

Caracterización del Movimiento del Suelo en Ingeniería Sísmica

Belén BENITO y Luis CABAÑAS
E.U.I.T. de Topografía (UPM)

RESUMEN

Este trabajo se centra en los aspectos relacionados con la caracterización del movimiento del suelo en un emplazamiento dado, con fines de diseño sismorresistente, que se aborda tras el estudio de la peligrosidad y puede considerarse concluyente del mismo. Comienza exponiendo los parámetros y formas de representación más comúnmente empleados para caracterizar el movimiento en los emplazamientos de las estructuras a diseñar, que se introducirán después en los cálculos dinámicos de las mismas. En relación con la forma de representación, se hacen algunas consideraciones sobre la importancia del contenido frecuencial del movimiento en el grado de daño que experimenta la estructura, razón por la cual el espectro de respuesta es la representación más generalizada con el fin propuesto. No obstante se revisan otros parámetros que tienden a emplearse de forma complementaria, combinando información tanto de las amplitudes como de las frecuencias de la agitación. Se exponen también los antecedentes y estado actual del arte en la estimación de parámetros y espectros, una vez determinadas las características de los movimientos esperados por medio de estudios de peligrosidad. Se concluye el trabajo indicando cómo se aborda el problema en Normativas Sismorresistentes, con un análisis particular del tratamiento seguido por la NCSE-94, el Eurocode n.º 8 y la Normativa Nuclear.

ABSTRACT

This work is focused on the features concerning the characterization of ground motion in a given site, which follows to the hazard assessment and becomes the conclusion of these studies. It begins with an explanation of the parameters and representation ways most commonly used to characterize the ground motion in the site of the structures to be designed, which will be later introduced in the dynamic calculations of these. Regarding the type of representation, some considerations are made on the relevance of frequency content of the motion in the damage degree suffered by the structure. This is the reason for which the response spectrum is the most generalized representation of movement. Nevertheless, other parameters are examined which tend to be used complementarily, combining information both of the amplitudes and frequencies of motion. We also show the antecedents and the current state of the art in the estimation of parameters and spectra, once the characteristics of the expected motions have been determined by means of hazard studies. The paper concludes with an account of how the problem is approached in Seismic Building Codes, with a specific analysis of the treatment followed by the NCSE-94, the Eurocode n.^o 8 and the Nuclear Normative.

1. INTRODUCCIÓN

La predicción del movimiento del suelo causado por los terremotos que pueden afectar a un cierto emplazamiento es uno de los retos que se plantean actualmente en el campo de la sismología y que presenta, a su vez, gran interés en el ámbito de la ingeniería sísmica.

El diseño antisísmico requiere determinar previamente las características de los sismos esperados en una zona, que afectarán previsiblemente a las edificaciones asentadas en la misma, durante su tiempo de vida útil. Dichas características serán después introducidas en los cálculos dinámicos de las estructuras, siendo ésta una cuestión abordada por los códigos y normativas sismorresistentes.

La caracterización sísmica de emplazamientos es, por tanto, uno de los primeros pasos a seguir en planificación urbanística y territorial, así como en el diseño de instalaciones críticas, tales como centrales nucleares y almacenamiento de residuos radiactivos; o en grandes obras de ingeniería, como presas o plantas industriales.

La estimación de la respuesta de la estructura ante un determinado movimiento de entrada es el segundo problema que se plantea en el diseño sismo-

rresistente. Así pues, la ingeniería sísmica combina dos aspectos bien diferenciados. Todo lo referente a caracterización del movimiento configura el aspecto sismológico, mientras que lo relacionado con el comportamiento de la estructura constituye el más ingenieril. Dada la interrelación entre ambos, la caracterización del movimiento con el fin propuesto requiere una forma particular de representación, y el problema se sitúa en la frontera entre la sismología y la ingeniería.

2. PARÁMETROS Y FORMAS DE REPRESENTACIÓN DEL MOVIMIENTO

En el diseño sismorresistente la estructura se construye de modo que resista los valores máximos o probables de los parámetros del movimiento, que son estimados mediante estudios de peligrosidad. El periodo de retorno de la evaluación se fija en función del tiempo de vida útil de la estructura y de su importancia. Así para edificios ordinarios es habitual emplear periodos de retorno de 500 años, que significa que los parámetros resultantes tienen probabilidades anuales de no superación del 90% en 50 años, coincidiendo con su tiempo de vida útil. Para diseño de estructuras de especial importancia, como centrales nucleares, cuyo fallo pudiera tener consecuencias muy graves para la instalación, se acude generalmente a periodos de 10.000 años o aún mayores.

Hay que tener en cuenta que a medida que aumenta el periodo de retorno, los valores de los parámetros asociados son más altos, la probabilidad de superación más pequeña y el nivel de riesgo asumido es menor.

En cuanto a los parámetros característicos, cualquiera de los resultantes de un análisis de peligrosidad pueden considerarse estimativos del movimiento. Pero para fines de diseño antisísmico se requiere introducir dichos parámetros en los cálculos dinámicos de la estructura, y por tanto deben estar relacionados con su respuesta. Uno de los parámetros más empleados para este fin es la **aceleración pico, PGA**, que constituye una medida de la fuerza de inercia que ofrece la estructura al movimiento y en consecuencia, de su capacidad de daño. Sin embargo, esta amplitud máxima no es el único dato determinante de la respuesta de la estructura, de hecho la propiedad dinámica que la define es su frecuencia natural. Cuando ésta coincide con la frecuencia predominante del movimiento se produce resonancia y la energía se amplifica pudiendo causar mayor daño. Por ello las estructuras rígidas, de bajo periodo propio, se ven más afectadas por movimientos en los cuales la mayor parte de la energía está contenida en el rango de las altas frecuencias, mientras que lo contrario sucede con las estructuras flexibles.

Esto pone de manifiesto la necesidad de conocer, en aplicaciones de ingeniería sísmica, no sólo la amplitud máxima del movimiento sino también su contenido frecuencial. La forma más completa de representación del movimiento para fines de diseño es por medio de **espectros de respuesta**, que indican la respuesta máxima de osciladores simples de un grado de libertad con cierto amortiguamiento, ante una excitación sísmica, en función de la frecuencia propia del oscilador. Dicha respuesta puede expresarse en términos de aceleración, velocidad o desplazamiento para las distintas frecuencias del movimiento, $SA(\omega)$, $SV(\omega)$, $SD(\omega)$. Un esquema gráfico de la construcción de este tipo de espectros se muestra en la figura 1.

La interpretación física de los parámetros espectrales y la relación entre ellos se explica por las leyes de la mecánica que rigen la respuesta de un oscilador, cuyo fundamento teórico ha sido expuesto por Housner (1961) y Jennings (1983), entre otros.

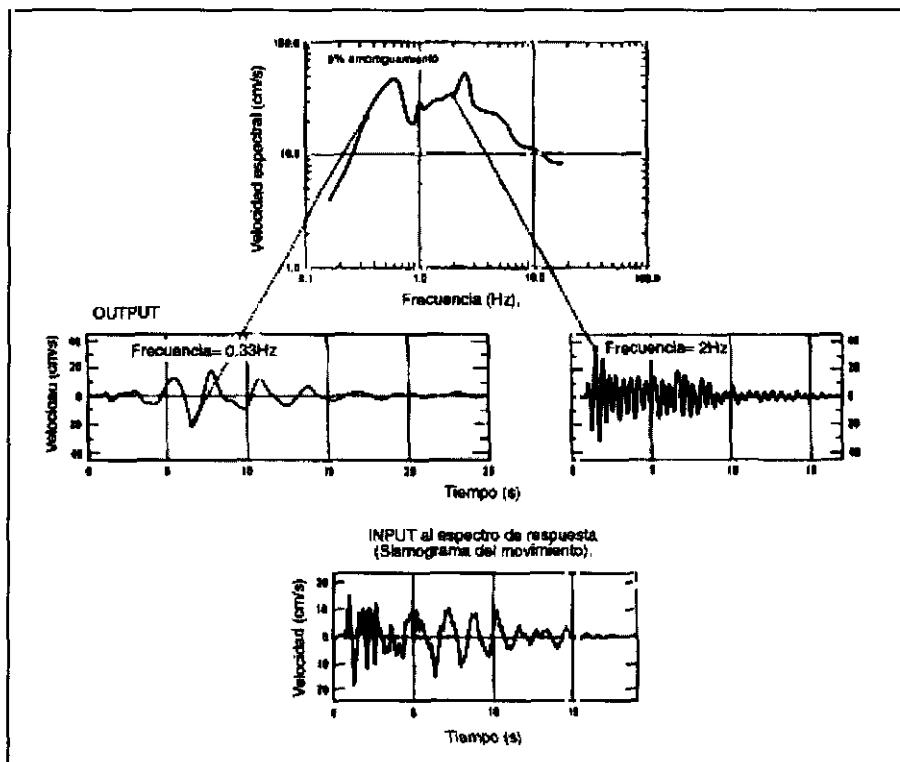


Figura 1. Esquema de construcción de espectros de respuesta (de Hays, 1980).

Cabe destacar, por su importancia práctica, la relación existente entre valores pico del movimiento y ordenadas espectrales. Para vibraciones de frecuencia muy alta una estructura rígida tiende a moverse con el terreno, y por tanto la aceleración de respuesta coincide prácticamente con la máxima del suelo. Por eso, la aceleraciónpectral de periodo $T = 0$ (límite de alta frecuencia), coincide prácticamente con la aceleración pico del movimiento, es decir, $SA(\omega \approx \infty) \equiv PGA$. Para vibraciones de frecuencia muy baja ($\omega \approx 0$) una aproximación similar se tiene con el desplazamiento en estructuras flexibles, por tanto, $SD(\omega \approx 0) \equiv PGD$. La aceleración pico del movimiento determina entonces el límite de alta frecuencia del espectro, mientras que el desplazamiento pico condiciona el de baja frecuencia.

