

Capítulo 3

La acción sísmica

3.1. Introducción

La definición de la acción es un problema al que se le debe dar una solución concreta antes de efectuar un análisis sísmico de estructuras. Hay poca discusión en el hecho de que la principal contribución al riesgo sísmico es la acción sísmica, y como consecuencia, una definición realista de la acción sísmica es crítica para una estimación confiable del riesgo. Así pues, una necesidad básica de la comunidad de la ingeniería sísmica ha sido definir modelos de la acción sísmica de forma realista (Pinto et al., 2004).

El movimiento sísmico es complejo y se puede considerar como un proceso aleatorio, que requiere estudios basados en análisis estocásticos y en la teoría de probabilidades. Sin embargo, en el pasado se han utilizado definiciones deterministas de la acción y aún se siguen usando hoy en día, debido a su sencilla forma de aplicación y a la escasez de acelerogramas.

La poca información que se tiene en determinados emplazamientos de sismicidad baja y moderada, o donde no existe un grupo de registros sísmicos, se puede suplir mediante la generación de acelerogramas artificiales.

Un ejemplo específico es la ciudad de Barcelona, que se encuentra situada en una zona de sismicidad moderada y no dispone de registros sísmicos.

En España, la Comisión Interministerial de la Presidencia de Gobierno aprobó, provisionalmente, en el año 1969, un código sísmico general (PGS, 1968) que incluía un mapa de peligrosidad sísmica para España. En el año 1974 se publicó una versión actualizada del código sísmico. Esta normativa (PDS-1, 1974) definía un mapa de zonificación sísmica de España y asignaba a la ciudad de Barcelona una intensidad VII en la escala MSK. Con la norma posterior (NCSE-94, 1994), que estuvo vigente hasta el año 2002, Barcelona tenía asignada una aceleración de $0.04g$ para un período de retorno de 500 años, pero esta normativa no era obligatoria para aceleraciones sísmicas de cálculo inferiores a $0.06g$. La nueva y vigente norma (NCSE-02, 2002) mantiene la peligrosidad sísmica de Barcelona en $0.04g$ para un período de retorno de 500 años, pero establece también en $0.04g$ el nivel de aceleración esperado que obliga su aplicación.

Estudios recientes realizados por el *Instituto Cartográfico de Cataluña* (ICC) asignan a Barcelona, aceleraciones superiores a $0.10g$, asemejándose a las aceleraciones previstas en los primeros códigos españoles.

El objetivo de este capítulo es definir la acción sísmica a considerar en la evaluación de estructuras para distintas intensidades sísmicas y para distintos emplazamientos. Dicha definición se establece mediante espectros sísmicos de diseño y acelerogramas artificiales compatibles con ellos.

Finalmente, se presentan los espectros de respuesta considerados para definir la demanda sísmica y los acelerogramas artificiales obtenidos. Los espectros y acelerogramas aquí presentados son específicos para la ciudad de Barcelona ya que constituye el ámbito de aplicación de este trabajo.

3.2. La acción sísmica en el diseño estructural

En esta sección se describen, muy brevemente, las formas de definir la acción sísmica que son adecuadas al cálculo estructural. Las técnicas más usuales de caracterizar el movimiento del terreno, tanto de forma determinista como de forma probabilista se basan en espectros de respuesta y en acelerogramas.

Para modelos con un comportamiento lineal elástico se permite la aplicación del desacoplamiento modal del sistema de ecuaciones del movimiento y la definición de la acción mediante espectros de respuesta. Este tipo de definición se utiliza en las normas sísmicas de cálculo de estructuras. La aplicación de procedimientos de análisis que utilicen tal definición permite solamente la obtención de valores máximos de la respuesta estructural. En las normas más modernas, la teoría de los espectros de respuesta se ha extendido al análisis no lineal de estructuras, utilizándose espectros correspondientes a sistemas con comportamiento no lineal. Dichos espectros se representan en función de los mismos períodos correspondientes al sistema considerado lineal elástico, pero adoptan correcciones mediante el uso de coeficientes que tienen en cuenta la ductilidad del material de la estructura (Barbat y Canet, 1994).

Básicamente, los parámetros más utilizados son, la aceleración máxima, la frecuencia de movimiento y, en algunas ocasiones, registros de aceleración de movimientos fuertes del terreno, ocurridos en una región en el pasado. Pueden también utilizarse los espectros sísmicos de respuesta y los acelerogramas.

Existen zonas sísmicas con poca sismicidad para las que únicamente se dispone de los espectros de respuesta, estipulados en las normas sísmicas. En estos casos, cuando no se dispone de registros sísmicos reales, existen procedimientos numéricos que permiten generar familias de acelerogramas artificiales, cuyos espectros son compatibles con los espectros de respuesta prescritos o indicados en los códigos sísmicos.

Así pues, los espectros de respuesta representan una definición usual del mo-

vimiento sísmico del terreno, para utilizar en el análisis de estructuras. Su gran ventaja reside en que permiten una descripción de las características más importantes de la respuesta, sin necesidad de disponer de una historia temporal de la excitación. Un espectro de respuesta puede suavizarse, promediarse o simplemente modificarse para incluir las condiciones locales del terreno. Mediante el estudio de espectros de respuesta correspondientes a un número suficiente de terremotos registrados en una región, es posible la estimación de la forma de un espectro típico para dicha región y, además, obtener reglas generales para el desarrollo de espectros aproximados. Éstos son espectros suavizados, definidos mediante un número limitado de parámetros característicos. Cuando este tipo de espectros se utilizan en el diseño sísmico de estructuras, se suelen denominar espectros de diseño. Un espectro de diseño es una representación gráfica suavizada que simula las características esenciales de un espectro de respuesta, pero que a diferencia de éste, es válido para una región sísmica completa. Una vez definido el espectro de diseño, las normas estipulan el cálculo de las fuerzas sísmicas estáticas equivalentes a utilizar para determinar la respuesta estructural (Barbat y Canet, 1994). Los acelerogramas reales, son los registrados en una zona y el cálculo sísmico se basa en un registro único o en pocos registros disponibles para una zona, por lo que implican una elevada incertidumbre en la definición de la acción. Sin embargo, mediante los acelerogramas artificiales se pueden generar señales que consideren la influencia de las distintas características de los movimientos sísmicos, tales como, la magnitud, la distancia focal y el contenido de frecuencias, entre otras.

3.3. Técnicas de obtención de acelerogramas artificiales

Los principales métodos utilizados para la generación de acelerogramas son los métodos deterministas y los estocásticos (Lam et al., 2000).

3.3.1. Métodos sismológicos

Es uno de los primeros métodos usados para generar acelerogramas artificiales, está basado en la teoría de la dislocación o rotura puntual (Aki, 1968). Este método utiliza el momento sísmico y supone una función de deslizamiento de falla para caracterizar la fuente sísmica y la teoría de ondas para modelar la transmisión de las ondas sísmicas de cizalla generadas en un lugar, a través de un espacio homogéneo. Otros métodos de simulación determinista más sofisticados han sido desarrollados para generar acelerogramas más realistas. Los dos métodos de simulación contemporánea más populares son, el método de la función empírica de Green (*EGF: Empirical Green Function*) y el método de la teoría de rayos (Atkinson y Somerville, 1994; Irikura, 1986; Beresnev y Atkinson, 1967; Irikura y Kamae, 1994; Bolt, 1995). El método de la función de Green define una onda, generada por un pequeño impulso, viajando a través de un medio elástico y el método de la teoría de rayos está basada en la trayectoria de la propagación de ondas. En el método EGF, las mismas funciones empíricas de la función de Green derivadas para y a partir de un evento sísmico, son superpuestas, con retrasos de tiempos cortos, para generar acelerogramas de eventos mucho más grandes, basados en leyes de escala establecidas. El método tiene la ventaja de su simplicidad, pero su potencial está limitado por el hecho de que los eventos sísmicos reales representativos y las funciones empíricas de Green adecuadas, no están siempre disponibles. En el método de la teoría de rayos, los acelerogramas se generan mediante la convolución de una función de Green teórica, que se sintetiza por medio de la teoría de rayos, con una función de tiempo, empírica o teórica, de la fuente, la cual, a su vez, se basa en la geometría de falla supuesta y en la profundidad focal (Lam et al., 2000).

