

REVISIÓN DE MODELOS DE MOVIMIENTO FUERTE DEL SUELO Y APLICACIÓN A LA PREDICCIÓN DE ESPECTROS DE RESPUESTA

B.Benito¹, L.Cabañas¹, M. López², M.E. Jiménez¹, A. López-Arroyo

1. EUIT Topográfica. UPM, 2. EUIT Industrial. UPM

ma_ben@nivel.euitto.upm.es

RESUMEN

En este trabajo se realiza una aplicación práctica de cálculo de espectros de respuesta específicos en un emplazamiento dado, utilizando una metodología acorde al estado actual del arte. Para ello se revisan inicialmente los modelos de movimiento fuerte propuestos en la literatura, y se extraen las principales características que determinan su aplicabilidad: zona fuente de los datos, escalas y rangos de magnitud, distancia y clases de suelo adoptadas. Para la aplicación de estos modelos, se realiza previamente un análisis de peligrosidad en un cierto emplazamiento, que concluye estableciendo escenarios caracterizados por determinados pares magnitud-distancia. Éstos se introducen en los modelos anteriores y con ello se realiza la predicción de los espectros de respuesta correspondientes al emplazamiento en cuestión, los cuales son finalmente comparados con los establecidos en diferentes normativas.

Palabras clave: Modelos de movimiento fuerte, espectros de respuesta, peligrosidad sísmica.

SUMMARY

In this work a practical application of a methodology for specific response assesment in a certain site, is developed and carried out according to the state of the art. For that purpose, in a first stage the strong motion models proposed in the literature are revised, and, the main characteristics defining their application are extracted: source area data, scales, magnitude and distance ranges, and, site classifications adopted. These models are applied to a certain site, for that reason a hazard analysis of it is fulfilled previously, establishing scenarios characterized by certain magnitude-distance pairs. These are introduced in the aforementioned models and the corresponding spectra are predicted, which are finally compared with those established by different normatives.

Key words: Strong-motion models, response spectra, seismic hazard.

1 Introducción

La predicción del movimiento del suelo en un emplazamiento dado debido a terremotos ocurridos en su entorno, es una de las cuestiones de primordial interés en ingeniería sísmica. Dichos movimientos deben ser caracterizados, a efectos de diseño sismorresistente de estructuras, por medio de espectros de respuesta que proporcionen las amplitudes máximas esperadas para diferentes frecuencias del movimiento. Tradicionalmente, estos espectros se han construido “escalando” una forma espectral estándar con el valor de la aceleración pico, PGA, que representa la peligrosidad del emplazamiento. Esta es la solución adoptada por normativas como la Norma Sismorresistente Española NCSE-94, la Regulatory Guide 1.60 para diseño de instalaciones críticas, o el Eurocode 8. Los espectros obtenidos por esta vía presentan algunos inconvenientes, ya que numerosos errores e incertidumbres son introducidos por las siguientes causas:

- La PGA es generalmente obtenida por medio de correlaciones con la intensidad, I / PGA , con un alto grado de dispersión.
- El espectro estándar que se adopta no responde a las características del emplazamiento al que se aplica, es decir a un modelo adecuado fuente-medio-estación.
- La aceleración pico que caracteriza inicialmente el movimiento sólo proporciona información de la energía liberada en el rango de las altas frecuencias, pero no es representativa de la contenida en el resto del espectro.

Para solventar los problemas anteriores, algunas técnicas actuales proponen el desarrollo y uso de modelos de movimiento fuerte del suelo, que sirven para la predicción de ordenadas espectrales en función de la magnitud, distancia y tipo de suelo, permitiendo así construir espectros “punto a punto” que pueden considerarse específicos de un emplazamiento dado. La aplicación de estos modelos requiere previamente caracterizar la peligrosidad por medio de pares magnitud-distancia, que sean representativos de los máximos terremotos que afectan al emplazamiento, o de aquellos asociados a una cierta probabilidad de ocurrencia. Esto supone estimar escenarios de peligrosidad, a partir de los cuales se deducirán mediante los modelos calculados, los espectros asociados a los correspondientes movimientos.

Ésta es la línea seguida en este trabajo, en el que tras un análisis de los modelos de movimiento fuerte del suelo propuestos en la literatura, éstos se han empleado para la predicción de espectros en un emplazamiento situado en la provincia de Cáceres, elegido por estar su peligrosidad condicionada por terremotos en diferentes rangos de distancia. Finalmente, estos espectros han sido comparados con los establecidos por distintas normativas.

2 Revisión de Modelos de Movimiento Fuerte en la Literatura

La primera fase del trabajo ha consistido en la revisión de los modelos de movimiento fuerte propuestos en la literatura. En todos ellos las aceleraciones y/o velocidades espectrales se formulan en función de la magnitud y distancia, para el rango de frecuencias de interés en ingeniería sísmica. Generalmente en los modelos interviene también el tipo de suelo en el emplazamiento, que se incluye a través de un factor S que lo identifica, según la clasificación adoptada. Una diferencia esencial entre los distintos modelos es la zona fuente de los datos, que condiciona su aplicación a zonas de características afines. Además hay variaciones en las escalas de magnitud y distancia introducidas, así como en los rangos de validez del modelo atendiendo a estos parámetros. Por todo ello, para realizar una correcta aplicación, es importante examinar previamente las características principales de cada modelo y extraer la información necesaria para el posterior cálculo de espectros. Dichas características son sintetizadas en la tabla 1 y son descritas de forma resumida a continuación.