Otra cuestión de importancia práctica es la forma de representación de estos espectros. Los parámetros espectrales definidos $SD(\omega)$, $SV(\omega)$, $SA(\omega)$, se pueden representar por medio de diagramas de distribución de amplitudes en función de la frecuencia, dando lugar entonces a los espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración, independientes entre sí. Pero la forma más común de representación en ingeniería sísmica, es por medio de diagramas trilogarítmicos, donde se indican simultáneamente los valores del desplazamiento $SD(\omega)$, junto con valores aproximados de los otros dos parámetros, pseudo-velocidadpectral, $PSV(\omega)$, y pseudo-aceleraciónspectral $PSA(\omega)$. Se construyen así pseudo-espectros, que constituyen una aproximación aceptable a los espectros de respuesta reales. Un ejemplo es mostrado en la figura 2.

La caracterización del movimiento del suelo (máximo o probable) por medio de espectros de respuesta es generalmente, el paso final de todo estudio de peligrosidad dirigido a diseño sismorresistente, con el que concluye el aspecto más sismológico del problema. A partir de ahí, comienza el análisis de la respuesta de la estructura cuyo diseño se pretende, que se aborda ya desde un punto de vista ingenieril.

Recientemente se investiga en la selección de otros parámetros del movimiento indicativos de la energía susceptible de dañar a las estructuras, que puedan ser considerados *parámetros de daño potencial*. Estos pueden ser complementarios con la PGA y con el espectro de respuesta y ser empleados para definir valores umbrales, a partir de los cuales se espera un cierto grado de daño, dependiendo de la vulnerabilidad de la estructura, lo que tiene indudable interés en diseño sismorresistente.

La mayoría de los parámetros propuestos en la literatura con este fin proporcionan una medida de la energía liberada en un cierto rango de frecuencias, considerando tanto la amplitud como el contenido frecuencial, y también se proponen otros indicativos de la duración del movimiento. En relación con este último aspecto, que puede ser determinante en la respuesta de la instalación, se

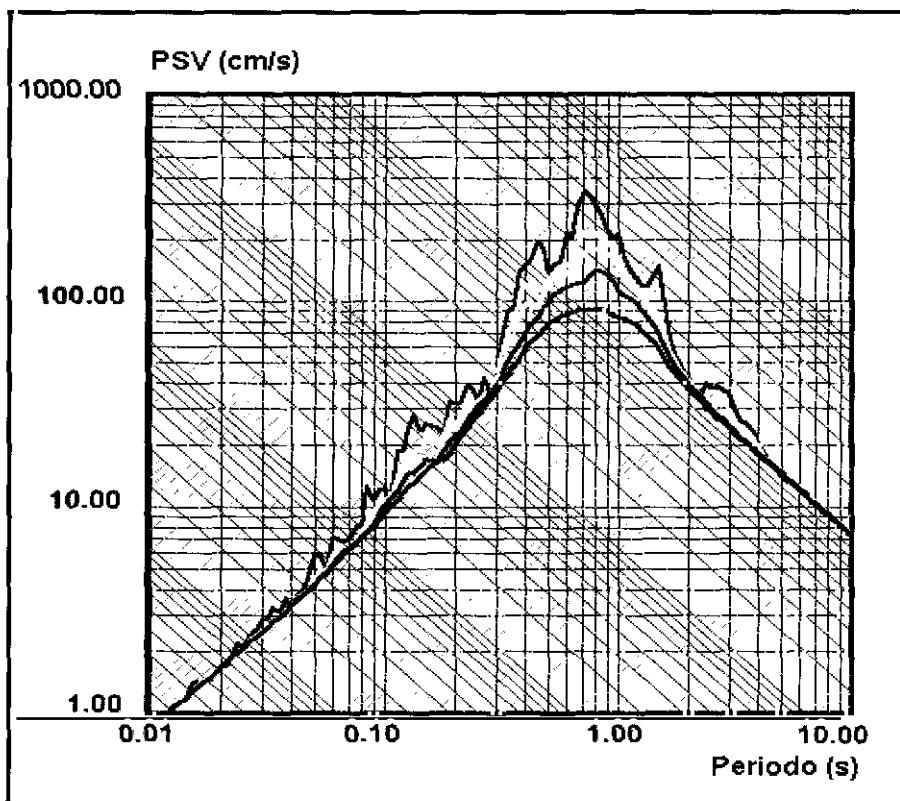


Figura 2. Ejemplo de pseudo-espectro de repuesta en diagrama trilogarítmico. Terremoto de San Salvador 1986 (amortiguamientos 0, 2.5, 5, 7.5 y 10%).

han propuesto numerosas definiciones como la duración de la fase fuerte (Housner, 1965), la duración acotada para un cierto nivel de la aceleración pico (Kobayashi, 1971), la duración significante (Trifunac y Brady, 1975) y otras.

Como ejemplo de parámetros indicativos de la energía se han definido la Intensidad de Arias y el CAV (Cumulative Absolutely Velocity) y entre las definiciones de duración una de las más recientemente propuestas es la duración efectiva (Bommer y Martínez-Pereira, 1996). Todos ellos se describen a continuación.

La Intensidad de Arias (IA) es una medida de la capacidad de daño basada en la energía (por unidad de peso), del movimiento del suelo, disipada por una población de estructuras (sistemas lineales de un grado de libertad) cuyas frecuencias propias están uniformemente distribuidas en todo el rango de frecuencias (Arias 1970). Refleja por tanto, la energía total contenida en el ace-

lerograma. Una alternativa en el empleo de este parámetro consiste en filtrar los acelerogramas en determinados rangos de frecuencia, obteniendo así una medida proporcional de la energía contenida en los mismos, en el entorno del periodo de filtrado (p.e., periodo natural de estructuras).

La **Velocidad Absoluta Acumulativa (CAV)** fue definida inicialmente por el Electrical Power Research Intitute (EPRI) en 1988, y posteriormente modificada en 1991. En esta última versión refleja el área bajo el acelerograma absoluto, eliminando la influencia de pequeñas amplitudes, en principio no dañinas para las estructuras. Para su estimación se toman ventanas de 1 segundo y se consideran los valores de aceleración sólo de aquellas ventanas en las que, al menos un pico, excede un umbral fijado (en este caso este umbral es de 25 cm/s^2). Estos valores son los que se integran, de manera que el CAV resultante es el área que se obtiene al sumar todas las ventanas significativas. Puede considerarse, por tanto, un parámetro estimativo de la capacidad de daño del movimiento, dado que los ciclos en principio no dañinos han sido eliminados. Un esquema de su definición y cálculo se muestra en la figura 3.

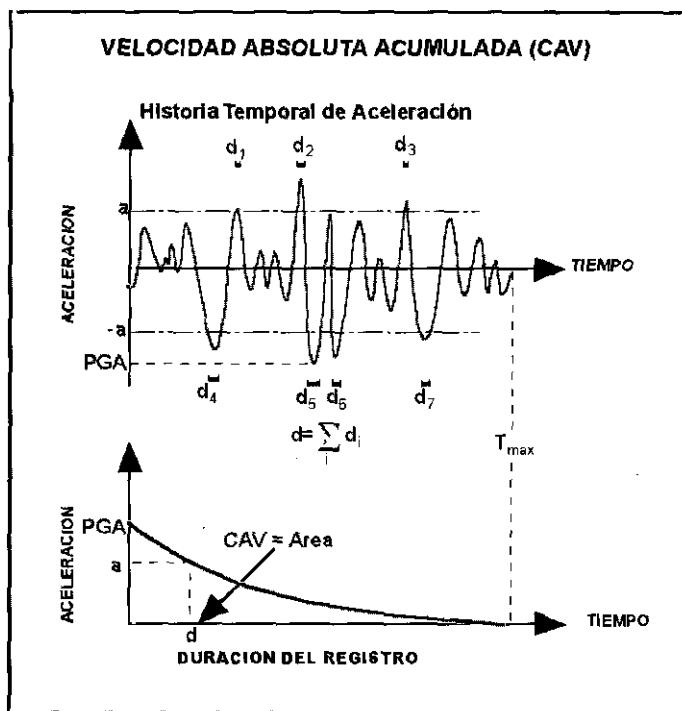


Figura 3. Esquema de cálculo de la velocidad absoluta acumulativa (CAV).

La **Duración Efectiva** fue propuesta por Bommer y Martínez-Pereira (1997) y está basada en la definición de duración significativa propuesta por Trifunac y Brady (1975), pero a diferencia de ésta el comienzo y final de la fase fuerte se miden con criterios absolutos, tal como se muestra de forma esquemática en la figura 4. Para estimar esta duración se parte del diagrama de Husid, en el que se representa la Intensidad de Arias frente al tiempo y se toma el intervalo $t_o - t_f$ como duración efectiva; siendo t_o el tiempo para el cual la IA alcanza un umbral de 0.01 m/s y t_f el tiempo para el cual la energía remanente del registro es 0.125 m/s. De esta manera se tiene una medida objetiva del intervalo de tiempo en el que se encuentra comprendida una cierta cantidad de energía.

