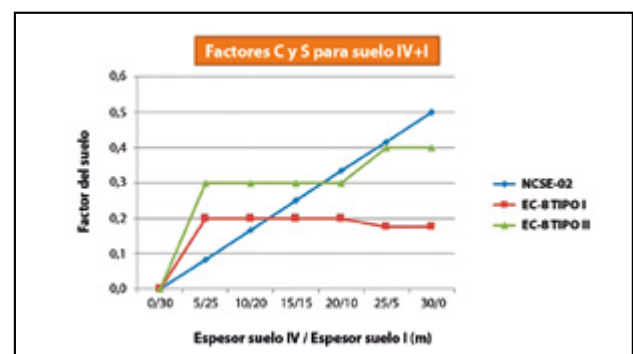


Figura 4. Variación de C y S con la proporción de espesores para la configuración IV+I, según la NCSE-02 y EC-8. Con la norma española dicha variación es continua, mientras que con la norma europea existen saltos entre una configuración y otra, ya que entre 5 y 20 metros superficiales de terreno tipo C o D se define el mismo factor S .

Ejemplos de suelo tipo E para este caso de configuración podrían ser:

- Unos depósitos blandos lacustres sobre un basamento rocoso.
- Un relleno arcilloso en un valle kárstico (dolina o polje).
- Unos depósitos de cenizas sobre una colada volcánica antigua.

b) Suelo III+I o C y E

Suelo constituido por un terreno **tipo I** (roca) y otro **tipo III** (blando), según la NCSE-02. En caso de aplicar el EC-8, la clasificación del suelo podría ser de:

- **Tipo A** si los 30 metros están constituidos enteramente por roca.
- **Tipo E** si los 5-20 primeros metros de los 30 están constituidos por suelo granular denso y los restantes metros por roca.
- **Tipo C** si más de los 20 metros superficiales están constituidos por arenas y gravas densas.

Un ejemplo de este escenario puede ser el borde de una cuenca sedimentaria donde se han depositado sedimentos en facies de abanico aluvial medias-distales (arenas, limos, arcillas) sobre el basamento de la cuenca (roca), o unos depósitos de terrazas fluviales sobre roca.

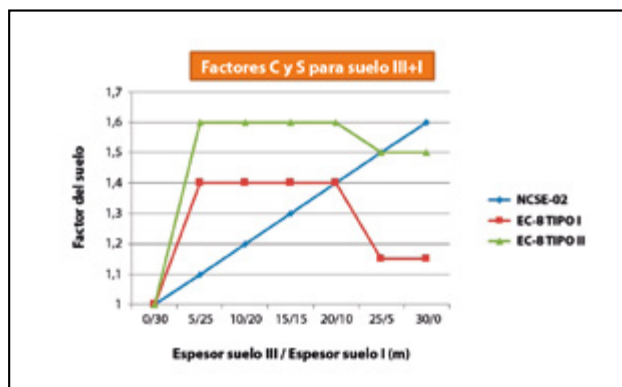


Figura 5. Variación de C y S con la proporción de espesores para la configuración III+I, según la NCSE-02 y EC-8.

c) Suelo I+II o A y B

Suelo formado por un terreno **tipo I** (roca) y **tipo II** (duro), según la NCSE-02. En caso de aplicar el EC-8 la clasificación del suelo podría variar desde:

- **Tipo A** si más de los 15 metros superficiales están constituidos por roca.
- **Tipo B** si más de los 15 metros superficiales están constituidos por arena y grava muy densa, o de arcilla muy compacta.

Un caso típico de suelo tipo B sería un suelo de relleno de cuenca sedimentaria en sus partes más próximas al relieve fuente, típica de sedimentos de abanico aluvial en facies proximales (gravas y arenas). Otro ejemplo lo constituiría una roca con un espesor de meteorización variable.

