

Metodología Simplificada para el Análisis del Riesgo Sísmico

Alfonso LÓPEZ ARROYO y Julio VILLACAÑAS BERENGUER

RESUMEN

La determinación del Riesgo Sísmico y de Escenarios de daños ocasionados por terremotos para un número grande de poblaciones distribuidas en amplias zonas de un país plantea problemas cuya solución requiere un gran esfuerzo. Parte de estos problemas pueden obviarse utilizando métodos abreviados, uno de los cuales se describe en este trabajo. El método se basa fundamentalmente en la adopción, como valores de entrada para el cálculo, de los proporcionados por la información disponible sobre peligrosidad, tipologías de edificación, población y vulnerabilidad, sin recurrir a estudios específicos para obtener datos más precisos. El uso de este método permitirá identificar aquellas zonas que precisan estudios más completos.

ABSTRACT

The determination of Seismic Risk and Damage Scenarios for a number of towns distributed over a large area requires a great effort in order to obtain the information necessary to carry out the analysis. Part of this effort can be avoided through the use of simplified methods, such as the one described in this paper. The method is based on the use, as input values for the calculation, of the readily available data concerning hazard, building typologies, population and vulnerability. The use of this method will allow the identification of the areas for which specific detailed studies are needed.

1. INTRODUCCIÓN

En 1994 se publicó la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de terremotos en España. Esta directriz establece los requisitos que deben cumplir los planes especiales de Protección Civil relacionados con este fenómeno, previendo la planificación a tres niveles, municipal, autonómico y estatal, y considera como contenidos de estos planes la preparación de Bases de Datos sobre medios y recursos de aplicación en cada caso.

El ámbito al que se trata de extender la planificación incluye todas las áreas en que son previsible sismos de intensidad macrosísmica igual o superior al grado VII MSK con un periodo de retorno de 500 años, según el Mapa de Peligrosidad Sísmica publicado por el Instituto Geográfico Nacional incluido la norma NCSE-94.

Ante el elevado número de municipios para los que habrían de redactarse planes locales (de los que derivarían después los de las Comunidades Autónomas y el Estatal) parece razonable aplicar inicialmente una metodología simplificada, pero suficientemente rigurosa, que permita identificar las áreas que requieren un análisis más completo. Con esta filosofía desarrollamos en 1996 una metodología para la evaluación del riesgo sísmico, presentada a organismos de Protección Civil (OFITECO-IOMA, 1996), que describimos en este artículo.

2. DEFINICIONES GENERALES

El Riesgo sísmico se define como la función de probabilidad de pérdidas derivadas de los daños a un elemento o conjunto de elementos (p.e. una ciudad) como consecuencia de la acción de terremotos. Es, por tanto, función, en cada caso, de las características de esta acción y de la respuesta a ella de los elementos en riesgo. Comentamos brevemente a continuación las definiciones y características de estos términos.

2.1. Pérdidas y daño

Se entiende en general como pérdida el valor en términos monetarios de un daño, sea éste directo o indirecto. Boissonade y Shah (1984) dan una extensa lista de ambos tipos de daño, de la que pueden destacarse entre los primeros los daños a edificios, a infraestructuras y a instalaciones, y entre los segundos daños a personas, interrupción de servicios cesación de negocios. En su evaluación se consideran “estados de daño” o daño porcentual.

La clasificación en estados de daño se establece en función de criterios que dependen del problema que se considera en cada caso. Así, en el caso de un mecanismo simple se suelen considerar sólo dos estados de daño, que corresponden a la descripción “se mantiene operativo” y “no puede continuar funcionando”. En el diseño sísmico de instalaciones industriales (en particular en el de centrales nucleares) se tienen en cuenta también dos posibles estados de daño: “con daños leves que no disminuyen su capacidad operativa (al que corresponde el sismo base de operación, OBE)” y “con daños graves que impiden su continuidad operativa pero no implican riesgo una vez interrumpido su funcionamiento (que corresponde al sismo de parada segura, SSE)”. Semejantes a estos son los estados que se consideran en el diseño sísmico de edificaciones ordinarias (p.e. en la normas NCSE-94 y EUROCODIGO 8); las situaciones que se distinguen en este caso corresponden a “daños leves que no afectan a elementos estructurales” y “daños estructurales graves pero no colapso”.