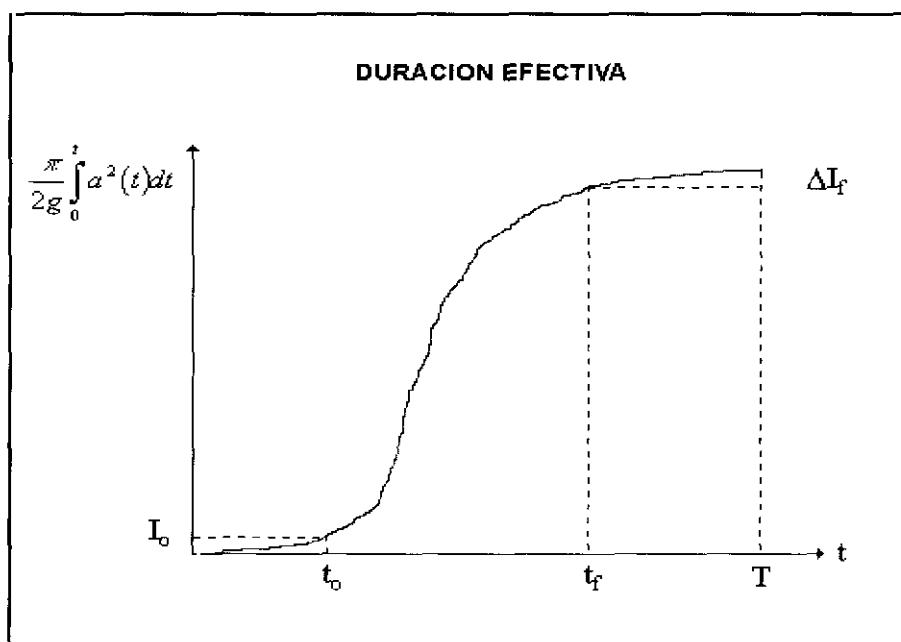


Figura 4. Esquema de cálculo de la duración efectiva (DE).

2.1. Contenido Frecuencial del Movimiento y Respuesta de la Estructura

Por su propia definición, los espectros de respuesta indican cuál es la máxima respuesta a un determinado movimiento, dada por edificios de diferentes frecuencias naturales.

La relación entre el movimiento de entrada y la respuesta de la estructura está fuertemente condicionada por la rigidez o flexibilidad de ésta (función de su altura) y por el contenido de frecuencias de la agitación, además de por sus amplitudes máximas. Para entender esta relación conviene hacer algunas consideraciones de índole ingenieril.

Ante una vibración sísmica el edificio oscila hacia un lado y hacia otro, describiendo un ciclo en el tiempo de su periodo natural. Los edificios altos se mueven más lentamente, y por tanto, tienen mayor periodo natural que las construcciones bajas.

Un edificio de 10 pisos puede tardar, aproximadamente, un segundo en describir un ciclo completo, por tanto, su periodo natural es $T = 1$ s. Un edificio de 2 plantas, más rígido, empleará la quinta parte de tiempo que el anterior, y su periodo natural es de 0.2 s. Una aproximación aceptada es considerar que cada piso añade 1/10 s al periodo natural de la estructura. (Coburn et al., 1992).

Si la perturbación es corta, la oscilación continuará una vez finalizada la sacudida, pero gradualmente se extinguirá. La razón a la que decae la oscilación después de la perturbación es una medida del amortiguamiento de la estructura.

Si el edificio fuera sacudido por oscilaciones regulares, su respuesta dependería de la relación entre la frecuencia de esas oscilaciones y la suya natural. Para frecuencias mucho menores que la propia del edificio, éste simplemente se mueve con el suelo y se deforma muy poco; a medida que la frecuencia del movimiento crece la deformación es mayor, y cuando ambas frecuencias son iguales la deformación del edificio alcanza una amplitud que puede ser mucho mayor que la del suelo: ambos han entrado en resonancia.

Cuando una estructura es sacudida por un terremoto real, cuyo movimiento es un sumatorio de frecuencias, la respuesta depende de la natural del edificio y del contenido frecuencial del movimiento. Así p.e., un edificio de 10 pisos con frecuencia propia de 1 Hz, se verá particularmente afectado por esta componente del movimiento y mucho menos por las mayores y menores frecuencias. La aceleración máxima con la que responde esta estructura a un cierto movimiento es justamente la ordenada espectral de $T = 1$ s. El espectro completo representa esta máxima respuesta para estructuras de diferentes periodos naturales, y su forma dependerá del contenido frecuencial del movimiento y del amortiguamiento de la estructura.

Por su parte, los aspectos que más influyen en el contenido de frecuencias del movimiento son la *distancia al epicentro* y el *tipo de suelo* en el emplazamiento de registro. A medida que aumenta la distancia el movimiento presenta menores frecuencias; en campo lejano el contenido frecuencial es

menor que en campo próximo. En cuanto al suelo, los suelos blandos tienen baja frecuencia propia, y tienden a amplificar las bajas frecuencias del movimiento, determinando así la forma de los correspondientes espectros.

La respuesta de un edificio está fuertemente condicionada por la relación entre la frecuencia predominante del movimiento (en la base rocosa), la natural del suelo y la propia del edificio. Si todas ellas son del mismo orden la capacidad de daño aumenta notablemente. En la figura 5 se ilustran dos ejemplos típicos de espectros de respuesta, junto con el tipo de edificios que pueden verse más afectados. (Coburn et al., 1992).

El ejemplo A corresponde a un movimiento en un emplazamiento cercano al epicentro, situado sobre suelo duro o roca. El valor pico se presenta a alta frecuencia o bajo periodo, del orden de 0.3 s, por lo que el movimiento será más dañino para estructuras bajas y rígidas, que vibren con este periodo natural.

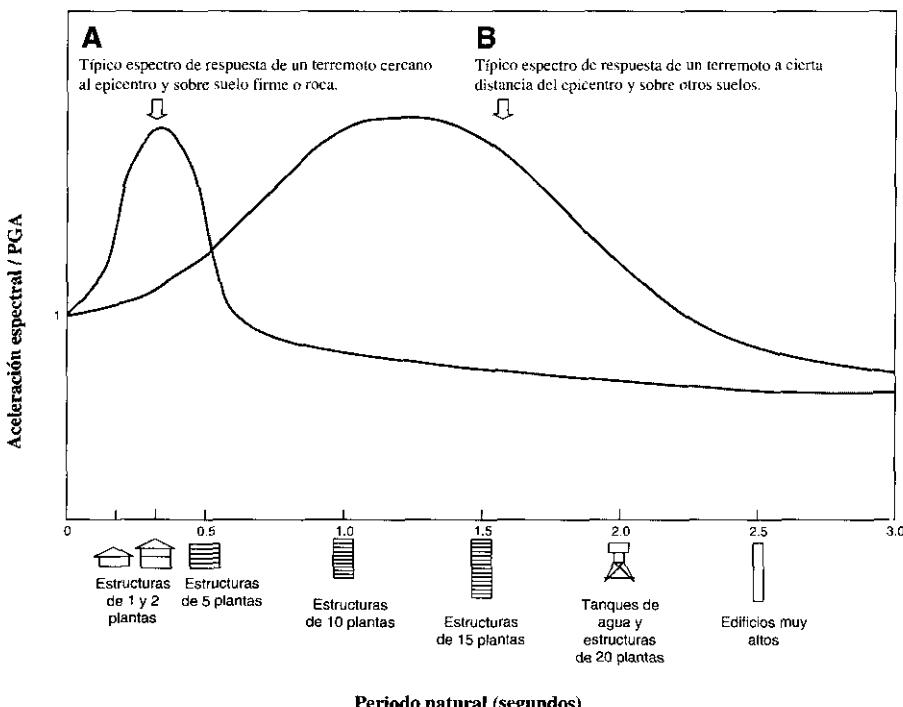


Figura 5. Dos ejemplos típicos de espectros de respuesta, junto con el tipo de edificios que pueden verse más afectados (Coburn et al., 1992).

El ejemplo *B* muestra la forma típica de un espectro en un emplazamiento a larga distancia del epicentro, situado en suelo blando, desplazándose el valor máximo hacia mayores períodos, del orden de 1 s. El movimiento representado será especialmente dañino para estructuras altas y flexibles, con este periodo propio.

Un ejemplo real de este tipo de comportamiento quedó reflejado durante el terremoto de Michoacan (Méjico) de 1985. En Ciudad de Méjico, situada a unos 400 km del epicentro, el movimiento llegó con largos períodos debido a la larga distancia recorrida. El lecho acuífero sobre el que se asienta la ciudad tiene un alto periodo natural, en torno a los 2 s. El efecto de resonancia entre el movimiento y el suelo amplificó notablemente las aceleraciones para este periodo, y el terremoto causó serios daños particularmente en apartamentos altos de 10 a 20 plantas, recientemente construidos; mientras que edificios bajos de adobe, más viejos y débiles sufrieron mucho menor daño.

Este hecho ilustra la enorme importancia del contenido frecuencial del movimiento en el daño causado, de ahí la necesidad de incluir este aspecto en la caracterización sísmica de emplazamientos con fines de diseño.

3. EVOLUCIÓN DE LAS TÉCNICAS EMPLEADAS

Las técnicas empleadas para obtener los parámetros estimativos del movimiento, y en particular los espectros de respuesta, han ido evolucionando a medida que ha aumentado el número de registros instrumentales, permitiendo estimaciones más precisas de la peligrosidad y un mayor conocimiento de las características del movimiento fuerte del suelo.

El procedimiento *tradicionalmente* empleado para la deducción de los espectros buscados, comienza con el análisis de la peligrosidad del emplazamiento, generalmente en términos de intensidad macrosísmica o bien, en el caso favorable de disponer de datos de aceleración, empleando la *PGA* como parámetro de cálculo. Si la primera opción es seguida, se procede a la estimación de la *PGA* a partir de los valores resultantes de *I*, por empleo de correlaciones *I-PGA*, deducidas desde regiones con abundante información de ambos parámetros. El espectro de respuesta del movimiento se estima entonces "escalando" una forma espectral estándar con el valor de la *PGA* calculado previamente y para ello éste se hace coincidir con la ordenada espectral de periodo cero, $PGA \equiv SA(T \approx 0)$, hecho justificado por la relación explicada anteriormente. Resulta así un espectro en el emplazamiento objeto de estudio, cuya forma no refleja directamente las características particulares del mismo, ya que el proceso descrito conlleva numerosas incertidumbres. Por una parte,

hace uso de una forma espectral estándar que difícilmente responderá a un modelo adecuado fuente-medio-estación para el emplazamiento y, además el efecto local no se tiene explícitamente en cuenta (si bien, es habitual introducir algún factor de correlación). Por otra parte, la aceleración pico, PGA , que caracteriza inicialmente el movimiento sólo da información de la energía liberada en el rango de las altas frecuencias y no es representativa de la contenida en el resto del espectro. Para terminar, la probabilidad de excedencia asociada a la PGA , [y por tanto, $SA(T \approx 0)$] puede ser muy diferente de la probabilidad de las restantes ordenadas espectrales, por lo que un mismo espectro puede ser conservador para estructuras de cierto periodo propio y muy poco conservador para otro orden de periodos.