3.3.2. Métodos estocásticos

La generación de movimientos sísmicos debe tener en cuenta variables aleatorias, las cuales pueden ser consideradas para usar métodos estocásticos. Con la llegada de los ordenadores y el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (*FFT: Fast Fourier Transform*), los métodos estocásticos basados en el análisis en el dominio de frecuencias, han llegado a ser populares. Los procedimientos estocásticos consisten, básicamente, en definir el espectro de Fourier, es decir, el contenido de frecuencias y un grupo de ángulos aleatorios que definen las fases de llegada (Vanmarcke, 1977). La amplitud máxima y la duración de la señal se modelan mediante una función específica de amplitud. El conocido filtro de Kanai (1957) y Tajimi (1960) ha sido desarrollado dentro de un marco estocástico para generar acelerogramas artificiales. McGuire (1978) y Trifunac (1976, 1989) han desarrollado modelos de espectros de Fourier más elaborados, usando la magnitud sísmica, la distancia de la fuente y la clasificación del emplazamiento como parámetros de control (Lam et al., 2000).

Los procesos estocásticos permiten producir acelerogramas concretos, que se caracterizan mediante una variable aleatoria, que puede ser vectorial o escalar y que puede evolucionar con el tiempo. La figura 3.1 muestra un ejemplo de un acelerograma concreto que ha sido generado a partir de un modelo estocástico.

Este registro simulado, corresponde a una realización concreta de la variable aleatoria que lo define. Evidentemente pudo ocurrir otro acelerograma, al igual que al lanzar un dado en el que ha salido un 4 pudo haber salido cualquier número entre 1 y 6. Cuanto mayor es el acierto de estos modelos para predecir acelerogramas representativos de los realmente esperados en la zona de estudio, mayor es la calidad y adecuación del método. Por otra parte, la respuesta estructural a un acelerograma concreto, tampoco es determinista. Un mismo acelerograma puede producir respuestas similares aunque

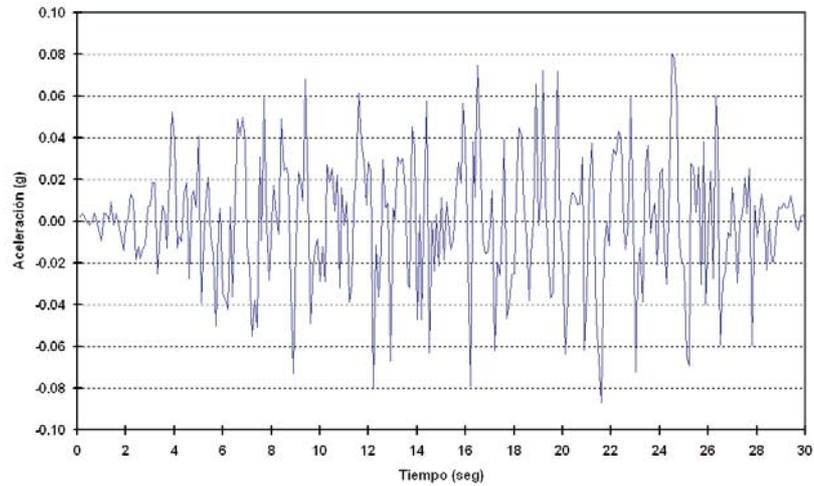


Figura 3.1: Acelerograma en función del tiempo.

distintas, particularmente cuando el sistema no es lineal. Por consiguiente, tanto la excitación como la respuesta deben ser consideradas como procesos estocásticos (Hurtado, 1998).

Entre los métodos estocásticos destacan las técnicas conocidas como estacionarias y no estacionarias.

Un proceso *estacionario* se define como aquel para el cual sus distribuciones probabilísticas permanecen inalteradas para una traslación arbitraria del eje de tiempo, es decir, su estructura probabilística no varía en el tiempo. Una hipótesis importante para la obtención de los parámetros estadísticos de un proceso estocástico estacionario a partir de sus realizaciones físicas es la ergodicidad, porque se establece una equivalencia entre los promedios obtenidos en el espacio de muestreo y los calculados a partir de una realización única sobre el eje temporal. En la práctica, el mayor interés reside principalmente en la ergodicidad con respecto a promedios comunes tales como la media, la media cuadrática y la autocorrelación. Un proceso estacionario puede descomponerse en una suma infinita de armónicos de amplitudes aleatorias, que pueden estar relacionados estadísticamente con su frecuencia respectiva me-

diante una función aleatoria que tenga una naturaleza espectral (Hurtado, 1998).

Por otra parte, los procesos *no estacionarios*, no se pueden representar como una suma de funciones seno y coseno, ya que éstas son completamente estacionarias. La representación espectral es atractiva tanto en sentido teórico (para cálculos analíticos) como práctico (para fines de simulación) por el hecho de que el espectro del proceso está implícito en su definición. Algunos autores tales como Priestley (1981) han propuesto modelos no estacionarios basados en la representación espectral (Hurtado, 1998).

En cualquier caso, los registros de sismos son altamente no estacionarios. Esto se debe a las diferencias en los tiempos de llegada de las distintas fases, en sus componentes frecuenciales, así como en su amplitud y duración.

La acción sísmica, por lo tanto, se debe considerar como un proceso aleatorio no estacionario. Existen diferentes técnicas para modelar la no estacionariedad de los movimientos sísmicos. El modelo de Hurtado (1998) tiene en cuenta la variación del contenido frecuencial con el tiempo. Una forma más sencilla de modelar la no estacionariedad consiste en considerar un proceso estacionario cuya amplitud se modela mediante un proceso no estacionario (Hurtado y Barbat, 1998). En este caso, se supone que la parte central del movimiento sísmico se puede representar adecuadamente como un proceso aleatorio, pero estacionario. La estacionariedad del modelo se tiene en cuenta multiplicando el proceso estacionario, por una función envolvente no estacionaria. Esta envolvente suele definirse mediante una curva que vale cero justo antes del inicio del terremoto, aumenta de forma rápida hasta un valor máximo, para decrecer luego de forma gradual, hasta que la aceleración desaparece. De hecho pueden existir varios picos antes de que la aceleración se desvanezca por completo (Nau et al., 1982). El proceso estacionario se modela en el dominio frecuencial, mediante un segmento de banda limitada que puede alternarse mediante el filtrado de un ruido blanco, es decir, el contenido de frecuencia se ha limitado a una banda finita concreta, que suele

ser caracterizada a partir del análisis de acelerogramas reales típicos de la zona de estudio o asimilables a ellos. En este estudio, el ancho de banda y la función de modulación de amplitud se determinan de forma que los acelerogramas resultantes sean compatibles con espectros de respuesta, es decir, que su espectro de respuesta sea compatible con un espectro de diseño específico. En este trabajo se van a considerar espectros de diseño para Barcelona. Se usarán los espectros previstos de la norma española y espectros específicos desarrollados por el ICC, que han sido ajustados al eurocódigo 8.

A continuación se describe el procedimiento utilizado para la generación de acelerogramas compatibles con espectros de respuesta.

3.3.3. Acelerogramas artificiales compatibles con espectros de respuesta

La definición de la acción está directamente relacionada con el tipo de análisis estructural que se pretende realizar. Si es un análisis lineal, la definición más utilizada se basa en el desacoplamiento modal de las ecuaciones del movimiento y en la teoría de los espectros de respuesta. En un análisis no lineal, se suele utilizar algún procedimiento de integración paso a paso de las ecuaciones del movimiento, siendo necesaria, la definición de la excitación sísmica a través de acelerogramas (Barbat y Canet, 1994).