Ambraseys, Simpson and Bommer (1996). Las ecuaciones de atenuación propuestas predicen las ordenadas espectrales de aceleración absoluta, SA (unidades g), en función de la magnitud, distancia y geología del emplazamiento. Cubren el rango de frecuencias entre 0.5 y 10 Hz, y son válidas en los intervalos de magnitud y distancia correspondientes a los datos analizados. Los autores han analizado un conjunto de datos de movimiento fuerte del suelo compuesto por 422 registros triaxiales, correspondientes a 157 terremotos ocurridos en Europa y Oriente Medio, en un rango de magnitudes M_s entre 4.0 y 7.5, con profundidades focales iguales o menores a 30 km y distancias a la fuente inferiores a 200 km. La magnitud que interviene en las ecuaciones de atenuación es M_s , considerada por los autores como el mejor estimador del tamaño de un terremoto en la corteza y que presenta a su vez una buena correlación con el momento sísmico, M_0 . La distancia tomada responde a la expresión $R = (R_{JB}^2 + h_0^2)^{1/2}$, donde R_{JB} es la distancia mínima a la proyección vertical de la superficie de ruptura, definida por Joyner and Boore (1981), y h_0 es una constante que tiene en cuenta el hecho de que la fuente del movimiento no es necesariamente el punto más próximo a la proyección en superficie de la falla. Las condiciones locales se contemplan estableciendo 4 categorías de suelo -roca, suelo rígido, suelo blando y suelo muy blando-, atendiendo a la velocidad de las ondas de cizalla promediadas en los 30 m de espesor bajo el emplazamiento.

Benito (1993). Los modelos son deducidos mediante análisis de regresión de 62 registros de movimiento fuerte del suelo pertenecientes a la red acelerométrica ENEA-ENEL, que corresponden a terremotos de la serie de Friuli de 1976. Las ecuaciones formuladas son leyes de atenuación de ordenadas espectrales de aceleración absoluta SA (en gal), para un 5% de amortiguamiento, y de amplitud máxima del espectro de Fourier $F_{a_{max}}$ (en cm/s). Se obtienen ecuaciones independientes para tres categorías de suelo: roca, aluvión superficial y aluvión profundo. Para suelo duro o roca las ecuaciones de predicción de SA(ω) cubren el rango de frecuencias de 0.1 a 25 Hz, si bien los valores para frecuencias inferiores a 0.5 Hz no pueden considerarse fiables por cuestiones de filtrado de los registros. Para cada tipo de suelo las leyes se formulan expresando el parámetro de movimiento fuerte en función de la magnitud local M_L y la distancia hipocentral, R_h . Los rangos cubiertos por las observaciones para estos parámetros son: $4.2 < M_L < 6.5$ y $2 < R_h < 194$ km. El estudio incluye, además, un análisis detallado de la influencia de la magnitud y la distancia en las aceleraciones espectrales para diferentes frecuencias del movimiento y para cada tipo de suelo.

Sabetta and Pugliese (1996). Este trabajo analiza un conjunto de 95 acelerogramas, correspondientes a 17 terremotos italianos, para estudiar la atenuación del espectro de respuesta y simular acelerogramas artificiales, en función de la magnitud, distancia y geología del emplazamiento. Mediante análisis de regresión en dos pasos se obtienen ecuaciones para la predicción de la PGA, la Intensidad de Arias (1970), la Duración de Vanmarcke and Lai (1980) y las ordenadas espectrales en términos de pseudo-velocidad relativa PSV, para 14 frecuencias en el rango de 0.25 a 25 Hz, tanto en la componente vertical como para la máxima de las dos horizontales. La magnitud empleada es la magnitud local, M_L , cuando ésta es inferior a 5.5 y la magnitud de ondas superficiales, M_s , cuando ambas son iguales o superiores a este valor. Los autores optan por esta dualidad en la escala de magnitud, debido a que así evitan efectos de saturación de la M_L . Además en los rangos elegidos ambas magnitudes correlacionan linealmente con la magnitud momento, M , que resulta la medida más estable de este parámetro. El rango cubierto por las observaciones es $4.6 < M < 6.8$. La distancia introducida es la epicentral, R_{ep} y la distancia R_{JB} , (Joyner and Boore, 1981) desarrollándose ecuaciones para ambos tipos. Los datos analizados cubren el rango de 1 a 200 km. La influencia de la geología local es considerada estableciendo 3 clases de suelo, que distinguen suelo duro, aluvión superficial y aluvión profundo, atendiendo al espesor de los materiales y a la velocidad de las ondas de cizalla.