A pesar de estos inconvenientes, la deducción de espectros de respuesta en un emplazamiento dado empleando una forma espectral estándar, ha sido una práctica habitual impuesta por casi todas las Normativas, hecho motivado fundamentalmente por la escasez de registros de aceleración antes de la década de los 80, para la estimación directa de tales espectros. (RG 1.60 y Apéndice A de 10CFR100 para diseño de Centrales Nucleares, Norma Española Sismorresistente de la Construcción NCSE-94, Eurocode n.º 8).

Tras la instalación de acelerógrafos y el aumento de registros instrumentales en todo el mundo, se han venido desarrollando recientemente otros métodos, que tratan de reducir las incertidumbres del problema y de obtener, como resultado más representativo de la peligrosidad de un emplazamiento, su espectro específico de respuesta, integrando todos los factores determinantes del movimiento esperado. Estas técnicas se fundamentan esencialmente en el análisis de acelerogramas, que son los registros de movimiento fuerte del suelo que contienen toda la información que lo caracteriza y permiten además, un cálculo directo de los espectros a introducir en el diseño de las estructuras.

Actualmente, la mayor parte de los estudios se dirige a estimar las aceleraciones pico y los espectros de respuesta por métodos de modelización, análisis estadístico de registros y procedimientos empíricos.

Las *técnicas de modelización teórica* requieren la existencia de acelerogramas registrados en la zona donde se efectúa la predicción. Se basan en la interpretación de los mismos en campo próximo, para construir modelos del proceso de ruptura en la fuente, coherentes con las características de la radiación generada. A partir de estos modelos se predicen los picos de aceleración, velocidad o desplazamiento para distintas frecuencias del movimiento. Se obtienen así simulaciones teóricas de acelerogramas o sismogramas, siendo necesario para ello disponer de datos de una densa red de estaciones que vigile la estructura de la fuente que origina el movimiento. Algunos ejemplos de

este tipo de análisis han sido desarrollados por Suhadolc (1990), Costa et al. (1992). Otro tipo de modelo teórico, relativamente sencillo y muy empleado es el de ruido blanco de banda limitada, basado en la teoría de vibración aleatoria (Band-limited-white-noise/random-vibratory-theory, BLWN/RVT). Fue desarrollado por Hanks y McGuire (1981) y Boore (1983, 1986) y es útil para estimar movimientos en gran variedad de entornos tectónicos. Consiste en la obtención de un espectro a partir de parámetros característicos del modelo, teniendo en cuenta todos los parámetros que afectan a la amplitud y al contenido frecuencial.

Otro procedimiento muy empleado actualmente es el *análisis estadístico* de espectros de respuesta, registrados para terremotos de magnitudes y distancias análogas a las del máximo sismo potencial y en condiciones de suelo similares a las del emplazamiento cuyo movimiento se predice. Fue propuesto por la US Nuclear Regulatory Commission, Stándar Review Plan (US NRC, 1990).

Además, actualmente se ha generalizado el uso de *procedimientos empíricos*, que llevan a establecer modelos de movimiento en una zona por medio de regresiones de datos registrados en la misma o en otras tectónicamente afines. El movimiento en un punto se plantea como una suma de los tres factores que intervienen: fuente, medio y estación. Esta idea se concreta expresando el parámetro característico del movimiento, que denominamos genéricamente *GM* (Ground Motion), como una variable que es función de otras explicativas de esos efectos, que suelen ser la magnitud *M*, distancia a la falla o epicentral, *R* y un factor indicativo del tipo de suelo *S*. Con este enfoque el problema se resuelve tratando de encontrar la función $GM = f(M, R, S)$ más adecuada a las características de una determinada zona. Dichas características deben examinarse previamente con el fin de establecer cuál es el rango de magnitudes de los terremotos que pueden afectar al emplazamiento, su distancia epicentral y el tipo de suelo y geología del mismo, caracterizando así los tres factores integrantes del movimiento. Con esta información se seleccionan acelerogramas y se formulan ecuaciones siguiendo un cierto modelo matemático en el que el parámetro *GM* —normalmente identificado con aceleración, velocidad, desplazamiento u ordenadas espectrales— se plantea como variable dependiente, mientras que *M*, *R* y *S* actúan como variables independientes del modelo. Los coeficientes del mismo se estiman habitualmente por regresión estadística, ajustando los datos reales al modelo, con lo que éste queda determinado. Puede procederse entonces a calcular el valor esperado de *GM* para las condiciones fijadas por los valores de *M*, *R* y *S* en la zona. Análisis de este tipo han llevado a la deducción de modelos de movimiento fuerte en términos de ordenadas espectrales para diferentes frecuencias. Algunos de ellos, obtenidos con datos europeos, han sido propuestos por Dahle et al. (1990), Tento et al. (1992),

Benito (1993), Ambraseys et al. (1996) y Sabetta y Pugliese (1996). Dada la escasez de acelerogramas de terremotos fuertes en la Península Ibérica, el método empírico constituye el más idóneo para la predicción de movimientos en emplazamientos españoles. La formulación matemática del mismo es descrita con detalle por Benito (1993).

Por otra parte, algunas metodologías recientes se dirigen al cálculo de espectros de peligrosidad uniforme, U.H.S. (Uniform Hazard Spectra), cuyas ordenadas espectrales tienen la misma probabilidad de excedencia en todo el rango de frecuencias, a diferencia de los obtenidos por métodos tradicionales, en los que sólo se controla la probabilidad de la *PGA*, es decir, de la aceleración espectral de periodo cero. Esta cuestión es especialmente importante en el diseño de estructuras que no pueden ser modelizadas como sistemas de un solo grado de libertad, como es el caso de las centrales nucleares.

Para resolver este problema, la USNRC (1980) propuso el uso de los U.H.S. cuyo cálculo en un cierto emplazamiento requiere el conocimiento de la atenuación del movimiento en el trayecto de la fuente al emplazamiento, para diferentes rangos de frecuencia, derivado de registros de aceleración. Partiendo de esa propuesta algunos autores han desarrollado diferentes métodos de cálculo de los U.H.S. (Wheaton y Von Dollen, 1981; Lee y Trifunac, 1985, Loh et al., 1994). Para regiones donde estos datos no son disponibles, como es el caso de la Península Ibérica, algunos métodos se han propuesto para obtener aproximaciones a tales espectros (Benito y López Arroyo, 1991).

Por último, en el entorno nuclear, recientemente se han desarrollado metodologías destinadas al análisis probabilista de seguridad (PSA). El estado del arte al respecto ha sido descrito en el documento NEA/CSNI/R(97)22, donde se sintetizan todas ellas en una metodología de cuatro pasos: caracterización de la fuente sísmica, determinación de las relaciones de recurrencia, cálculo de atenuación del movimiento fuerte y estimación de curvas de peligrosidad. Las dificultades en realizar este análisis por la laguna de información causada por ausencia de datos, tratan de resolverse mediante juicio de expertos, habiéndose realizado dos importantes casos de aplicación: EPRI 1989 y LLNL 1989.

3.1. Algunas Aplicaciones Prácticas en Emplazamientos Españoles

En zonas de sismicidad moderada, como la Península Ibérica, donde la escasez de registros de aceleración impide realizar estudios de peligrosidad a partir de estos datos, es posible la aproximación a las características del movimiento partiendo de registros de otras zonas para las que puede considerarse razonable la extrapolación. La aplicación de modelos de movimiento fuerte

obtenidos empíricamente a un determinado emplazamiento, permite obtener espectros de respuesta acordes con una configuración fija en cuanto a magnitud, distancia y suelo. Así, el problema de ausencia de datos *in situ* se resuelve haciendo uso de información de otras zonas, siempre que exista afinidad tectónica entre la zona fuente del modelo y la aplicación.

Un procedimiento de este tipo ha sido desarrollado para la estimación de espectros de respuesta correspondientes al sismo ocurrido en la provincia de Murcia, el 2 de febrero de 1999. El terremoto tuvo magnitud $mb = 5$ y causó notables daños en la localidad de Mula, situada a una distancia aproximada del epicentro de 8 km, donde se han calculado los espectros de respuesta, considerando emplazamientos en roca. Los modelos de movimiento fuerte aplicados han sido desarrollados por diferentes autores partiendo de datos de terremotos europeos (Dahle et al., 1992, Benito, 1993, Ambraseys et al., 1996, Sabetta y Pugliese, 1996). Dado que no existen registros de movimiento fuerte del suelo en esa localidad, los espectros así estimados constituyen una aproximación adecuada para representar las características del movimiento previsiblemente producido por el terremoto. La figura 6 muestra los resultados de este estudio.