Sin embargo, las escalas macrosísmicas, que se desarrollaron con el propósito de proporcionar una medida general de la gradación de los daños producidos por terremotos (y, consecuentemente, de la distribución superficial de su “intensidad”) establecen usualmente 5 grados de daño mediante la consideración de los efectos sobre distintos tipos de objetos, definiendo tales efectos, también, mediante descripciones literales. Los problemas más importantes de estas escalas han sido reiteradamente señalados en la literatura sismológica (ver p.e. López Arroyo, 1991) y se corresponden con los distintos pasos necesarios para su construcción, a saber:

- a) Selección de objetos, e_p (generalmente personas, edificaciones, naturaleza).
- b) Definición de estados de daño para cada tipo de objetos, $D_{i,p}$.
- c) Definición de subescalas de intensidad macrosísmica, una por cada tipo de objeto, SM_p , estableciendo la correspondencia entre los estados de daño definidos y grados de intensidad
- d) Combinación de las subescalas así definidas en una única escala macrosísmica, SM .

En este esquema simple se supone que cada tipo de objetos está constituido por elementos de idéntica respuesta a la acción sísmica, lo que, obviamente, no es necesariamente cierto. Por ello, determinados tipos de objetos se han subdividido en un número creciente de “clases” de elementos que cumplen mejor esta condición. Un ejemplo de esta evolución puede verse en la consideración de los edificios, parte importante en la definición de todas las

escalas macrosísmicas. Las primeras escalas (Rossi- Forel, Mercalli) incluían todos los edificios en una sola clase; la escala MSK-74 considera 3 clases de edificios, A, B, y C, definidas en función de las características estructurales; y la más reciente EMS-98, distingue 6 clases (A, B, C, D, E, F) en las que se agrupan hasta 15 tipos de estructuras (ESC, 1998). Este mismo número de tipologías y de clases es considerado en análisis recientes de los daños a edificios causados por terremotos (Braga et al, 1982, 1984; Chavez, 1998).

El número de estados de daño que consideran las escalas macrosísmicas no es el mismo en todas, aunque el aceptado en todas las más en uso (MMI, MSK, EMS) es 12.

Un problema distinto, esencial en la construcción de las escalas macrosísmicas es el que presenta el último paso, d, es decir, el de combinación de las subescalas para obtener una escala única, problema que ya fue puesto de manifiesto por Dutton (1904). Sólo análisis estadísticos rigurosos de datos sobre daños a objetos de los distintas clases consideradas en las escalas, en terremotos bien estudiados, han permitido llegar a resultados aceptables; y a demostrar, de paso, el amplio grado de dispersión en las correlaciones obtenidas para algunos tipos de objetos, p.e. la naturaleza (ESC, 1998).

Por otra parte, el uso, como medida de daño del daño porcentual (cociente “costo de reparación/valor total”) permite establecer una medida prácticamente continua, que es sin embargo aplicable únicamente a determinados tipos de elementos; uno clásico es el referido de daño a construcciones. Se han publicado correlaciones entre ambas medidas en daños a edificios (p.e. Whitman, 1988, tabla 1).

Tabla 1. Matriz de probabilidad de daño para la escala MMI (Whitman, 1988)

Estado de daño	Porcentaje de daño Rango	Valor central % daño	Probabilidad de daño						
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1 No daño	0	0	95	49	30	14	3	1	0,4
2 Leve	0-1	0,5	3	38	40	30	10	3	0,6
3 Ligero	1-10	5	1,5	8	16	24	30	10	1
4 Moderado	10-30	20	0,4	2	8	16	26	30	3
5 Grave	30-60	45	0,1	1,5	3	10	18	30	18
6 Muy grave	60-100	80	–	1	2	4	10	18	39
7 Destrucción	100	100	–	0,5	1	2	3	8	38