Tento, Franceschina and Marcellini (1992). Se analizan 137 acelerogramas de la red acelerométrica ENEA-ENEL correspondientes a 40 terremotos registrados en Italia, con los que se deducen ecuaciones de predicción de la PGA, en gal, y de las ordenadas del espectro de respuesta en términos de pseudo velocidad relativa PSV, en cm/s. Estas se obtienen cubriendo el rango de periodos de 0.04 a 2.75 s y para un 5% de amortiguamiento crítico. La magnitud empleada es magnitud local, M_L y la distancia R responde a la expresión $R = (d^2 + h^2)^{1/2}$, donde d es la distancia más próxima a la falla y h la profundidad focal. Los rangos cubiertos en las ecuaciones para ambos parámetros son: $4 < M_L < 6.6$ y $3.2 < R < 170$ km. Las ecuaciones deducidas no contienen un término representativo de las condiciones locales, por lo que los parámetros predichos resultan valores promedio de diferentes suelos.

Dahle, Bungum and Kvamme (1990). En este estudio se analiza una muestra de 87 registros de movimiento fuerte correspondientes a 56 terremotos intraplaca ocurridos en Norteamérica, Europa, China y Australia. Mediante análisis de regresión en dos pasos se desarrollan modelos de atenuación de la aceleración pico, y de la pseudo-velocidad relativa para frecuencias de 0.25, a 40 Hz, y con un amortiguamiento crítico del 5%. También se deducen atenuaciones del espectro de Fourier de aceleración. Las ecuaciones para la predicción de estas variables se formulan únicamente en función de la magnitud y la distancia y no incluyen explícitamente un término de efecto local, sino que representan valores promedio de diferentes condiciones geológicas. La magnitud elegida es magnitud de ondas superficiales M_s y como término de distancia los autores introducen distancia hipocentral R_h , matizando que para los terremotos de la muestra no es muy diferente de la distancia R_{JB} . Las

ecuaciones resultantes incluyen términos que contemplan explícitamente la atenuación geométrica y la atenuación anelástica y son especialmente indicadas para la predicción de espectros de Fourier y respuesta correspondientes a terremotos intraplaca, en el rango de magnitudes $3 < M_s < 7$ y para distancias hipocentrales entre 10 y 1000 km.

Atkinson and Boore (1996). Este trabajo presenta un modelo para el Este de Norteamérica obtenido mediante simulación numérica basada en el modelo estocástico de fuente puntual, originalmente propuesto por Hanks y McGuire (1981), en el que además se utilizan relaciones empíricas previas (de la misma región), para la obtención de parámetros del modelo de fuente y propagación. Las simulaciones fueron realizadas en el rango de magnitudes $4 < M < 7.25$, para distancias R_h comprendidas entre 10 y 500 km, considerando emplazamientos en roca. Las ecuaciones cuadráticas deducidas por regresión de los puntos obtenidos en la simulación, son válidas para la predicción de PGA, en g, PGV, en cm/s y aceleraciones espectrales absolutas $SA(\omega)$, en g, en el rango de frecuencias entre 0.5 y 20 Hz, para un 5% de amortiguamiento crítico, y en los intervalos de magnitud y distancia anteriores.

Toro, Abrahamson and Schneider (1996). Los modelos están deducidos para emplazamientos en roca, en la región Centro y Este de Norteamérica. Se basan en simulación numérica según el modelo estocástico de fuente puntual anterior, y aplicando la teoría de propagación de rayos en una estructura de corteza estratificada horizontalmente. Se desarrollan 4 conjuntos de leyes de atenuación, combinando dos regiones de corteza -Continente Medio y Costa del Golfo- y dos escalas de magnitud: magnitud momento M y magnitud de la fase L_g, m_{Lg} . Las ecuaciones predicen aceleración pico, PGA y aceleraciones espectrales $SA(\omega)$, ambas en g, en el rango de frecuencias de 1 a 35 Hz. Los datos de magnitud introducidos oscilan entre $M=5$ y $M=8$. La distancia introducida responde a la expresión: $R_M = (R_{JB}^2 + c^2)^{1/2}$, donde c es una constante que se determina en el ajuste y que contempla la profundidad focal. El rango cubierto en las ecuaciones comprende distancias de 1 a 500 km, con mayor énfasis en el intervalo de 1 a 100 km. El trabajo incluye una cuantificación de las incertidumbres asociadas a los distintos parámetros y de la propagación de éstas a los resultados.