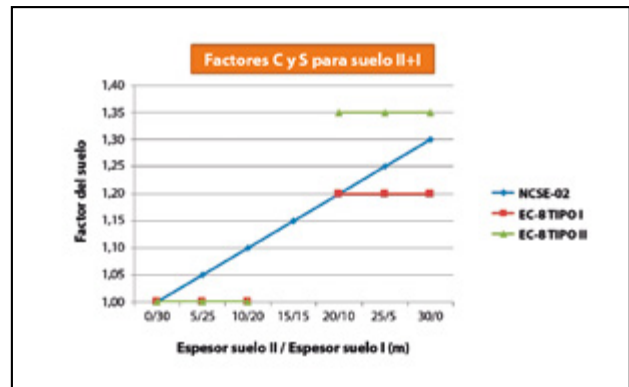


Figura 6. Variación de C y S con la proporción de espesores para la configuración II+I, según la NCSE-02 y EC-8. Para la configuración de 15 metros de cada tipo de suelo, el EC-8 no define un tipo de terreno E, generando un salto y haciendo que la definición del terreno sea discreta. De forma conservadora, se podría clasificar esta configuración como un terreno tipo B.

3.2. Comparación de espectros de respuesta

Dependiendo de la configuración de suelo que se considere, los espectros de respuesta que resultan de aplicar la NCSE-02 o el EC-8 son muy diferentes entre sí. Analicemos esto en los casos anteriormente descritos:

a) Suelo IV+I o D y E

La configuración de 25 metros de suelo tipo IV sobre 5 metros de suelo tipo I (IV_{25}/I_5) genera un espectro de respuesta para la NCSE-02 prácticamente idéntico en forma y

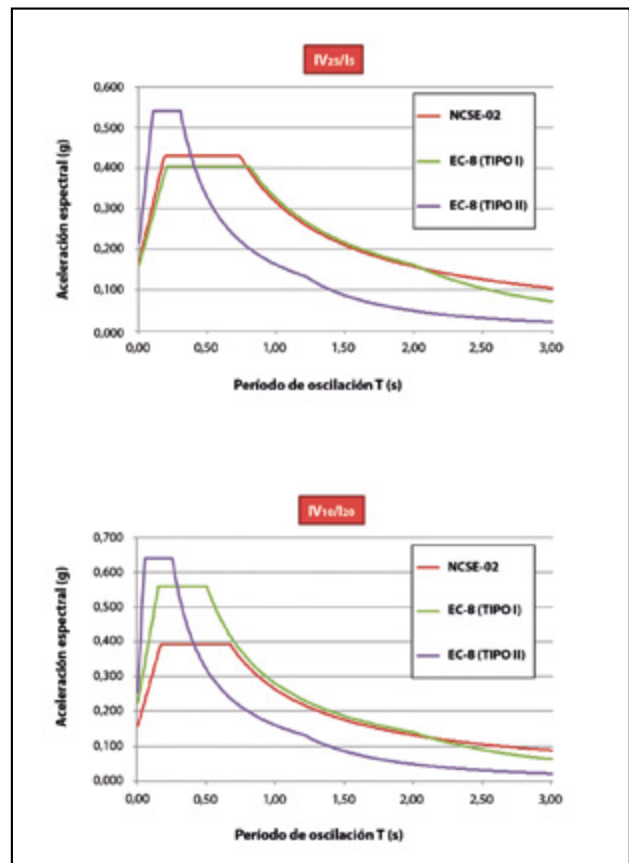


Figura 7. Espectros de respuesta según la NCSE-02 y el EC-8 para las configuraciones de suelos $IV_{(25)} / I_{(5)}$ (arriba) y $IV_{(10)} / I_{(20)}$ (abajo).

amplitud al resultante de aplicar el EC-8 Tipo I, mientras que el caso de 10 metros de suelo tipo IV sobre 20 metros de suelo tipo I (IV_{10}/I_{20}) genera unos espectros de respuesta muy diferentes (figura 7).

Este hecho llama especialmente la atención, dado que el EC-8 propone el uso del Tipo I cuando se espera que la M_s del terremoto de diseño sea superior a 5,5. Teniendo en cuenta que para el período de retorno analizado (475 años) el terremoto más probable en España, en general, es inferior a 5,5, el espectro de respuesta de la NCSE-02 debería ser más similar al Tipo II del EC-8.

b) Suelo III+I o C y E

Análogamente al caso anterior, la configuración de los 30 metros de suelo tipo III (III_{30}/I_0) genera un espectro de respuesta para la NCSE-02 muy similar en la forma y amplitud al resultante de aplicar el EC-8 Tipo I, mientras que el caso intermedio de 15 metros de cada tipo de suelo (III_{15}/I_{15}) genera espectros que difieren totalmente entre sí (figura 8).

