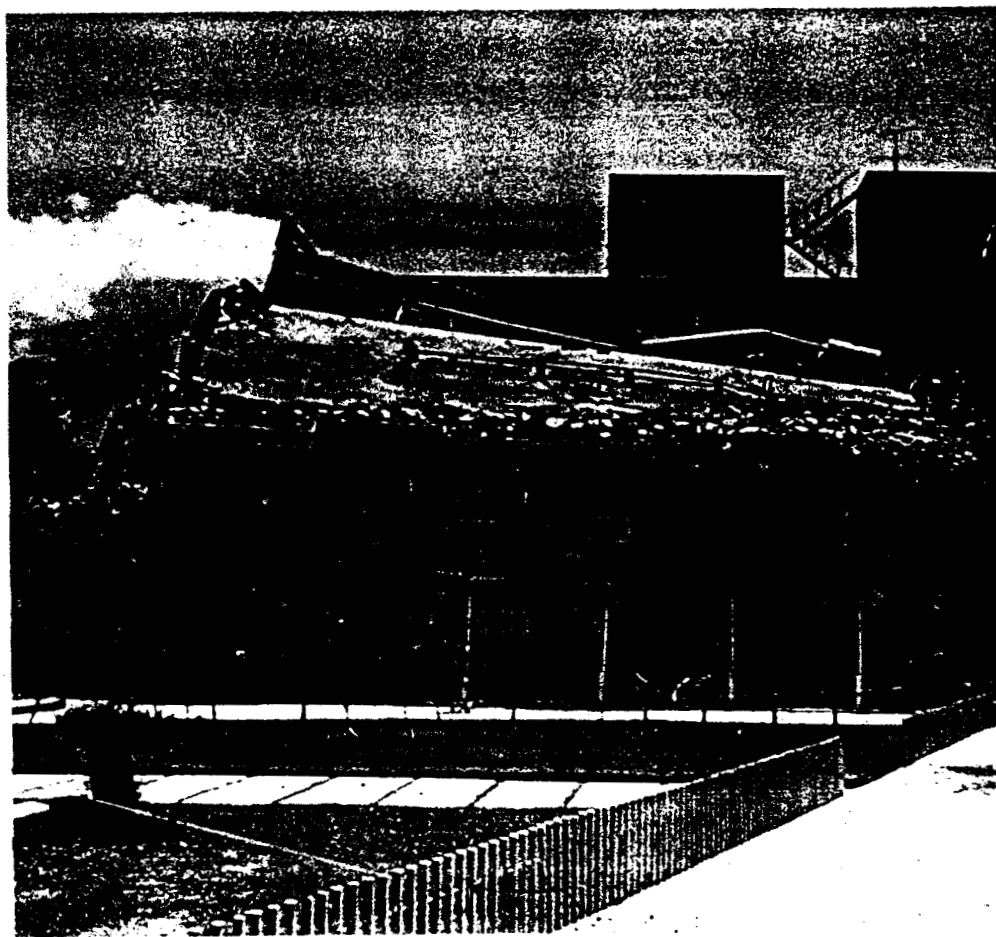




Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

**ELABORACION DE DIRECTRICES DE RIESGOS  
GEOLOGICOS PARA PROTECCION CIVIL**

**Ingeniería GeoAmbiental**



**EVALUACION DEL RIESGO SISMICO**

01051

**EVALUACION  
DEL  
RIESGO SISMICO**

**AÑO 1.989**

Este trabajo ha sido realizado por la Dirección de Aguas Subterráneas y Geología Ambiental del Instituto Tecnológico y GeoMínero de España en régimen de contratación con la Empresa EQUIPO DE ASISTENCIA TÉCNICA, S.A., con la participación del siguiente personal técnico:

POR EL ITGE: D. Francisco Javier Ayala Carcedo  
Ingeniero de Minas - Director del Estudio

POR E.A.T., S.A.: D. José M<sup>a</sup> Rodríguez Ortiz  
Dr. Ingeniero de Caminos  
  
D. Pablo de la Fuente Martín  
Dr. Ingeniero de Caminos  
  
D. Carlos Prieto Alcolea  
Licenciado en Ciencias Geológicas  
  
D. José Luis Lamas Romero  
Ingeniero de Caminos

ELABORACION DE DIRECTRICES DE RIESGOS GEOLOGICOS  
PARA PROTECCION CIVIL

MEMORIA

RIESGO SISMICO

ANEXO

EVALUACION DEL RIESGOS SISMICO

MEMORIA

RIESGO SISMICO

## RIESGO SISMICO

### INDICE

<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>1.</b>
<b>2. CONCEPTOS BASICOS DE SISMOLOGIA</b>	<b>3.</b>
2.1. Introducción	3.
2.2. Terremotos. Causas. Clasificación	3.
2.3. Ondas sísmicas	8.
2.4. Registros de terremotos	10.
2.5. Tamaño de los terremotos	14.
2.5.1. Escalas de intensidad	14.
2.5.2. Magnitud	15.
2.5.3. Atenuación	16.
2.6. Efectos de un terremoto	17.
<b>3. SISMICIDAD EN ESPAÑA</b>	<b>21.</b>
3.1. Sismicidad en la región Azores-Mediterráneo	21.
3.2. Sismicidad histórica	24.
3.3. Sismos ocurridos en el siglo XX	25.
3.4. Normas sísmicas	26.
<b>4. RIESGO SISMICO</b>	<b>28.</b>
4.1. Conceptos	28.
4.2. Definición de la sismicidad	28.
4.3. Agitación del terreno	31.
4.4. Vulnerabilidad de las condiciones	33.
<b>5. PROPUESTA DE VALORACION DEL RIESGO SISMICO</b>	<b>40.</b>
5.1. Introducción	40.

5.2. Factores que intervienen en el riesgo	40.
5.2.1. Sismicidad de la región	42.
5.2.2. Naturaleza del terreno	44.
5.2.3. Vulnerabilidad de la edificación	48.
5.2.4. Daños a las personas	50.
5.2.5. Evacuación de la población	51.
5.2.6. Impactos sociales y repercusiones	53.
5.3. Evaluación del riesgo sísmico	54.
5.3.1. Riesgo sísmico de un edificio	54.
5.3.2. Riesgo sísmico de un barrio o zona	56.
5.3.3. Riesgo sísmico de una población o localidad	57.
6. MEDIDAS DE ACTUACION	
6.1. Medidas de protección de la unidad familiar, en centros de trabajo y escuelas	59.
6.2. Medidas que competen a las autoridades	64.
7. REFERENCIAS	66.

## 1. INTRODUCCION

Los terremotos son catástrofes de origen natural asociadas a la geodinámica interna. Sus consecuencias, destrucción de poblaciones y pérdidas de vidas humanas, son por todos conocidas, pero con frecuencia olvidadas, a pesar de que el impacto es cada vez mayor debido al crecimiento de las ciudades y al desarrollo industrial.

España está situada en una zona de actividad sísmica moderada, pero su situación, en el límite de la placa euroasiática, y ciertas condiciones sismotectónicas, hacen suponer que en un futuro se repetirán terremotos destructivos como los ocurridos en el pasado, el último de los cuales tuvo lugar entre Málaga y Granada en 1984, afectando a varias poblaciones.

El estudio de los terremotos más importantes, ocurridos en diversas partes del mundo, ha permitido adquirir un mejor conocimiento de sus mecanismos y acumular una valiosa experiencia, todo lo cual ha cristalizado en estudios muy completos para valorar el riesgo sísmico, publicación de Normas Sismorresistentes, divulgación de medidas de prevención y autoprotección, etc., que han demostrado su validez para reducir las consecuencias catastróficas de un sismo.

Aunque en España existe una Norma Sismorresistente (P.D.S.-1, 1974), cuyos antecedentes son la Norma P.G.S.-1, 1968 y la Norma M.V.-101, 1962 del Ministerio de la Vivienda, son aún escasos los estudios sobre valoración del riesgo sísmico, medidas preventivas, impacto económico y social, etc. No obstante, algunos de estos estudios son de gran validez, como los promovidos por el I.T.G.E. (Impacto Económico y Social de los Riesgos Geológicos en España, 1987; Mapa Sismotectónico de España, hoja piloto de Granada, 1983; etc.), los realizados por el I.G.N. (Catálogo General de Isosistas de la Península Ibérica, 1982; Catálogo Sísmico, 1983; etc.) o los realizados por diversos autores



(Esteva, L.; Mezena, J.; García Yagüe, A; González de Vallejo, L.; Martín Martín, A.J.; Soriano, A.; López Arroyo, A.; Munuera, J.M.; Udías, A.; Samartín, A.; etc.).

En el presente estudio, después de repasar los conceptos más importantes en relación con la sismología y exponer una rápida visión de la sismicidad en España, se hace un análisis del riesgo sísmico, comentando su significado y procedimientos de valoración. A continuación se propone un método sencillo de valoración del riesgo, comentando los factores que se hacen intervenir en su formulación. Finalmente se recogen una serie de medidas y directrices de Protección Civil ampliamente difundidas en países y regiones con una actividad sísmica importante.

## 2. CONCEPTOS BASICOS DE SISMOLOGIA

### 2.1. Introducción

En este capítulo vamos a tratar algunas cuestiones generales en relación con la sismicidad, lo cual nos facilitará la lectura y comprensión de los siguientes capítulos de esta Memoria, sobre todo en el análisis de riesgo sísmico.

Comentaremos brevemente acerca de lo que entendemos por terremotos, causas que los originan, como se transmiten, criterios disponibles para valorar su "tamaño" (magnitud e intensidad), efectos que producen, como afectan a las obras públicas y a la edificación, etc.

No se trata de abordar en profundidad estos temas hasta agotarlos, lo cual rebasaría ampliamente los límites de este estudio, sino de fijar unas ideas sobre el estado actual de conocimientos en relación con esas cuestiones planteadas.

### 2.2. Terremotos. Causas. Clasificación

Actualmente entendemos por terremoto, seísmo o sismo la vibración o sacudida experimentada por el terreno, en una determinada superficie, producida por el paso de ondas sísmicas, cuyo origen se encuentra en algún punto de la corteza terrestre.

Históricamente, el origen de los terremotos ha sido atribuido a muchas y variadas causas. Los pueblos griego y romano cifraban el origen de los terremotos en la cólera de algunos dioses de su mitología. Sin embargo, desde

varios siglos antes de J.C., se trató de encontrar una explicación científica al origen de los terremotos, independientemente de las leyendas y creencias religiosas.

Anaxímenes encontró una explicación en el hundimiento de las cavernas producidas por el mar. Aristóteles, cuyas ideas sobre éste y otros muchos temas tuvieron gran influencia hasta el Renacimiento, atribuía los terremotos a desplazamientos de la corteza terrestre, originados por la "lucha" entre el aire contenido en cuevas y poros de la tierra, tratando de salir, y el agua impidiéndolo. A Thales de Mileto se le atribuye la idea ("Aspectos de la Naturaleza de Séneca") de que la tierra flotaba sobre un mar y que cuando éste se agitaba producía los terremotos con surgimiento de manantiales. Durante el Renacimiento, por ejemplo en Descartes, se insiste sobre la idea de que el origen de los terremotos hay que encontrarlo en el hundimiento de grandes cavidades existentes en el interior de la tierra. En todas estas teorías científicas y en otras más está presente la idea de vibración, cuyo origen es diferente en cada explicación.

Desde la segunda mitad del siglo pasado se han desarrollado diversas teorías acerca de la causa de los terremotos, parte de las cuales explicaban fenómenos aislados. Así, Humboldt (1769-1859) estudió la relación de los terremotos con los volcanes. Suess, en su obra "La faz de la Tierra" (1873), aportó nuevas ideas sobre los movimientos orogénicos en la corteza terrestre. Wegener desarrolló, a principios de siglo, la teoría sobre la deriva de continentes.

Simultáneamente, y desde 1850, se ha dispuesto de medidas geodésicas, cada vez más precisas, en zonas sísmicas, lo que ha permitido un estudio y seguimiento de los movimientos ocurridos en dichas zonas.

En los últimos veinticinco años, a partir de la teoría que comenzó a desarrollarse en la década de los sesenta, conocida como Tectónica de Placas, se ha encontrado una explicación satisfactoria de la causa de los terremotos. Esta teoría parte de la idea de que la corteza terrestre está constituida por

varios bloques (placas), con un espesor medio de 80-100 Km, que se mueven deslizando sobre la astenosfera, de naturaleza más viscosa. Estas placas sufren continuos cambios, medidos a escala geológica. De forma muy esquemática, los límites entre placas se pueden clasificar en tres grupos. Existen zonas de extensión, correspondientes a las denominadas dorsales centro-oceánicas, en las cuales fluye la lava, que pasa a constituir un nuevo fondo oceánico. En otras zonas limítrofes, llamadas zonas de subducción y que coinciden con las fosas oceánicas, una de las placas se sumerge por debajo de la adyacente. Finalmente, en otros límites entre placas se produce una colisión entre éstas (Figura 2.1.).

En todos los bordes de placas ha existido y existe una gran actividad sísmica, explicable por la concentración de esfuerzos (esfuerzos tectónicos) y acumulación de energía elástica, la cual se libera durante el movimiento relativo entre placas, con la consiguiente producción de terremotos.

A lo largo de las dorsales oceánicas, además de la creación de placa a ambos lados de la dorsal, se producen periódicamente deslizamientos horizontales de las placas que se va transformando por la aportación de la lava que fluye a lo largo de la dorsal. Es la razón por la que se llaman fallas transformantes a dichos deslizamientos, los cuales, junto con la formación de nuevo fondo oceánico son los causantes de los terremotos que se producen en la dorsal Centro-Atlántica y en los límites de la placa Antártica, al sur de los océanos Atlántico, Pacífico e Indico.

En las zonas de colisión entre placas, la actividad sísmica, es continua, habiéndose producido cadenas montañosas, como la alpina del Mediterráneo y el Himalaya.

En las zonas donde una placa se sumerge por debajo de otra, las cuales están asociadas a las mayores depresiones oceánicas, se producen tanto terremotos superficiales como de origen más profundo. Estas zonas se sitúan en la costa del Pacífico de América Central y del Sur, y a lo largo de una línea que parte del Sur de Alaska y que continúa por las islas Aleutianas, península de Kamchatka y costa oeste de Japón, bifurcándose después en otras dos,

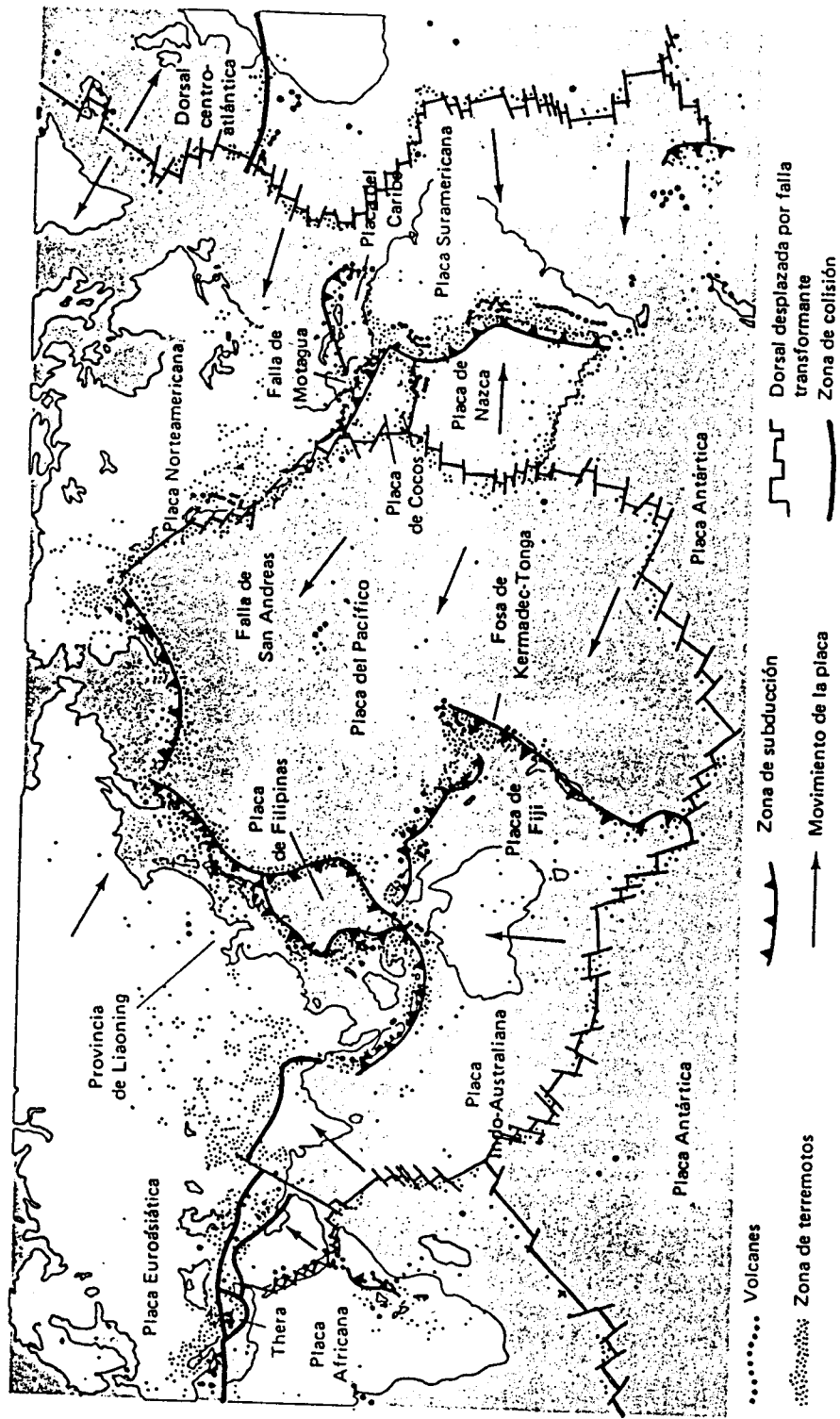


Fig. 2.1. - Mapa del mundo que muestra la relación entre las placas tectónicas más importantes y los terremotos y volcanes recientes. Los epicentros de terremotos están representados por círculos pequeños y los volcanes por círculos grandes (Tomada de B.A. Bolt. Terremotos)

una de las cuales se sitúa al oeste de las islas Filipinas y sur de Indonesia, y la otra recorre las islas Marianas, las islas Salomón, Fidji, terminando al norte de Nueva Zelanda. Otra zona de subsidencia se sitúa al norte de la República Dominicana y de Puerto Rico.