Muchos programas computacionales, como por ejemplo el SIMQKE (Venmarcke, 1976), han sido desarrollados para obtener de forma iterativa, el espectro de Fourier de un acelerograma con un espectro de respuesta dado. Así los acelerogramas artificiales pueden generarse para que sus espectros de respuesta sean compatibles con los espectros de respuesta previstos en los códigos.

La mayoría de los métodos que generan acelerogramas compatibles con un espectro de respuesta prefijado, se basan en el hecho de que una función pe-

riódica, como la aceleración $\ddot{x}(t)$ que define la señal sísmica, se puede expandir en una serie de ondas sinusoidales, ecuación (3.1).

$$\ddot{x}(t) = \sum_{k=1}^n A_k \text{sen}(\omega_k t + \phi_k) \quad (3.1)$$

donde A_k es la amplitud, ω_k es la frecuencia angular y ϕ_k son los ángulos de fase de las k contribuciones sinusoidales.

A continuación se describe, de forma resumida el método propuesto por Gasparini y Venmarcke, (1976) para la generación de acelerogramas artificiales.

Fijando una serie de amplitudes y generando diferentes series de ángulos fase, se pueden generar diferentes movimientos con la misma apariencia general en el contenido de frecuencias pero distintos en los detalles. Estos modelos fijan un número n de frecuencias, luego se generan de forma aleatoria la misma cantidad de amplitudes y ángulos fase con valores comprendidos entre 0 y 2π , dando a la señal un carácter estocástico. Las amplitudes A_k están relacionadas a la función de densidad espectral $G(\omega)$, mediante la ecuación (3.2):

$$G(\omega_k)\Delta\omega = \frac{A_k^2}{2} \quad (3.2)$$

donde $G(\omega_k)\Delta\omega$ representa la contribución de la potencia del movimiento de la sinusoidal con frecuencia ω_k .

La potencia total y el contenido de frecuencia relativa de los movimientos producidos por la ecuación $\ddot{x}(t)$ no varían con el tiempo. Para simular el carácter transitorio de terremotos reales, los movimientos estacionarios $\ddot{x}(t)$, se multiplican por una función de intensidad envolvente determinista predefinida: $I(t)$. De esta forma, el movimiento final simulado viene dado por la ecuación (3.3):

$$\ddot{x}(t) = I(t) \sum_{k=1}^n A_k \text{sen}(\omega_k t + \phi_k) \quad (3.3)$$

Este movimiento es estacionario en el contenido de frecuencias con una aceleración pico cercana a la aceleración pico dada (Gasparini y Venmarcke,

1976).

Las funciones de intensidad simulan el carácter transitorio de los acelerogramas. Algunos ejemplos de las funciones de intensidad deterministas obtenidas a partir de observaciones reales son, de tipo cajón, trapezoidal (Hou, 1968), exponencial (Liu, 1968) y compuestas (Jennings, 1968), figura 3.2.

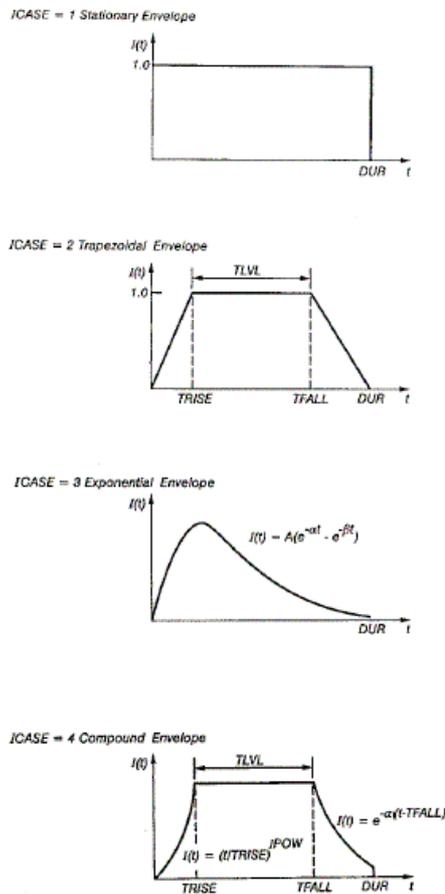


Figura 3.2: Envoltentes de intensidad (Carr, 1997).

3.4. Espectros de respuesta para Barcelona

Se describen aquí, los espectros de respuesta que se van a utilizar en este trabajo.

3.4.1. Espectros norma sísmica española

La norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-02), fue publicada en septiembre del año 2002. La NCSE-02 define la peligrosidad sísmica de España en términos de la llamada aceleración sísmica básica (a_b) que representa la aceleración en un período de retorno de 500 años. La aceleración sísmica de cálculo (a_c) se define a partir de la aceleración básica mediante la siguiente ecuación,

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b \quad (3.4)$$

donde ρ es un coeficiente adimensional de riesgo que depende del período de vida útil para el que se proyecta la construcción, y de la importancia de la misma. Para un edificio considerado de importancia normal, el factor de riesgo vale 1.0. S es un coeficiente de amplificación del terreno que se define como:

$$\begin{aligned} S &= \frac{C}{1,25} & \rho a_b \leq 0,1g \\ S &= \frac{C}{1,25} + 3,33 (\rho a_b / g - 0,1) (1 - C / 1,25) & 0,1g < \rho a_b < 0,4g \\ S &= 1 & \rho a_b \geq 0,4g \end{aligned} \quad (3.5)$$

La norma sismorresistente anterior a la NCSE-02 (2002), la NCSE-94 (1994), en el párrafo §1.2.3 de la misma, establece que no es obligatoria su aplicación para aceleraciones de cálculo menores a $0.06g$.

La NCSE-02 considera 4 tipos de suelo, donde a cada uno se le asigna un coeficiente C que depende de las características geotécnicas del terreno de

cimentación. A continuación se definen los tipos de suelo y los valores del parámetro C .

Tipo I: Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $V_s > 750$ m/s, $C=1.0$.

Tipo II: Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $750 \text{ m/s} = V_s > 400 \text{ m/s}$, $C=1.3$.

Tipo III: Suelo granular de compactación media o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $400 \text{ m/s} = V_s > 200 \text{ m/s}$, $C=1.6$.

Tipo IV: Suelo granular suelto o suelo cohesivo blando. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $V_s = 200 \text{ m/s}$, $C=2.0$

En el apartado §1.2.3 de la norma, se consideran los criterios de aplicación de la misma y en él se especifica que, la norma está exenta de aplicación en las edificaciones consideradas de importancia normal o especial cuando la aceleración sísmica básica es inferior a $0.04g$, siendo g la aceleración de la gravedad, así como también, en las construcciones de importancia normal con pórticos bien arriostrados entre sí en todas las direcciones, cuando la aceleración sísmica básica es inferior a $0.08g$. No obstante, la norma debe aplicarse en edificios de más de siete plantas, si la aceleración sísmica de cálculo es igual o mayor que $0.08g$. Si la aceleración sísmica básica es igual o mayor que $0.04g$ deberán tenerse en cuenta los posibles efectos del sismo en terrenos potencialmente inestables. Si la aceleración básica es igual o mayor que $0.08g$ e inferior a $0.12g$, las edificaciones de fábrica de ladrillo, de bloques de mortero, o similares, poseerán un máximo de cuatro alturas, y si dicha aceleración sísmica básica es igual o superior a $0.12g$, un máximo de dos (NCSE-02, 2002).

La NCSE-02 (2002) establece un espectro normalizado de respuesta elástico para movimientos horizontales, correspondientes a un oscilador lineal simple con amortiguamiento de 5% respecto al crítico. El espectro consta de tres tramos que se definen en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1. Tramos del espectro de respuesta (NCSE-02, 2002).