Youngs, Chiou, Silva y Humphrey (1996). El estudio en este caso, contiene relaciones de atenuación para zonas de subducción, dentro de las cuales se han considerado dos tipos de terremotos: los que suelen estar producidos por fallas inversas de poco ángulo, que ocurren en la interfase entre la placa subducente y la placa que cabalga; y los terremotos que tienen lugar dentro de la placa oceánica en subducción, que son típicamente eventos de falla normal y profundos. La magnitud utilizada es magnitud momento, M y se asume que la magnitud de ondas superficiales M_s es equivalente a M entre 6 y 7.5. El rango cubierto por los datos para este parámetro es $5 < M < 8.1$. La distancia fuente-estación es la mínima a la superficie de ruptura, R_{rup} , y cuando ésta no está bien definida se usa la distancia hipocentral, R_h . Ésta oscila entre 10 y 500 km para terremotos de la interfase y entre 50 y 500 km para los ocurridos en el interior de la placa oceánica, con alguna observación aislada para distancias mayores. Las condiciones locales se consideran clasificando los registros en tres grupos: roca, aluvión superficial y aluvión profundo. Las ecuaciones deducidas sirven para la predicción de la aceleración pico PGA y de la aceleración espectral absoluta SA, ambas en g, en el rango de distancias de 10 a 500 km, para magnitudes $M > 5$. La predicción se realiza para los tres tipos de suelo citados y en los dos regímenes tectónicos, siendo el intervalo de frecuencias cubierto para las ordenadas espectrales de 0.33 a 13. Hz.

Tabla 1

Sumario de las características de los diferentes modelos de movimiento fuerte analizados

Modelo	Zona Fuente	Magnitud		Distancia		Clasificación S	Parámetro Predicho
		Tipo	rango	Tipo	rango		
Ambraseys et al. (1996)	Europa y Oriente Medio (422 a.c.)	Ms	4.0 - 7.5	R	< 200 km	roca suelo rígido suelo blando suelo muy blando	SA (g) (0.5 - 10 Hz)
Benito (1993)	Friuli (Italia) (62 a.c.)	ML	4.2 - 6.5	Rh	(2 - 194 km)	roca aluvión superficial aluvión profundo	SA (gal) (0.1 - 25 Hz)
Sabetta & Pugliese (1996)	Italia (95 a.c.)	ML (<5.5) Ms(>=5.5)	4.6-6.8	Rep Rjb	(1-200 km)	roca aluvión superficial aluvión profundo	PGA (g) IA (cm ² /s ³) t V. Mark & Lai (s) PSV (cm/s) (0,25-25 Hz)
Tento et al (1992)	Italia (137 a.c.)	ML	(4.0-6.6)	R	(3.2-170 km)	No clasificación Condiciones promedio	PGA (gal) PSV (cm/s) (0,36 - 25 Hz)
Dahle et al (1990)	Norte América, Europa, China y Australia (87 ac.)	Ms	3 - 7	Rh	(10 -1000km)	No clasificación Condiciones promedio	PGA (m/s ²) PSV(m/s) FA (m/s) (0.25-10 Hz)
Atkinson & Boore (1996)	este de Norte América	M	4-7.25	Rh	(10-500 km)	roca	PGA (g) PGV (cm/s) SA (g) (0.5 - 20 Hz)
Toro et al. (1996)	centro y este de Norte America	M mLg	5 - 8	R	(1-500 km)	roca	PGA (g) SA (g) (1-35 Hz)
Youngs et al (1996)	Zona de subducción: interfase e intraslab	M	5 - 8.1	R rup ó Rh	(10-500 km)	roca aluvión superficial aluvión profundo	PGA (g) SA(g)

3 Aplicación al Cálculo de Espectros en el Emplazamiento de Estudio

Un caso práctico de aplicación de los modelos anteriores al cálculo de espectros se ha llevado a cabo en un emplazamiento genérico, situado en roca y localizado en la provincia de Cáceres. La elección de este emplazamiento ha sido motivada por el hecho de que su peligrosidad está condicionada por terremotos a distintas distancias, incluidos los lejanos de la fractura de Azores-Gibraltar; cobrando así mayor interés el análisis comparativo de los correspondientes espectros, que reflejan movimientos de distintas características espectrales. A su vez, todos ellos son comparados con los que establecen diversas normativas, escalados al valor de PGA que representa la peligrosidad total del emplazamiento. A través de la comparación se pretende analizar si los espectros de estas Normativas resultan o no conservadores en todo el rango de frecuencias de interés ingenieril, o si por el contrario se encuentran intervalos que no sean cubiertos por éstos.

3.1 Resultados del análisis de peligrosidad

El cálculo de espectros aplicando los diferentes modelos o escalando una forma estándar, requiere realizar previamente un estudio de peligrosidad en el emplazamiento. Este debe concluir con un valor de la aceleración pico esperada en el mismo, junto con los pares magnitud-distancia (M, R) correspondientes a los terremotos característicos que determinen su peligrosidad. Con el fin citado, el estudio de peligrosidad puede ser determinista o probabilista, siendo las principales diferencias en cuanto a los resultados que los primeros proporcionan valores máximos esperados, mientras que los segundos estiman valores asociados a diferentes probabilidades de excedencia. En cualquier caso, la aplicación que se realiza en este estudio requiere estimar, además de la peligrosidad total, la asociada a la ocurrencia de terremotos en diferentes rangos de distancia.