Los movimientos tanto horizontales como verticales, ocurridos en la corteza terrestre, han necesitado millones de años hasta llegar a la actual orografía. Sin embargo, muchos movimientos son apreciables en el corto espacio de una decenas de años gracias a los métodos geodésicos actualmente disponibles.

Medidas de este tipo han sido realizadas desde 1850 en California, lo que permitió conocer movimientos paralelos a la falla de San Andrés antes y después del terremoto de San Francisco de 1906. Este ha sido una de los terremotos más estudiados, lo que dió lugar a una de las primeras Normas Sísmicas de este siglo. A raíz de este terremoto Reid (1910) elaboró la teoría del "rebote elástico", como causa inmediata de los terremotos, al liberarse bruscamente, la energía elástica acumulada en las formaciones existentes a ambos lados de una falla, como consecuencia de que las rocas no pueden deformarse indefinidamente, por lo que, finalmente, se fracturarán, produciéndose un "rebote" o "movimiento hacia atrás" a ambos lados de la fractura.

Hasta ahora nos hemos referido a los terremotos que tienen un origen tectónico, siendo éstos los más frecuentes. Sin embargo, también se producen terremotos durante las erupciones volcánicas, las cuales, por otra parte, tienen lugar, preferentemente, en las mismas zonas que los terremotos de origen tectónico. Otros terremotos son provocados por el hundimiento de cavernas, fundamentalmente en zonas kársticas, o bien por el deslizamiento o corrimiento de grandes masas de terreno. Finalmente, la actividad humana también provoca temblores en el terreno, asociados a voladuras, explosiones nucleares, etc.

En el resto de la exposición nos vamos a referir a los terremotos que tienen un origen tectónico, por ser los más comunes y los que entrañan un mayor riesgo.

Los terremotos de origen tectónico se pueden, a su vez, clasificar en función de la profundidad del foco o hipocentro, zona donde se produce la rotura o el movimiento relativo entre placas. Se denomina epicentro al punto de la superficie terrestre sobre el que se proyecta radialmente el foco.

Los terremotos con foco situado a más de 300 Km de profundidad se denominan de foco profundo, de foco intermedio aquéllos cuyo foco se encuentre entre 70 y 300 Km y superficiales aquéllos cuyo foco se encuentre a menor profundidad (en muchos casos a 5-10 Km).

La mayor parte de la energía liberada en los terremotos corresponde a zonas de subducción, habiéndose comprobado que en estas zonas existe una cierta alineación de los focos, desde los más superficiales a los más profundos, definiendo una zona sísmica con un buzamiento del orden de  $45^\circ$ , conocida como zona de Benioff, siendo los terremotos de foco superficial los que causan mayores daños.

### 2.3. Ondas Sísmicas

Una vez producido el movimiento relativo entre placas o bien la rotura de rocas en una zona del interior de la corteza terrestre -zona que puede ser muy amplia, ya que el movimiento o rotura puede ocurrir a lo largo de decenas de kilómetros-, que hemos denominado foco del seísmo, dicha perturbación se propaga a través del terreno mediante las ondas sísmicas, las cuales originan la vibración de aquél.

En el interior del terreno son dos los tipos de onda que se propagan: las ondas longitudinales y las ondas transversales. Ambas se propagan en direcciones radiales a partir del foco. Las ondas longitudinales, también llamadas ondas P producen, alternativamente, una compresión y dilatación del terreno en cada una de las direcciones de propagación. Las ondas transversales, conocidas como ondas S, provocan deformaciones transversales del terreno, perpendiculares a la dirección de propagación.

La velocidad con la que estas ondas se propagan depende de las propiedades elásticas en cada punto.

Para las ondas longitudinales (P) esta velocidad es:

$$v_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

y para las ondas transversales (S):

$$v_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

donde, E es el módulo de elasticidad dinámico,  $\nu$  el coeficiente de Poisson y  $\rho$  la densidad del punto considerado.

Para los valores de  $\nu$ , situados en torno a 0,25, la relación  $v_P/v_S \sim \sqrt{3}$ , por lo que la velocidad de las ondas P es superior a la de las ondas S.

Una característica de las ondas longitudinales es provocar variaciones volumétricas en el medio a través del cual se propagan, que puede ser sólido, líquido o gaseoso. Sin embargo, las ondas transversales sólo se transmiten a través de sólidos, ejerciendo una acción de cizalla que afecta a la forma del elemento de volumen considerado, pero no a su volumen.

Debido a la falta de homogeneidad e isotropía de la corteza terrestre, así como a la existencia de discontinuidades, las ondas P y S sufren reflexiones y refracciones, lo que complica en gran medida la interpretación de registros.

Cuando estas ondas lleguen a la superficie de la Tierra, se generan otras ondas que se propagan superficialmente, disminuyendo sensiblemente su efecto con la profundidad. Son las ondas conocidas como Love (L) y Rayleigh (R).



Las ondas Rayleigh provocan una oscilación elíptica de los puntos contenidos con un plano normal a la superficie que contiene a la dirección de propagación. Su efecto sobre un determinado elemento de volúmen es una compresión, dilatación y cizalla.

Las ondas Love producen una deformación transversal en el elemento de volúmen considerado, perpendicular a la dirección de propagación y contenida en el plano tangente a la superficie.

La velocidad de propagación de las ondas Rayleigh es del orden de 0,9 veces la velocidad de las ondas S y la velocidad de propagación de las ondas Love es análoga a la de las ondas Rayleigh.

Debido a su naturaleza son las ondas transversales y las ondas Love las responsables de los mayores daños en las estructuras.

En la Figura 2.2. puede verse el esquema de propagación de los distintos tipos de ondas sísmicas y en la Figura 2.3. un gráfico simplificado de las reflexiones y refracciones que sufren las ondas.

#### 2.4. Registros de terremotos

Los primeros instrumentos que permitían obtener alguna información acerca del movimiento del terreno en un determinado punto se denominaron seismoscopios. El más antiguo del que tenemos información, data del segundo siglo de nuestra era y fue inventado en China; sobre una superficie esférica estaban dispuestas varias cabezas de dragón, que mantenían una bola sobre la boca; una sacudida del terreno hacía caer la bola sobre la boca de una rana dispuesta debajo de cada dragón, lo cual permitía señalar la dirección de donde procedía el temblor. Sobre esta idea se construyeron posteriormente otros aparatos.

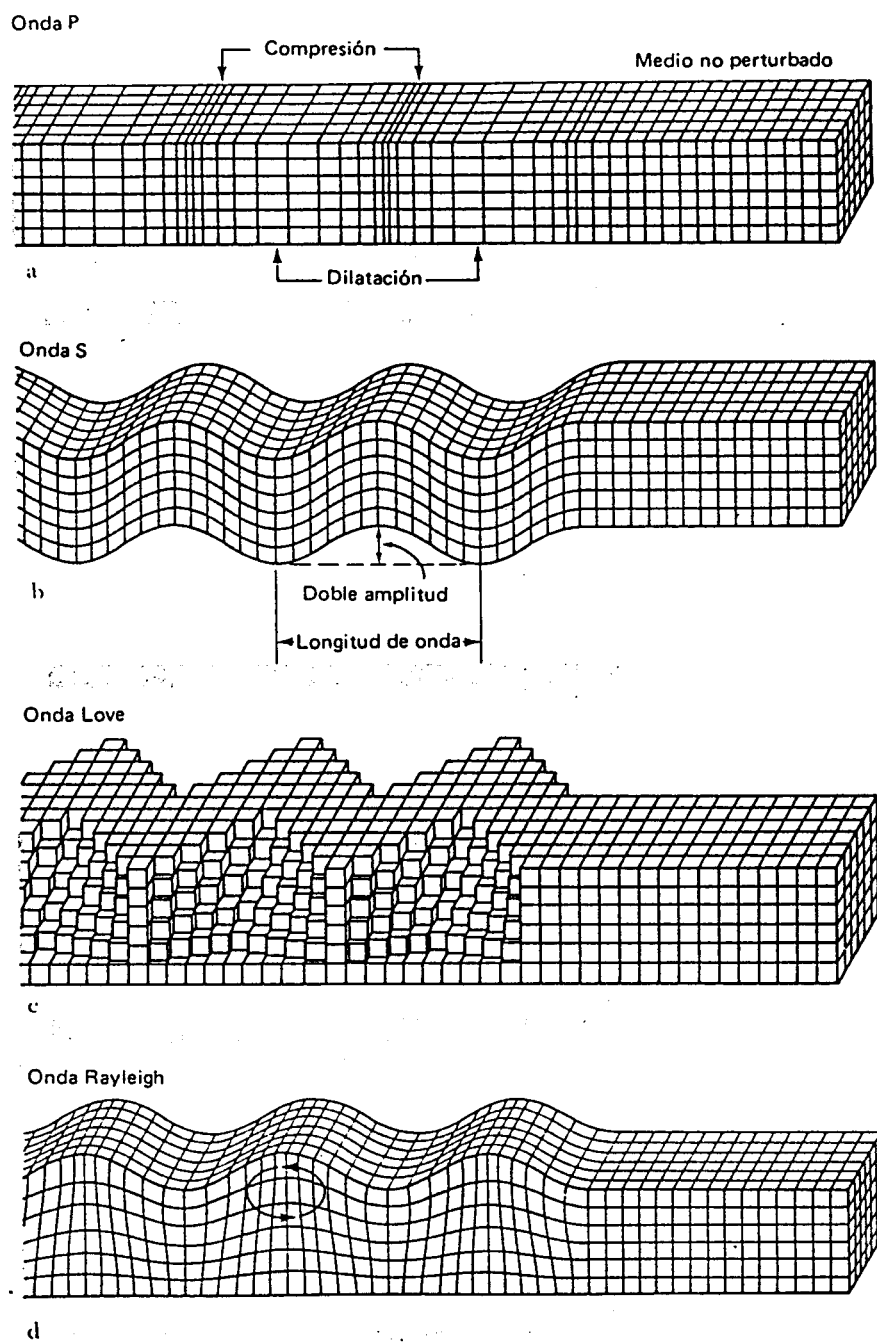


Fig. 2.2.- Esquema de propagación de los cuatro tipos de ondas sísmicas. (De Bruce A. Bolt, Nuclear Explosions and Earthquakes. W.H. Freeman and Company, 1976).

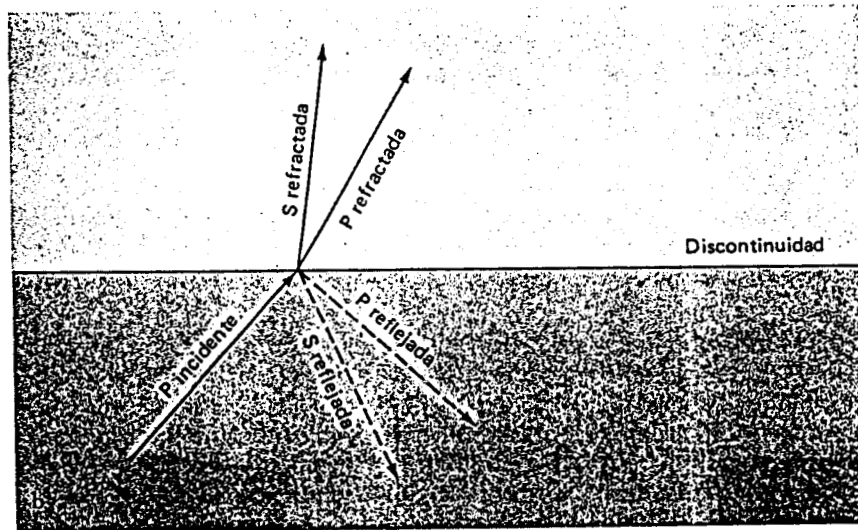
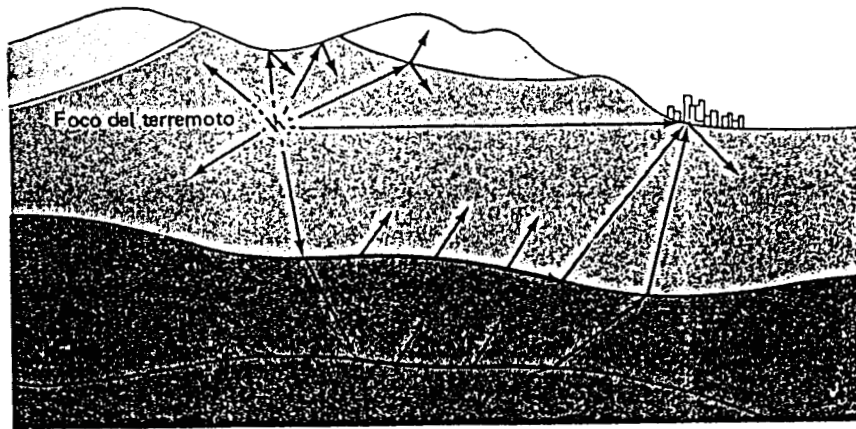


Fig. 2.3.- (a) Gráfico simplificado de las trayectorias de ondas sísmicas P y S reflejadas y refractadas en estructuras rocosas de la corteza de la Tierra. (b) Reflexión y refracción de una onda longitudinal (P) en un terremoto al alcanzar la superficie de discontinuidad entre los dos tipos de rocas. (Tomado de B.A. Bolt. Terremotos, 1981).

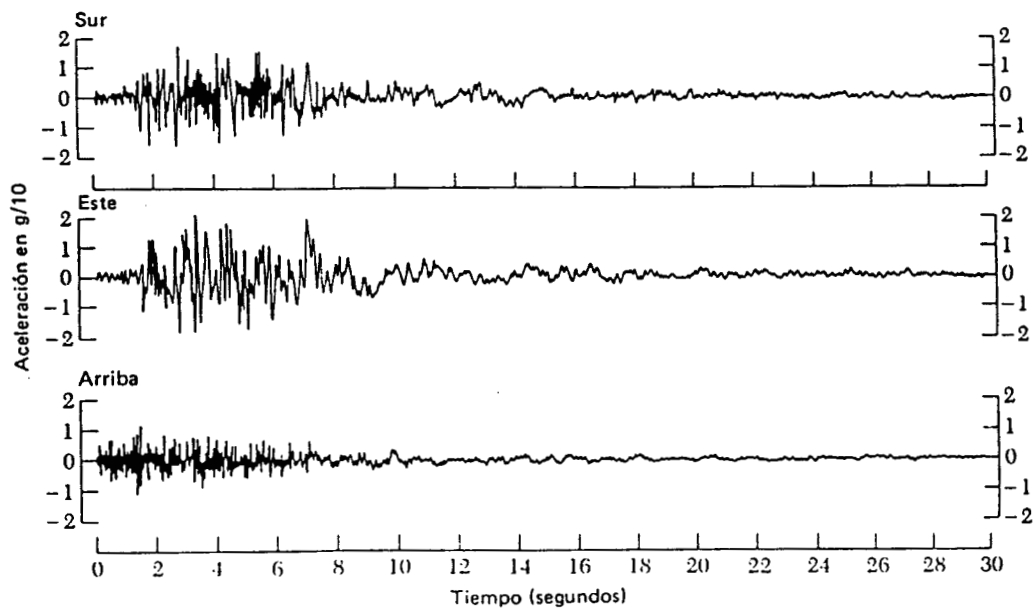


Fig. 2.4.- Tres componentes de la aceleración registrada en el aparcamiento exterior del edificio comercial de Hollywood a unos 20 Kilómetros de distancia de la falla en el terremoto de San Fernando de 1971. (Tomado de B.A. Bolt. Terremotos, 1981).

Sin embargo, es importante conocer las características del movimiento de un punto del terreno, cuando este movimiento es causado por un terremoto. El conocimiento de estas características, trayectoria, velocidad y aceleración, tienen especial importancia en el diseño de estructuras frente a los efectos sísmicos. Tales características del movimiento se obtienen, actualmente, mediante los sismógrafos, cuyos registros se llaman sismogramas. Tanto los instrumentos de registro como los propios registros se han ido perfeccionando desde finales del siglo pasado.

La trayectoria de un punto del terreno queda determinada por la proyección de dicha trayectoria sobre dos planos ortogonales. Si estos planos se desplazan a una velocidad conocida quedarán completamente determinadas las características cinemáticas del movimiento del punto, es decir, conoceremos, no sólo la trayectoria, sino su velocidad y aceleración. En la Figura 2.4. se muestran ejemplos de acelerogramas.

Para determinar estos datos sería preciso disponer de un punto fijo respecto del terreno cuando éste está sometido a una vibración, lo cual es difícil de conseguir. Sin embargo, un péndulo de gran longitud, con una masa suficientemente grande y con una aguja en su extremo que marcarse sobre un plano horizontal que, unido a la superficie que vibra, se desplazase a velocidad conocida, reproduciría con bastante aproximación las condiciones que buscamos. Este es el fundamento de los sismógrafos. A partir de esta idea del péndulo es posible obtener, también, la proyección del movimiento sobre un plano vertical.