Tramos	$\alpha(T)$
Períodos bajos ($T < T_A$)	$1.0 + 1.5 \cdot \frac{T}{T_A}$
Períodos intermedios ($T_A \leq T \leq T_B$)	2.5
Períodos altos ($T > T_B$)	$K \cdot \frac{C}{T}$

T es el período en segundos, K es un coeficiente de contribución, $\alpha(T)$ es el valor del espectro de respuesta elástico normalizado, Sa es la aceleración espectral y T_A y T_B son períodos característicos dados por:

$$T_A = K \cdot \frac{C}{10} \qquad T_B = K \cdot \frac{C}{2,5} \qquad (3.6)$$

Para la provincia de Barcelona $0.04 g \leq a_b \leq 0.09 g$ con un factor $K=1.0$. En Barcelona ciudad, $a_b = 0.04 g$ (NCSE-02, 2002).

El espectro elástico de respuesta representa la aceleración máxima de la estructura (Sa) durante un terremoto, en función del período de vibración (T). La siguiente ecuación permite pasar del formato $Sa - T$ al formato $Sa - Sd$.

$$Sd = \frac{Sa}{\omega^2} = \frac{Sa * T^2}{(2 * \pi)^2} \qquad (3.7)$$

La figura 3.3 muestra los espectros de respuesta previstos para Barcelona para los diferentes tipos de suelo ($C=1.0, 1.3, 1.6, 2.0$). Para $a_b=0.04g$ se ha considerado $K=1$ y $\rho=1$.

3.4.2. Espectros código sísmico europeo

El eurocódigo número 8 (EC-8, 1998; 2004), es una norma europea que contiene disposiciones para el proyecto de estructuras sismorresistentes. La ace-

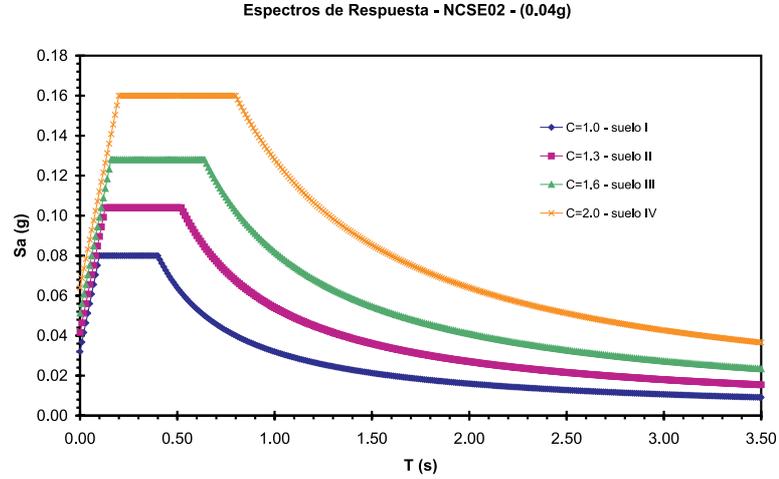


Figura 3.3: Espectros de respuesta previstos para Barcelona, NCSE-02.

lización de cálculo del terreno (a_g), corresponde a un período de retorno de 475 años. En el EC-8 (1998), parte 1-1 párrafo §4.1.5, en zonas sísmicas con aceleraciones de cálculo al terreno no mayores a $0,04g$, se establece que no es necesario observar las disposiciones del mismo.

El espectro elástico de respuesta es la representación del movimiento sísmico en un punto dado de la superficie. El espectro elástico de respuesta $S_e(T)$ para el período de retorno de referencia se define como:

$$\begin{aligned}
 S_e(T) &= a_g S \left\{ 1 + \frac{T}{T_B} (\eta \xi_0 - 1) \right\} & 0 \leq T \leq T_B \\
 S_e(T) &= a_g S \eta \xi_0 & T_B \leq T \leq T_C \\
 S_e(T) &= a_g S \eta \xi_0 \left\{ \frac{T_C}{T} \right\}^{k_1} & T_C \leq T \leq T_D \\
 S_e(T) &= a_g S \eta \xi_0 \left\{ \frac{T_C}{T_D} \right\}^{k_1} \left\{ \frac{T_D}{T} \right\}^{k_2} & T_D \leq T
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

donde, T es el período (segundos), $S_e(T)$ es la ordenada del espectro elástico de respuesta, a_g es la aceleración de cálculo del terreno, ξ_0 es el factor de amplificación de la aceleración espectral para un amortiguamiento viscoso de

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 constante del espectro; k_1 y k_2 son exponentes que definen la forma del espectro para un período de vibración mayor de T_C y T_D , respectivamente, S es el parámetro del suelo y η es un factor de corrección por amortiguamiento, η vale 1.0 para el caso de un amortiguamiento del 5 %. Los valores de los parámetros que describen el espectro elástico de respuesta han sido seleccionados para que las ordenadas del mismo tengan una probabilidad de excedencia uniforme para todos los períodos, igual al 50 % (EC-8, 1998), ver Tabla 3.2:

Tabla 3.2. Parámetros del espectro de respuesta (EC-8, 1998).

Tipo de Suelo	S	ξ_0	k_1	k_2	$T_B(s)$	$T_C(s)$	$T_D(s)$
<i>A</i>	1.0	2.5	1.0	2.0	0.10	0.40	3.0
<i>B</i>	1.0	2.5	1.0	2.0	0.15	0.60	3.0
<i>C</i>	0.9	2.5	1.0	2.0	0.20	0.80	3.0

La influencia de las condiciones locales del terreno sobre la acción sísmica se tiene en cuenta mediante la consideración de tres clases de suelo descritas a continuación:

Clase A: Roca u otra formación geológica caracterizada por una velocidad de onda transversal, V_s , de 800 m/s, incluyendo como máximo 5 m del material más débil de la superficie. Depósitos compactos de arena, grava o arcilla sobre-consolidada de varias decenas de metros de espesor, caracterizados por valores de V_s de 400 m/s a una profundidad de 10 m.

Clase B: Depósitos profundos de arenas de densidad media, gravas o arcillas de consistencia media, con espesores desde algunas decenas a muchos centenares de metros, caracterizados por valores de V_s de 200 m/s, a 10 m de profundidad, que se incrementan hasta 350 m/s, por lo menos, a una profundidad de 50 m.

Clase C: Depósitos de suelo suelto no cohesivo, con o sin algunas capas de débil cohesión, caracterizados por valores de V_s inferiores a 200 m/s en los

primeros 20 m. Depósitos en los que predominan suelos cohesivos de rigidez débil a media, caracterizados por valores de V_s inferiores a 200 m/s en los 20 m más superficiales.

La figura 3.4 muestra los espectros de respuesta para una aceleración de $0.04g$ para los 3 tipos de suelo A, B y C.

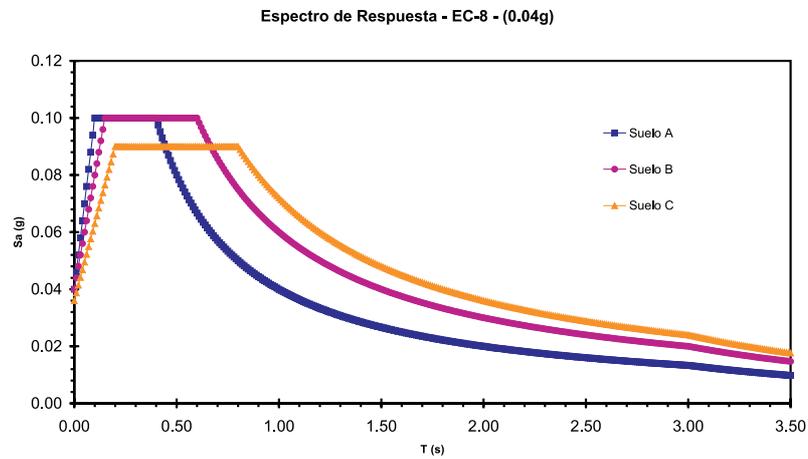


Figura 3.4: Espectros de respuesta para una aceleración de $0.04g$ (EC-8, 1998).

En la nueva versión del eurocódigo 8 (2004), los parámetros para construir los espectros de respuesta varían, y uno de los cambios hechos en este código fue el de considerar cinco tipos de suelos en vez de tres. En el momento de llevar a cabo este estudio estaba vigente la versión del código europeo del año 1998, por lo tanto los espectros utilizados y los acelerogramas generados corresponden a esta versión del código europeo.