En esta primera aplicación, se ha partido de un estudio de peligrosidad determinista, que concluye estableciendo las intensidades máximas esperadas en el emplazamiento, correspondientes a los rangos de distancia significativos. Para cada uno de estos rangos se ha estimado el máximo terremoto registrado y el máximo creíble, caracterizados por una intensidad epicentral y una distancia epicentral, R_{ep} . A partir de esa intensidad se han estimado las magnitudes M_L , m_b y M_s , empleando diferentes correlaciones adecuadas para la zona de estudio. Por otra parte, se ha estimado la distancia hipocentral R_h , asumiendo una profundidad focal de 10 km en todos los casos, dado que todos los terremotos que afectan al emplazamiento son superficiales. Ambos tipos de distancias, R_{ep} y R_h son prácticamente coincidentes más allá de los 100 km. Con todo ello se obtienen los pares (magnitud-distancia) que representan los escenarios de peligrosidad en el emplazamiento, y que van a servir de punto de partida para el cálculo de espectros. La tabla 2 es un sumario de los diferentes valores resultantes siguiendo el procedimiento descrito. Como conclusión de este análisis se tienen cuatro pares (M, R) representativos de los escenarios de peligrosidad, si bien para cada uno de ellos se tienen tres estimaciones de magnitud (M_L, M_s y m_b) y dos de distancia (R_{ep} y R_h). La intensidad máxima en el emplazamiento que refleja la peligrosidad total es VII (MSK) y el valor correspondiente deducido para la PGA es 0.1 g.

Tabla 2

Parámetros característicos de los escenarios de peligrosidad en el emplazamiento de estudio

Rango de distancia	I_{max} creíble ⁽¹⁾	$R_{min}(z_i-s)$ ⁽²⁾	$I_{max}(s)$ ⁽³⁾	M_L	M_s	m_b	R_h
R < 50 km	VI	0	VI	4.1	3.5	4.3	10 km
50 km < R < 200 km	IX	188 km	VI	6.3	6.0	6.1	188,5 km
200 km < R < 300 km	X	223 km	VI 1/2	7.2	7.0	6.9	223,3 km
R > 300 km	XII	480 km	VII	8.5	8.5	8.7	480,1 km

(1) En zonas z_i incluidas en el rango de distancia; (2) Distancia mínima de la fuente z_i al emplazamiento s ;

(3) Intensidad máxima sentida en el emplazamiento.

3.2 Espectros resultantes

Introduciendo los pares magnitud-distancia deducidos en los modelos de movimiento analizados anteriormente, se han estimado los espectros específicos del emplazamiento. Además se han construido los espectros establecidos por diferentes normativas, cuya comparación con los anteriores permite extraer las conclusiones del trabajo.

3.2.1 Espectros calculados por aplicación de diferentes Normativas

Un primer cálculo de espectros en el emplazamiento se ha realizado escalando las formas espectrales estándar propuestas por la Norma Sismorresistente Española NCSE-94, el Eurocode 8 y la Nuclear Regulatory Commission (NRC), incluido en la Regulatory Guide 1.60. El valor tomado de PGA para escalar los tres espectros es 0.1 g. En todos los casos los cálculos se realizan en suelo duro o roca y en la aplicación de la NCSE-94 se toma un factor $k=1.4$, para contemplar la acción de Azores-Gibraltar en el emplazamiento de estudio. La figura 1 representa los tres espectros citados. Como puede observarse, el más conservador es el de la NRC en el rango de frecuencias $f < 10$ Hz, mientras que para frecuencias superiores a este valor son mayores las aceleraciones espectrales del Eurocode 8. El espectro de la NCSE-94 coincide enteramente con éste para $f < 2$ Hz.

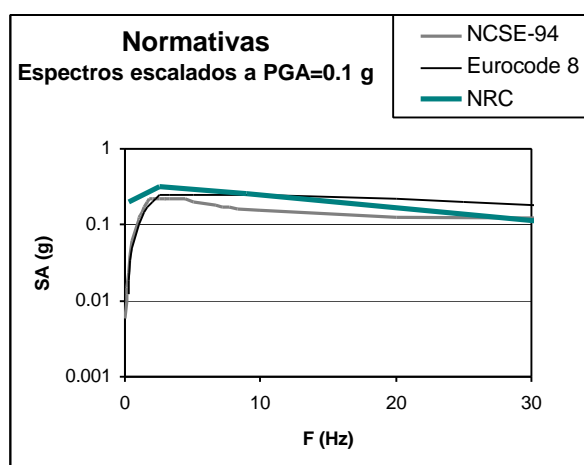


Figura 1.- Espectros de normativas NCSE-94, Eurocode 8 y NRC.