2.2. Intensidad sísmica

El análisis del Riesgo sísmico exige el conocimiento de la Peligrosidad sísmica (apartado 2.3), que es definida en términos de la capacidad, o potencial, de daño del movimiento del suelo generado por terremotos en un lugar (su destructividad), a la que designamos como “Intensidad sísmica” (López Arroyo, 1991). La intensidad macrosísmica es una medida de la intensidad sísmica así definida, pero ya desde los primeros tiempos de la Sismología (Mendelhall 1888, Dutton 1904) se han propuesto otros parámetros más directamente relacionados con el movimiento del suelo. Entre estos,

- valores máximos y duración de éste (a_{\max} , v_{\max} , d_{\max} , Δt)
- desarrollo temporal ($a(t)$, $v(t)$, $d(t)$)
- espectros de Fourier y de respuesta
- funciones de la energía (p.e. intensidad de Arias) y valores derivados de la historia temporal (p.e. velocidad absoluta acumulada, CAV)

Cada uno de estos parámetros es aplicable preferentemente a un problema determinado en relación con el Riesgo sísmico.

2.3. Peligrosidad sísmica

Se ha definido la Peligrosidad sísmica en un punto, $H(x)$, como la función de probabilidad de un parámetro cualquiera representativo del movimiento del suelo originado por terremotos (UNDRO, 1979). Más apropiado es definirla en forma general como función de la capacidad de daño del movimiento del suelo (su intensidad sísmica),

$$H(x) = P[I(x) \geq I; T, X] \quad [1]$$

Donde T representa el intervalo de tiempo para el que se calcula H (usualmente 1 año); I puede caracterizarse por cualquiera de los parámetros citados en el apartado anterior (incluida la intensidad macrosísmica).

La peligrosidad se expresa generalmente por el valor de la intensidad sísmica, I , al que corresponde una probabilidad anual determinada; valores usuales de ésta son 2×10^{-3} , 10^{-3} , 10^{-4} . Un ejemplo de mapas de Peligrosidad es el contenido en la Norma NCSE-94 correspondiente a una probabilidad anual de 2×10^{-3} .

2.4. Vulnerabilidad sísmica

La vulnerabilidad sísmica de un elemento V_e (por ejemplo un edificio), se define como la relación entre la intensidad I del movimiento del suelo, generado por un sismo, en el emplazamiento del elemento, y el daño que sufre éste. Esta relación se expresa, en general, mediante una matriz de probabilidad de daño (MPD) o por funciones de vulnerabilidad y de fragilidad.

Las matrices de probabilidad de daño de elementos de una clase determinada están constituidas por términos que representan la probabilidad condicionada de que el elemento sufra un daño de grado i como consecuencia de un movimiento del suelo de intensidad j .

$$\text{MPD} = [P(D_i / I_j)] \quad [2]$$

Estos términos pueden también interpretarse como expresión del porcentaje de elementos (p.e. edificios de la misma clase en una ciudad) con un determinado estado de daño, i , como consecuencia de un sismo de una intensidad dada, j .

Cada columna (I fijo) representa la función de probabilidad de daños para la intensidad considerada. En ocasiones (para estados de daño expresados en porcentaje de daño) se considera suficiente caracterizar esta función por su valor medio,

$$\langle D \rangle (I_j) = S_i [D_i \times P(D_i / I_j)] \quad [3]$$

con los que se construyen las funciones de vulnerabilidad

$$y = \langle D \rangle (I) \quad [4]$$

Por otra parte, cada fila de la MPD (D fijo) representa la función de fragilidad del elemento,

$$P(D \geq D') = f(I) \quad [5]$$

de aplicación a problemas de fallo de sistemas o instalaciones, como las relacionadas con accidentes es instalaciones críticas. El conjunto de funciones de fragilidad expresa gráficamente las MPD.

Las tres relaciones (3), (4) y (5) son usadas para representar la respuesta al movimiento del suelo de un elemento.

Todas ellas suelen evaluarse, para elementos tales como estructuras, mediante el estudio teórico de su respuesta dinámica o bien por el análisis estadístico de datos obtenidos con ocasión de terremotos reales. Para otros tipos de elementos sólo es aplicable este segundo procedimiento, que es, por otra parte, el de mayor fiabilidad.