En el capítulo referente al estudio de los edificios de obra de fábrica de ladrillo se utilizó la nueva versión del eurocódigo 8 (2004).

3.4.3. Espectros ICC para Barcelona

Cid, J. (1998; 2001) realizó la zonificación sísmica de Barcelona, definiendo cuatro zonas representativas.

De los principales suelos existentes en Barcelona, se definen a continuación estas cuatro zonas:

Zona I: afloramientos holocenos, una amplificación pico máxima en un rango de 0.5 - 0.7 segundos, caracteriza la función promedio de transferencia. El factor de amplificación máximo es aproximadamente 4. Corresponde a rocas compactas.

Zona II: afloramientos pleistocenos con substrato terciario de espesor lo suficientemente grande como para que influya en la respuesta. La función de transferencia presenta un pico de amplificación máxima cercano a 0.2 segundos, con un factor de amplificación alrededor de 4. La amplificación de la aceleración máxima del suelo (PGA) respecto a la roca es 1.65. Corresponde a materiales semicompactos.

Zona III: afloramientos pleistocenos sin substrato terciario de espesor lo suficientemente grueso como para que influya en la respuesta. La función de transferencia está caracterizada por una amplificación máxima próxima a 0.2 segundos, con un valor de amplificación entre 3 y 4. La amplificación de la aceleración máxima del suelo (PGA) respecto a la roca es 1.40. Corresponde a suelos no cohesionados.

Zona Roca: afloramientos paleozoicos y terciarios, no se esperan efectos de amplificación. Corresponde a una roca dura (suelo firme).

La figura 3.5 muestra la zonificación sísmica de Barcelona.

Por otro parte, el Instituto Cartográfico de Cataluña, ha desarrollado dos escenarios sísmicos para el análisis de riesgo sísmico en la ciudad de Barcelona (Irizarry et al., 2003), los cuales reciben el nombre de escenarios deterministas

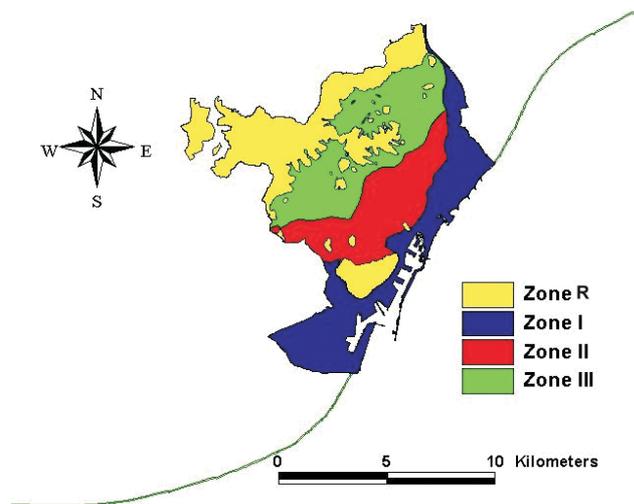


Figura 3.5: Clasificación de los suelos de la ciudad de Barcelona (Cid, 1998).

y probabilistas.

El escenario *probabilista* fue evaluado en términos de los valores espectrales teniendo en cuenta la zonificación sismotectónica, en cada una de estas zonas se ajustan los parámetros característicos del modelo de recurrencia de los terremotos utilizados. Una vez deducidas todas las distribuciones de probabilidad de recurrencia de terremotos de cada zona sismotectónica, se propagan los efectos de la sismicidad de cada zona a cada punto del territorio, de acuerdo a leyes de atenuación sísmica para Cataluña.

El escenario *determinista* se evalúa a partir de las intensidades máximas de los terremotos históricos. La estimación de la intensidad en cada punto de Cataluña se obtiene aplicando a cada terremoto del catálogo un modelo de atenuación de la intensidad con la distancia. De esta manera, en cada punto de Cataluña, se puede saber la intensidad que probablemente se percibió por causa de cada uno de los terremotos del catálogo. Finalmente, con la consideración de los efectos de todos los terremotos se puede deducir la intensidad máxima en cada punto.

Irizarry et al. (2003) establecieron unos espectros de respuesta para estos dos

escenarios básicos: deterministas y probabilistas. El espectro se define, para un período de retorno de 475 años, como:

$$\begin{aligned}
 S_a(T) &= PGA \left\{ 1 + \frac{T}{T_B} (B_C - 1) \right\} & 0 \leq T \leq T_B \\
 S_a(T) &= PGA * B_C & T_B \leq T \leq T_C \\
 S_a(T) &= PGA \left\{ \frac{T_C}{T} \right\}^d B_C & T_C \leq T \leq T_D \\
 S_a(T) &= PGA \left\{ \frac{T_D}{T} \right\}^2 B_C & T_D \leq T
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

La PGA define el nivel de la acción sísmica, T_B y T_C definen la meseta de aceleración espectral constante, T_D es el valor que define el comienzo del tramo de desplazamiento constante del espectro, B_C , es un factor que relaciona la aceleración máxima espectral con la PGA y d es un parámetro que modula la caída del espectro para períodos largos.

La Tabla 3.3 muestra los parámetros que definen los 8 espectros de respuesta correspondientes a los escenarios determinista y probabilista para los 4 tipos de suelos de Barcelona.

Tabla 3.3. Parámetros del espectro de respuesta de Barcelona propuestos por el ICC (Irizarry et al., 2003).

Tipo de Suelo	Tipo de espectro	$PGA(g)$	d	B_C	$T_B(s)$	$T_C(s)$	$T_D(s)$
<i>Zona I</i>	Determinista	0.136	1.70	1.91	0.10	0.39	2.30
	Probabilista	0.188	1.34	2.00	0.10	0.40	2.85
<i>Zona II</i>	Determinista	0.141	1.43	2.45	0.10	0.22	2.20
	Probabilista	0.194	1.28	2.50	0.10	0.23	2.21
<i>Zona III</i>	Determinista	0.122	1.40	2.29	0.10	0.22	2.00
	Probabilista	0.169	1.12	2.57	0.10	0.19	1.77
<i>Zona R(roca)</i>	Determinista	0.072	1.12	2.26	0.10	0.23	1.75
	Probabilista	0.10	0.98	2.29	0.10	0.25	1.75

La figura 3.6 muestra los espectros de respuesta correspondientes a los escenarios determinista y probabilista en la zona R.

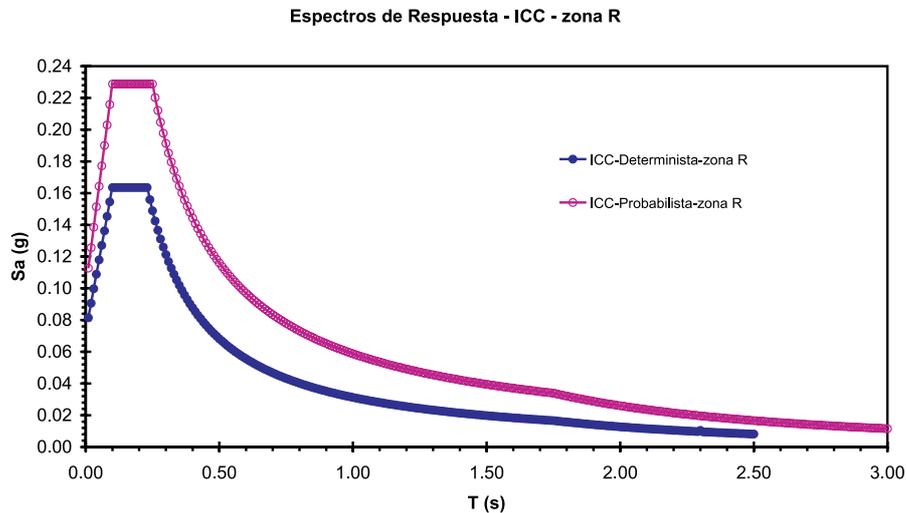


Figura 3.6: Espectros de respuesta del ICC en zona R.