3.2.2 Espectros calculados con los diferentes modelos analizados

Las figuras 2 y 3 muestran los espectros calculados con los diferentes modelos de movimiento fuerte, comparados todos ellos con el de la NCSE-94, que se toma como referencia. En todos los casos los modelos han sido únicamente aplicados para magnitudes y/o distancias dentro de su rango de validez, lo que ha supuesto una restricción en los espectros resultantes. Ninguno de los modelos ha sido válido para los cuatro pares (M, R) representativos de la peligrosidad en el emplazamiento de estudio. El tipo de magnitud y distancia se ha elegido en cada caso compatible con las escalas adoptadas por el modelo en cuestión. La magnitud es M_L o M_s , dependiendo de éste. Para aquellos modelos que introducen la magnitud momento, M , se ha adoptado el mismo criterio de Sabetta y Pugliese (1996): M_L cuando es menor que 5.5 y M_s para valores superiores, debido a la correlación lineal de ambas escalas con M en estos rangos. La distancia tomada en todos los casos es hipocentral, que se aproxima a todas las definiciones incluidas en los modelos, especialmente para distancias superiores a 100 km, donde se realizan la mayor parte de las predicciones. Una excepción es hecha con el modelo de Sabetta y Pugliese (1996), para el que se toma distancia epicentral por ser la elegida por los autores.

Comentamos brevemente a continuación los resultados encontrados con cada uno de los modelos, para los pares (M, R) compatibles con los mismos.

- *Ambraseys et al (1996)*. Los correspondientes espectros son representados en la figura 2a y son notablemente más bajos que el de la NCSE-94 escalado 0.1 g, por lo que éste resulta conservador.

- *Benito (1993)*. Los espectros representados en la figura 2b para dos escenarios de peligrosidad, presentan valores pico entorno a 6 Hz, que son prácticamente cubiertos por el espectro de la NCSE-94. Para frecuencias superiores a ese valor el espectro de la Norma coincide bastante bien con el obtenido para terremotos próximos ($M_L=4.1$, $R_h=10$ km). Para frecuencias inferiores a 6 Hz el espectro de la NCSE-94 resulta conservador, comparado con los del modelo.
- *Sabetta y Pugliese (1996)*. Los espectros predichos, en términos de pseudo-aceleración espectral, PSA, son inferiores a los de la NCSE-94, en todo el rango de frecuencias y aparecen representados en la figura 2c.
- *Tento et al (1992)*. Al igual que en el caso anterior, el espectro de la NCSE-94 resulta conservador, comparado con los obtenidos con estos modelos para los pares (M , R) comprendidos en su rango de validez, como se muestra en la figura 2d

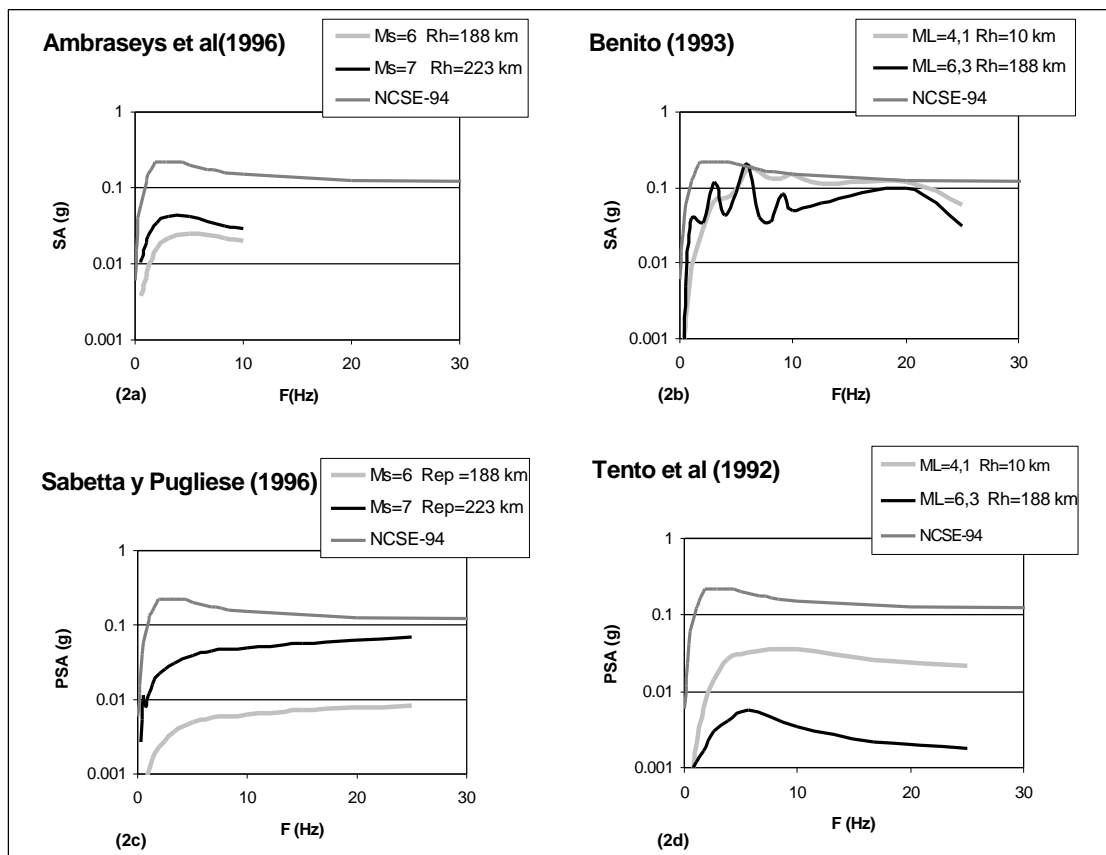


Figura 2.- Espectros de respuesta en el emplazamiento de estudio, correspondientes a diferentes escenarios de peligrosidad aplicando los modelos de movimiento fuerte: **2a)** Ambraseys et al.(1996); **2b)** Benito (1993); **2c)** Sabetta y Pugliese (1996); **2d)** Tento et al. (1992)