Los sismogramas se obtienen sobre cilindros que giran a una determinada velocidad sobre su eje. En el plano horizontal, el movimiento se registra, normalmente, en dos direcciones perpendiculares, permitiendo que el péndulo se mueva sólo en la dirección del eje del cilindro. De esta forma, el movimiento de un punto del terreno está definido por sus proyecciones (dos en horizontal y una en vertical) según tres ejes coordenados. En los equipos modernos el registro es fotográfico o bien en cinta magnética, amplificando electrónicamente la señal eléctrica que se produce en el movimiento relativo entre cilindro y

péndulo.

Los sismógrafos de registro continuo instalados en los observatorios sismológicos suelen presentar problemas durante los temblores fuertes del terreno, ya que es difícil conseguir equipos capaces de registrar amplitudes de onda de cualquier tamaño. Por este motivo se instalan, también, sismógrafos que sólo se ponen en funcionamiento cuando la amplitud de onda sobrepasa un determinado umbral; el más común de estos equipos es el acelerómetro, el cual registra directamente la aceleración del terreno.

Es muy importante disponer de una amplia red de estaciones sismológicas con equipos precisos, ya que de la interpretación de los sismogramas se comprenden cada vez mejor los mecanismos de transmisión de las vibraciones en el terreno (definición de ondas P, S y superficiales, amplitudes y frecuencias de las mismas, etc.), siendo posible la localización de focos y epicentros en base a la definición de tipos de ondas y tiempos de llegada, todo lo cual permite acotar y definir áreas con mayor riesgo sísmico. Los sismogramas facilitan también información sobre la variación que experimentan las ondas, principalmente la velocidad, en las etapas precursoras a terremotos de cierta importancia, siendo este uno de los campos de trabajo, junto a otros indicios físicos (cambios en medidas geodésicas, variación de la resistividad de las rocas, emisión de radón, etc.), para la predicción sísmica.

## 2.5. Tamaño de los terremotos

### **2.5.1. Escalas de intensidad**

Desde el siglo pasado han sido muchas las escalas propuestas por los científicos que han trabajado en el campo de la sismología, con objeto de proporcionar una medida de la destructividad de un terremoto en un punto de la superficie terrestre. Tales escalas, denominadas de intensidad, están basadas en los daños producidos por un sismo en las edificaciones, efectos sentidos por el hombre, reacciones de los animales, etc.

Las primeras escalas fueron elaboradas por Egen (1928), Mallet (1858), Rossi Forel (1880), etc., cada una de las cuales consta de varios grados de intensidad. Una de las más utilizadas fue propuesta por Mercalli (1883), con 11 grados. A partir de esta última, Cancani (1903), construyó una escala con 12 grados, asignando una aceleración a cada grado. H.O. Wood y Frank Neumann (1931), propusieron la Escala de Intensidad Mercalli Modificada, adoptada por muchos países durante bastante tiempo. A partir de 1964, la Reunión Intergubernamental sobre Ingeniería Sísmica recomendó la utilización de la escala de 12 grados propuesta por S. Medvedev, W. Sponhever y V. Karnik (Escala de Intensidad Sísmica M.S.K.), basada en la Escala de Intensidad Mercalli Modificada. Esta escala ha sido adoptada por la mayor parte de los países europeos, e incluida en la Norma Sismorresistente (1974), actualmente en vigor en España.

En la determinación de la intensidad sísmica en una zona determinada de la superficie terrestre no intervienen medidas de movimiento, velocidades o aceleraciones, presentando el inconveniente de la subjetividad de las personas encuestadas en relación con un terremoto; así mismo la intensidad dependerá del tipo de construcciones predominantes en la zona o región, tecnología de dichas construcciones, etc.

A pesar de los inconvenientes señalados, las escalas de intensidades se seguirán utilizando, ya que en muchas regiones sísmicas aún no existen los adecuados equipos de medida. Por otra parte, las descripciones de los mayores terremotos ocurridos en el pasado están basadas en dichas escalas, lo que ha permitido reconstruir, en muchos casos, las líneas de igual intensidad o isosistas correspondientes a dichos terremotos.

### 2.5.2. Magnitud

En 1935, C.F. Richter propuso un método para cuantificar el "tamaño" de un terremoto, basado en los registros de las vibraciones del terreno. Definió la magnitud de un terremoto como el logaritmo decimal de la máxima amplitud de onda, en micras, registrada en un sismógrafo estándar, a una distancia de 100 Km del epicentro, en un suelo firme. Para otras condiciones del terreno y distan -

cia al epicentro existen tablas correctoras.

En el método desarrollado por Richter no se especificaba que tipo de onda (P, S o superficial) se tenía que utilizar, sólo se establecía que esta fuese la de mayor amplitud. En los centros sismológicos es habitual determinar una magnitud para la onda P y otra para las ondas superficiales; la primera nos da una idea del tamaño de un terremoto de foco profundo, en el que las ondas superficiales suelen tener menos importancia, y la segunda caracteriza mejor los terremotos superficiales. Para evitar éste y otros inconvenientes, Hanks y Kanamori propusieron, en 1979, la utilización del momento sísmico, como producto de la rigidez del terreno en las proximidades del foco por el área de la zona de falla y por la longitud de la falla.

Los mayores terremotos registrados en este siglo tienen una magnitud próxima a 9. A partir de una magnitud de 5,5 los terremotos superficiales pueden causar daños importantes.

La magnitud de un terremoto ha sido relacionada por los sismólogos con la energía liberada. La expresión más utilizada es:

$$\log_{10} E = 1,5 M + 11,8$$

Siendo E la energía liberada, en ergios, y M la magnitud.

### 2.5.3. Atenuación

El movimiento del terreno en un punto determinado depende fundamentalmente de los siguientes factores: Energía liberada y profundidad del foco, distancia al epicentro y naturaleza del terreno a través del cual se propagan las ondas sísmicas.

Una vez generado el terremoto, la intensidad sísmica, como medida de la destructividad, será distinta en cada zona alcanzada por las ondas, atenuándose con la distancia. La atenuación se suele expresar mediante la ecuación:

$$I_e - I = K_1 + K_2 \log_e (R + R_0)$$

donde,  $I_e$  es la intensidad en el epicentro,  $I$  la intensidad en el punto considerado y  $R$  la distancia al epicentro;  $K_1$ ,  $K_2$  y  $R_0$  son parámetros que se ajustan, por ejemplo mediante mínimos cuadrados, para cada zona sísmica.

También se ha relacionado la intensidad sísmica con la magnitud y la distancia epicentral. La ley de atenuación se expresa mediante una ecuación de la forma.

$$I = 1,44 M + f(R)$$

donde  $f(R)$  es una función decreciente.

## 2.6. Efectos de un terremoto

El paso de las ondas sísmicas produce una vibración, tanto horizontal como vertical del terremoto, incluso la rotura del mismo. Enumeraremos sucintamente los efectos y daños producidos por estas vibraciones. Para ello distinguiremos los siguientes efectos:

- Efectos sobre el Terreno
- Efectos sobre la Edificación
- Efectos sobre Servicios y Obras Públicas
- Impacto Económico y Social

### a) Efectos sobre el Terreno

- Deformaciones permanentes, puestas de manifiesto en la aparición de zonas elevadas y zonas deprimidas.



- Densificación de suelos, especialmente de suelos granulares flojos, dando lugar a asentamientos.
- Fenómenos de licuefacción en arenas saturadas. El suelo experimenta una pérdida de resistencia y fluye hasta alcanzar una nueva situación estable. Se produce un hundimiento, acompañado de un flujo de agua en los minutos posteriores al sismo.
- Rotura del terreno, dando lugar a la aparición de grietas.
- Desplazamientos horizontales y/o verticales a lo largo de fallas ya existentes.
- Caídas de bloques en acantilados y deslizamientos de laderas.

Evidentemente, éstos y otros efectos son causantes de daños en edificaciones, servicios y obras públicas.

#### b) Efectos sobre la Edificación

- Colapso o destrucción total de la estructura del edificio, bien sea aquella metálica, de hormigón, de madera, muros de carga de mampostería o ladrillo, etc. Supone la ruina total del edificio. Afectará fundamentalmente a estructuras construidas sin tener en cuenta alguna Norma Sismorresistente.
- Destrucción parcial del edificio, afectando a fachadas tabiques, forjados, etc. Se podría considerar su reconstrucción.
- Rotura de servicios de agua, saneamiento, gas, energía eléctrica, etc., con el peligro de que se pueda producir un incendio a causa de un cortocircuito.
- Daños ligeros en el edificio, como roturas de cristales, desplomes de tabiques ligeros, falsos techos, caída parcial de tejados, revestimientos, etc. Se produ-

cirán, incluso en terremotos de baja intensidad.

- Otros efectos a considerar, por el grave daño que puede causar a los miembros de la comunidad que habita el edificio, son la caída de objetos y muebles pesados.

c) Efectos sobre Servicios y Obras Públicas

- Roturas en los depósitos y conducciones de abastecimiento de agua, redes de saneamiento, conducciones de gas, canalizaciones telefónicas, redes de energía eléctrica, alumbrado público, etc.
- Destrucción e interrupción de vías de comunicación, carreteras, ferrocarril, puentes, etc. El efecto es especialmente importante en poblaciones que puedan quedar aisladas.
- Destrucción o daños en presas, azudes, canales, con el consiguiente efecto de inundaciones.
- Incendios causados por la rotura de postes y cables de tendidos eléctricos de alta tensión.

d) Impacto Económico y Social

- Pérdidas económicas debidas a la destrucción de enseres y propiedades.
- Disminución del valor de propiedades a causa de la interrupción o cese de ciertas actividades.
- Interrupción o cese de determinadas actividades en sectores de la población con la consiguiente pérdida de puestos de trabajo.
- Cambios de actividad.

En cualquier caso el impacto socio-económico está muy condicionado por la existencia de seguros, subvenciones y ayudas de autoridades locales y estatales, etc. Es un tema muy debatido y de preocupación para los gobiernos.

### 3. SISMICIDAD EN ESPAÑA

#### 3.1. Sismicidad en la región Azores-Mediterráneo

El sur de la Península Ibérica está situado en una región donde han ocurrido frecuentes terremotos. La mayor parte sólo han causado la alarma entre la población y daños ligeros en construcciones. Sin embargo, también se han producido terremotos realmente destructores, con una periodicidad del orden de cien años desde principios del siglo XV, siendo escasa la información de épocas anteriores a ese siglo.

En la Figura 3.1. puede verse el mapa de epicentros de la región Ibero-Magrebí, publicado por I. Mezena y J. Martínez Solares (1983) del Instituto Geográfico Nacional y en la Figura 3.2. los epicentros de terremotos ocurridos entre 1910 y 1977 en el Mediterráneo Occidental hasta las islas Azores.

Esta actividad sísmica se ha explicado recientemente por la situación de la región respecto de las placas Euroasiática y Africana. Del estudio de diversos terremotos del sur de España, Mar de Alborán y norte de Africa, y de sus mecanismos focales (Udias, 1963; etc.) se pueden deducir las direcciones predominantes de esfuerzos en la zona. Por lo que se refiere al sur peninsular, las conclusiones más importantes a las que se ha llegado son las siguientes: en la falla Azores-Gibraltar, los movimientos son de desgarre dextral hasta el meridiano 12ºW y correspondientes a fallas inversas desde esta zona hasta el Estrecho de Gibraltar, con la placa de Africa deslizándose por debajo de la Euroasiática; este movimiento también se pone de manifiesto en el Mediterráneo Occidental (Norte de Africa) hasta el arco Sicilia-Calabria. (Figura 3.3.).

Como se expone en la Memoria del Mapa Sismotectónico de España, Hoja piloto de Granada, 1983 del I.T.G.E., son escasos los datos de terremotos

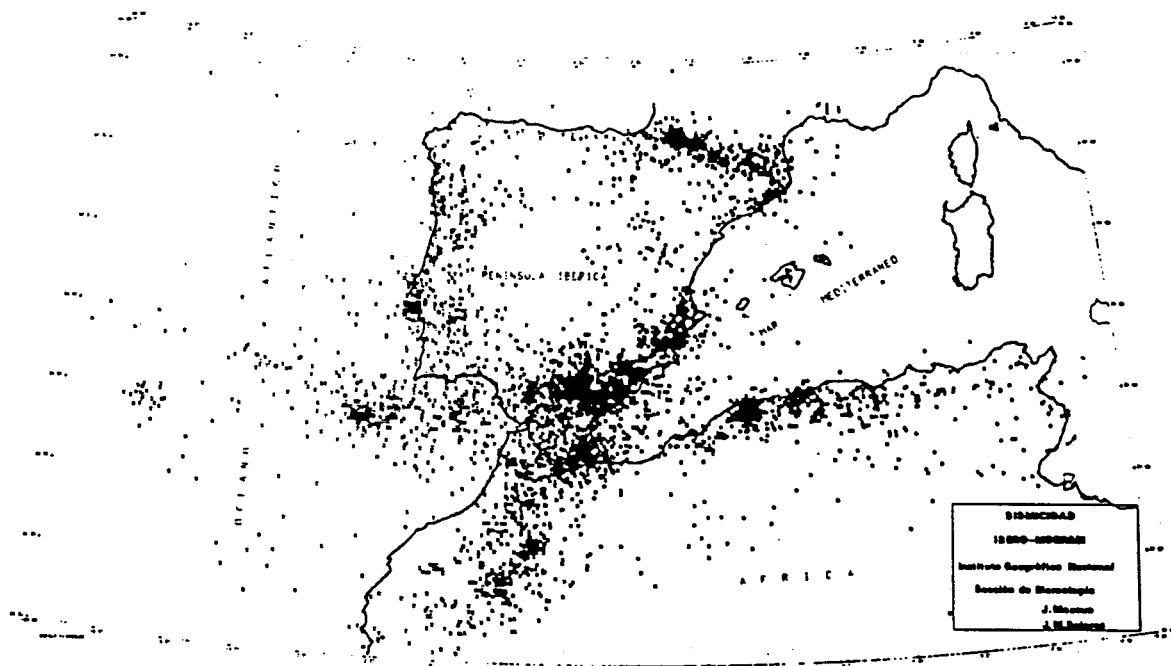


Fig. 3.1. - Mapa de epicentros de la región Ibero-Magrebí  
I.G.N. (Julio Mezcuca y J. Martínez Solares, 1983)

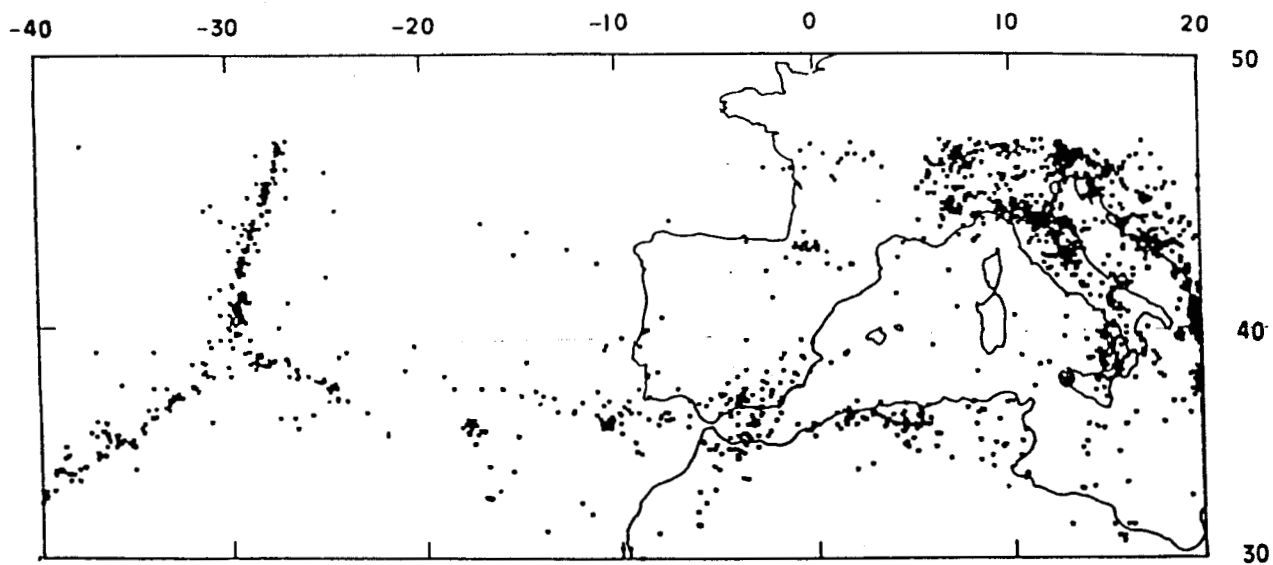


Fig. 3.2. - Terremotos en la parte occidental del Mediterráneo hasta las Islas Azores, desde 1910 a 1977. (Tomado de B.A. Bolt. Terremotos, 1981)

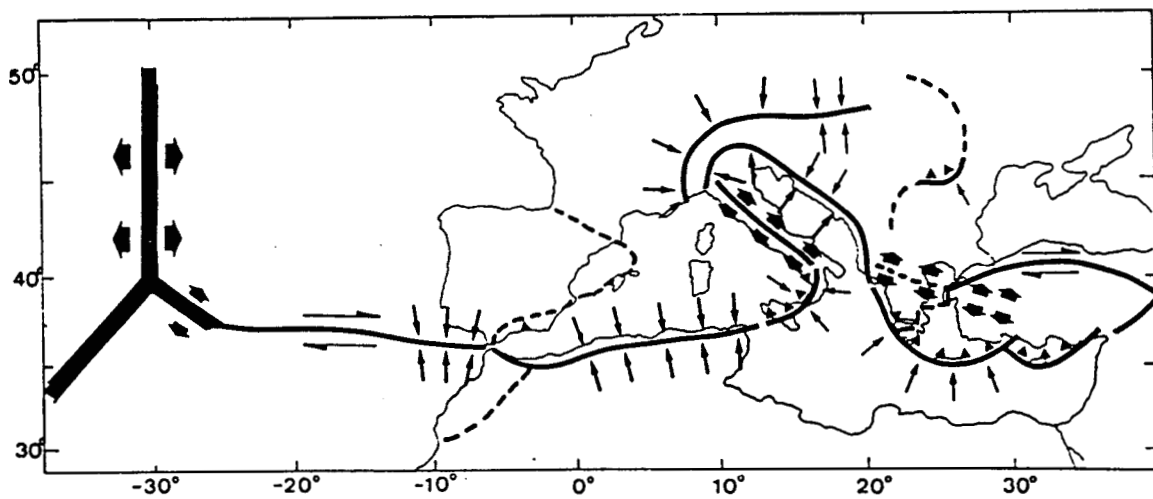


Fig. 3.3. - Esquema de la distribución de esfuerzos en la región Azores-Mediterráneo. (Tomado de Mapa Sismotectónico de España, Hoja Piloto de Granada. ITGE, 1983)

registrados en el período instrumental (desde principios de siglo), como para establecer una hipótesis concluyente de distribución de esfuerzos a escala regional. No obstante, la distribución de terremotos en el Sur y Levante, así como en los Pirineos, parece indicar que la mayor parte de la Península Ibérica se comporta como un bloque independiente de la placa Euroasiática.