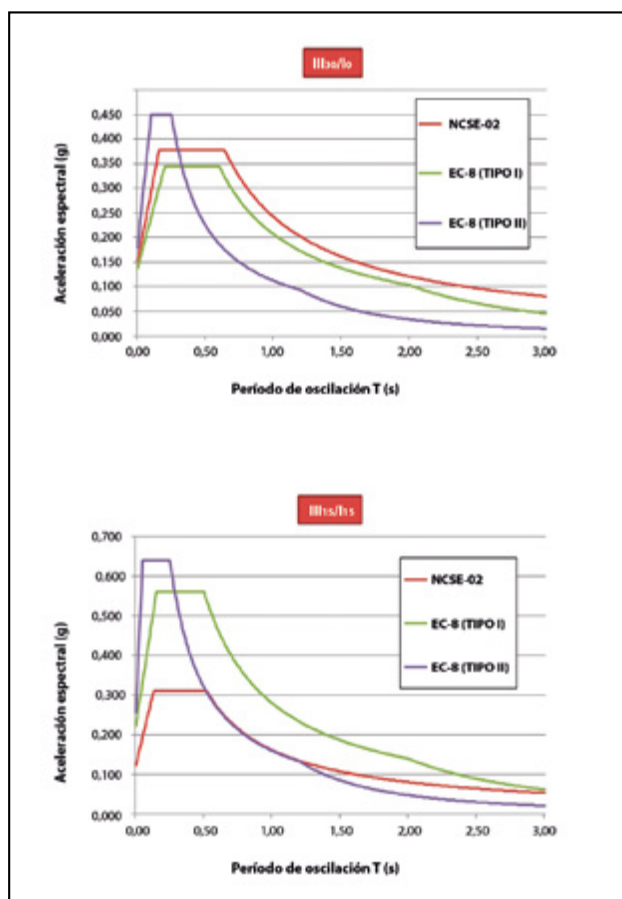


Figura 8. Espectros de respuesta según la NCSE-02 y el EC-8 para las configuraciones de suelos III(30) / I(0) (arriba) y III(15) / I(15) (abajo).

c) Suelo II+I o A y B

Tanto la configuración de 20 metros de suelo tipo II sobre 10 metros de suelo tipo I (II_{20}/I_{10}) como el caso de 5 metros de suelo tipo II sobre 25 metros de suelo tipo I (II_5/I_{25}), arrojan un espectro de respuesta de la NCSE-02 similar en forma al del EC-8 Tipo I.

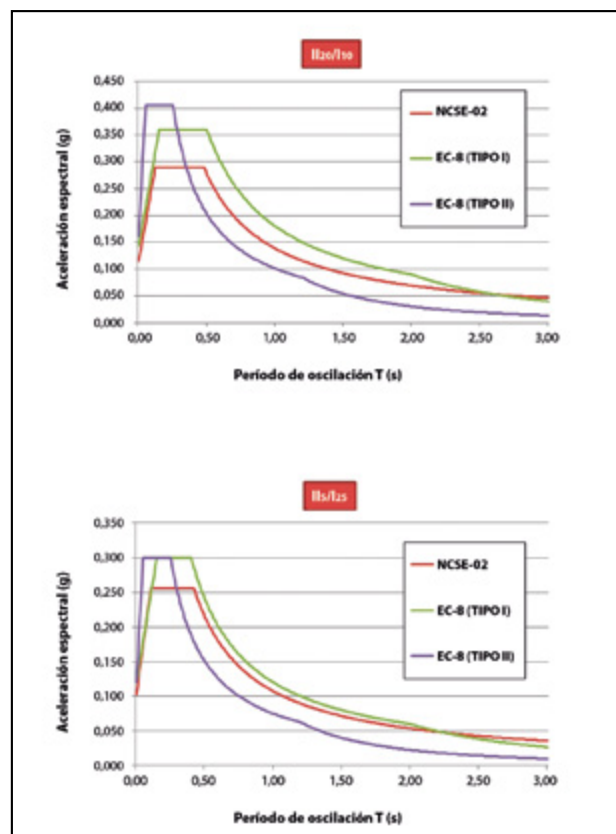


Figura 9. Espectros de respuesta según la NCSE-02 y el EC-8 para las configuraciones de suelos II(20) / I(10) (arriba) y II(5) / I(25) (abajo).