- *Dahle et al (1990)*. Los espectros en este caso son calculados para tres pares M - R , representados en la figura 3a, siendo todos ellos más bajos que el de la NCSE-94.
- *Atkinson y Boore (1996)*. El espectro de la NCSE-94 cubre los deducidos para los diferentes pares M - R , exceptuando los correspondientes a $M_L = 4.1$ y $R_h = 10$ km, para frecuencias mayores que 10 Hz. Las amplitudes deducidas con el modelo para altas frecuencias son superiores a las de la Norma Española, que en estas condiciones no resulta conservadora. Hay que tener en cuenta, no obstante, que el modelo es deducido por simulación con datos del este de Norte América.

- *Toro et al.* (1996). Este modelo y el siguiente son los únicos validos para magnitudes grandes y largas distancias, permitiendo el cálculo de espectros para el par $M_s = 8.5$ y $R_h = 480$, no cubierto con los otros modelos. Los espectros son representados en la figura 3c, en la que puede observarse que el correspondiente a este par, que en nuestro caso representa los movimientos generados por sismos de Azores Gibraltar, presenta ordenadas espectrales SA más altas que las predichas por la NCSE-94 para frecuencias bajas, inferiores a 2 Hz. Este resultado no es, en principio, sorprendente, ya que es de esperar que los movimientos generados por sismos lejanos tengan mayor contenido de bajas frecuencias que los de sismos próximos. Es en este rango donde pueden ser más cuestionables las aceleraciones espectrales predichas por formas estándar y donde éstas pueden resultar menos conservadoras para sismos lejanos. Este resultado merece especial atención, dada la problemática de la sismicidad de Azores-Gibraltar y su influencia en todo el Suroeste de la Península Ibérica.
- *Youngs et al.* (1996) Todos los espectros calculados con estos modelos son enteramente cubiertos por el de la NCSE-94, como puede verse en la figura 3d. Hay que tener en cuenta que son modelos para zonas de subducción, con un régimen tectónico muy diferente al de la zona de aplicación, por lo que parece más fiable el resultado encontrado con los modelos anteriores.