3.5. La envolvente trapezoidal

La figura 3.7 muestra la función de envolvente de amplitud utilizada para la generación de los acelerogramas artificiales. Los parámetros que componen dicha envolvente se obtienen de acuerdo a la severidad del sismo y no de forma arbitraria.

En este apartado se definen los parámetros que describen esta función envolvente.

3.5.1. La duración (DUR)

No hay una definición universal aceptada para la duración aparente de un movimiento del suelo debido a un sismo. En las últimas tres décadas, un gran

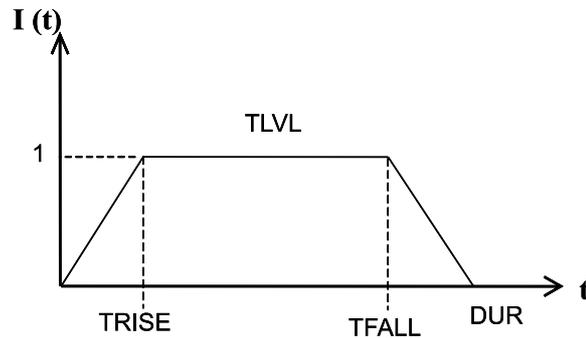


Figura 3.7: Envolvente de amplitud trapezoidal.

número de investigadores han propuesto definiciones de la duración de movimiento sísmico, y estas definiciones fueron revisadas en orden cronológico por Bommer y Martínez-Pereira (1999) y clasificadas de acuerdo a cuatro grupos genéricos: categoría de la duración, duración uniforme, duración significativa y duraciones basadas en la respuesta de la estructura ante una carga sísmica (Bruno y Fabrice, 2000).

Con el modelo de Bruno y Fabrice (2000), el cálculo de la duración aparente está basado en la acumulación de energía del acelerograma representado por la integral del cuadrado de la aceleración. Esta definición está relacionada a la intensidad de Arias (Arias, 1970) y está clasificada en el grupo de duración significativa, definida como el intervalo entre el tiempo en el cual el 5% y 95% de la intensidad de Arias (Arias, 1970) es alcanzado (Trifunac y Brady, 1975; Dobry et al., 1978). Esta definición tiene la ventaja que considera el acelerograma completo. La duración de la señal del sismo crece con la distancia debido a las diferentes velocidades de propagación de ondas. La figura 3.8 muestra la duración del movimiento fuerte del suelo según el modelo empírico y los datos registrados. Con las líneas continuas se representa la relación propuesta para distintas magnitudes sísmicas, que se indican según la barra de colores dada, los círculos corresponden a la duración derivada de los datos, las estrellas corresponden a la duración calculada, usando el modelo empírico propuesto en su estudio con la magnitud y distancia de los datos utilizados (Bruno y Fabrice, 2000).

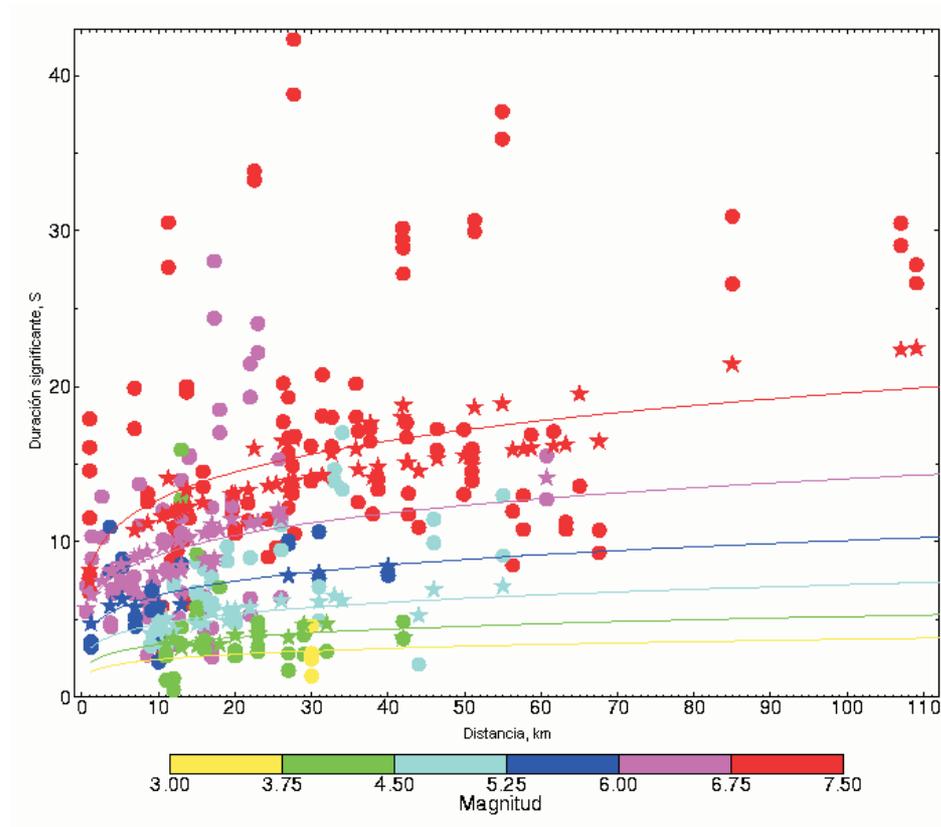


Figura 3.8: Modelo empírico para la duración del movimiento sísmico.

El parámetro de duración del movimiento sísmico (DUR) es muy importante, debido a que la cantidad de daño en las estructuras aumenta con el número de ciclos de carga. La duración del movimiento está relacionada con la magnitud y distancia de la fuente, y al aumentar la magnitud, aumenta también la duración.

La duración del terremoto es uno de los efectos de la demanda sísmica que se debe tener en cuenta. La duración del movimiento sísmico está definida en relación a la aceleración sísmica y existe un gran número de definiciones diferentes. Desafortunadamente, las expresiones para tales correlaciones varían extensamente (Dowrich, 1997).

La evaluación de la duración de un sismo para una magnitud y distancia

dada entre la fuente y el sitio no es sencilla. De todas formas, este parámetro aún no ha sido considerado en la mayoría de los códigos sísmicos. Bruno y Fabrice (2000) presentan un modelo empírico preliminar para la duración del movimiento sísmico, derivado de datos de movimientos horizontales de California e Italia. Este modelo empírico predice el valor medio de la duración como una función de la magnitud, la distancia y las condiciones del suelo, y puede ser usado para la evaluación del riesgo sísmico.

La expresión general del modelo empírico usado en este estudio es definido por, ecuación (3.10):

$$\ln(D) = a + b.Magnitud + c. \ln(dist) + d.Suelo + 0,48 \quad (3.10)$$

donde D es la duración del sismo en segundos, $dist$, es la distancia epicentral en km,

$$Suelo = \begin{cases} 1 & V \leq 750 \text{ m/s} \\ 0 & \textit{roca} \end{cases}$$

donde, V es la velocidad de onda en el sitio.

A continuación se definen los parámetros de la ecuación (3.10) para modelar la duración del sismo.

a	b	c	d
-1.04	0.44	0.19	0.04

Estos parámetros son coeficientes empíricos para un rango de frecuencias entre 0.5 y 10 Hz, los valores fueron derivados a partir de 272 acelerogramas.

3.5.2. El tiempo de elevación (*TRISE*)

El tiempo de elevación (T_{RISE}), ver figura 3.7, se calcula a partir de la frecuencia de esquina usando la expresión de Beresnev y Atkinson (1997), ecuación (3.11) (Lam et al., 2000):

$$T_{RISE} = \frac{0,27}{f_c} \quad (3.11)$$

f_c es la frecuencia de esquina y se basa en el modelo de Brune (1970), pero como este modelo presenta ciertas limitaciones, Atkinson ha introducido un modelo semi-empírico de frecuencias de esquina, basándose en registros de movimientos sísmicos (Atkinson, 1993; Atkinson y Silva, 1997).