4. APLICACIÓN DE LA NCSE-02 Y EL EC-8 AL TERREMOTO DE LORCA DEL 11/05/2011

4.1. Contexto geológico

La ciudad de Lorca se encuentra en la Región de Murcia, en la mitad oriental de la Cordillera Bética. Ésta consiste en una cadena de montañas originada por la colisión entre las placas tectónicas Euroasiática y Africana. Los relieves que este fenómeno produjo, como Sierra Nevada o Sierra de los Filábrides, eran islas en una zona marina que comunicaba el océano Atlántico con el actual Mar Mediterráneo. Entre estos relieves existían cuencas marinas que actuaban como trampas de sedimentos provenientes de la erosión de los relieves emergidos adyacentes. Lorca se situaba en una de esas cuencas marinas. El acercamiento entre África y Europa provocó el cierre de la comunicación entre el Mediterráneo y el Atlántico y la cuenca de Lorca dejó de ser marina.

Debido a los procesos de plegamiento y fracturación originados por la colisión de las placas, y que siguen vigentes en la actualidad, se localiza en la región de Murcia una serie de fallas activas, siendo la más importante la **Falla de Alhama de Murcia (FAM)** (IGME, 2012). A ésta falla se le asocian varios terremotos dañinos ocurridos desde tiempos históricos, siendo el último el del **11 de mayo de 2011 en Lorca** (M_w 5,1).

Los terremotos del 11 de mayo de 2011 generaron importantes daños en las edificaciones de Lorca, así como gran número de inestabilidades de ladera que produjeron varios cortes temporales de carreteras. Así mismo, hubo que lamentar la muerte de 9 personas.

Las causas principales a las que se atribuyen los grandes daños ocasionados por el terremoto de Lorca son (Cabañas Rodríguez et al., 2011; Martínez Díaz et al., 2011):

- #### 4.2. Comparación entre los espectros de respuesta del terremoto y los de la NCSE-02 y el EC-8

Analizemos varias maneras diferentes de comparar los espectros de respuesta del sismo principal de Lorca, con los diferentes tipos de espectros que dictan las normas:

Caso 2. Comparación de los espectros de respuesta de cada componente del sismo principal junto con los espectros correspondientes al Tipo II (NCSE-02) y Tipo B (EC-8) escalados a la aceleración máxima registrada de cada componente (**figura 12**).

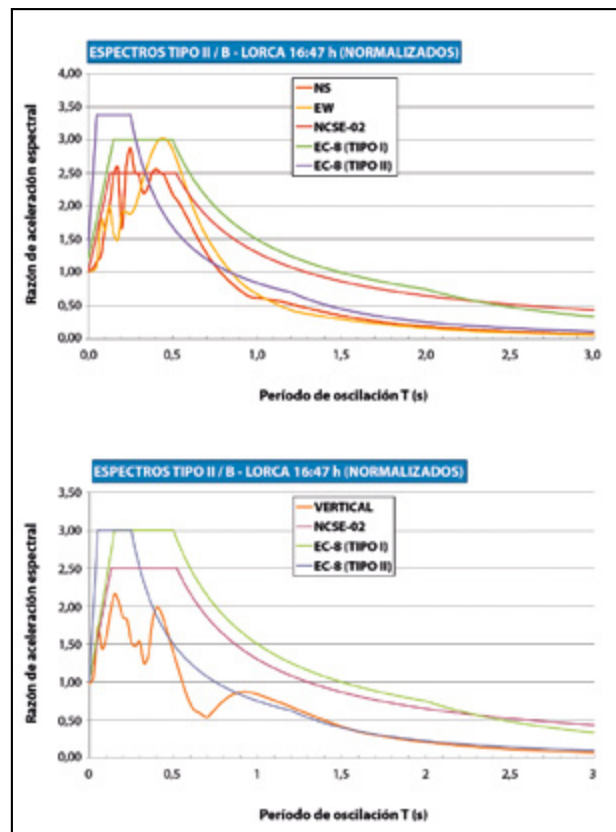
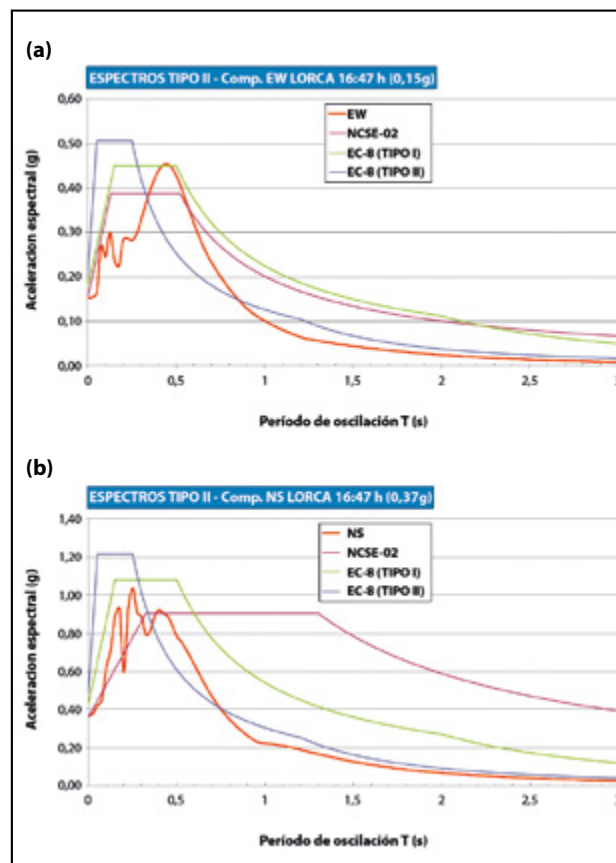