### 3.2. Sismicidad histórica

En el Cuadro nº 1 se han reflejado los terremotos más importantes ocurridos en la Península Ibérica entre comienzos del siglo XV y finales del XIX. Los documentos históricos anteriores al siglo XV son escasos. Los romanos describen un terremoto que afectó a las costas de Málaga y Almería y los árabes se refieren a terremotos que produjeron daños importantes en Andalucía en los años 881 y 1080.

#### CUADRO Nº 1

##### TERREMOTOS DESTRUCTORES OCURRIDOS EN LA PENINSULA IBERICA DESDE EL SIGLO XV

---

Febrero, 1428	Destrucción de Olot, Puigcerdá, Camprodón, San Juan de las Abadesas. Importantes daños en el norte de Cataluña . 800 muertos.
Agosto, 1504	Destrucción de Carmona (Sevilla). Muchos muertos.
Octubre, 1680	Destrucción de 1000 casas en Málaga. 80 muertos
Noviembre, 1755	Destrucción de Lisboa. Daños en Portugal y España. Más de 20.000 muertos.
1804-1860-1863	Graves daños en Almería.
Marzo, 1829	Destrucción de 3000 casas en Torrevieja, Orihuela, Almoradí, Rojales y Guardamar, en Alicante. Más de 400 muertos.
Diciembre, 1884	Destrucción total de Arenas del Rey (Granada) y graves daños en Ventas de Zafarraya, Alhama, Jatar, Jayena. Cerca de 5000 casas destruidas. 800 muertos.

El terremoto de Granada de 1884, dió origen a la creación de una comisión oficial que recogió amplia información de los testigos que presenciaron y sufrieron la catástrofe y de las destrucciones que provocó. La Gaceta Oficial de 30 de Marzo de 1885 publicó el Informe de esta comisión. Posteriormente a los trabajos de esa comisión, la zona fue visitada por una comisión francesa y otra italiana. El terremoto fue ampliamente estudiado. Aunque por entonces no eran conocidos los mecanismos que originan los sismos, ya se apuntó una explicación tectónica.

A raíz de este terremoto se puso en funcionamiento el Observatorio Sismológico de San Fernando (Cádiz), creándose la Red Sismológica Nacional con los Observatorios de Alicante, Málaga, Almería, Toledo, La Cartuja (Granada), Roquetas (Tortosa) y Fabra (Barcelona). Años después la red se incrementó con los Observatorios de Logroño, Santiago de Compostela y Tenerife.

### **3.3. Sismos ocurridos en el siglo XX**

En el Cuadro nº 2 figuran los terremotos de intensidad VII y VIII (en la escala M.S.K.) ocurridos en España en lo que va de siglo. La mayor parte se han producido en Andalucía y Levante. Fuera de esta zona uno tuvo lugar en Los Pirineos y otro en Logroño.

En el Cuadro se ha incluido el de marzo de 1954, ocurrido en Granada. Se ha estimado en 7 la magnitud de este terremoto, pero debido a que el foco se situó a una profundidad del orden de 650 Km, la intensidad sólo fué de V.



## CUADRO Nº 2

TERREMOTOS DE INTENSIDAD VII-VIII -  
OCURRIDOS EN ESPAÑA EN EL SIGLO  
XX

---

Marzo, 1911 (Grado VIII)	Cotillas (Murcia)
Septiembre, 1919 (Grado VIII)	Jacarilla (Murcia)
Noviembre, 1923 (Grado VIII)	Viella (Pirineos)
Julio, 1930 (Grado VIII)	Montilla (Córdoba)
Junio, 1948 (Grado VIII)	Cehegín (Murcia)
Marzo, 1951 (Grado VIII)	Bailén (Jaén)
Mayo, 1951 (Grado VIII)	Alcaudete (Jaén)
Enero, 1954 (Grado VII-VIII)	Arenas del Rey (Granada)
Marzo, 1954 (Grado V, foco profundo)	Dúrcal (Granada)
Abril, 1956 (Grado VIII)	Albolote-Atarfe (Granada)
Septiembre, 1961 (Grado VIII)	Cervera del Río Alhama (Logroño)
Junio, 1964 (Grado VII-VIII)	Orce-Galera (Granada)

### 3.4. Normas Sísmicas

Por lo que se refiere a nuestro país, la primera disposición oficial en relación con los sismos fue dictada en marzo de 1952 por Orden del Ministerio de Hacienda, estableciendo que los daños ocasionados por un terremoto de intensidad igual o superior a VII de la Escala Mercalli Modificada, fuesen considerados como de riesgo catastrófico a efectos de seguros.

En 1962, el Ministerio de la Vivienda publicó la "Norma MV-101-1962" y el Ministerio de Obras Públicas la "Instrucción para Proyectos, Construcción y Explotación de Grandes Presas", disposiciones, ambas, que contemplan las acciones sísmicas. En ese mismo año se creó, por orden de la Presidencia de Gobierno, una Comisión Interministerial, cuyo trabajo dió lugar a la "Norma

Sismorresistente P.G.S.-1 - 1968". Dicha Comisión recibió el encargo de preparar un texto corregido de la Norma P.G.S.-1 (parte A, texto) y elaborar dos apéndices (Apéndice B, aclaratorio y Apéndice C, bibliográfico y tecnológico). Por Decreto de 30 de Agosto de 1974 se aprueba la "Norma Sismorresistente P.D.S.-1 1974, parte A(texto)", actualmente en vigor, quedando pendientes las partes B y C. En el mismo Decreto de 30 de Agosto de 1974 se constituye una Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes, adscrita al Ministerio de Planificación del Desarrollo, Dirección General del Instituto Geográfico y Catastral, formada por representantes de diversos Ministerios, con la misión de estudiar los avances que se vayan produciendo en el campo de la Ingeniería Sísmica y proponer las oportunas modificaciones de la Norma Sismorresistente. Actualmente se encuentra en fase muy avanzada la elaboración de una nueva Norma.

La Norma P.D.S.-1 - 1974, entre otras normativas relativas a cálculo, criterios de aplicación y prescripciones para la composición y construcción de las obras, establece como escala oficial de intensidades sísmicas la M.S.K. y clasifica el territorio nacional en tres zonas sísmicas teniendo en cuenta los terremotos históricos y los que se han producido en la época instrumental, así como los planos de isosistas de terremotos importantes y las características geológicas y tectónicas del territorio nacional.

## 4. RIESGO SISMICO

### 4.1. Conceptos

La expresión de riesgo sísmico es utilizada en muchas ocasiones para referirnos a diferentes conceptos. Siguiendo a López Arroyo y Espinosa, 1977 y a J. Martín, 1983, distinguiremos entre:

- a) Riesgo sísmico como expresión de la sismicidad.
- b) Riesgo sísmico como expresión de la agitabilidad del terreno.
- c) Riesgo sísmico, en sentido estricto, como medida del daño que un terremoto puede causar a los edificios, obras públicas, etc.

El conocimiento de la sismicidad de una zona o región, de como se transmiten las ondas sísmicas y de como responden unas determinadas estructuras a las vibraciones originadas por los sismos ocurridos en esa región, nos permitirá intentar valorar de alguna manera cual es el riesgo sísmico, en su sentido más amplio, de un edificio, de un conjunto de edificaciones, de una población o de una región.

En los siguientes apartados se desarrollan las ideas fundamentales que encierran estos conceptos.

### 4.2. Definición de la sismicidad

El conocimiento de la sismicidad de una región es el punto de partida para cualquier tipo de análisis o valoración de riesgo sísmico.

Dicho conocimiento supone disponer del mayor número posible de datos correspondientes a los terremotos ocurridos en la región. Los más característicos son los siguientes:

- Localización de epicentros y focos, con las fechas en que se han producido los terremotos.
- Magnitud
- Momento sísmico
- Esfuerzo medio
- Geometría de la falla origen del terremoto (longitud, anchura, orientación, dirección).

Estos datos se obtienen de los catálogos sísmicos, como el Catálogo Oficial de Sismos Españoles (Galvis, 1932 y 1940), completado por Munuera (1964), o el Catálogo Nacional de Isosistas de la Península Ibérica, publicado por el Instituto Geográfico Nacional en 1982. La información más completa, relativa a nuestro país, queda recogida en el Catálogo Sísmico del Instituto Geográfico Nacional, para lo cual se han revisado y efectuado las oportunas correcciones de los datos existentes.

A pesar de las revisiones efectuadas acerca de los terremotos anteriores a la época instrumental, la cual comienza a principios de siglo, la información disponible de dichos terremotos no tiene la misma precisión, ni recoge tantos datos como la correspondiente al período instrumental.

La localización de epicentros de terremotos no registrados instrumentalmente, tienen poca precisión al estar sólo basada en los datos recogidos en las poblaciones afectadas, lo cual dependerá, en gran medida, de la densidad de núcleos urbanos de la región, densidad de población, calidad y cantidad de las construcciones, etc. Incluso la precisión de los sismos registrados en la primera mitad de este siglo no es la misma que en las tres últimas décadas, en las que ha mejorado notablemente la calidad de los equipos, y por consiguiente de los registros, y aumentado el número de Observatorios Sismológicos.

Así mismo, la localización de los focos correspondientes a sismos históricos es prácticamente imposible de determinar, y lo mismo ocurre con

algunos sismos de la primera época instrumental, lo cual condiciona el estudio de los mecanismos de los terremotos.

Todos estos datos recogidos en catálogos también se pueden plasmar en mapas, por ejemplo en un mapa de epicentros de terremotos ocurridos en los últimos 500 años en un área determinada.

Veamos sucintamente como se trabaja con estos datos para abordar un problema concreto de valoración del riesgo sísmico como expresión de la sismicidad.

Los terremotos son fenómenos naturales que pueden ser clasificados y tratados bajo un punto de vista determinista o probabilista. Si consideramos que el proceso es determinista, estamos admitiendo que la ocurrencia de futuros terremotos se puede integrar en el proceso que define la historia sísmica de una zona. En los métodos probabilistas se aplica la teoría de la probabilidad a la ocurrencia de nuevos terremotos y, por tanto, un futuro terremoto constituirá un punto único entre los varios que podrían haber ocurrido.

En el proceso determinista queda implícitamente admitido que, en el futuro, no se van a producir terremotos cuyos efectos sean superiores a los de los terremotos ya ocurridos en una zona, por lo que la fiabilidad del método será tanto mayor cuanto más amplio sea el período cubierto por los datos.

Generalmente se trata de evaluar un parámetro, habitualmente la intensidad, que caracterice el mayor terremoto que se pueda producir en cada una de la provincias sismotectónicas de la zona, las cuales se definen a partir de criterios geológicos y tectónicos teniendo en cuenta los datos sísmicos de la región. En este sentido, los Mapas Sismotectónicos constituyen un documento fundamental para la evaluación del riesgo sísmico. En 1983, el I.T.G.E. publicó el Mapa Sismotectónico de Granada (Hoja piloto), basado en la "Metodología para la elaboración del Mapa Sismotectónico de España", I.T.G.E., 1981.

El proceso determinista ha sido aplicado en la evaluación del riesgo sísmico de numerosas obras singulares, especialmente centrales nucleares.

En los métodos probabilistas se supone que el proceso de puntos, constituido por los diferentes terremotos, es un proceso de Poisson, con una expectancia definida por una ecuación de la forma:

$$\log n = a - bM$$

donde  $n$  es el número de terremotos anuales cuya magnitud es igual o superior a  $M$  y  $a, b$  son parámetros que caracterizan la sismicidad de cada provincia sismo-tectónica.

En un proceso de Poisson se admiten las siguientes hipótesis:

- Los sismos ocurren aleatoriamente, constituyendo puntos independientes del proceso, tanto espacial como temporalmente.
- La probabilidad de que dos sismos ocurran simultáneamente es muy pequeña.
- Estacionariedad del proceso, lo que supone que la tasa de ocurrencia de terremotos es independiente del tiempo.

#### 4.3. Agitabilidad del terreno

La agitabilidad del terreno está definida por el desplazamiento, velocidad y aceleración de cada punto durante el terremoto, funciones que sólo son conocidas en aquellos puntos en los que está instalado un equipo de registro.

Dichas funciones (funciones vectoriales de la variable tiempo) dependerán de los parámetros que definen el sismo (epicentro, foco, mecanismo focal, etc.) y de las características del medio a través del cual se propagan las ondas sísmicas; estas características se refieren, tanto a sus propiedades elásticas,

diferentes para cada material, como a sus propiedades geométricas, potencia de estratos, existencia de discontinuidades, fallas, etc.

Ante la dificultad de considerar todos los parámetros que van a definir el movimiento del suelo en cada punto, se recurre a modelos simplificados, conocidos como leyes de atenuación, que caracterizan dicho movimiento por el valor máximo del desplazamiento, velocidad y aceleración según determinadas direcciones, habitualmente contenidas en un plano horizontal y la perpendicular a dicho plano, expresando esos valores máximos en función de la magnitud, distancia al foco y de las características del terreno. Son conocidas, entre otras, las leyes de Esteva (1969) para sismos en terreno firme:

$$a = 1230 e^{0,8 M} (R + 25)^{-2}$$

$$v = 15e^M (R + 0,17 e^{0,59 M})^{-1,7}$$

$$\frac{ad}{v^2} = 1 + \frac{400}{R^{0,6}}$$

donde d (desplazamiento), v (velocidad) y a (aceleración) están expresadas en cm, - cm/seg y cm/seg<sup>2</sup>, respectivamente en función de la distancia focal R (en Km) y de la magnitud.

Cualquier correlación del tipo de las expuestas debe ser aplicada con prudencia en zonas en las que no exista una experiencia de sismos registrados, ya que las estimaciones así hechas pueden apartarse mucho de la realidad.

También es frecuente expresar la intensidad sísmica en función de la magnitud y la distancia epicentral o bien en función de la intensidad en el epicentro y de la distancia al mismo, como se ha expuesto en el punto 2.5.3.

A partir de una adecuada ley de atenuación y mediante algún procedimiento estocástico se puede obtener la probabilidad de que un determinado parámetro que evalúe el riesgo (desplazamiento, velocidad, aceleración, intensidad, etc.) sea superado en un punto, o bien los valores de ese parámetro para una

probabilidad dada. Así mismo es habitual determinar el período de retorno correspondientes a un determinado grado de intensidad, valor de la aceleración horizontal, etc.

Los cálculos de riesgo sísmico se pueden realizar para un emplazamiento, pero también pueden reflejarse en un mapa de isolíneas (aceleraciones, intensidades, etc.) con una probabilidad de ser superadas o bien un determinado período de retorno, así como mapas en los que figure el período de retorno de un parámetro (aceleración, intensidad, etc.). Ejemplos de estos mapas, elaborados por J. Martín Martín, 1983, pueden verse en las Figuras 4.1. y 4.2.

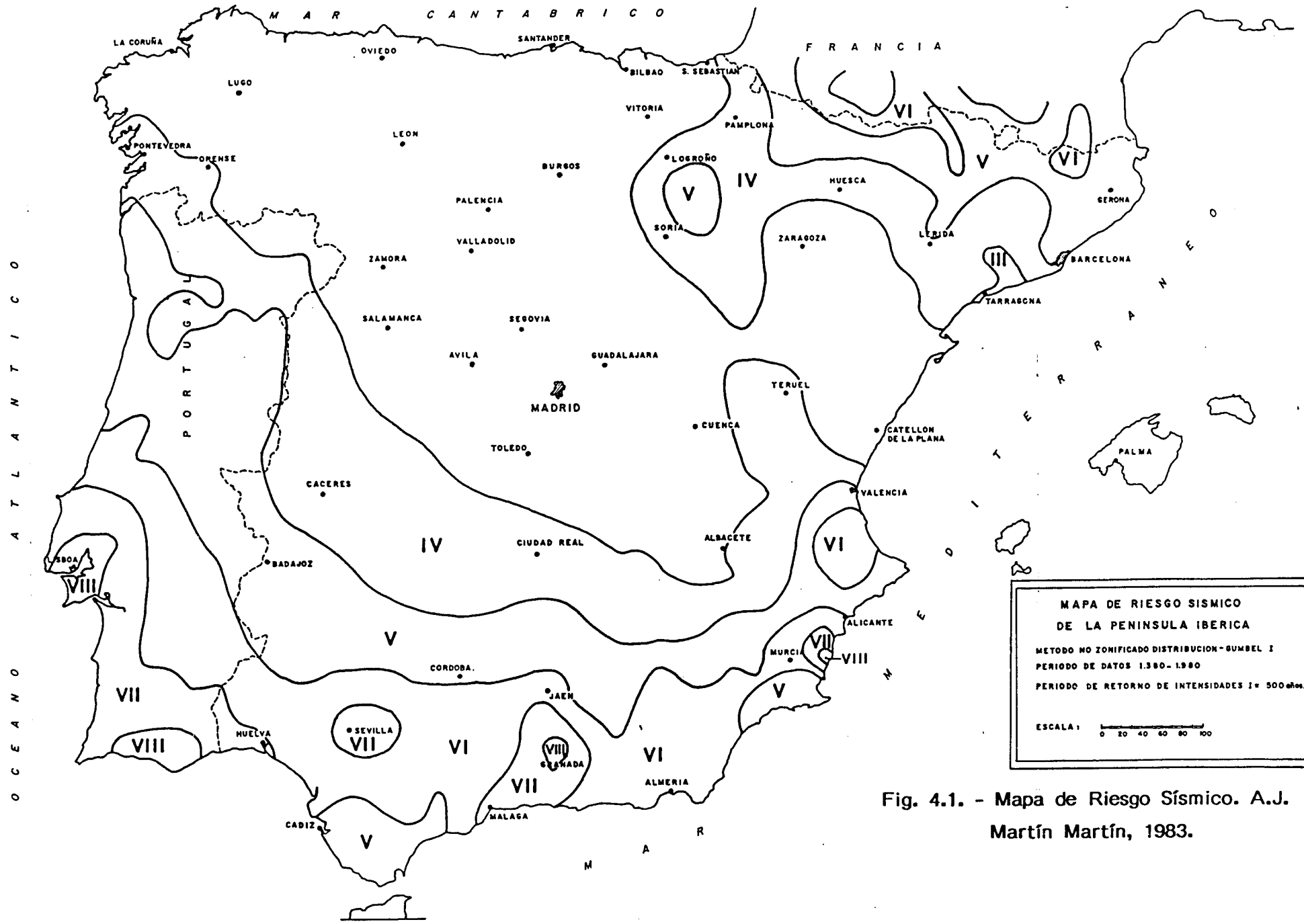
Evidentemente los resultados finales dependen del período de años analizado, de la bondad de los datos correspondientes a ese período y del modelo de cálculo empleado.