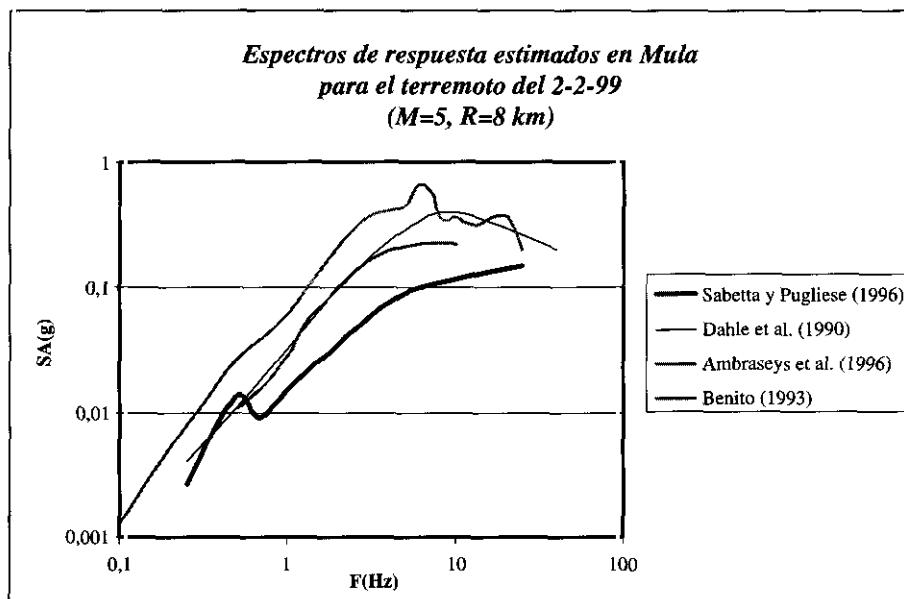


Figura 6. Espectros de respuesta estimados en la localidad de Mula, para el terremoto del 2 de febrero de 1999, considerando el par magnitud-distancia correspondiente. El cálculo se ha efectuado aplicando modelos de movimiento fuerte desarrollados en Europa [de Benito et al., 1999].

Este proceso permite a su vez, deducir espectros de respuesta diferentes para distintos *escenarios de peligrosidad* en un emplazamiento dado. Este hecho tiene especial interés cuando la peligrosidad no es dominada únicamente por un terremoto característico, sino que está condicionada por terremotos de diferentes magnitudes y a distintas distancias, produciendo movimientos en el emplazamiento con muy diferente contenido frecuencial. El tratamiento más adecuado en este caso es definir distintos escenarios de peligrosidad que se caractericen cada uno por un par magnitud-distancia y por su correspondiente espectro de respuesta, pudiendo determinar cuál resulta más influyente en cada intervalo de frecuencias. Como ejemplo de este tratamiento, en la figura 7 se muestran los resultados de un estudio realizado en un emplazamiento genérico en roca, en la provincia de Cáceres, donde resultaron influyentes cuatro escenarios de peligrosidad, caracterizados por los pares magnitud-distancia: (4.1, 10 km), (6, 188 km), (7, 223 km) y (8.5, 480 km), reflejando el último la influencia de los sismos de Azores-Gibraltar. Los

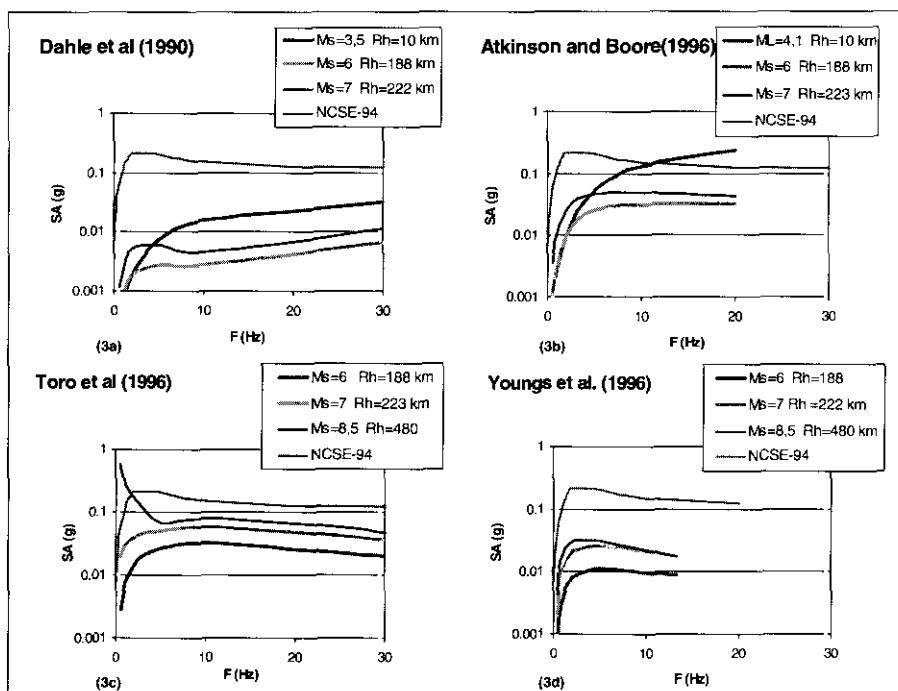


Figura 7. Espectros de respuesta calculados para diferentes escenarios de peligrosidad, aplicando modelos de movimiento fuerte propuestos por distintos autores. Los resultados son comparados con los espectros establecidos por la NCSE-94.

espectros para los diferentes escenarios fueron calculados por aplicación de distintos modelos de movimiento fuerte (sólo para los pares $M-R$ dentro del rango de validez de cada modelo) y todos ellos han sido comparados con el dado por la NCSE-94 para el emplazamiento de estudio (Benito et al., 1999).

El estudio permitió extraer conclusiones sobre el espectro de la NCSE-94, que resulta más o menos conservador en relación con los resultados obtenidos:

- Los espectros estimados para diferentes escenarios de peligrosidad 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 el espectro de la NCSE-94 en el rango de bajas frecuencias, cuestionando la idoneidad de la Norma para contemplar la influencia de los sismos de Azores-Gibraltar en el Sudoeste de la Península.

Por último, en lo referente a aspectos prácticos en el cálculo de la peligrosidad y caracterización del movimiento, es de mencionar el creciente uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), para almacenar y relacionar toda la información necesaria en el estudio —sísmica, geológica, tectónica, etc.— aportando una mayor agilización del proceso de cálculo y una mayor resolución en los resultados (Jiménez Peña et al., 1998 a y b).

4. CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO EN NORMATIVAS

En general los espectros de diseño o de proyecto propuestos en las normativas de construcción, son formas espectrales suavizadas, medias o envolventes, construidas con tramos rectos (en escala logarítmica) que aproximan espectros de respuesta reales de la zona de aplicación.

Estas formas espectrales han sido normalizadas por el valor de la aceleración máxima del terreno, por lo que, en realidad las ordenadas espetrales de

la aceleración vienen dadas como factores de amplificación para distintos tramos de frecuencias o períodos, en función del amortiguamiento, del tipo de suelo, y del tipo de terremoto.

4.1. Norma de la Construcción Sismorresistente Española. NCSE-94

Siguiendo esta filosofía, propuesta inicialmente por Newmark y Hall (1969), la Norma NCSE-94 define los espectros de respuesta elástica de diseño, para períodos de retorno de 500 años, a partir de una forma espectral de 3 tramos dada por el factor de amplificación $\alpha(T)$, que para el caso de movimiento horizontal y con amortiguamiento crítico del 5% viene dado por:

$$\alpha(T) = \begin{cases} 1.0 + [\alpha(T_0) - 1.0]T/T_0 & \text{para } T < T_0 \\ \alpha(T_0) & \text{para } T_0 \leq T \leq T_1 \\ \alpha(T_0)T_1/T & \text{para } T > T_1 \end{cases}$$

donde,

$T_0 = T_0(C, K) = 0.125C + 0.2K - 0.175$; es el límite superior del intervalo de períodos bajos.

$\alpha(T_0) = (3C - 3.8)(K - 1.25) + 2.30$; da la amplificación del tramo intermedio.

$T_1 = [0.215K(5C - 1)] / \alpha(T_0)$; es el límite inferior del intervalo de períodos altos.

De esta forma, el factor de amplificación α y la separación en los 3 tramos de períodos dependen del tipo de suelo del emplazamiento a través del coeficiente del terreno C , y del llamado coeficiente de contribución K , cuyo objetivo final es valorar la influencia en el espectro de respuesta de los terremotos lejanos.

El coeficiente de suelo C toma los valores:

$C = 1.0$ para terrenos tipo I (roca compacta, $V_s > 750$ m/s)

$C = 1.4$ para terrenos tipo II (suelos de compacidad media a dura, $400 \leq V_s \leq 750$ m/s)

$C = 1.8$ para terrenos tipo III (suelo granular suelto, cohesivo medio a blando, $V_s \leq 400$ m/s)

El coeficiente de contribución K toma valores comprendidos entre $K = 1$ para aquellos emplazamientos en los que la mayor contribución a la peligrosidad sísmica sea debida a terremotos peninsulares próximos, y $K = 1.5$ para los emplazamientos en los que la mayor contribución de peligrosidad proceda de terremotos de la falla Azores-Gibraltar (terremotos lejanos con mayor contenido de baja frecuencia).

La construcción final del espectro de respuesta se hace teniendo en cuenta que $\alpha(T) = PSA(T)/PGA$; donde,

PGA = aceleración máxima del terreno (periodo de retorno de referencia 500 años),

$PSA(T)$ = pseudo-espectro de respuesta de aceleración.

El espectro de respuesta del movimiento horizontal, se construye así, conociendo el valor de la aceleración máxima de cada emplazamiento dada por el cálculo de peligrosidad sísmica. Para el movimiento vertical la Norma propone tomar el 70% del espectro del movimiento horizontal.

En la figura 8 se muestran las formas espectrales (factores de amplificación) para las tres clases de suelo y los dos valores extremos del coeficiente K (1 y 1.5).

4.2. Eurocódigo 8, Parte 1-1 (Env 1998-1-1:1994)

El Eurocódigo 8, “*Disposiciones para el proyecto de estructuras sismorresistentes*” recoge en su Parte 1-1 “*Reglas generales. Acciones sísmicas y requisitos generales de las estructuras*”, todo lo referente a caracterización y representación del movimiento del suelo. La Normativa viene expresada por una serie de principios (enunciados generales y definiciones o requisitos y modelos analíticos para los que no se permite ninguna otra alternativa, salvo que esté específicamente indicado) y por reglas de aplicación (que siguen los principios y satisfacen sus requisitos).