Figura 11. Comparación de los espectros de respuesta normalizados de las componentes **NS** y **EW** (arriba) y **Vertical** (abajo) del sismo principal de Lorca (16:47 h) con los espectros normalizados para terreno tipo II / tipo B. Para el caso de la componente vertical, las aceleraciones espectrales están escaladas a los coeficientes que indican las normas para considerar aceleraciones verticales: (0,7 para la NCSE-02, 0,9 para el Tipo I del EC-8, y 0,45 para el Tipo II del EC-8).



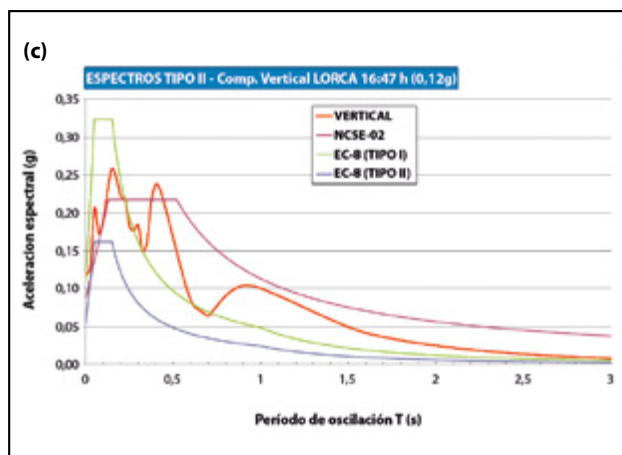


Figura 12. (a) Comparación de respuesta de la componente **EW** con los espectros para terreno tipo II / tipo B, para la aceleración máxima registrada de la componente EW (0,15g); (b) Comparación del espectro de respuesta de la componente **NS** con los espectros para terreno tipo II / tipo B, para la aceleración máxima registrada de la componente NS (0,37g); (c) Comparación del espectro de respuesta de la componente **Vertical** con los espectros para terreno tipo II / tipo B, para la aceleración máxima registrada de la componente Vertical (0,12g).