#### **4.4. Vulnerabilidad de las construcciones**

En los puntos anteriores se han expuesto los conceptos de riesgo sísmico como expresión de la sismicidad y de riesgo sísmico como expresión de la agilitud del terreno, así como la forma en que habitualmente se manejan y se expresan dichos conceptos. Se trata de conceptos sismológicos, cuya estimación constituye la primera fase para la valoración del riesgo sísmico, en sentido estricto, de una construcción, concepto que pertenece al campo de la ingeniería sísmica.

No debemos olvidar que son las construcciones y particularmente los edificios los causantes últimos de la muerte de personas y destrucción de bienes, incluido el propio edificio. Es, pues, importante saber valorar el riesgo de una estructura, expresado por la probabilidad de que pueda colapsar, sufrir daños importantes o quedar fuera de servicio, a causa de las vibraciones originadas por un sismo.





MAPA DE RIESGO SISMICO  
 DE LA PENINSULA IBERICA  
 METODO NO ZONIFICADO DISTRIBUCION-SUMBEL I  
 PERIODO DE DATOS 1.380-1.980  
 PERIODO DE RETORNO DE INTENSIDADES I= 500 años.  
 ESCALA: 0 20 40 60 80 100

Fig. 4.1. - Mapa de Riesgo Sísmico. A.J. Martín Martín, 1983.

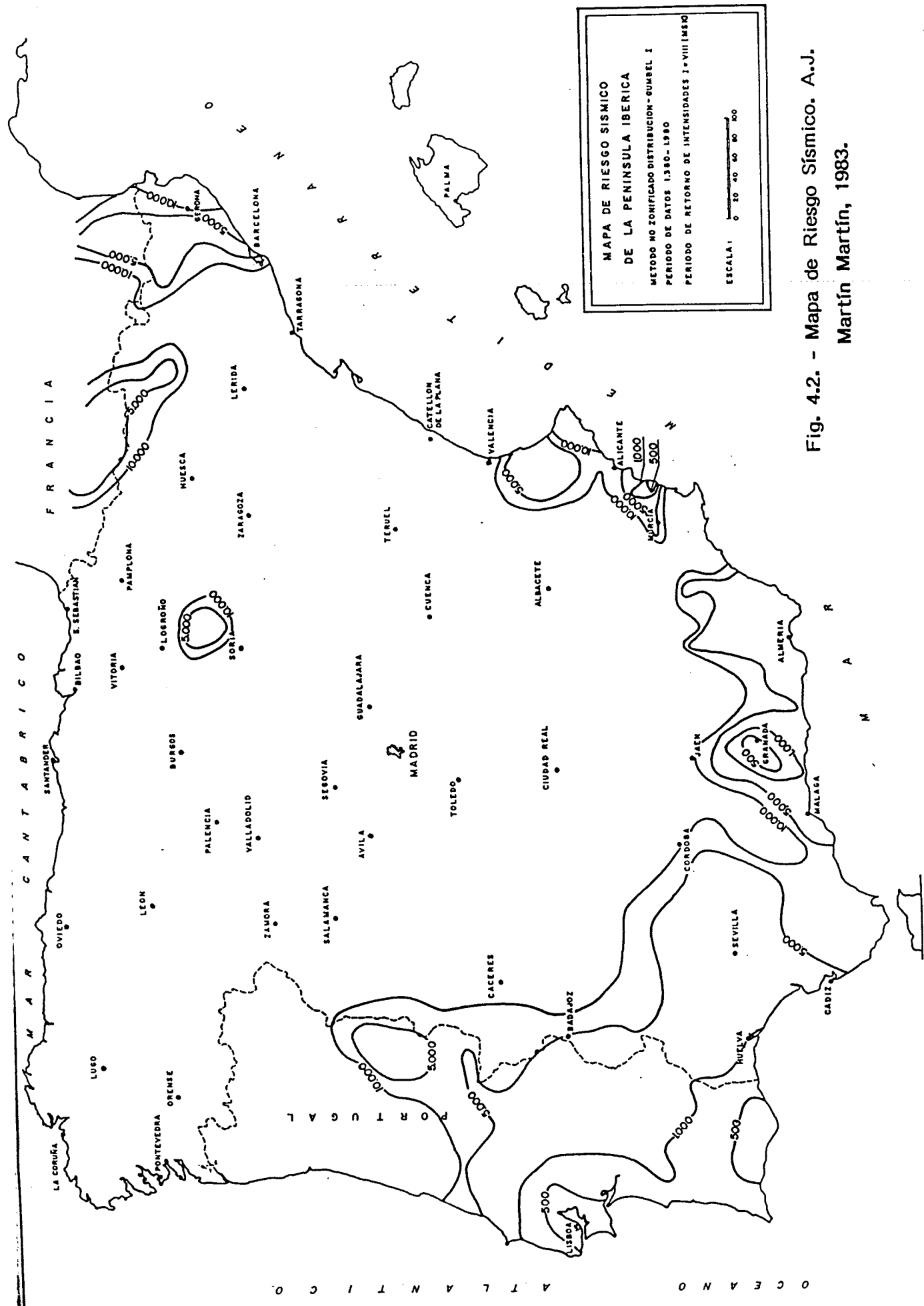


Fig. 4.2. - Mapa de Riesgo Sísmico. A.J. Martín Martín, 1983.

El riesgo sísmico en sentido estricto será función del sismo, de como se transmiten las ondas a través del terreno y de la vulnerabilidad de la estructura frente a las vibraciones.

Son muy diversos los procedimientos desarrollados para valorar el riesgo sísmico de un edificio. Una amplia visión de los mismos puede verse en "Techniques for Rapid Assessment of Seismic Vulnerability", ASCE, 1986, que recoge un conjunto de artículos presentados en el "Structures Congress'86", promovido por ASCE.

Todas las técnicas de valoración incluyen la definición del movimiento esperado, en un terreno determinado, para una estructura concreta.

Entre los métodos existentes (C. Scawthorn, 1986) para una "rápida" valoración del riesgo sísmico, pueden citarse:

- Juicio de un ingeniero experto.
- Consideración de un apropiado código de diseño.
- Uso de relaciones empíricas/estadísticas.
- Métodos analíticos simplificados.

La valoración de un ingeniero experto se basa fundamentalmente en los siguientes factores:

- . Configuración arquitectónica (número de alturas, forma en planta, etc.).
- . Características estructurales (tipología estructural, materiales que constituyen la estructura: madera, acero, hormigón, calidad de éstos, etc.).
- . Características de la cimentación (zapatas aisladas o atadas, zapatas corridas, losa, pilote, tipo y número de éstos, etc.).

- . Historia del edificio (antigüedad, modificaciones realizadas, daños sufridos en anteriores sismos, mantenimiento del edificio, etc.).

Estos y otros factores son, a veces, difíciles de cuantificar, lo que conduce a la utilización de reglas más o menos complejas basadas en la experiencia (uso de relaciones empíricas/estadísticas, que es otro de los métodos de trabajo comentados). Esto ha dado lugar al desarrollo de sistemas expertos (Ogawa, 1984; Myasato, 1986; etc.), capaces de evaluar el riesgo sísmico a partir de una amplia base de datos.

Recientemente, el documento ATC-14, 1987 "A Methodology for the Seismic Evaluation of existing Buildings", de Applied Technology Council, ha desarrollado una metodología para la valoración del riesgo sísmico de edificios a nivel nacional en U.S.A. (un antecedente es el documento ATC-13, 1985, desarrollado para California). La metodología incluye:

- Procedimientos para estimar la carga sísmica esperada. Proporciona un mapa nacional de aceleraciones máximas (con una probabilidad comprendida entre el 80% y el 95% de no ser sobrepasadas durante un período de 50 años), así como un espectro de respuesta para un amortiguamiento del 5% y procedimientos para determinar espectros de respuesta para otros amortiguamientos y diferentes niveles de probabilidad.
- Clasificación de los edificios en 15 tipos distintos comprendiendo las construcciones de: madera, acero, hormigón ("in situ"), hormigón prefabricado y de muros de mampostería reforzados y no reforzados.
- Procedimientos de evaluación cualitativa y cuantitativa para cada tipo de edificio, teniendo en cuenta sus características concretas (geométricas, constructivas, etc.).

Hemos hecho referencia a los espectros de respuesta. Estos son una representación del riesgo sísmico en sentido estricto, muy utilizada en el

análisis dinámico de estructuras.

Un espectro de respuesta es una representación gráfica de las máximas aceleraciones que se producen en estructuras modelizadas por un oscilador lineal simple (péndulo) y en los distintos modos de vibración de estructuras modelizadas por osciladores lineales múltiples, en función de su período (único en el oscilador simple y uno por cada modo de vibración en los múltiples) y del amortiguamiento, cuando su base es sometida a un movimiento vibratorio (Figura 4.3.).

También es posible obtener espectros de respuesta de desplazamiento o velocidades relativas respecto del terreno.

Los espectros de respuesta se pueden obtener a partir de modelos dinámicos, montando sobre una plataforma vibrante una serie de péndulos con distinto período y con una determinada amortiguación, e imprimiendo a la plataforma el movimiento correspondiente a un acelerograma registrado durante un sismo. Durante el movimiento de los péndulos es posible registrar las amplitudes y velocidades máximas relativas, así como las aceleraciones absolutas, lo que permite presentar estos valores en función del período de cada péndulo, obteniendo así los correspondientes espectros de desplazamiento, velocidades o aceleraciones. Los espectros de respuesta también se pueden obtener mediante métodos de integración numérica o por métodos analógicos.

El mayor inconveniente de los espectros de respuesta es que para obtenerlos es necesario disponer de diversos registros de sismos de la zona o región donde se quieren aplicar, cosa que no es posible en regiones que, incluso, disponiendo de Observatorios sismológicos, han tenido una baja actividad sísmica en la época instrumental. En estos casos, es frecuente utilizar espectros de otras regiones en las que el terreno sea similar y en las que se hayan registrado grados de intensidad del mismo orden que los que esperamos en la región objeto de estudio. No obstante, su empleo debe hacerse con mucha prudencia, ya que los mecanismos focales, tectónica regional, etc. nunca serán iguales.

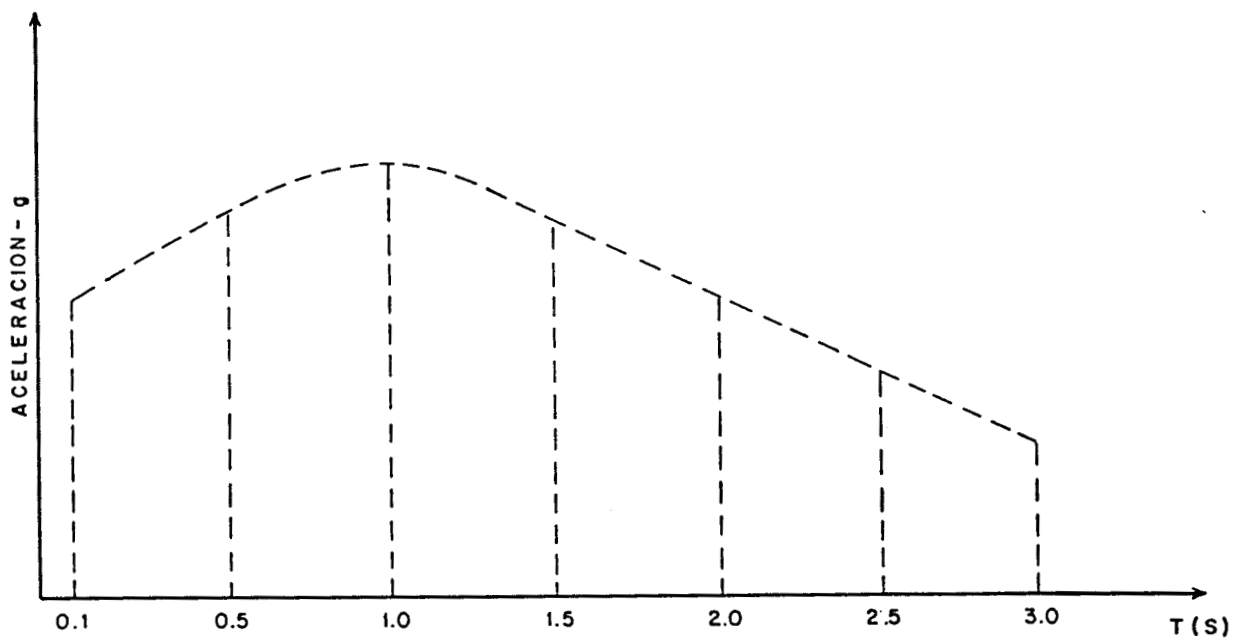
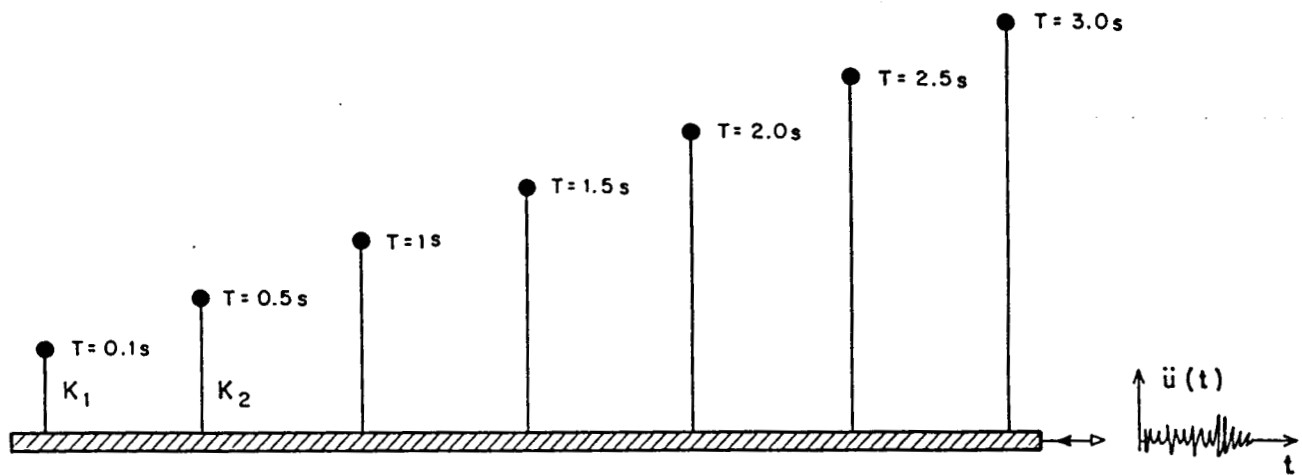


FIG. 4.3. - ESPECTRO DE RESPUESTA

## 5. PROPUESTA DE VALORACION DEL RIESGO SISMICO

### 5.1. Introducción

En el presente capítulo se propone una valoración sencilla y rápida del riesgo sísmico en sentido estricto, aplicable a un edificio, a un conjunto de edificios, que constituyan un barrio o urbanización o bien a una zona de una población, incluso a toda la población.

El procedimiento seguido es el que podría aplicar un técnico con cierta experiencia en el tema, en una valoración rápida del riesgo, sin disponer de un código previo de valoración. Siguiendo el método y códigos propuestos, la valoración puede ser realizada por cualquier persona con un nivel medio de conocimiento.

Los factores considerados son, a nuestro entender, los más importantes a tener en cuenta en cualquier formulación de riesgo que se realice para nuestro país. Las escalas propuestas para cada factor están basadas en valores medios contrastados por la experiencia.

### 5.2. Factores que intervienen en el riesgo

Se han considerado los siguientes factores para evaluar el riesgo sísmico.