Uno de estos principios declara que el movimiento sísmico en un punto dado de la superficie se representa generalmente por un espectro de respuesta elástica de la aceleración del suelo.

Algunas de las reglas de aplicación incluidas señalan que puede necesitarse más de un espectro para representar adecuadamente la peligrosidad (caso en el que fuentes sísmicas a diferentes distancias afecten al emplazamiento), y también que pueden utilizarse representaciones alternativas como por ejemplo el espectro de potencia o acelerogramas de cálculo (historias temporales).

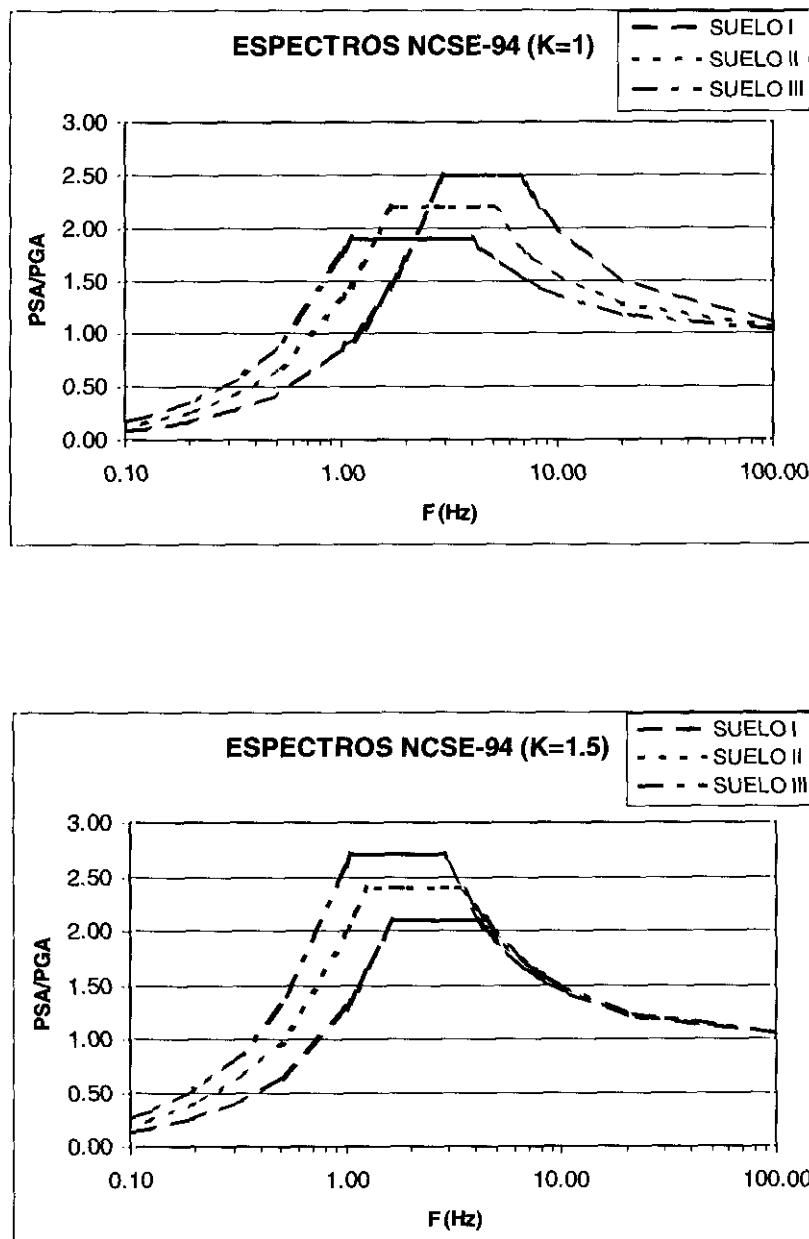


Figura 8. Espectros de respuesta propuestos en la NCSE-94 para las tres clases de suelo y los dos valores extremos de K: 1.0 y 1.5 (amortiguamiento crítico 5%).

El espectro de respuesta elástica, $S_e(T)$, para movimiento horizontal y para el periodo de retorno de referencia (475 años) definido por esta Normativa, está dado por:

$$S_e(T) = \begin{cases} a_g S [1 + (T/T_B) (\eta \beta_0 - 1)] & \text{para } 0 \leq T < T_B \\ a_g S \eta \beta_0 & \text{para } T_B \leq T < T_C \\ a_g S \eta \beta_0 (T_C/T)^{k1} & \text{para } T_C \leq T < T_D \\ a_g S \eta \beta_0 (T_C/T_D)^{k1} (T_D/T)^{k2} & \text{para } T_D \leq T \end{cases}$$

donde

T es el periodo de vibración de un sistema lineal con un grado de libertad.

a_g es la aceleración de cálculo del terreno para el periodo de retorno de referencia.

β_0 es el factor de amplificación de la aceleración espectral para un amortiguamiento viscoso del 5%.

T_B , T_C son los límites del tramo de aceleración espectral constante.

T_D es el valor que define el comienzo del tramo de desplazamiento espectral constante.

$k1$ y $k2$ son los exponentes que definen la forma del espectro para un periodo de vibración mayor que T_C y T_D respectivamente.

S es el parámetro del suelo.

η es el factor de corrección del amortiguamiento (valor de referencia $\eta = 1$ para un amortiguamiento viscoso del 5%).

Los valores inicialmente asignados a cada uno de estos parámetros se indican en la Tabla I, si bien la Normativa señala la posibilidad de que cada país miembro ajuste dichos parámetros de acuerdo a sus condiciones sismogenéticas y de peligrosidad.

Estos valores han sido seleccionados de manera que las ordenadas espectrales tengan una probabilidad de excedencia uniforme del 50% para todos los periodos.

Tabla I. Valores de los parámetros del espectro de respuesta propuesto en el Eurocódigo 8

Subsuelo	S	b_0	$k1$	$k2$	T_B	T_C	T_D
A	1.0	2.5	1.0	2.0	0.10	0.40	3.0
B	1.0	2.5	1.0	2.0	0.15	0.60	3.0
C	0.9	2.5	1.0	2.0	0.20	0.80	3.0

Para la componente vertical de la acción sísmica, salvo estudios específicos, el Eurocódigo indica que se representará por el espectro de respuesta horizontal reducido en la siguiente forma:

- para $T < 0.15$ s las ordenadas se multiplican por un factor 0.70
- para $T > 0.50$ s las ordenadas se multiplican por un factor 0.50
- para $0.15 \leq T \leq 0.50$ s se utilizará una interpolación lineal

La influencia de las condiciones locales del terreno sobre la acción sísmica ha de tenerse en cuenta considerando las tres clases de subsuelo A, B y C cuya descripción resumida es la que sigue:

- A. Roca, $V_s \geq 800$ m/s, incluyendo un espesor máximo de 5 m de material débil en superficie, o bien, depósitos de arena, grava o arcilla sobreconsolidada con varias decenas de metros de espesor ($V_s \geq 400$ m/s a 10 m de profundidad)
- B. Depósitos de arenas, gravas o arcillas de densidad o consistencia media, con espesores entre decenas y cientos de metros ($V_s \geq 200$ m/s a 10 m de profundidad, y $V_s \geq 350$ m/s a 50 m)
- C. Depósitos de suelo suelto, no cohesivos, o cohesivos de rigidez débil a media, caracterizados por valores de $V_s \leq 200$ m/s en los 20 primeros metros.

En la figura 9 se muestran los espectros de respuesta elástica del movimiento horizontal, para estas tres clases de suelo y para los valores de los parámetros dados en la Tabla I.

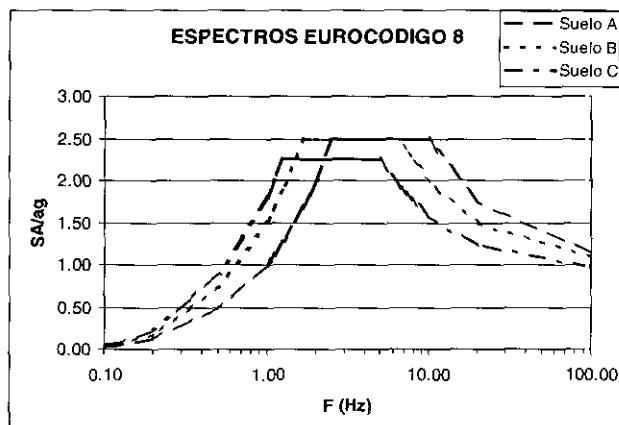


Figura 9. Espectros de respuesta propuestos en el Eurocódigo 8 para las tres clases de suelo consideradas (amortiguamiento crítico 5%).

4.3. Normativa Nuclear

La normativa sísmica para instalaciones nucleares y radiactivas en España, ha estado principalmente guiada por la normativa de EEUU. Los criterios tanto para el diseño, como para el emplazamiento del reactor, incluyendo las consideraciones geológicas y sismológicas necesarias, están recogidos, respectivamente, en los códigos federales 10CFR50 y 10CFR100. Así mismo, los criterios de evaluación son recogidos en las guías reguladoras (RG), en las guías de evaluación y aceptación de solicitudes de licenciamiento (SRP-Standard Review Plan) y en otros documentos relacionados (NUREG).

Hasta ahora, la estimación del terremoto base de diseño (SSE, Safe Shutdown Earthquake Ground Motion), estaba basada en la metodología determinista del cálculo de la peligrosidad sísmica (Apéndice A del 10CFR100), que llevaba a estimar el máximo terremoto potencial que podría afectar al emplazamiento, y un espectro de diseño del mismo. Este se obtenía, dada la escasez de registros de movimiento fuerte del suelo, escalando una forma espectral estándar (RG 1.60) con el valor de la aceleración pico estimada, y realizando posteriormente las correcciones necesarias debidas al efecto local del suelo. Aunque esta aproximación, según la USNRC (US. Nuclear Regulatory Commission), parece haber funcionado razonablemente bien, e incluso haber resultado en general adecuadamente conservadora, siempre han existido diferencias de opinión e interpretación entre diferentes expertos, dada la gran cantidad de incertidumbres, no cuantificadas, arrastradas en los procesos de cálculo.