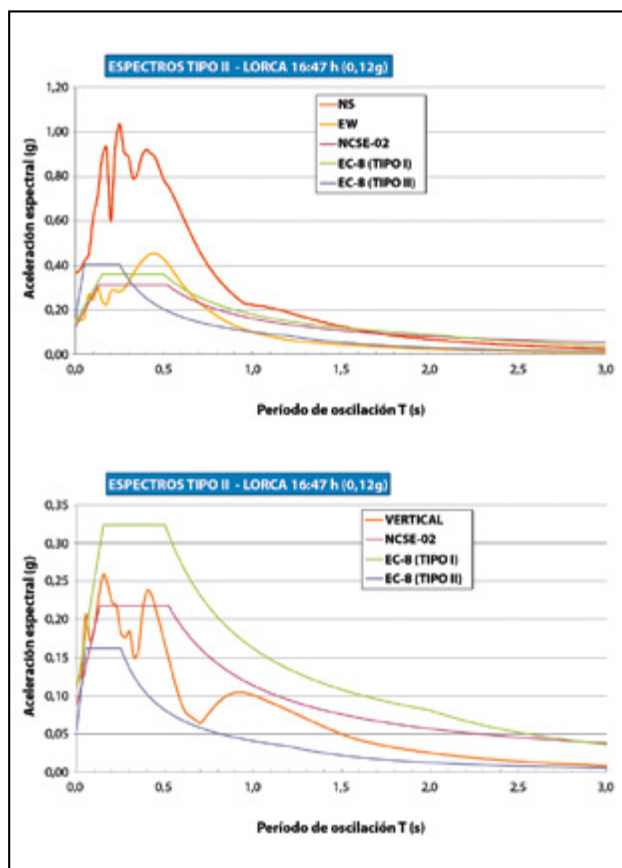


Figura 13. Comparación de los espectros de respuesta de las componentes **NS** y **EW** (arriba) y **Vertical** (abajo) del sismo principal de Lorca (16:47 h) con los espectros de terreno tipo II / tipo B, aplicando la a_c de 0,12g que propone la NCSE-02 para Lorca.

Caso 3. Comparación de los espectros de respuesta de las 3 componentes del sismo principal junto con los espectros correspondientes al Tipo II (NCSE-02) y Tipo B (EC-8) para la a_c (aceleración de cálculo) que propone la NCSE-02 para Lorca: 0,12g (figura 13).

4.3. Discusión

Caso 1: Comparación entre las formas espectrales normalizadas

Para la componente NS, el espectro normalizado del terremoto de Lorca en general queda bien cubierto para el EC-8 Tipo II, y la componente EW queda cubierta con el EC-8 Tipo I. Lo más llamativo es que el EC-8 Tipo I y la NCSE-02 dan valores espectrales muy superiores a los del espectro del terremoto de Lorca en la rama de decaimiento, a partir de $T=0,5$ s aproximadamente. Para la componente vertical, el espectro que más se parece es el del Tipo II del EC-8 en la forma, así como en la amplitud a partir de $T=0,5$ s.

El espectro que más se parece en general en la forma a cualquiera de las componentes es el Tipo II del EC-8, lo que es coherente con la magnitud de diseño propuesta en el EC-8 ($M_s < 5,5$) dado que el terremoto de Lorca fue de 5,1.

Caso 2: Comparación de cada componente con los espectros de Tipo II/Tipo B para la aceleración máxima de cada componente

- Componente EW ($A_{c\max} = 0,15g$).** El espectro está cubierto por los espectros de la NCSE-02 (en forma) y el Tipo I del EC-8, siendo demasiado conservadores para periodos largos ($T > 0,5$ s). En la rama de decaimiento el que más se asemeja es el Tipo II del EC-8.
- Componente NS ($A_{c\max} = 0,37g$).** Sólo el espectro de respuesta de Tipo II del EC-8 cubre el espectro de esta componente. No obstante, para periodos largos ocurre de forma análoga que para el caso anterior.
- Componente Vertical ($A_{c\max} = 0,12g$).** Su espectro de respuesta está cubierto en la forma y amplitud por el espectro de la NCSE-02. El Tipo II del EC-8 se adapta en forma pero no en amplitud al espectro del terremoto real, siendo inferior el que propone esta norma.

Caso 3. Comparación de cada componente con los espectros de Tipo II/Tipo B para la a_c que propone la NCSE-02 para Lorca

El espectro de la componente EW está cubierto por todos los espectros de las normativas, aunque el del Tipo I del EC-8 y el de la NCSE-02 son muy conservadores para periodos largos, mientras que para la componente NS el que mejor se adapta es el Tipo II del EC-8 en la forma, ya que presenta amplitudes muy superiores a los que propone esta norma.

En el caso de la componente vertical, su espectro se encuentra cubierto en forma por el Tipo II del EC-8, siendo el Tipo I y la NCSE-02 demasiado conservadores para la rama de decaimiento a partir de $T > 0,5$ s.