2.5. Riesgo sísmico y Escenario de Daños

2.5.1. *El Riesgo sísmico* de un elemento, e , (siguiendo el ejemplo anterior, un edificio) ha sido definido como la probabilidad de pérdidas sociales y económicas, L , como consecuencia de la acción de terremotos sobre e en un tiempo de exposición T . (UNDR0 1979, EERI 1989),

$$R = P(L \geq L'; T, e) \quad [6]$$

L incluye las pérdidas directas del elemento y las derivadas de éstas, tales como los daños a personas, los económicos sufridos por empresas e instalaciones, o los ocasionados al medio ambiente.

El Riesgo así definido viene determinado por tres términos:

- el elemento en riesgo, e
- su vulnerabilidad sísmica, V_e
- la peligrosidad sísmica del lugar, X , donde se ubica e .

La ecuación [6] puede, por tanto, desarrollarse de esta forma:

$$R(e, X, T) = \sum_i \sum_j L_i \times P(D_i / I_j)_e \times P(I_j; T, X) \quad [7]$$

donde

$P(I)$ representa la peligrosidad sísmica en x .

$P(D/I)_e$ es la matriz de probabilidad de daño (vulnerabilidad sísmica) de e , V_e .

L_i , pérdidas asociadas al grado i de daño del elemento, es igual al valor de éste multiplicado por el daño porcentual correspondiente a D_i .

En problemas más complejos, p. e. la determinación del Riesgo sísmico de una ciudad, siguen siendo válida la expresión [7], sustituyendo e por el conjunto, E , de elementos en riesgo en la ciudad, y la vulnerabilidad V_e por

la V_E global. V_E es función de la vulnerabilidad de cada una de las clases k de elementos (edificios de distintos tipos, infraestructuras, industrias) y de su distribución numérica, con lo que [7] queda en la forma

$$R(E, X, T) = \sum_i L_i \sum_j P(D_{i, \text{global}}/I_j) \times P(I_j; T, x) \quad [8]$$

donde

$$D_{i, \text{global}}/I_j = \sum_k (D_{i,k} / I_j) \times N_k \quad [9]$$

N_k = porcentaje de elementos de clase k sobre el total de los que componen la ciudad.

$D_{i,k}$ = daño de nivel i en elementos de clase k .

L_i = pérdidas asociadas al daño $D_{i, \text{global}}$.

El Riesgo sísmico se ha definido también como valor medio de pérdidas, definición aplicada en particular a problemas relacionados con seguros sobre daños por terremotos (Sauter, 1979; Boissonade y Shah, 1984) pero que también es útil en casos en que no se conoce la Matriz de Probabilidad de Daño y son en cambio conocidas curvas de vulnerabilidad aplicables. La vulnerabilidad de los elementos presentes no viene en estos casos expresada por las MPD sino por los vectores definidos por los valores de la correspondiente función de vulnerabilidad según [4], con lo que las ecuaciones [7] y [8] quedan reducidas a

$$R(e, X, T) = \sum_j L_j \times \langle D \rangle (I_j) \times P(I_j; T, x) \quad [10]$$

$$\langle R \rangle (E, X, T) = \sum_j L_j \times \langle D \rangle (I_j)_{\text{global}} \times P(I_j; T, x) \quad [11]$$

Estas ecuaciones son aplicables en la determinación de pérdidas por daños directos a construcciones, infraestructuras etc. Los daños a personas se suelen determinar mediante el uso de tablas que establecen la relación entre estados de daño de edificios y porcentaje de la población en cada uno de los estados de daño a personas (generalmente, fallecidos, heridos, desplazados). Relaciones empíricas de este tipo han sido propuestas por distintos autores, entre ellos Whitman y Cornell (1976), cuya tabla se reproduce aquí como tabla 3, y Rojahn y Sharpe en el informe ATC-13 (1985). También se han propuesto otras relaciones expresadas mediante factores que tienen en cuenta el número de habitantes por vivienda y la ocupación de éstas en función de la hora (Coburn y Spence, 1994, Chavez y otros, 1999).