Estas razones y el avance del estado del conocimiento han motivado la revisión de la Normativa, estableciendo una nueva Regulación que incluye importantes cambios, en particular, sobre los criterios sísmicos y de ingeniería sísmica para el emplazamiento de centrales nucleares (USNRC, enero 1997). Esta recomienda la utilización de métodos probabilistas para el cálculo de la peligrosidad sísmica (principalmente método LLNL, o método EPRI), u otros métodos de análisis de sensibilidad de parámetros, que puedan tener en cuenta y estimar todas las incertidumbres en los resultados finales.

A continuación se resumen algunos de los aspectos de interés incluidos en todas estas actualizaciones.

Apéndice S del 10CFR50

Este Apéndice recoge los nuevos criterios de ingeniería sísmica para el diseño de nuevas instalaciones. En él se dan algunas definiciones y directivas de actuación importantes, que incluyen los terremotos SSE y OBE.

Terremoto Base de Diseño (SSE-Safe Shutdown Earthquake). Movimiento del suelo para el que ha de garantizarse, en caso de ocurrencia, que las estructuras, sistemas y componentes destinados a mantener la integridad del reactor, la capacidad de una parada segura y la capacidad de prevenir o mitigar las consecuencias de un accidente potencialmente grave en cuanto a exposiciones radiactivas, se mantengan funcionales. Este terremoto debe venir caracterizado por los espectros de respuesta del movimiento del suelo en campo libre, en las componentes horizontal y vertical. Usualmente será apropiado que los espectros de respuesta de diseño puedan ser suavizados, en vista de la limitación de datos existentes de terremotos fuertes o destructivos.

En el nivel de cimentación, la componente horizontal del SSE ha de producir un espectro de respuesta con un pico de aceleración (PGA) de al menos 0.1 g. En el diseño han de tenerse en cuenta todo tipo de solicitudes posibles además de las producidas por las cargas sísmicas, como posibles efectos sobre el terreno debidos al terremoto.

Terremoto Base de Operación (OBE-Operating Basis Earthquake). Movimiento del suelo para el que se debe garantizar, en caso de ocurrencia, la funcionalidad de todos los elementos de la instalación, necesarios para que ésta se mantenga operativa, sin riesgos indebidos para la salud o seguridad pública.

En principio este terremoto está tan solo asociado a la parada e inspección de la planta. El OBE debe estar caracterizado mediante espectros de respuesta, y puede considerarse o elegirse para ello alguna de las opciones siguientes:

Espectro OBE $\leq 1/3$ del Espectro de diseño SSE. En este caso no es necesario realizar ningún análisis dinámico de respuesta de la instalación.

Espectro OBE $\geq 1/3$ del Espectro de diseño SSE. Será necesario realizar un análisis dinámico de respuesta teniendo en cuenta, tanto efectos de interacción suelo-estructura, como duración esperada del movimiento.

Si el movimiento del suelo en algún momento supera el espectro de respuesta del OBE, o bien si ocurren daños significativos, la planta debe ser parada e inspeccionada.

Subparte B del 10CFR100 (Epígrafe 100.23)

Este apartado de la normativa recoge los criterios geológicos y sismológicos necesarios para decidir sobre la adecuabilidad del emplazamiento y de sus implicaciones en el diseño de la central.

Para ello se indica que han de investigarse las características geológicas, sismológicas e ingenieriles del emplazamiento, con la profundidad suficiente para poder llegar a la estimación del SSE. Además habrán de incluirse las incertidumbres inherentes a tales estimaciones, obtenidas a partir de los análisis apropiados, tales como el cálculo probabilista de la peligrosidad o como los análisis de sensibilidad de parámetros.

Regulatory Guide RG 1.165

El objetivo principal de este documento es dar orientación detallada de los procedimientos aceptables para la realización de investigaciones geológicas, sismológicas y geofísicas del emplazamiento y su región. Identificación y caracterización de fuentes sísmicas. Análisis probabilista de la peligrosidad sísmica y determinación del terremoto básico de diseño (SSE) requerido.

Una vez obtenidas las curvas de probabilidad de excedencia (media, mediana, percentil 85% y percentil 15%) para las aceleraciones espectrales de 1, 2.5, 5, 10 y 25 Hz, ha de determinarse, para un valor de referencia de esta probabilidad, 10^{-5} /año, las medianas espectrales (5% de amortiguamiento crítico), promediadas en los intervalos de frecuencias [1, 2.5 Hz] y [5, 10 Hz].

A partir de los valores espectrales anteriores, ha de realizarse una desagregación en términos de magnitud-distancia (detallada en el apéndice C), que permita estimar las contribuciones a la peligrosidad de cada uno de estos pares, para de esta forma obtener los llamados terremotos de control.

A continuación, se procede al cálculo el espectro de respuesta del SSE. Este espectro puede determinarse escalando una forma espectral específica o escalando una forma espectral estándar de banda ancha, que envuelva los valores de la aceleración espectral promediados en los intervalos de frecuencias anteriores, en ambos casos a partir del terremoto o terremotos de control determinados.

Se recomienda utilizar los procedimientos del SRP sección 2.5.2 (Rev. 3, 1997) para obtener las formas espectrales específicas (amortiguamiento crítico 5%), bien para unas determinadas condiciones locales de roca, o bien para las condiciones reales del emplazamiento. Esta sección del SRP, que más abajo se comenta, permite utilizar para este fin, modelos de movimiento del suelo, que podrían no haber sido incluidos en el cálculo de la peligrosidad, pero que pueden ser más apropiados para la fuente, región y emplazamiento bajo consideración.

Finalmente, para emplazamientos no asentados en roca, ha de realizarse un análisis específico de amplificación local, que permita introducir las correcciones y las incertidumbres de los parámetros y propiedades geotécnicas en el espectro de respuesta.

Standard Review Plan. Rev. 3 March 1997 (Documento Nureg 0800). Sección 2.5.2 Movimiento vibratorio del terreno

Esta sección del SRP cubre la revisión y evaluación de las investigaciones sismológicas, geofísicas y geotécnicas, llevadas a cabo para la determinación del terremoto básico de diseño (SSE) del emplazamiento.

El SSE ha de estar definido por los espectros de respuesta del movimiento horizontal y vertical en campo libre, en el emplazamiento de la planta.

El apartado 2.5.2.6 de este capítulo, incluye, los procedimientos que deberían utilizarse, por orden de preferencia, para obtener las formas espetrales específicas del emplazamiento con los terremotos de control, como una parte más de la revisión de la adecuabilidad del SSE. Estos son:

1. Los espectros de respuesta específicos del emplazamiento, para las componentes horizontal y vertical deberían ser obtenidos estadísticamente a partir de los espectros de respuesta de registros de movimiento fuerte, seleccionados por tener características similares a los terremotos de control en cuanto a fuentes, trayectorias de propagación, y condiciones locales. Debe garantizarse que estos registros representan condiciones de campo libre y no están afectados, ni corregidos de efectos de interacción suelo-estructura. Además debe utilizarse un número suficientemente grande de historias temporales o de espectros de respuesta específicos del emplazamiento o de ambos, para poder tener en cuenta todas las incertidumbres.

En el proceso de revisión se preferirán las estimaciones directas de las ordenadas espetrales, al escalado de los espectros con las aceleraciones pico.

En el caso de que los datos no puedan ser obtenidos bajo condiciones geológicas similares a las del emplazamiento, se realizarán las correcciones de efecto local necesarias para la obtención de los espectros específicos.

2. Si no es posible conseguir un gran conjunto de registros de movimiento fuerte, entonces los espectros de respuesta podrán obtenerse escalando aquel conjunto de registros que represente la mejor estima-

ción de fuente, propagación y condiciones locales. Los efectos del escalado deberán estudiarse mediante análisis de sensibilidad.

3. En caso de no existir registros de movimiento fuerte, se deberán determinar aceleración, velocidad y desplazamiento pico, específicos del emplazamiento para las condiciones de magnitud, distancia y suelo apropiadas. Los espectros se determinarán entonces, escalando los valores de aceleración, velocidad y desplazamiento con los factores de amplificación apropiados.

Los valores pico del movimiento se obtendrán mediante las relaciones entre movimiento del suelo, tamaño del terremoto (magnitud, intensidad) y distancia a la fuente, según el estado actual del arte.

4. Pueden usarse modelos teórico-empíricos del movimiento del suelo para calcular espectros complementarios a los espectros específicos del emplazamiento, si los parámetros de entrada y la justificación del modelo están bien documentados.

La modelización es particularmente útil para emplazamientos cercanos a fuentes sísmicas, que pueden sufrir movimientos muy diferentes, en cuanto a contenido frecuencial y tipo de ondas, a los causados por terremotos más lejanos.

Referente a la obtención de historias temporales del movimiento, en este apartado se comenta la necesidad de indicar la duración y número de ciclos del movimiento fuerte para el análisis y diseño de numerosos componentes de la central. La adecuabilidad de las historias temporales, elegidas para análisis estructural, se revisa en el capítulo SRP 3.7.1 en cuanto a su compatibilidad con las condiciones geológicas y sismológicas, y al modelo de SSE aceptado.

5. BIBLIOGRAFÍA

- AMBRASEYS, N. N.; SIMPSON, K. A. y BOMMER, J. J., 1996. Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, pp. 371-400.
- ARIAS, A., 1970. A measure of earthquake intensity. *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, Mit Press, pp. 438-469.
- ATKINSON, G. M. y BOORE, D. M., 1996. Some comparisions between recent ground motion relations. *BSSA*.Vol. 68, pp. 24-40.
- BENITO, B., 1993. Estimación de parámetros sísmicos y espectros de respuesta característicos del movimiento del suelo en emplazamientos de la Península Ibérica.