- Sismicidad de la región
- Naturaleza del terreno
- Vulnerabilidad de la edificación
- Nivel de ocupación del edificio
- Evacuación de la población
- Impactos sociales y repercusiones

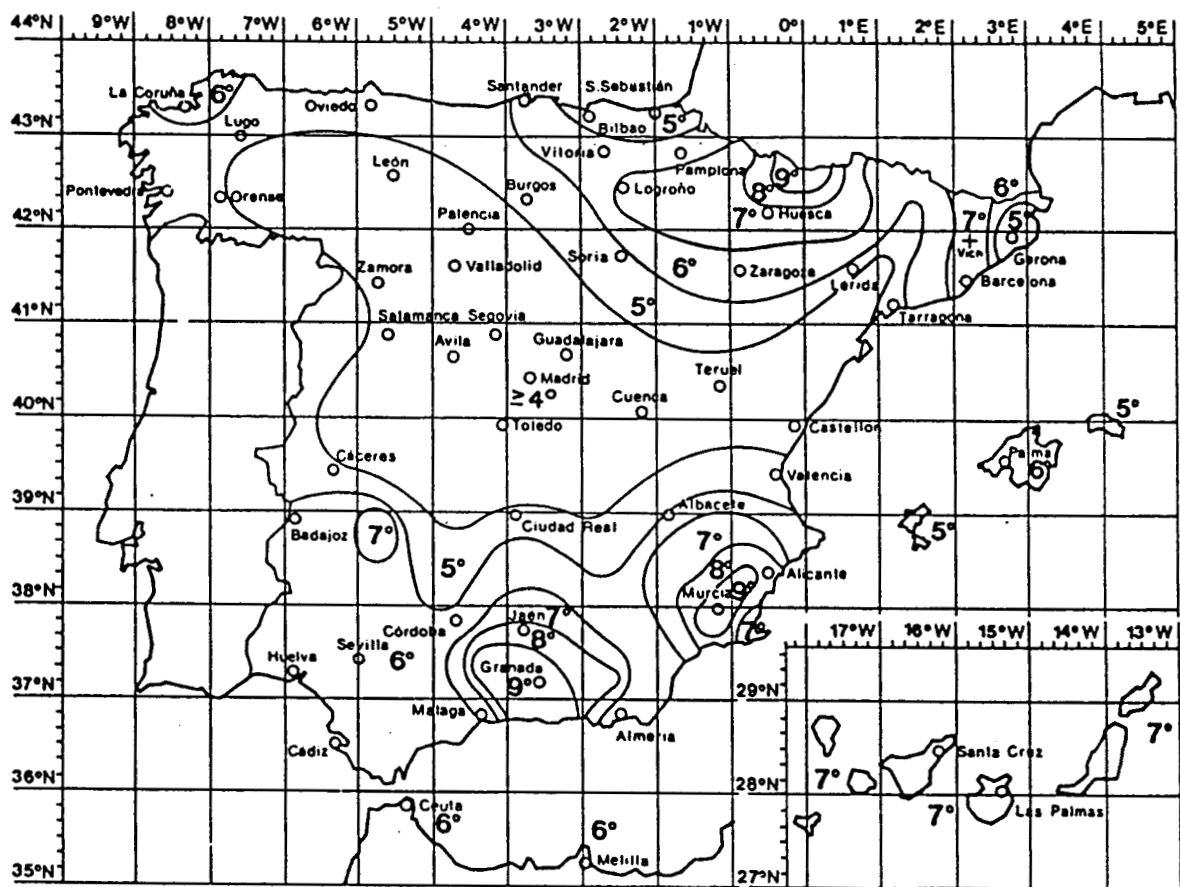


FIG. 5.1. - NORMA SISMORRESISTENTE P.D.S.-1 (1974)



El primer factor se refiere al riesgo sísmico como expresión de la sismicidad. El segundo está relacionado con la agitabilidad del terreno y con otros riesgos asociados al mismo, como es el de licuefacción. El tercer factor, y considerando los dos anteriores, se refiere al riesgo sísmico en sentido estricto. Los factores cuarto y quinto afectan al mayor o menor nivel de ocupación de los edificios y de las posibilidades de evacuación después de un sismo; ambos pueden incrementar notablemente el nivel de riesgo humano. Finalmente, el último factor, que podríamos considerar como secundario, tiene que ver con el coste socio-económico y laboral provocado por un terremoto.

A continuación se comentan brevemente cada uno de estos factores.

#### 5.2.1. Sismicidad de la región

Es el primer factor a tener en cuenta para cualquier valoración de riesgo sísmico. Ya ha sido tratado a lo largo del texto cómo se puede abordar su estudio por métodos deterministas y probabilistas. Los resultados del estudio se expresan como el daño potencial que un sismo puede causar a una estructura, mediante un grado de intensidad o mediante la probabilidad de que una cierta aceleración horizontal, vertical, etc., no sea sobrepasada o bien fijando el período de retorno correspondiente a un determinado grado de intensidad, aceleración, etc.

Para el propósito que nos ocupa consideraremos los grados de intensidad definidos para el territorio nacional en la Norma Sismorresistente P.D.S.-1 (1974) (ver Figura 5.1.). No obstante, y como señala esta Norma en los Comentarios del Capítulo III, pueden consultarse los mapas publicados por el Instituto Tecnológico y GeoMinero de España y por el Instituto Geográfico y Nacional, o solicitar información complementaria a estos organismos

Según la citada Norma, la peligrosidad de los acciones sísmicas pre-  
visibles es:

<u>Grado sísmico</u>	<u>Peligrosidad</u>
> VIII	Alta
VII a VIII	Media
< VI	Baja

### 5.2.2. Naturaleza del terreno

El terreno es el elemento transmisor de las ondas elásticas y de él dependen, por tanto, las características de éstas (longitud de onda, velocidad y período). El fenómeno de propagación de las ondas es muy complejo debido a las numerosas reflexiones y refracciones que experimentan al cambiar las características elásticas del medio, existencia de discontinuidades, etc.

La cimentación complica el estudio de cómo se transmite la vibración al edificio, ya que en la cimentación se producen nuevas reflexiones y refracciones de las ondas, influyendo notablemente la forma, dimensiones, profundidad y enlace entre los distintos elementos y entre éstos y la estructura.

Entre las conclusiones a las que se ha llegado tras el estudio de diversos terremotos es que, en general, los daños son mayores en los edificios situados sobre terrenos blandos: arcillas y limos blandos, arenas poco densas, rellenos, etc. que en los edificios asentados sobre formaciones compactas: arcillas y limos duros, arenas y gravas densas, etc. y los cimentados en roca.

En la Figura 5.2. pueden verse las distintas zonas del subsuelo de la Ciudad de Méjico y en la Figura 5.3. las zonas donde se han producido los mayores daños durante los terremotos de 1957, 1979 y 1985. Como puede apreciarse, éstos se produjeron en las zonas donde los depósitos blandos tienen mayor potencia. Después del terremoto de California de 1906 se hizo un estudio análogo, llegando a las mismas conclusiones. El estudio de sismogramas y acelerogramas confirma que las amplitudes de las ondas y las máximas aceleraciones son mayores en los terrenos más blandos (Figura 5.4.). En la Figura 5.5. se muestran los espectros recomendados por el Instituto de Ingeniería para la Ciudad de Méjico.

Sin embargo, también se ha podido comprobar que en construcciones rígidas con un período fundamental bajo, el terreno blando actúa de amortiguador del efecto sísmico, desplazándose el edificio libremente y disminuyendo el efecto de choque. Hechos como éste nos confirman que el terreno, como factor de riesgo, no se puede independizar de las características elásticas, dinámicas y geométricas,

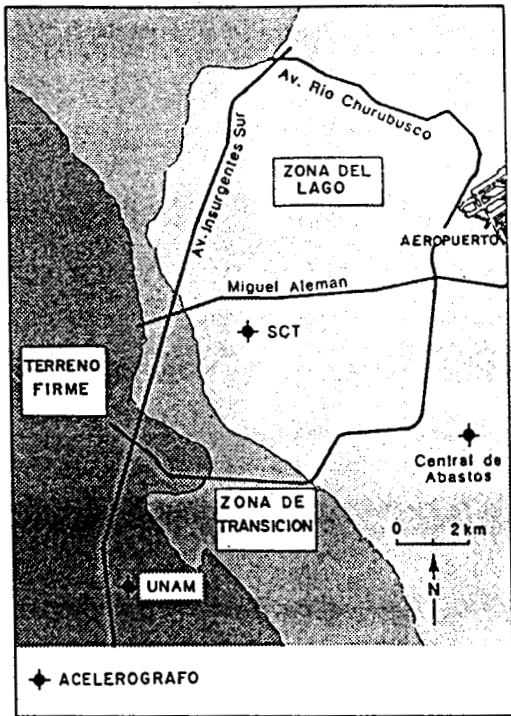


Fig. 5.2. - Subsuelo de la Ciudad de México y situación de observatorios (Instituto de Ingeniería, 1985)

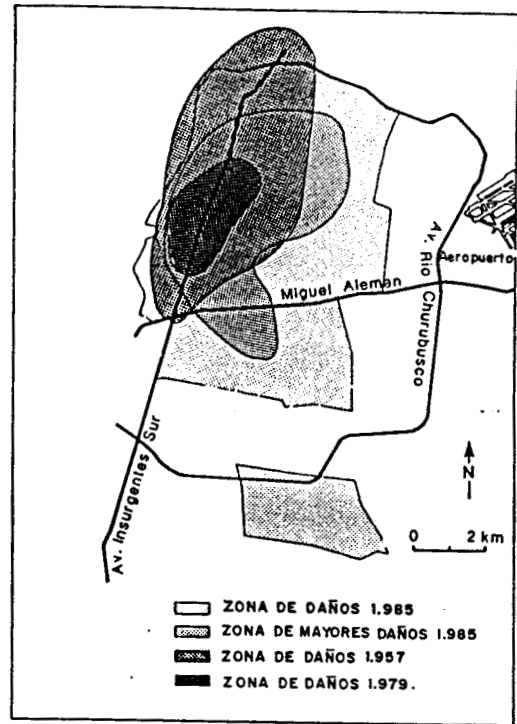


Fig. 5.3. - Zonas de daños en los terremotos de 1957, 1979 y 1985 (Instituto de Ingeniería, 1985)

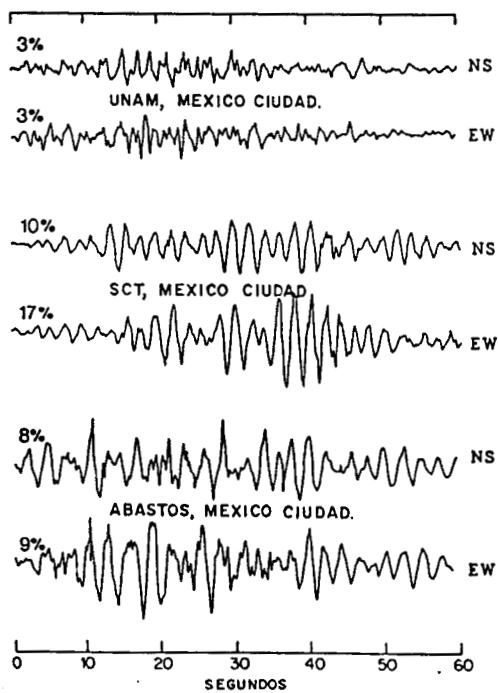


Fig. 5.4. - Acelerogramas en dirección N-S y E-W (Prince et al. 1985, Mena et al. 1985 y Quas et al. 1985)

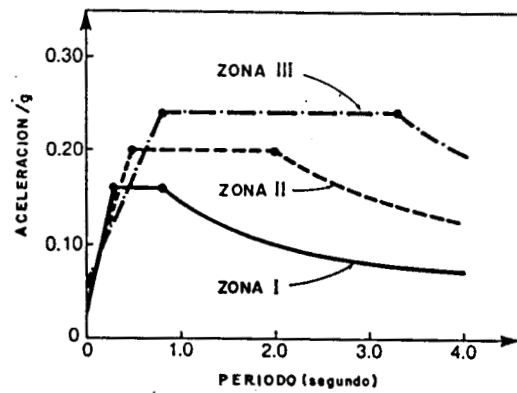


Fig. 5.5. - Espectros recomendados para la ciudad de México por el Instituto de Ingeniería, 1977

tanto de la estructura como de su cimentación, y en este sentido van dirigidas las investigaciones sobre el tema en los últimos 10-15 años. Algunas de las conclusiones apuntadas por A. Beles, D. Ifrim, A. García Yagüe (1975), sobre el comportamiento de edificios en función de la naturaleza del terreno, son:

- Los edificios de sillería, mampostería, ladrillos o adobes con mortero de cal débil o sin mortero, de una o dos alturas, tienen un buen comportamiento en terrenos compactos o rocosos, y también en terrenos menos compactos cuando sus dimensiones en planta son grandes y los cimientos resistentes.
- Los edificios rígidos de hormigón armado o de ladrillos proyectados correctamente han tenido un comportamiento satisfactorio, incluso aunque estuviesen apoyados en terrenos flojos.
- En los edificios rígidos de pequeñas dimensiones los daños más importantes se producen en el tercio superior de la altura cuando están situados en terrenos flojos y en el tercio inferior cuando están situados en terrenos compactos.
- En los edificios rígidos con un período fundamental bajo es muy importante el efecto de choque.
- Los edificios de estructura flexible tienen mejor comportamiento sobre terrenos compactos. En estos edificios el efecto de choque es un factor menos importante.

Un fenómeno bastante frecuente y en el que sí juega un papel importante la naturaleza del terreno y sus propiedades de estado, es el de licuefacción del suelo.

El fenómeno de licuefacción se caracteriza por una pérdida importante de resistencia al corte sin drenaje de ciertas arcillas, conocidas como arcillas sensitivas y de arenas flojas saturadas, cuando son sometidas a una sollicitación dinámica como la provocada por un sismo. Tanto las arcillas sensitivas como las arenas saturadas fluyen hasta alcanzar una nueva situación estable, producién-

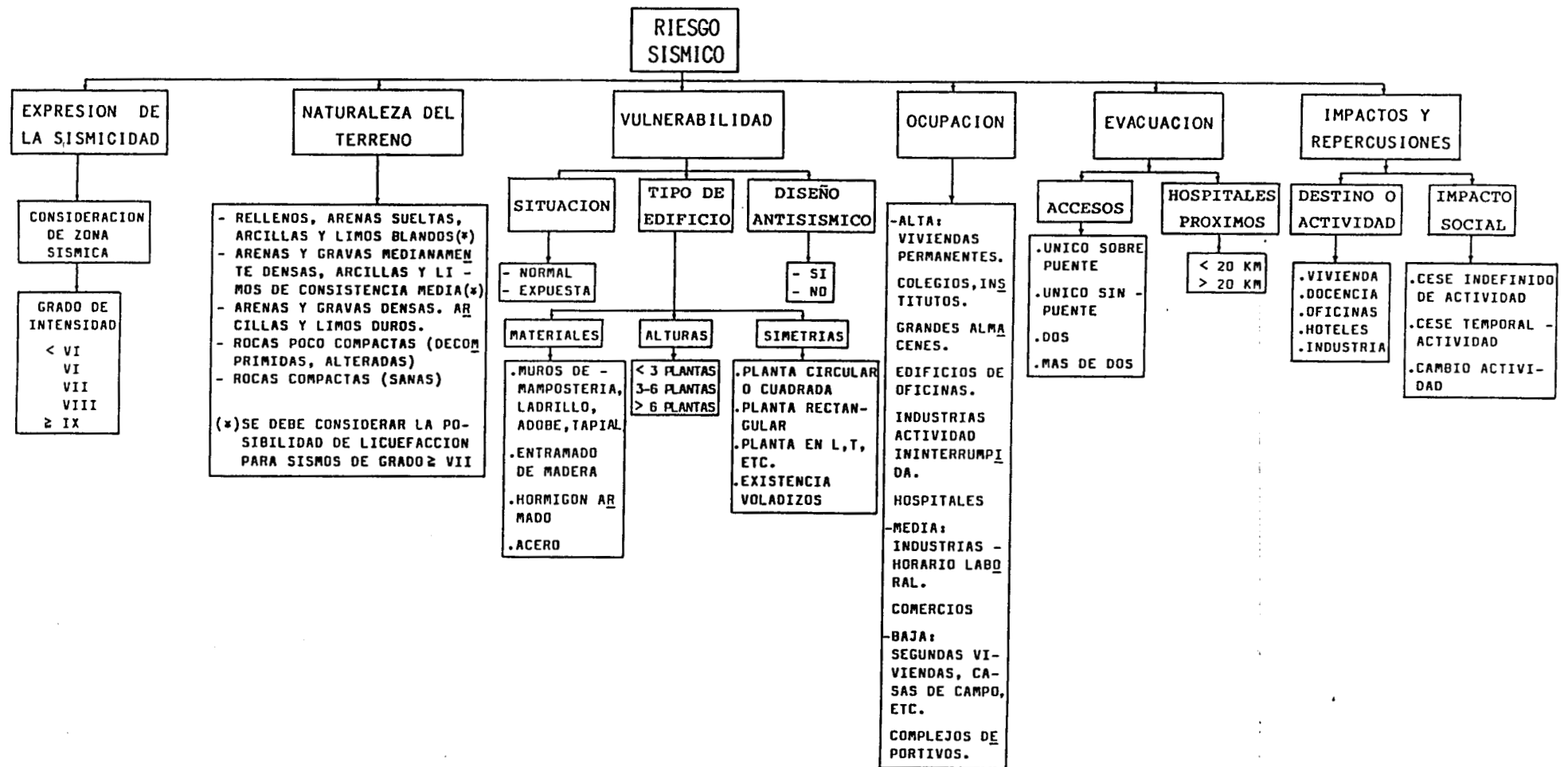


FIG. 5.6. - FACTORES CONSIDERADOS EN LA EVALUACION DEL RIESGO SISMICO

dose el hundimiento y/o giro de los edificios.

En depósitos de arenas con un nivel freático alto, aún sin llegar a la licuefacción, se produce un flujo de agua, al disiparse las presiones intersticiales, que puede provocar el sifonamiento, con efectos análogos a los que produce la licuefacción.