2.5.2. Escenarios de Daños (ED)

En el análisis de Riesgo sísmico se incluye también la estimación de Escenarios de Daños por terremoto, definidos como la descripción y evaluación de los posibles efectos de un sismo concreto sobre una ciudad o una región. Los ED de mayor interés son los que se refieren a:

- Daños ocasionados por un sismo que ha tenido lugar, cuyos parámetros focales (*localización, magnitud*) son conocidos. El objetivo de la estimación de estos daños es la identificación de los medios que han de aportarse en la ayuda inmediata a la zona afectada por el terremoto.
- Daños que puede ocasionar a una ciudad o una región un terremoto hipotético que alcanzase en ella una intensidad cuya probabilidad de ocurrencia tenga un valor fijado. Su estimación permitirá prevenir medidas para reducir tales efectos; es además útil en la toma de decisiones sobre ubicación de industrias peligrosas y, en general, en problemas relacionados con ordenación territorial y urbana.

La estimación de estos escenarios se ha llamado (Whitman, 1988) análisis determinista del Riesgo sísmico, por contraposición a la de los descritos en 2.5.1, que se considera análisis probabilista. En todo caso, los escenarios de daño se obtienen mediante expresiones semejantes a la [7] para un único valor de la intensidad I .

$$ED(I) = \sum_k D_k(I) = \sum_k \sum_i P(D_{i,k}/I) \times N_k \quad [12]$$

3. MÉTODO ABREVIADO DE ESTIMACIÓN DE RIESGO SÍSMICO Y ESCENARIOS DE DAÑOS

Las relaciones deducidas en el apartado anterior permiten el cálculo del Riesgo Sísmico y de Escenarios de daños de una ciudad. Como se dijo en la Introducción, el propósito de esta nota es presentar un método *suficientemente riguroso que haga posible la estimación, en un tiempo relativamente breve, del Riesgo Sísmico de grandes áreas, tales como las comprendidas en el programa previsto por la Dirección General de Protección Civil*. En este capítulo se describen las características esenciales de este método, cuya idea general es reducir en lo posible el esfuerzo de adquisición y análisis de la información de partida.

3.1. Adquisición y análisis de datos

3.1.1. Peligrosidad Sísmica

La estimación del riesgo y de Escenarios de Daño de un núcleo de población requiere obtener previamente la Peligrosidad Sísmica de la zona donde se asienta la ciudad, lo que lleva consigo un proceso complejo, como se pone de relieve en este mismo volumen. Este proceso puede obviarse si se aceptan los resultados de análisis previos. En particular, para el estudio de grandes áreas de España, como el previsto en la Directriz de Protección Civil, es recomendable recurrir en un primer análisis a los datos deducidos por el Instituto Geográfico Nacional, incluidos en el Mapa y la Lista de Peligrosidad Sísmica que incluye la norma NCSE-94. Sólo para áreas identificadas como de particular interés se llevarán a cabo análisis más completos.

3.1.2. Elementos en riesgo y su clasificación

También la adquisición de datos sobre los distintos tipos de elementos en riesgo en la ciudad (edificaciones, instalaciones industriales, infraestructura viaria, redes de mantenimiento, personas), y de su distribución según características directamente relacionadas con su vulnerabilidad sísmica, requiere un gran esfuerzo aun para ciudades de tamaño medio. En la metodología que se propone éste se reduce mediante la aceptación de dos simplificaciones:

- Se consideran únicamente, en el estudio previo, dos grupos de elementos: personas y edificaciones. Recordemos que los daños a estos grupos constituyen generalmente la parte más importante de los producidos por los terremotos sobre una ciudad.
- Se considera suficiente la descripción sobre las características y distribución de tales elementos incluida en censos, inventarios y catálogos preparados por organismos oficiales, tales como el Catastro de la Propiedad Urbana, Ayuntamientos, Instituto Nacional de Estadística, etc. En lo que se refiere a edificios, estos documentos suelen contener datos tales como año de construcción, tipo de estructura, número de plantas o viviendas, uso, etc. que permiten establecer una clasificación en tipos asimilable a la establecida en publicaciones como la escala EMS-98.