- Tesis Doctoral. F.F.C.C., Dpto. Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I, *Universidad Complutense de Madrid*, 350 pp.
- BENITO, B. y LÓPEZ ARROYO, A., 1991. Uniform hazard applied to Southwest Spain. Seismicity, seismotectonics and seismic risk of the Ibero-Maghrebian Region. Monografía N.º 8, *I.G.N.*
- BENITO, B.; CABAÑAS, L.; JIMÉNEZ PEÑA, M. E.; CABAÑAS, C.; ÁLVAREZ RUBIO, S.; LÓPEZ, M.; LÓPEZ ARROYO, L.; RAMÍREZ, M. S. y NUCHE, R. (1999). Caracterización sísmica de emplazamientos de la Península Ibérica y evaluación del daño potencial en estructuras. Informe Final *Proyecto Daños, U.P.M.-C.S.N.-ENRESA*.
- BENITO, B.; CABAÑAS, L.; LÓPEZ, M.; JIMÉNEZ PEÑA, M. E. y LÓPEZ ARROYO, A., 1999. Revisión de modelos del movimiento fuerte del suelo y aplicación a la predicción de espectros de respuesta. *Memorias 1º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Murcia 12-16 de abril 1999, Tomo Ia, pp. 165-175.
- BOOMER, J. J. y MARTÍNEZ-PEREIRA, A., 1996. The prediction of strong-motion duration for engineering design. *11th Worl Conference on Earthquake Engineering*, paper N.º 84, pp. 8.
- BOMMER, J. J. y MARTÍNEZ-PEREIRA, A. 1997. The prediction of earthquake strong-motion duration. Submitted to the *Journal of Earthquake Engineering*.
- BOORE, D. M., 1983. Stochastic simulation of high frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *BSSA*, Vol. 73, pp. 1865-1894.
- BOORE, D. M., 1986. Short period P and S wave radiation from large earthquakes: implications for spectra scaling relations. *BSSA*, Vol. 76, pp. 43-64.
- COBURN, A. y SPENCE, R., 1992. Site selection and seismic hazard assessment. *Earthquake Protection*, pp. 187-213.
- COSTA, G.; PANZA, G. y SUHADOLC, P., 1992. Zoning of the Italian Region with synthetic seismograms computed with known structural and source information. Proceedings of the 10th Worl Conference on Earthquake Engineering, July 19-24, 1992, Madrid.
- DAHLE, A.; BUNGUM, H. y KVAMME, L. F, 1990. Attenuation models inferred from intraplate earthquake recording. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19, pp. 1125-1141.
- EPRI, 1988. A criterion for determining exceedance of the operating basis earthquakes. Report NP-5930. *Electrical Power Research Intitute*, Palo Alto, C.A.
- EPRI, 1989. Probabilistic seismic hazard evaluations at nuclear plant sites in the Central and Eastern United States: resolution of the Charleston earthquake issue. Report NP-6395D. *Electrical Power Research Intitute*, Palo Alto, C.A.
- EPRI, 1991. Standardizatiuon of the cumulative absolute velocity. Report TR-100082 (Tier 1). *Electrical Power Research Intitute*, Palo Alto, C.A.

- EPRI, 1993. Guidelines for determining design basis ground motions. Report (TR-102293). *Electrical Power Research Institute*, Palo Alto, C.A.
- EUROCODE n.º 8. Design provisions for earthquakes resistance of structures. *ENV*, Vol. 1.
- HANKS, T. y MCGUIRE, R., 1981. The character of high-frequency strong ground motion. *BSSA*, Vol. 62, pp. 561-589.
- HANKS, T. y MCGUIRE, R., 1981. The character of high-frequency strong ground motion. *BSSA*, Vol. 71, pp. 2071-2095.
- HAYS, W. W., 1980. Procedures for estimating earthquakes ground motions. *U.S. Geological Survey*. Professional paper 1114, 77 pp.
- HOUSNER, G. W., 1961. Vibration of structures induced by seismic waves. Part 1: Earthquakes. C.M. Harris, C.E. Crede (eds), *Shock and vibration Handbook*, Vol. 3. *Engineering design and environmental conditions*. McGraw-Hill Book Comp., New York, 50. 1-50.32.
- HOUSNER, G. W., 1965. Intensity of ground shaking near the causative fault. Proc. 3rd World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand, Vol. 1, pp. 94-109.
- JENNINGS, P. C., 1983. Engineering seismology in earthquakes: observation, theory and interpretation, *North Holland Publ. Comp*, Amsterdam, pp. 138-173.
- JIMÉNEZ PEÑA, M. E.; CARRERA, E.; TERRASA, L.; BENITO, B. y GARCÍA LÁZARO, F. J., 1998a. Estimación de la peligrosidad sísmica utilizando un S.I.G. Aplicación al Sureste de la Península Ibérica. *IX Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica*, Aguadulce (Almería), 1998.
- JIMÉNEZ PEÑA, M. E., BENITO, B. y CABAÑAS, L., 1998b. Desarrollo de un sistema de información geográfica para estudios de peligrosidad en la zona del Estrecho. 100 Años de Observaciones Sismológicas en San Fernando, 1898-1998. *Jornadas Científicas, San Fernando* (Cádiz), 1998.
- KOBAYASHI, Y., 1971. Effects of earthquakes on ground (II). *Journal of Physics of the Earth*, Vol. 19, pp. 231-241.
- LEE, V. W. y TRIFUNAC, M. D., 1985. Uniform risk spectra of earthquake ground motion: NEQRISK. Civil Engineering Dept. Report 8505, *University South California*, Los Angeles and *USNRC NUREG/CR-4903*, Vol. 2.
- LLNL, 1989. BERNREUTER, D. L.; SAVY, J. B.; MENSING, R. W. y CHEN, J. J., 1989. Seismic hazard characterization of 69 nuclear plant sites East of the Rocky Mountains. Report NUREG/CR-5250, *Lawrence Livermore National Laboratory and US Nuclear Regulatory Commission*.
- LLNL, 1993. SAVY et al., 1993. Eastern seismic hazard characterization update. UCRL-ID-115111. *Lawrence Livermore National Laboratory*, June 1993.

- LOH, C. H.; JEAN, W. Y. y PENZIEN, J., 1994. Uniform-hazard response spectra, An alternative approach. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 23, N.º 4, pp. 433-446.
- NUCLEAR ENERGY AGENCY. NEA/CSNI/R(97)22, 1998. State of the art report on the current status of methodologies for seismic PSA. *Nuclear Energy Agency, Committee of the safety of nuclear installations*. París, 1998. 39 pp.
- NEWMARK, N. M. y HALL, W. J., 1969. Seismic design criteria for nuclear reactor facilities. Proc. *4th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago de Chile, V B-4, pp. 37-50.
- NCSE-94. Norma de la Construcción Sismorresistente Española, 1994. Real Decreto 2543/1994 de 29 de diciembre por el que se aprueba la norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación. *BOE* núm 33, miércoles 8 de febrero de 1995, pp. 3935-3980.
- SABETTA, F. y PUGLIESE, A., 1996. Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. *BSSA*, Vol. 86, N.º 2, pp. 337-352.
- SUHADOLC, P., 1990. Fault-plane solutions and seismicity around the EGT southern segment. R Freeman and St. Müller (eds.), *Sixth EGT Workshop: Data Compilations and Synoptic Interpretation*, European Science Foundation, Strasbourg, pp. 371-382.
- TENTO, A. L.; FRANCESCHINA, L. y MARCELLINI, A., 1992. Expected ground motion evaluation for Italian Sites. Proc. *10th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 1, pp. 489-494.
- TORO, G. R.; ABRAHAMSON, N. A. y 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.
- TRIFUNAC, M. D. y BRADY, A.G., 1975. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. *BSSA*, Vol. 65, pp. 139-162.
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION 10CFR100, 1973. Seismic and geology siting criteria for nuclear power plants. Apéndice A. *Code of Federal Regulation, Reactor Site Criteria*.
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Regulatory Guide 1.60, (RG 1.60), 1973. Design response spectra for seismic design of nuclear power plants. Revisión 1, *Nuclear Regulatory Commission*, Diciembre 1973.
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (US NRC, 1980), 1980. Seismic Hazard Analysis. A methodology for the Eastern United States. NUREG-CR-1582, Vol. 2.
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (US NRC, 1990), 1990. Standard Review Plan. *Office of Nuclear Reactor Regulation*, NUGEG-0800, Rev. 2, 2.5.2. Vibratory Ground Motion, 15 p.

- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION 10CFR50, 1997. Earthquake engineering criteria for Nuclear Power Plants. *Code of Federal Regulation*, enero 1997.
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION 10CFR100, 1997. Seismic and geology siting criteria for nuclear power plants. Subparte B (Epígrafe 100.23). *Code of Federal Regulation*, Reactor Site Criteria.
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Regulatory Guide 1.165 (RG 1.165), 1997. Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion. *Nuclear Regulatory Commission*, March 1997.
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Regulatory Guide 1.12 Rev. 2. (RG 1.12), 1997. Nuclear power plant instrumentation for earthquakes. March 1997
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (US NRC, 1997), 1997. Standard Review Plan. *Office of Nuclear Reactor Regulation*, NUREG-0800 Rev. 3, March 1997.
- WHEATON, R. D. y VON DOLLEN, F. S., 1981. A direct approach to uniform probability response spectra. *Earthquakes Notes*, Vol. 52, N.^o 1, pp. 79.
- YOUNG, R. R.; CHIOW, S. J.; SILVA, W. J. y HUMPHREY, J. R., 1996. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, Vol. 68, pp. 58-73.