El estudio del potencial de licuefacción generalmente se aborda por métodos empíricos basados en la resistencia a la penetración en el ensayo S.P.T. (penetración estándar). Una explicación de éstos y otros métodos puede verse en Geotecnia y Cimientos III (Jiménez Salas y otros, 1980). Un método que considera los factores sísmicos, sedimentológicos, topográficos, hidrológicos, granulométría, densidad, etc., ha sido desarrollado por L. Youd y D.H. Perkins (1987). El método evalúa un índice (LSI), en función de los factores señalados, que indica, de acuerdo con una escala, el riesgo de licuefacción en un determinado lugar.

En la evaluación del riesgo sísmico que aquí se propone, se consideran los cinco tipos de terreno indicados en el esquema de la Figura 5.6., así como la posibilidad de licuefacción en los dos primeros tipos para sismos de grado  $\geq$  VII.

### 5.2.3. Vulnerabilidad de la edificación.

La vulnerabilidad de un edificio depende de sus dimensiones, concepción estructural, materiales que forman la estructura y dimensionamiento de la misma, forma en planta, número de alturas, rigidez del conjunto, presencia o no de elementos capaces de absorber esfuerzos horizontales, etc.

En general, las construcciones rígidas tienen un mejor comportamiento durante los terremotos, que las flexibles, ya que en éstas, los grandes movimientos pueden provocar la rotura sobre todo de pilares.

Las estructuras de hormigón armado y de acero tienen un buen comportamiento frente a los sismos, siempre que estén adecuadamente diseñadas, especialmente los enlaces, que en la mayor parte de las ocasiones suelen ser los puntos débiles. Únicamente señalar que los incendios, frecuentes después de un terremoto, suponen un mayor riesgo para las estructuras metálicas.

Para conseguir una mayor rigidización de estas estructuras se suelen disponer celosías y diafragmas de hormigón armado.

Los forjados continuos de hormigón armado transmiten mejor las cargas sísmicas que los constituidos por vigas; además las vigas pueden provocar la rotura de muros si no están enlazadas en sus extremos.

Las estructuras de madera tienen un mayor riesgo frente a los sismos debido a su menor capacidad para resistir los esfuerzos inducidos por un sismo; así mismo las uniones y enlaces son puntos más débiles que en las estructuras de hormigón o acero.

Finalmente, los edificios de mampostería, ladrillo, adobe, tapial, etc. presentan un alto riesgo ya que estos elementos son muy poco aptos para resistir tracciones.

En cuanto a las formas de los edificios, las más seguras son las que más se aproximan a una construcción con simetría central: de planta circular o cuadrada. En los edificios con planta en L, T, etc., se generan unos esfuerzos de torsión superiores, por lo que estas formas son poco aconsejables en zonas sísmicas, como tampoco lo son los elementos en ménsula, voladizos, balastradas, etc. Las recomendaciones de simetría son aplicables tanto a la forma como a los materiales, por lo que deben evitarse las construcciones mixtas en zonas sísmicas.

En cuanto a las cimentaciones son aplicables los mismos criterios de rigidez y simetría, siendo más seguras las cimentaciones atadas en dos direcciones y los emparrillados, dispuestas a una profundidad superior a la normal.



En el esquema de la Figura 5.6. se hace intervenir el factor situación, considerándose expuesta la de aquellos edificios situados al pie de taludes altos o acantilados en los que se pueden producir caídas de bloques y deslizamientos durante la vibración, y también la de edificios situados en cerros y partes altas de las montañas, ya que al estrecharse el camino por donde se transmiten las ondas se produce un aumento de las oscilaciones.

Otro importante factor a tener en cuenta es el diseño sismorresistente. Un edificio diseñado y construido de acuerdo con Normas Sísmicas estará menos expuesto frente a un terremoto.

A efectos de la valoración que se hace en el siguiente apartado, el factor cimentación se considera incluido en el diseño sismorresistente, ya que si éste se ha tenido en cuenta, la cimentación no influirá negativamente a efectos de evaluación del riesgo sísmico, al haber sido correctamente proyectada. Otra causa que nos ha inducido a valorar la influencia de la cimentación de esta manera, es el hecho de que en muy pocos casos se conocerán las características de la cimentación.

La consideración de todos los parámetros implicados hace muy difícil su evaluación. Una valoración relativa simplificada, a través del factor  $R_v$ . es la que se indica en el cuadro 5.1.

#### 5.2.4. Daños a las personas.

El riesgo sísmico será tanto mayor cuantas más personas puedan ser afectadas (heridas o muertas) como consecuencia del hundimiento o daños estructurales de un edificio.

Esto se valora por el factor  $R_p$ . referido al número de ocupantes máximos del edificio: (Cuadro 5.2.).

<u>Nº de Ocupantes</u>	<u>Rp</u>
> 500	10
100-500	8
50-100	6
10- 50	4
< 10	2

Y aplicando al citado factor: Rp. según el nivel probable de ocupación un coeficiente corrector Rp tal que:

<u>NIVEL DE OCUPACION</u>	<u>R:p</u>
- ALTO (Viviendas permanentes, colegios, industrias, grandes almacenes, edificios de oficinas, industrias de actividad ininterrumpida, hospitales, etc.)	1
- MEDIO ( Industrias con horario laboral, comercios, etc.)	0,7
- BAJA (Segundas viviendas, casas de campo, complejos deportivos, etc.)	0,3

#### 5.2.5. Evacuación de la población

Es muy probable que durante un terremoto las vías de comunicación, carreteras y vías de ferrocarril, sufran desperfectos importantes, debido a que se hayan visto afectadas por grietas del terreno, fallas activadas, deslizamientos o deformaciones en el caso de vías férreas, de tal forma que pierdan su funcionalidad. La situación será más expuesta en el caso de disponer de una sola vía de comunicación, y más aún si en ésta existe un puente, ya que durante la vibración puede ser destruido parcial o totalmente.

Cuadro 5.1.

FACTOR Rv. ASOCIADO A LA VULNERABILIDAD DEL EDIFICIO

TIPO DE CONSTRUCCION	Nº DE PLANTAS (o alturas de 3m)	PLANTA IRREGULAR	PLANTA REGULAR O SIMETRICA
Construcción ligera de mampostería, ladrillo, adobe, etc.	> 1	9,0	8,50
	1	8,0	7,75
	> 6	7,25	7,0
Estructura de madera	3-6	6,50	6,25
	≤ 3	5,75	5,50
Construcción masiva de sillera o mampostería	> 3	6,00	5,50
	< 3	4,00	3,50
Estructura de hormigón armado o acero	> 6	5,0	4,75
	3-6	4,25	4,0
	≤ 3	3,50	3,25

SITUACION: En emplazamientos expuestos (cantiles, promontorios, etc), se multiplicarán por 1,2 los valores indicados para Rv.

En el caso de edificios altos adosados se multiplicará, Rv. por 1,3 para tener en cuenta el efecto de ariete.

DISEÑO ANTISISMICO: Si se tiene constancia de un diseño antisísmico del edificio se multiplicará por 0,5 el valor de Rv. resultante.

CIMENTACION: Se multiplicarán los valores de Rv. por 0,8 (caso de losas), 1,1 (pilotes); 1,3 (zapatas).

VOLADIZOS Y SALIENTES: Si existen en plantas altas se multiplicará Rv. por 1,2. Si hay una marquesina amplia en planta baja se multiplicará por 0,9.

Consideramos que estos factores, así como la existencia de un hospital próximo a la población afectada, con capacidad para atender, principalmente casos de traumatismos y quemaduras, deben ser tenidos en cuenta en la valoración del riesgo sísmico de una población, por su importancia, tanto en el auxilio de los heridos, como para su evacuación.

#### **5.2.6. Impactos sociales y repercusiones**

En España, el Seguro de Riesgo Catastrófico (B.O.E. 3 de mayo de 1952) ampara los daños producidos por sismos de intensidad igual o superior al grado VII de la escala Wood-Newman, que corresponde al punto medio entre los grados VI y VII de la escala M.S.K.

No obstante, cualquier evaluación de riesgo sísmico debe contemplar la posibilidad de cese, temporal o definitivo, de ciertas actividades, industriales, de servicios, etc. por la importancia que conlleva en el futuro desarrollo de la región, pérdidas de empleo, cambios de actividad, etc.

### 5.3. Evaluación del riesgo sísmico.

Una vez expuestos los factores que inciden en el riesgo sísmico y considerando la importancia relativa de cada uno de ellos, se opta por las siguientes expresiones valorativas.

#### 5.3.1. Riesgo sísmico de un edificio.

Se obtiene mediante la expresión:

$$RS = C_s R_t R_v R_p$$

En donde:

RS = Riesgo sísmico

$C_s$  = Coeficiente sísmico que tiene en cuenta la expresión de la sismicidad en la zona donde se valora el riesgo.

$R_t$  = Riesgo sísmico debido a la naturaleza del terreno.

$R_v$  = Riesgo sísmico debido a la vulnerabilidad de la edificación

$R_p$  = Riesgo sísmico referido al número de personas ocupantes de un determinado edificio

Los valores propuestos para el coeficiente sísmico,  $C_s$ , son los indicados en el Cuadro 5.3. y para los riesgos " $R_v$ ", " $R_p$ ", " $R_t$ ", se consideran las escalas reflejadas en los Cuadros N° 5.1., 5.2. y 5.4.

CUADRO 5.3.- COEFICIENTE SISMICO

<u>GRADO DE INTENSIDAD</u>	<u>C<sub>s</sub></u>
< VI	0,1
VI	0,3
VII	0,6
VIII	0,8
≥ IX	1,0

CUADRO 5.4.- RIESGO SISMICO ASOCIADO AL TERRENO

<u>TIPO DE TERRENO</u>	<u>R<sub>T</sub></u>
- RELLENOS, ARENAS SUELTAS, ARCILLAS Y LIMOS BLANDOS (*)	10
- ARENAS Y GRAVAS MEDIANAMENTE DENSAS. ARCILLAS Y LIMOS DE CONSISTENCIA MEDIA (*)	8
- ARENAS Y GRAVAS DENSAS. ARCILLAS Y LIMOS DUROS	5
- ROCAS POCO COMPACTAS (DECOMPRIMIDAS Y ALTERADAS)	2
- ROCAS COMPACTAS (SANAS)	1

(\*) En estos tipos de terreno, y a efectos de tener en cuenta la posibilidad de licuefacción, se considerará un valor doble del riesgo en el caso de existir un nivel de agua alto.

De acuerdo con los valores adoptados, la escala valorada del riesgo - sísmico será la siguiente:

<u>RS</u>	<u>Riesgo sísmico</u>
> 500	Alto
100-500	Medio
50-100	Bajo
< 50	Muy Bajo

### 5.3.2. Riesgo sísmico de un barrio o zona.

La expresión que se propone debe aplicarse a zonas con cierta homogeneidad en las condiciones del terreno o en la tipología de la edificación:

$$RSZ_0 = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n RS \text{ (para los "n" edificios de la zona).}$$

A este valor inicial debe aplicársele un factor de corrección " $\alpha z$ " según la escala siguiente:

<u>Tipo de zona</u>	<u><math>\alpha z</math></u>
Zonas residenciales	1
Zonas de servicios	1,2
Zonas comerciales	1,3

Resultará así un valor de riesgo sísmico de un barrio o zona:  
 $RSZ = \alpha z RSZ_0$ , con la valoración siguiente:

<u>RSZ</u>	<u>Riesgo sísmico de una zona.</u>
> 500	Altas
100-500	Medio
50-100	Bajo
< 50	Muy bajo

### 5.3.3. Riesgo sísmico de una población o localidad.

Se obtiene como media de los "n" barrios que la componen:

$$RSP_o = 1/n \sum_n RSZ$$

A este valor básico debe de aplicársele un factor de corrección producto de los valores  $\alpha T$  correspondientes a los cuatro conceptos siguientes:

<u>Equipamiento</u>	<u><math>\alpha T</math></u>
a) Dotación de bomberos	
Buena	1
Regular	1,2
Escasa o nula	1,4
b) Dotación de hospitales	
Buena	1
Regular	1,3
Escasa o nula	1,6
c) Accesos	
Unico sobre puente	1,8
Unico sin puente	1,4
Dos accesos	1,2
Mas de dos accesos	1
d) Redes de abastecimiento de agua y energía	
Buena disponibilidad y protección	1
Regular disponibilidad y protección	1,2
Mala disponibilidad y protección	1,4



Resultará así una expresión en la forma  $RSP = \alpha_T RSP_0$ . La escala de valoración propuesta como en los anteriores casos, es:

<u>RSP</u>	<u>Riesgo sísmico de una población o localidad</u>
> 500	Alto
100-500	Medio
50-100	Bajo
< 50	Muy bajo

## 6. MEDIDAS DE ACTUACION

En este capítulo se recogen una serie de consejos y actitudes a tener en cuenta, antes, durante y posteriores a un terremoto. Medidas como las que se indican han sido ampliamente difundidas en regiones y países con una historia sísmica importante y, recientemente, por la Junta de Andalucía.

Dichas medidas son el resultado de numerosos estudios realizados en la mayor parte de los terremotos catastróficos, sobre todo durante el último siglo.

De la observación de estos consejos dependerá, en muchos casos, que la magnitud de la catástrofe quede mitigada, disminuyendo el número de víctimas.

### 6.1. Medidas de protección de la unidad familiar, en centros de trabajo y escuelas

#### A) Previas a un terremoto

- Tener conocimiento de habitar en una zona de sismicidad media o elevada, en la que un terremoto puede ocasionar daños importantes, incluso la completa destrucción de edificios.
- Revisar la estructura de la vivienda y consultar con un técnico la forma de reforzarla.
- Asegurarse que elementos tales como chimeneas, balcones, aleros, etc. están bien unidos a la estructura del edificio.

- Los muebles y servicios pesados (armarios, bibliotecas, cisternas, calentadores, etc.) deben estar bien sujetos a las paredes. Las puertas de los armarios de cocina deben oponer gran resistencia a ser abiertas durante un temblor.
- Evitar las lámparas muy pesadas colgadas del techo.
- No colocar en bordes de ventana, balcones o terrazas, tiestos, macetas u otros objetos que puedan caer al exterior durante el temblor.
- Conocer donde se encuentran las llaves de paso del agua, gas y los fusibles de energía eléctrica, de forma que desconectándolas se puedan evitar cortocircuitos, incendios e inundaciones.
- Disponer de un botiquín de primeros auxilios y tener conocimiento de los mismos.
- Disponer de linternas y pilas (una linterna por cada miembro con uso de razón).
- A nivel familiar, tener previsto un plan de actuación en caso de emergencia y de reunión una vez pasado el terremoto.
- Tener un directorio cerca del teléfono con los números de bomberos, policía, hospitales, Protección Civil, etc.
- En los centros de enseñanza difundir medidas de prevención y autoprotección y disponer de un plan de actuación en caso de emergencia.
- En los centros de trabajo tener previstas las actuaciones a seguir en caso de emergencia.
- En los edificios de uso público señalar las salidas y la advertencia de no utilizar el ascensor en caso de terremotos.

## B) Durante un terremoto

- Mantener la calma. Es la forma más segura de conocer lo que está ocurriendo alrededor y poder tomar decisiones.
- Si se está dentro de un edificio, quedarse en él y si se está fuera, permanecer fuera. Muchos accidentes ocurren al entrar o salir de los edificios.
- En el interior de los edificios los lugares más seguros son: bajo una cama o una mesa resistente, bajo el dintel de una puerta, junto a una pared lo más próxima al centro de la vivienda, etc.
- Mantenerse lejos de los muros de fachada, ventanas, cristaleras, así como de objetos pesados que puedan caerse.
- No utilizar cerillas, velas o cualquier otro tipo de llama, debido al peligro de incendio. Apagar los posibles focos de fuego.
- No utilizar el ascensor. En caso de falta de corriente quedaría atrapado.
- Si se está fuera de un edificio, mantenerse alejado de cables eléctricos, cornisas y, en general, de cualquier objeto o construcción que pueda caer. Caminar hacia lugares abiertos prestando atención al tráfico.
- Si se está circulando en un coche, parar lo más lejos posible de las fachadas de edificios y cables de tendido eléctrico y permanecer dentro hasta que el temblor haya pasado.
- En los centros escolares, protegerse bajo las mesas, alejado de las ventanas, y si se está en un patio permanecer en él.
- En los centros de trabajo, protegerse bajo las mesas, alejado de los muros de fachada y ventanas. Si está previsto un plan de evacuación, salir del edifi-

cio ordenadamente, sin utilizar el ascensor.

c) Después de un terremoto

- Mantener y actuar con calma y transmitir tranquilidad y confianza.
- Comprobar si alguien se encuentra herido y prestarle auxilio. No mover a los heridos graves, salvo si se tienen conocimientos de como hacerlo, o en los casos de peligro extremo, como fuego, derrumbamientos, etc.
- Revisar visualmente o por el olor las instalaciones de agua, gas, electricidad, sin poner en funcionamiento. Si se observan anomalías cerrar las llaves de paso de la vivienda o del edificio.
- Apagar los focos de fuego que se puedan haber producido. Si el fuego es grande se deben seguir las normas contra incendios.
- No utilizar el teléfono salvo para llamadas a bomberos o solicitar ayuda sanitaria.
- No usar los servicios hasta que el alcantarillado tenga garantías de servicio.
- Conectar la radio y enterarse si hay instrucciones de emergencia.
- Tener precaución al abrir armarios ya que pueden caer objetos.
- Después de las sacudidas violentas abandonar el edificio de forma ordenada y siguiendo los planes previstos en los centros de enseñanza y trabajo.
- Consumir agua hervida o embotellada. El abastecimiento de agua puede estar contaminado.