A pesar que el modelo de Brune (1970) es ampliamente utilizado, existen otros modelos para estimar f_c , tales como: el modelo de Atkinson y Boore (1995), ecuación (3.12)

$$f_c = 2,41 - 0,533M \quad (3.12)$$

donde M es la magnitud de momento.

El modelo de Frankel et al. (1996), ecuación (3.13)

$$f_c = 2,623 - 0,5M \quad (3.13)$$

El modelo de Joyner (1997), ecuación (3.14)

$$f_c = 2,312 - 0,5M \quad (3.14)$$

El modelo de Atkinson y Silva (2000), ecuación (3.15), etc.

$$f_c = 2,181 - 0,496M \quad (3.15)$$

En este trabajo, para obtener el tiempo de elevación, T_{RISE} , que da paso a la acción fuerte del sismo, se utilizó la función de frecuencia de esquina de Atkinson y Silva (2000), ecuación (3.15).

3.5.3. La fase fuerte (*TLVL*)

En este estudio, la duración de la zona de movimiento fuerte (*TLVL*), ver figura 3.7, es determinada usando la fórmula propuesta por Huo et al. (1991):

$$\ln(Te) = -5,222 + 0,751M + 0,582 \ln(R + 10) \quad (3.16)$$

Por ejemplo, para una magnitud de momento sísmico $M = 7.3$ y una distancia epicentral $R=95$ km, la duración de la fase fuerte del sismo es de 19 segundos (Hwan y Huo, 1994).

En Barcelona se han sentido terremotos con intensidades (I) entre V y VII en la escala MSK, concentrándose la mayor actividad sísmica en la zona Pirenaica. A partir de estas intensidades, se calcula la magnitud de ondas superficiales (M_S), ecuación (3.17),

$$M_S = 0,55I + 2,2\log R - 1,14 \quad (3.17)$$

seguidamente la magnitud de ondas internas (ondas de cuerpo, mb), ecuación (3.18),

$$mb = 2,5 + 0,63M_S \quad (3.18)$$

las cuales son transformadas a magnitud de momento usando la ecuación (3.19) para una distancia epicentral fijada en 95 km (Tabla 3.4).

$$M = 4,853 - 0,853mb + 0,173mb^2 \quad (3.19)$$

Esta distancia epicentral ha sido tomada, teniendo en cuenta que la mayor actividad sísmica que ha afectado a Barcelona, se encuentra en la zona volcánica de la *Garratoxa* y en los Pirineos.

Tabla 3.4. Magnitudes obtenidas a partir de intensidades

I	M_s	mb	M
V	6.0	6.3	6.3
VI	6.5	6.6	6.8
VII	7.1	6.9	7.3

3.5.4. El tiempo de caída (*TFALL*)

Se define como el tiempo en el cual el terremoto empieza a desvanecer y se obtiene como la suma de *TRISE* más *TLVL*, ver figura 3.7.

La Tabla 3.5 resume las principales variables necesarias para la generación de los acelerogramas artificiales, para una distancia epicentral de 95 km.

Tabla 3.5. Valores de la envolvente sísmica trapezoidal

<i>I</i>	<i>Ms</i>	<i>mb</i>	<i>M</i>	<i>Dur</i>	<i>Te(TLVL)</i>	<i>T_{rise}</i>	<i>T_{fall}</i>
<i>V</i>	6.0	6.3	6.3	13.0	9.0	2.0	11.0
<i>VI</i>	6.5	6.6	6.8	20.0	13.0	4.0	17.0
<i>VII</i>	7.1	6.9	7.3	30.0	19.0	7.0	26.0

3.6. Acelerogramas artificiales

En este trabajo se empleó el programa SIMQKE (Carr, 1997) para la generación de los acelerogramas artificiales. Con este programa se pueden generar acelerogramas compatibles con un espectro de respuesta, definido por el usuario, o con una función de densidad espectral (Gasparini y Venmarcke, 1976), de forma que para cada espectro de respuesta se pueden generar un número infinito de acelerogramas diferentes.

Los acelerogramas artificiales generados en este trabajo, son compatibles con los espectros elásticos de respuesta de aceleración, que se han definido anteriormente.

En este trabajo, se adoptó la función de envolvente de amplitud trapezoidal, que se encuentra incorporada dentro del programa, cuyos parámetros se han descrito en la sección 3.5.

En este apartado se presenta una breve descripción del programa SIMQKE.

3.6.1. El programa SIMQKE

Las principales características del programa SIMQKE son las siguientes:

- Calcula una función densidad del espectro de potencia a partir de un espectro de respuesta suavizado especificado.
- Genera acelerogramas artificiales estáticamente independientes de las historias en el tiempo y trata de igualar por un proceso iterativo el espectro de respuesta especificado.
- Lleva a cabo una corrección de línea base garantizando que la velocidad final del terreno, es nula.
- Calcula el espectro de respuesta correspondiente a las historias temporales generadas.
- El programa puede elevar o bajar la aceleración pico generada para que corresponda exactamente con la aceleración pico que se desea.

La figura 3.9 muestra un ejemplo de acelerograma obtenido con el programa SIMQKE, a partir de un espectro de respuesta. La figura 3.10 muestra el espectro de respuesta junto con el espectro adoptado en la simulación.

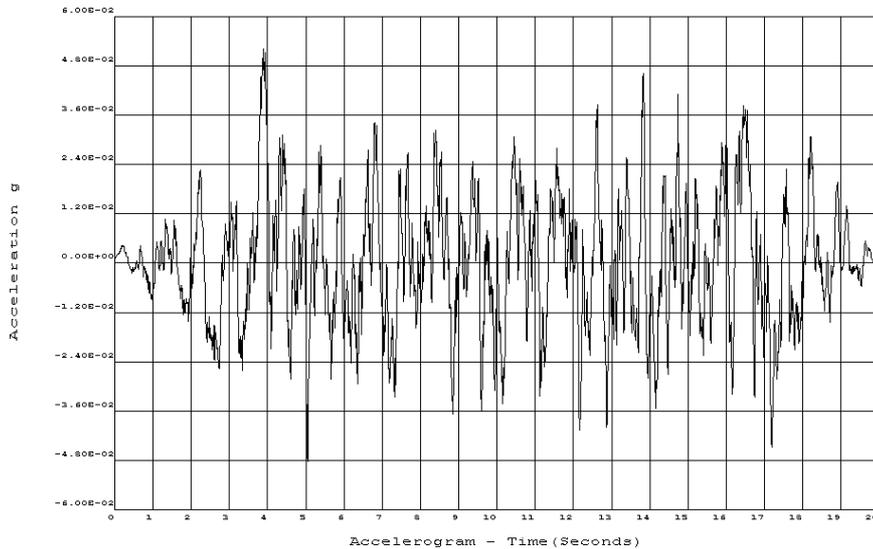


Figura 3.9: Acelerograma generado con el programa SIMQKE.

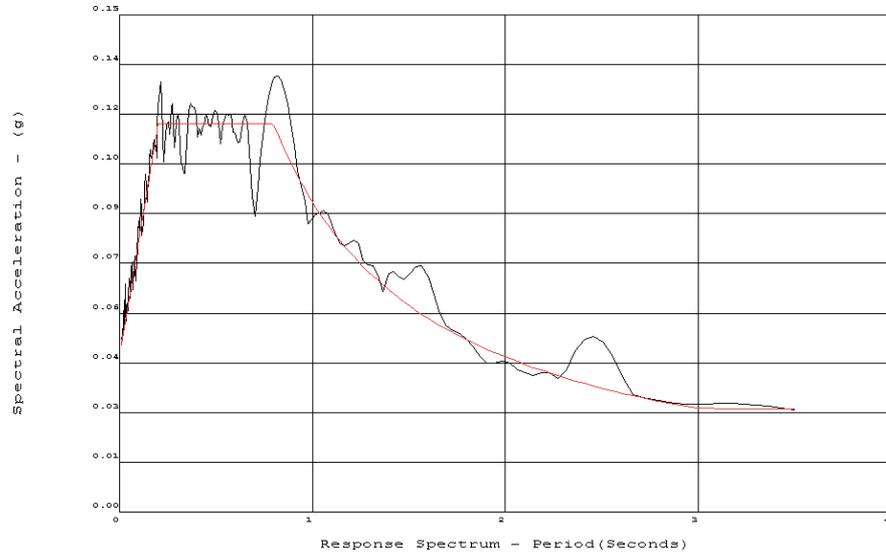


Figura 3.10: Espectro de aceleración ajustado con el programa SIMQKE.