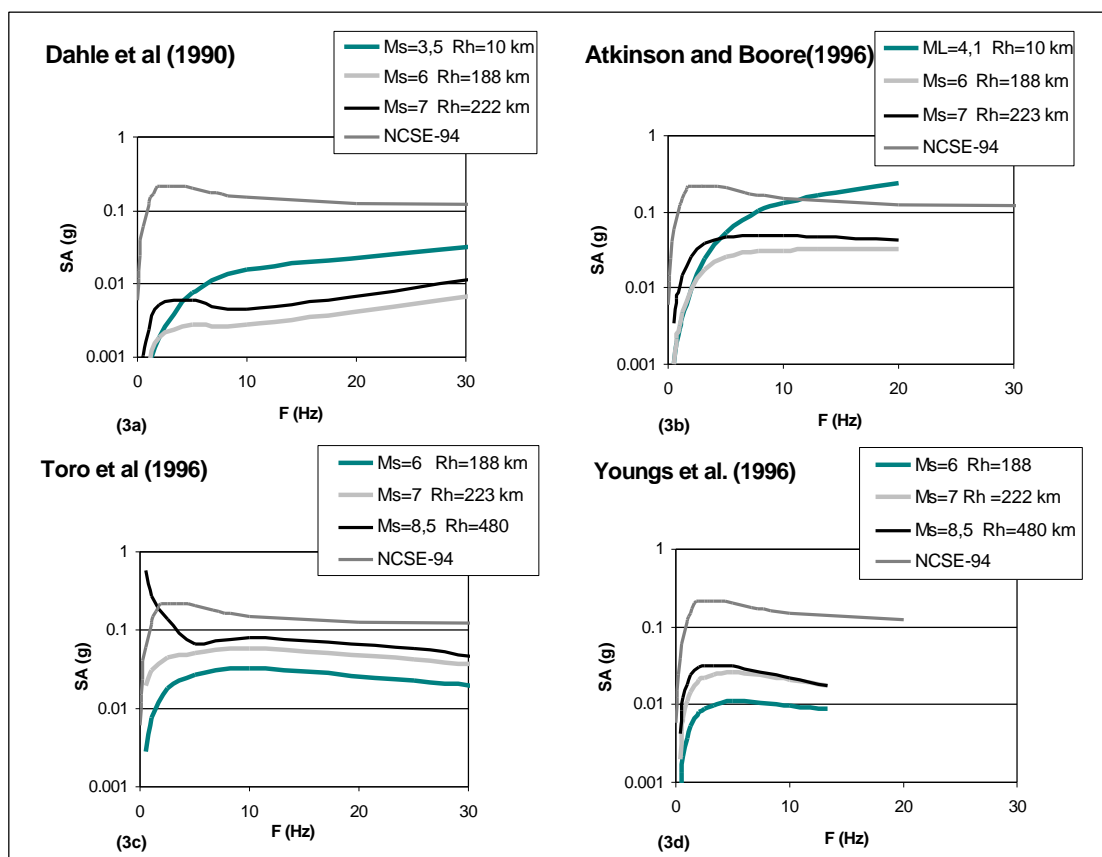


Figura 3.- Espectro de respuesta en el emplazamiento de estudio, correspondientes a diferentes escenarios de peligrosidad aplicando los modelos de movimiento fuerte: **3a)** Dhale et al.(1990); **3b)** Atkinson & Boore(1996); **3c)** Toro et al.(1996); **3d)** Youngs et al. (1992)

4 Conclusiones

De los resultados obtenidos podemos extraer, en síntesis, las siguientes conclusiones:

- Los espectros calculados para diferentes escenarios de peligrosidad en el emplazamiento objeto de estudio (provincia de Cáceres), con diferentes modelos de movimiento fuerte, resultan generalmente más bajos que los obtenidos con la forma espectral estándar de la NCSE-94, escalados a 0.1 g; siendo éste el valor que representa la peligrosidad total del emplazamiento.
- Una excepción a la afirmación anterior se presenta con los espectros predichos con el modelo de Atkinson y Boore (1996) para $M_L=4.1$ y $R_h=10$ km y para frecuencias superiores a 10 Hz. El espectro de la NCSE-94 no cubre el rango de altas frecuencias para terremotos próximos, según este modelo.
- Otra excepción se presenta con los espectros asociados a sismos lejanos ($M_s=8.5$, $R_h=480$ km), aplicando el modelo de Toro et al. (1996), en el rango de las bajas frecuencias, $f < 2$ Hz. Las correspondientes aceleraciones espectrales no son tampoco cubiertas por la forma espectral estándar. Este resultado cuestiona la validez del espectro de la NCSE-94 en el rango de bajas frecuencias para los sismos de Azores-Gibraltar en todo el Suroeste de la Península. Parece conveniente continuar la investigación a este respecto, proponiendo tal vez modelos más afines a la zona a tratar.
- De los tres espectros analizados propuestos por Normativas, resulta más conservador el de la NRC(R.G. 1.60) en el rango de frecuencias $f < 10$ Hz, y el del Eurocode (para frecuencias superiores a este valor. El espectro de la NCSE-94 coincide enteramente con éste para $f < 2$ Hz.

5 Referencias

- A.E.I.S. "25 años de Normativa Sismorresistente en España (1969-1994)".
- Ambraseys N.N.; Simpson K.A. and Bommer J.J. (1996)**, "Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 25, pp. 371-400.
- Arias A. (1970)**, "A measure of Earthquake Intensity, in *Seismic Design of Nuclear Power Plants*" R. Hansen (Editor), M.I.T. Press, Cambridge.
- Atkinson G.M. and Boore D.M. (1996)**, "Some Comparisons between Recent Ground-Motion Relations", *Seismological Research Letters*, Vol. 68, pp. 24-40.
- Benito B. (1993)**, "Estimación de Parámetros Sísmicos y Espectros Específicos de Respuesta Característicos del Movimiento del Suelo en Emplazamientos de la Península Ibérica", Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, pp. 349.
- Dahle A.; Bungum H. and Kvamme L.F. (1990)**, "Attenuation Models Inferred from Intraplate Earthquake Recordings", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 19, pp. 1125-1141.
- Eurocode 8 (1994)**, "Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures", ENV 1998 1-1/2/3 CEN Comité Européen de Normalisation Brussels.
- Hanks T. and McGuire R. (1981)**, "The Character of high-frequency Strong Ground Motion", *BSSA* Vol. 46, pp. 105-145.
- Joyner W.B. and Boore D.M. (1981)**, "Peak Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, pp. 2011-2038.
- Sabetta F. and Pugliese A. (1996)**, "Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motions", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 86, pp. 337-352.
- Tento A.L.; Franceschina L. and Marcellini A. (1992)**, "Expected Ground Motion Evaluation for Italian Sites", *Proc., Tenth World Conf. Earthq., Madrid*, Vol. 1, pp. 489-494.
- Toro G.R.; Abrahamson N.A. and Schneider J.F. (1996)**, "Model of Strong Ground Motions from Earthquakes in Central and Eastern North America: Best Estimates and Uncertainties", *Seismological Research Letters*, Vol. 68, pp. 41-57.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (1973)**, "Regulatory Guide 1.60" (Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants) pp. 6.
- Vanmarcke E.H. and Lai S.P. (1980)**, "Strong-Motion Duration and RMS Amplitude of Earthquake Records", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 70, pp. 1293-1307.
- Youngs R.R.; Chiou S.J.; Silva W.J. and Humphrey J.R. (1996)**, "Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes", *Seismological Research Letters*, Vol. 68, pp. 58-73.