- Mantenerse alejado de los edificios y protegerse de cristales y elementos punzantes con un calzado fuerte.
- No acercarse a chimeneas o tendidos de corriente eléctrica.
- Si es necesario entrar en un edificio, lo deben hacer el mínimo número de personas. Si se observan graves destrozos no hacerlo hasta que un técnico califique su estado y de instrucciones de cómo y por donde entrar.
- Comunicar a las autoridades la existencia de edificios que amenacen ruina, de materiales inflamables, conducciones de servicios averiadas, etc.
- Colaborar bajo las instrucciones de Protección Civil.
- No acudir a las zonas afectadas sin que lo soliciten las autoridades, ya que se podrían dificultar las labores de rescate.
- Conducir por zonas siniestradas es peligroso, pues se puede chocar con objetos caídos, rocas, cables, escombros, árboles, etc.
- Para alejarse de la zona se deben seguir las instrucciones de Protección Civil, ya que los accesos pueden quedar colapsados o impedir la evacuación de heridos y la ayuda exterior.
- Es frecuente que después de un terremoto se produzcan otros más pequeños, los cuales pueden terminar de destruir edificios ya dañados, por lo que se debe permanecer lejos de estos edificios.
- Mantenerse alejado de playas y costas donde puede ocurrir un tsunami (grandes olas), incluso después que el terremoto haya pasado.

## 6.2. Medidas que competen a las autoridades.

Las principales medidas y acciones que deben tenerse en cuenta y seguir tanto las autoridades locales como comarcales, debidamente coordinadas son las siguientes:

- Tener previstos planes de emergencia tanto a nivel local como regional.
- Divulgar dichos planes entre las comunidades de vecinos, centros de enseñanza, centros de trabajo, etc.
- Tener previstos un plan de evacuación con accesos alternativos.
- Realizar simulacros de emergencia y evacuación.
- Divulgar las medidas de autoprotección y prevención, sobre todo en centros escolares y comunidades de vecinos.
- Preocuparse de que los técnicos relacionados con la construcción y ordenación del territorio tengan una adecuada información sobre el riesgo sísmico de la zona, prevención sísmica y construcción sismorresistente.
- Velar por la correcta aplicación de las Normas Sismorresistentes, especialmente en centros hospitalarios, por el mayor riesgo de estos centros, debido a su actividad.
- Los hospitales requieren una especial atención, pues deben seguir funcionando después de un terremoto para atender a los heridos. No sólo la estructura debe tener un diseño sismorresistente, sino que también se debe prestar atención a elementos tales como fachadas y sistemas de energía, disponiendo de generadores propios, capaces de mantener el servicio, al menos en salas de urgencia, quirófanos y unidad de cuidados intensivos. Análogos requerimientos deben ser tenidos en cuenta para los sistemas de calefacción y aire acondicionado. Así mismo deben estar previstos suministros alternativos de agua. La

mayor parte de las medidas preventivas expuestas en el punto anterior son de aplicación en los hospitales. Otras medidas preventivas, de mayor importancia en estos centros, se refieren al aislamiento de medicamentos, líquidos, etc., evitando su rotura durante la vibración.

- Cuidar que los accesos a la población se encuentren en buen estado de conservación (carreteras, vías férreas, puentes, etc.).
- Tener previstos suministros alternativos, sobre todo de agua y luz.



## REFERENCIAS

- Applied Technology Council. ATC-14 (1987). Evaluating The Seismic Resistance of Existing Buildings.
- Beles, A.; Ifrim, M.; García Yagüe, A; (1975) Elementos de Ingeniería Sísmica.
- Bruno, D. (1983). L'edilizia Nelle Zone Sismiche.
- Bolt, B. (1981). Terremotos.
- Instituto Geográfico Nacional (1982). Catálogo General de Isosistas de la Península Ibérica.
- Instituto Geográfico Nacional (1983). Catálogo Sísmico.
- Instituto Geológico y Minero de España (1983). Mapa Sismotectónico de España. Hoja piloto de Granada.
- Instituto Geológico y Minero de España (1987). Impacto económico y social de los Riesgos Geológicos en España.
- Isenberg, J. (1980). Social and Economic Impact Earthquakes on Utility Lifelines. Proceedings ASCE.
- Jiménez Salas y otros (1980). Geotecnia y Cimientos III.

- Martín Martín, A.J. (1983). Riesgo Sísmico en la Península Ibérica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Mitchell, D. (1987). Structural damage due to the 1985 Mexican earthquake. Earthquake engineering. Fifth Canadian Conference.
- Newmark, N.M.; Rosenblueth, E. (1976). Fundamentos de Ingeniería Sísmica.
- Norma Sismorresistente P.D.S.-1 (1974). Ministerio de Planificación y Desarrollo.
- Scawthorn, C. (1986). Techniques for Rapid Assessment of Seismic Vulnerability. ASCE.
- Yound, T.; Perkins, D. (1987). Mapping of Liquefaction Severity Index. Journal of Geotechnical Engineering. Vol 113 Nº 11. Nov. 1987. ASCE.

ANEXO

EVALUACION DEL RIESGO SISMICO

## PROPUESTA DE DIRECTRIZ DE PROTECCION CIVIL

### EVALUACION DEL RIESGO SISMICO

<u>INDICE</u>	<u>Pag</u>
1. INTRODUCCION	70.
2. SISMICIDAD REGIONAL	71.
3. SISMICIDAD LOCAL	73.
4. VULNERABILIDAD DE LOS EDIFICIOS	74.
5. DAÑOS A LAS PERSONAS	76.
6. EVALUACION DEL RIESGO SISMICO	77.
6.1. Riesgo sísmico de un edificio	77.
6.2. Riesgo sísmico de un barrio o zona	77.
6.3. Riesgo sísmico de una población o localidad	78.
7. ACTUACIONES RECOMENDADAS	80.

## PROPUESTA DE DIRECTRIZ DE PROTECCION CIVIL

### EVALUACION DEL RIESGO SISMICO

#### 1. INTRODUCCION

Esta Directriz, tiene por objeto dar algunas indicaciones para evaluar el riesgo asociado a los fenómenos sísmicos en pequeñas comunidades, teniendo en cuenta la distinta susceptibilidad a los terremotos, de las estructuras, edificios, servicios e instalaciones.

No se incluyen recomendaciones de comportamiento a la población ni orientaciones para la actuación de las autoridades ya que esto es objeto de otras directrices de la D.G. de Protección Civil.

## 2. SISMICIDAD REGIONAL

Es importante que cada comunidad conozca el grado de intensidad de los terremotos que pueden afectar a su región de ubicación.

Una primera indicación puede obtenerse por la Norma Sismoresistente P.D.S. - 1 (1974), (ver figura adjunta). Para mayor detalle, pueden consultarse los mapas publicados por el Instituto Tecnológico y GeoMinero de España y el Instituto Geográfico Nacional, o solicitar información complementaria a estos organismos. En casos concretos pueden realizarse estudios sismotectónicos de una determinada zona.

Según la citada Norma la peligrosidad de las acciones sísmicas pre-visibles es:

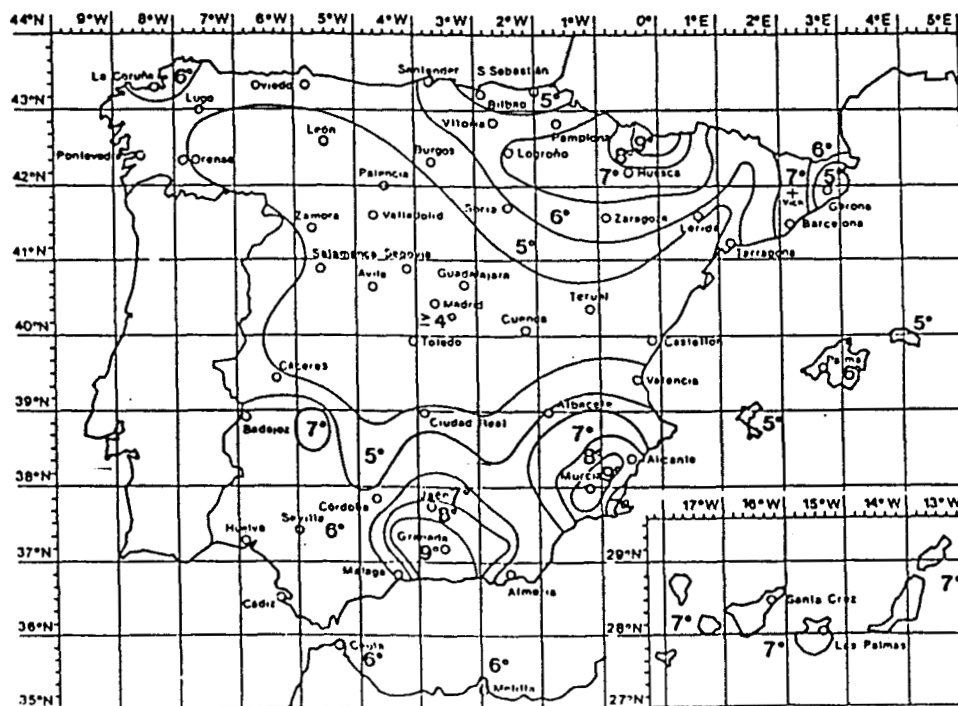


FIG. 5.1. - NORMA SISMORRESISTENTE P.D.S.-1 (1974)

<u>Grado sísmico</u>	<u>Peligrosidad</u>
>.. VIII	Alta
VI a VIII	Media
< VI	Baja

Esta Directriz está orientada a las localidades situadas en áreas de alta peligrosidad, pero puede también resultar útil, en las de peligrosidad media.

Puede asignarse un valor numérico relativo a cada zona a efectos de evaluación del riesgo.

<u>Grado sísmico</u>	<u>Cs</u>
< VI	0,1
VI	0,3
VII	0,6
VIII	0,8
≥ IX	1,0

### 3. SISMICIDAD LOCAL

Las acciones sísmicas regionales sufren modificaciones apreciables según la morfología y naturaleza de los terrenos atravesados.

Elo explica que incluso en zonas de una misma población, los efectos de un sismo sean muy diferentes.

Aunque resulta muy difícil hacer una zonificación de vulnerabilidad sísmica a escala de una población, puede obtenerse alguna orientación, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Los promontorios rocosos amplifican las acciones sísmicas, sobre todo en las bajas frecuencias.
- Las fallas o grandes fracturas existentes en el terreno, dan lugar a que en sus inmediaciones se produzcan movimientos importantes.
- Las arenas flojas y las arcillas blandas saturadas pueden perder totalmente su capacidad de soporte por efecto de una sacudida sísmica.
- Aunque el tipo de terreno, por si solo, no es un factor determinante de peligrosidad, ya que esta depende también de las características de los edificios, puede asignarse una valoración relativa de peligrosidad de los distintos terrenos:

<u>TIPO DE TERRENO</u>	<u>RT</u>
- Rellenos, arenas sueltas, arcillas y limos blandos (*)	10
- Arenas y gravas medianamente densas. Arcillas y limos de consistencia media (*)	8
- Arenas y gravas densas. Arcillas y limos duros	5
- Rocas poco compactas (Decomprimidas y alteradas)	2
- Rocas compactas (Sanas)	1

(\*) En estos tipos de terreno, y a efectos de tener en cuenta la posibilidad de licuefacción, se considerará un valor del riesgo en el caso de existir un nivel de agua alto.



#### 4. VULNERABILIDAD DE LOS EDIFICIOS

La vulnerabilidad de un edificio depende de sus dimensiones, concepción estructural, materiales que forman la estructura y dimensionamiento de la misma, forma en planta, rigidez de conjunto, presencia o no de elementos capaces de absorber esfuerzos horizontales, etc.

Todo ello hace muy difícil su evaluación, por lo que, a efectos de esta Directriz se opta por una valoración relativa simplificada, a través del factor  $R_v$ , según se indica en el Cuadro Adjunto.

FACTOR Rv ASOCIADO A LA VULNERABILIDAD DEL EDIFICIO

TIPO DE CONSTRUCCION	Nº DE PLANTAS (o altura de 3m)	PLANTA IRREGULAR	PLANTA REGULAR O SIMETRICA
Construcción ligera de mampostería, ladrillo, adobe, etc.	> 1	9,0	8,50
	1	8,0	7,75
Estructura de madera	> 6	7,25	7,0
	3-6	6,50	6,25
	≤ 3	5,75	5,50
Construcción masiva de sillería o mampostería	> 3	6,00	5,50
	< 3	4,00	3,50
Estructura de hormigón armado o acero	> 6	5,0	4,75
	3-6	4,25	4,0
	≤ 3	3,50	3,25

SITUACION: En emplazamientos expuestos (Cantiles, promontorios, etc.) se multiplicarán por 1,2 los valores indicados para Rv. En el caso de edificios altos adosados se multiplicará Rv, por 1,3 para tener en cuenta el efecto de ariete.

DISEÑO ANTISISMICO: Si se tiene constancia de un diseño antisísmico del edificio se multiplicará por 0,5 el valor de Rv resultante.

CIMENTACION: Se multiplicarán los valores de Rv, por 0,8 (caso de losas); 1,1 (pilotes); 1,3 (zapatas)

VOLADIZOS Y SALIENTES: Si existen en plantas altas se multiplicará Rv por 1,2. Si hay una marquesina amplia en planta baja, se multiplicará por 0,9.

## 5. DAÑOS A LAS PERSONAS

El riesgo sísmico será tanto mayor cuantas más personas puedan resultar muertas, o heridas como consecuencia del hundimiento o daños estructurales de un edificio.

Esto se valora por el factor  $R_p$ , referido al número de ocupantes máximo del edificio.

<u>Nº de ocupantes</u>	<u><math>R_p</math></u>
> 500	10
100 - 500	8
50 - 100	6
10 - 50	4
< 10	2

Según el nivel probable de ocupación, se aplicará al factor  $R_p$ , un coeficiente corrector  $\alpha_p$  tal que:

<u>Nivel de ocupación</u>	<u><math>\alpha_p</math></u>
- ALTO (Viviendas permanentes, colegios, institutos, grandes almacenes, edificios de oficinas, industrias de actividad ininterrumpida, hospitales, etc.)	1
- MEDIO (Industrias con horario laboral, comercios, etc.)	0,7
- BAJA (Segundas viviendas, casas de campo, complejos deportivos, etc.)	0,3

## 6. EVALUACION DEL RIESGO SISMICO

### 6.1. Riesgo sísmico de un edificio

Se obtiene por la expresión:

$$RS = Cs Rt Rv Rp$$

Con la escala siguiente:

<u>RS</u>	<u>Riesgo sísmico</u>
> 500	Alto
100 - 500	Medio
50 - 100	Bajo
< 50	Muy bajo

### 6.2. Riesgo sísmico de un barrio o zona

Se aplicará a zonas con cierta homogeneidad, en las condiciones del terreno o en la tipología de la edificación.

$$RSZ_0 = \frac{1}{n} \sum_n RS \text{ (para los } n \text{ edificios de la zona)}$$

A este valor básico se le aplicará un factor de corrección  $\alpha_z$  del orden siguiente:

	<u><math>\alpha_z</math></u>
Zonas residuales	1
Zonas de servicios	1,2
Zonas comerciales	1,3

Resultará así,  $RSZ = \alpha_z RSZ_0$ , con la misma escala de valoración del Apdo. 6.1.

### 6.3. Riesgo sísmico de una población o localidad.

Se obtendrá como media de los  $n$  barrios que la componen.

$$RSP_0 = \frac{1}{n} \sum_n RSZ$$

A este valor básico se le aplicará un factor de corrección producto de los valores  $\alpha_T$  correspondientes a los cuatro conceptos siguientes:

<u>Equipamiento</u>	<u><math>\alpha_T</math></u>
a) Dotación de bomberos	
Buena	1
Regular	1,2
Escasa o nula	1,4
b) Dotación de hospitales	
Buena	1
Regular	1,3
Escasa o nula	1,6
c) Accesos	
Único sobre puente	1,8
Unico sin puente	1,4
Dos accesos	1,2
Más de dos accesos	1
d) Redes de abastecimiento de agua y energía	
Buena disponibilidad y protección	1
Regular     "     "     "	1,2
Mala       "     "     "	1,4

Resulta así,  $RSP = \alpha_T RSP_O$ , con la misma escala de valoración del Apdo. 6.1.

## 7. ACTUACIONES RECOMENDADAS

Las localidades con riesgo sísmico medio o alto, deben adoptar medidas preventivas para reducir dicho riesgo.

De modo no exhaustivo pueden indicarse las siguientes:

- Limitar la edificación a las zonas de menor peligrosidad. Modificar si es preciso los Planes de Urbanismo
- Preocuparse de que los técnicos de la zona relacionados con la construcción ubicación y ordenación del territorio tengan una adecuada información sobre el riesgo sísmico de la localidad, prevención sísmica y construcción sismorresistente.
- Exigir la estricta aplicación de las Normas Sismorresistentes en los proyectos de edificación. Limitar, si es preciso la edificación en altura.
- Elaborar ordenanzas de edificación específicas para la localidad.
- Prestar especial atención a la construcción y ubicación de hospitales y centros sanitarios. Deben ser capaces de resistir el sismo y poseer autonomía en cuanto a energía, agua y electricidad.
- Inspeccionar y realizar una evaluación pormenorizada de los edificios existentes. Asegurarse de que las partes salientes como chimeneas, balcones, aleros, etc. están bien unidos a la estructura. En caso contrario, reforzarlos o eliminarlos.
- Procurar el desalojo progresivo de las viviendas en condiciones precarias de estabilidad.

- Garantizar la estabilidad sísmica de locales públicos muy concurridos como escuelas, mercados, centros deportivos, iglesias, etc.
- Asegurar el mantenimiento de los accesos y salidas de la localidad, con varios posibles itinerarios.
- Comprobar que las redes de abastecimiento y servicios poseen suficiente seguridad antisísmica. Reforzarlas o sustituirlas en caso contrario.
- Construir una red anti-incendios.
- Tener previstos suministros alternativos de agua y electricidad.