3.6.2. Acelerogramas generados

Para la generación de los acelerogramas artificiales se han propuesto unos intervalos de aceleraciones pico, que corresponden a intensidades que es razonable esperar en la ciudad de Barcelona y que, además, pueden ocasionar daños a sus edificios. Es decir, intensidades comprendidas entre V y VII en la escala MSK.

En la Tabla 3.6, se presenta la relación entre las intensidades y los intervalos de variación de las aceleraciones picos del terreno (*PGA*), correspondientes con las aceleraciones sísmicas de cálculo de la NCSE-02 y con las propuestas por el ICC. Estas intensidades han sido llevadas a aceleración, mediante la fórmula empírica incluida en la norma NCSE-94.

Además de estos intervalos de aceleración, también se consideraron, para la generación de acelerogramas artificiales, los diferentes tipos de suelo según cada normativa y simultáneamente, se tomaron distintos parámetros de la envolvente trapezoidal utilizada en el estudio, es decir, se realizó una variación

en la duración (*DUR*) del sismo según la aceleración sísmica y por lo tanto, en los tiempos de elevación (*TRISE*) y caída (*TFALL*) del movimiento sísmico.

Tabla 3.6. Relación de I y PGA para la generación de acelerogramas artificiales

I (MSK)	PGA(g)	Comentarios
V - VI	0.04g - 0.07g	Corresponden con la PGA propuestas en la NCSE-02 para Barcelona
VII	0.10g - 0.15g	Corresponden con las PGA propuestas por el ICC para Barcelona

La Tabla 3.7 sintetiza la colección de acelerogramas artificiales generados. Se han generado un grupo de 242 acelerogramas compatibles con acciones sísmicas que es razonable esperar en la ciudad de Barcelona. Se ha efectuado un barrido para considerar aceleraciones pico entre 0.03g y 0.15g con duraciones entre 13 y 30 segundos, utilizando las formas espectrales definidas en el eurocódigo 8 y en la NCSE-02, considerando los diferentes tipos de suelo. Todo ello garantiza, además del intervalo de la aceleración pico, una amplia variedad de contenidos espectrales.

También se han desarrollado otros acelerogramas artificiales compatibles con la norma española NCSE-04 para un suelo tipo II y con una duración fija de 15 segundos. Para estos acelerogramas se han considerado aceleraciones pico medias entre 0.05g y 0.35g con incrementos de 0.05g.

El motivo de este estudio se basa en la escasez de registros sísmicos disponibles en Barcelona, para llevar a cabo un análisis estructural teniendo en cuenta la acción sísmica.

Para algunos estudios específicos de vulnerabilidad y riesgo sísmico, es necesario generar acelerogramas artificiales para un amplio rango de aceleración máxima.

Tabla 3.7. Colección de acelerogramas artificiales.

<i>PGA</i> (<i>g</i>)	Espectros Tipo	Suelos Tipo	<i>Dur</i> (<i>seg</i>)	N° Acel
0,03 <i>g</i> – 0,048 <i>g</i>	<i>NCSE</i> – 02	<i>I</i>	13	10
0,03 <i>g</i> – 0,048 <i>g</i>	<i>NCSE</i> – 02	<i>II</i>	13	10
0,03 <i>g</i> – 0,048 <i>g</i>	<i>NCSE</i> – 02	<i>III</i>	13	10
0,03 <i>g</i> – 0,048 <i>g</i>	<i>NCSE</i> – 02	<i>IV</i>	13	10
0,05 <i>g</i> – 0,07 <i>g</i>	<i>EC</i> – 8	<i>A</i>	20	13
0,05 <i>g</i> – 0,07 <i>g</i>	<i>EC</i> – 8	<i>B</i>	20	13
0,05 <i>g</i> – 0,07 <i>g</i>	<i>EC</i> – 8	<i>C</i>	20	13
0,10 <i>g</i> – 0,15 <i>g</i>	<i>NCSE</i> – 02	<i>I</i>	30	21
0,10 <i>g</i> – 0,15 <i>g</i>	<i>NCSE</i> – 02	<i>II</i>	30	21
0,10 <i>g</i> – 0,15 <i>g</i>	<i>NCSE</i> – 02	<i>III</i>	30	21
0,10 <i>g</i> – 0,15 <i>g</i>	<i>NCSE</i> – 02	<i>IV</i>	30	21
0,10 <i>g</i> – 0,15 <i>g</i>	<i>EC</i> – 8	<i>A</i>	30	21
0,10 <i>g</i> – 0,15 <i>g</i>	<i>EC</i> – 8	<i>B</i>	30	21
0,10 <i>g</i> – 0,15 <i>g</i>	<i>EC</i> – 8	<i>C</i>	30	21
0,136 <i>g</i>	<i>ICC</i> – <i>Determinista</i>	<i>zonaI</i>	20	2
0,141 <i>g</i>	<i>ICC</i> – <i>Determinista</i>	<i>zonaII</i>	20	2
0,122 <i>g</i>	<i>ICC</i> – <i>Determinista</i>	<i>zonaIII</i>	20	2
0,072 <i>g</i>	<i>ICC</i> – <i>Determinista</i>	<i>zonaR</i>	20	2
0,188 <i>g</i>	<i>ICC</i> – <i>Probabilista</i>	<i>zonaI</i>	20	2
0,194 <i>g</i>	<i>ICC</i> – <i>Probabilista</i>	<i>zonaII</i>	20	2
0,169 <i>g</i>	<i>ICC</i> – <i>Probabilista</i>	<i>zonaIII</i>	20	2
0,100 <i>g</i>	<i>ICC</i> – <i>Probabilista</i>	<i>zonaR</i>	20	2

Los acelerogramas artificiales aquí generados cubren diferentes rangos de aceleración máxima y de contenido frecuencial, que son necesarios para analizar la respuesta no lineal de edificios.

Estos acelerogramas artificiales podrán ser utilizados por otros investigadores para llevar a cabo un estudio amplio y detallado de edificios, mediante un análisis dinámico no lineal.

3.7. Resumen

En este capítulo se presentaron las técnicas más utilizadas para definir la acción sísmica, como son los espectros de respuesta y los acelerogramas.

Debido a las incertidumbres existentes al considerar la acción sísmica, en un estudio sobre la evaluación del riesgo sísmico, es necesario incluir la demanda sísmica.

Para la generación de acelerogramas artificiales se definieron los principales métodos existentes, los sismológicos y los estocásticos.

Si se van a llevar a cabo estudios de riesgo sísmico por medio de análisis dinámico no lineal, es necesario disponer de un grupo de acelerogramas que cubran un rango de aceleraciones, para así, poder determinar de la manera más exacta la respuesta estructural.

En este capítulo, se presentó de forma detallada, el procedimiento empleado para generar acelerogramas artificiales. Estos acelerogramas se generaron para diferentes intensidades sísmicas y para diferentes tipos de suelo, para poder someter las estructuras a diversos movimientos sísmicos.

Los acelerogramas aquí generados, para la ciudad de Barcelona, se construyeron teniendo en cuenta los diferentes espectros de respuesta, un rango de aceleraciones pico, diferentes tipos de suelos, la duración de la señal y la variación de la envolvente trapezoidal.

Los espectros de respuesta definidos en este capítulo serán usados para evaluar la respuesta máxima de las estructuras mediante un análisis estático no lineal y los acelerogramas generados, a partir de estos espectros, se usarán para evaluar el comportamiento estructural por medio de un análisis de historias en el tiempo.