5. CONCLUSIONES

5.1. Diferencias entre NCSE-02 y EC-8

- Para un mismo perfil del terreno la aplicación de ambas normas puede producir espectros de respuesta

muy diferentes debido al diferente criterio utilizado en la clasificación de los suelos. Por ejemplo, para el caso de (IV_{25}/I_5) la NCSE-02 da un factor de suelo de 1,83, mientras que el EC-8 lo calcula en 1,35 (Tipo I) y 1,8 (Tipo II).

- Por lo general, la amplitud del techo espectral ($0,5 s < T < 1,5 s$) en la NCSE-02 es siempre inferior a la del EC-8, independientemente del Tipo I o Tipo II considerado.
- En general para todas las configuraciones de suelos analizadas, la forma del espectro de la NCSE-02 se parece más al Tipo I del EC-8, que es la forma espectral propuesta para terremotos de diseño de $M_s > 5,5$. Este resultado es muy llamativo, dado que la magnitud del terremoto más probable en España para un periodo de retorno de 500 años es, en general, inferior a 5,5.
- Sin embargo, cuanto mayor es el espesor de un suelo blando (tipo IV o tipo D), más se parece el espectro de la NCSE-02 al Tipo I del EC-8.

5.2. Comparación de las normas con el espectro del terremoto de Lorca

- Cualquier componente del espectro de respuesta del terremoto principal de Lorca está mejor representada, en general, por un espectro Tipo II del EC-8 que por la vigente NCSE-02. Esto es coherente con lo que propone el EC-8 de adoptar este tipo de espectro para terremotos de magnitud inferior a 5,5.
- La componente NS del terremoto de Lorca sobrepasa los techos de los espectros de ambas normativas. Quizás esto es debido a que en ninguna de ellas se considera el efecto fuente que tiene en cuenta la directividad de la rotura de la falla respecto al emplazamiento, así como la posición de éste respecto al plano de falla.
- El espectro Tipo I del EC-8 y el de la NCSE-02 cubren de forma general las componentes EW y Vertical pero son excesivamente conservadores para periodos largos ($T > 0,5 s$).
- Normalizando los espectros, o cuando se compara el espectro de cada componente con los de terreno tipo

II / clase B aplicando la a_c de dicha componente, los espectros están mejor cubiertos, siendo el Tipo II del EC-8 el que mejor se ajusta al terremoto de Lorca.

6. AGRADECIMIENTOS

Debo agradecer de manera especial y sincera al profesor Julián García Mayordomo por aceptarme para realizar esta tesis de master bajo su dirección. También agradezco a Luis Cabañas (IGN) por facilitarme el acceso a los registros acelerométricos y espectros de respuesta. Por último, quiero expresar también mi agradecimiento a los funcionarios de los diferentes organismos de Lorca que tan amablemente me brindaron su ayuda para acceder a la antigua cárcel donde se encuentra el acelerógrafo que registró los terremotos de Lorca del 11 de Mayo de 2011.

7. BIBLIOGRAFÍA

Ministerio de Fomento. (2002). *Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 - Parte general y edificación*. Capítulo 2.

COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN (CEN). (2004). *Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance.

José Jesús Martínez Díaz, Miguel Ángel Rodríguez-Pascua, Raúl Pérez López, Julián García Mayordomo, Jorge Luis Giner Robles, Fidel Martín-González, Martín Rodríguez Peces, Jose Antonio Álvarez Gómez, Juan Miguel Insua Arévalo. (2011). *Informe geológico preliminar del terremoto de Lorca del 11 de Mayo del año 2011, 5.1 Mw*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, Informe interno de acceso libre.

Instituto Geológico y Minero de España. (2012). *QAFI: Quaternary Active Faults Database of Iberia*. Último acceso Marzo 2013. Publicación online (<http://info.igme.es/qafi/>).

Luis Cabañas Rodríguez, Emilio Carreño Herrero, Arancha Izquierdo Álvarez, José Manuel Martínez Solares, Ramón Capote del Villar, José Martínez Díaz, Belén Benito Oterino, Jorge Gaspar Escribano, Alicia Rivas Medina, Julián García Mayordomo, Raúl Pérez López, Miguel A. Rodríguez Pascua, Patrick Murphy Corrella. (2011). *Informe del sismo de Lorca del 11 de Mayo de 2011*. IGN, Madrid, Informe interno de acceso libre.