Tabla 2. Matrices de probabilidad de daño (Braga et al., 1982, 1985)

CLASE A						
Intensidad	Nivel de Daño					
	0	1	2	3	4	5
VI	0,188	0,373	0,296	0,117	0,023	0,002
VII	0,064	0,234	0,344	0,252	0,092	0,014
VIII	0,002	0,020	0,108	0,287	0,381	0,202
IX	0,0	0,001	0,017	0,111	0,372	0,498
X	0,0	0,0	0,002	0,030	0,234	0,734

CLASE B						
Intensidad	Nivel de Daño					
	0	1	2	3	4	5
VI	0,36	0,408	0,185	0,042	0,005	0,0
VII	0,188	0,373	0,296	0,117	0,023	0,002
VIII	0,031	0,155	0,312	0,313	0,157	0,032
IX	0,002	0,022	0,114	0,293	0,376	0,193
X	0,0	0,001	0,017	0,111	0,372	0,498

CLASE C						
Intensidad	Nivel de Daño					
	0	1	2	3	4	5
VI	0,715	0,248	0,035	0,002	0,0	0,0
VII	0,401	0,402	0,161	0,032	0,003	0,0
VIII	0,131	0,329	0,330	0,165	0,041	0,004
IX	0,050	0,206	0,337	0,276	0,113	0,018
X	0,005	0,049	0,181	0,336	0,312	0,0116

3.1.3. Vulnerabilidad de las edificaciones

Las primeras funciones de vulnerabilidad y fragilidad publicadas, así como las matrices de probabilidad de Daño, corresponden a tipos de edificios definidos según criterios puramente estructurales, y en ellas se consideraban como parámetros de intensidad del movimiento del suelo la Intensidad Macrosísmica (MMI ó MSK-74) o la aceleración máxima horizontal; no siempre hacían referencia a la base observacional de la que se habían deducido. Las propias escalas macrosísmicas (una vez traducidos los términos “poco, mucho, la mayoría” a porcentajes numéricos) definen Matrices de Probabilidad de Daño. En época más reciente se han llevado a cabo extensos análisis del comportamiento de miles de edificios con ocasión de terremotos destructores (entre ellos Irpinia, 1980, e Italia central, 1984), que han permitido deducir Matrices de Probabilidad de Daño para las clases de edificios consideradas en las escalas macrosísmicas MSK (Braga et al., 1982, 1986) y EMS-95 (Chávez, 1998), a las que reducen las 15 tipologías estructurales identificadas en la zona afectada; en ambos trabajos se obtuvieron los términos de las MPD mediante ajuste de las observaciones para cada grado de Intensidad (VI a X) a una distribución binomial. Dadas las semejanzas en la construcción en las zonas de mayor sismicidad de España y en las de Italia, proponemos el uso de las MPD así obtenidas u otras semejantes en el cálculo previo del Riesgo Sísmico y de Escenarios de Daños en áreas españolas.

3.1.4. Vulnerabilidad de las personas

En los daños a personas se suelen considerar cuatro “estados de daño”:

1. Atrapados, que requerirán medios de búsqueda y desescombro.
2. Fallecidos en el momento del terremoto, para los que se habrá de habilitar medios de inhumación.
3. Heridos, que precisarán medios de transporte, atención y hospitalización.
4. Desalojados de sus viviendas, que precisarán albergue y mantenimiento.

Evidentemente, los conjuntos definidos por esta clasificación no son disjuntos, pero Protección Civil necesita una estimación del número esperado de personas en cada caso.

Por otra parte, como ya dijimos, no pueden establecerse Matrices de Probabilidad de Daño a las personas como función directa de la Intensidad Sísmica. Se han obtenido relaciones del tipo $P(D_p / D_c)$ entre estados de daño a

personas (D_p) y edificios (D_e), como la propuesta por Whitman (1988) que reproducimos en la tabla 3; y se han desarrollado otras expresiones que corresponden a particularizaciones de la relación general

$$Np^h = \sum_k \sum_i Nc^{k,i} \times Np^k \times Dp^{h,i} \quad [13]$$

donde:

Np^h = número total de personas con daño de tipo h (h = 1, 2, 3, 4 para muertos, heridos, atrapados y desplazados, respectivamente).

$Nc^{k,i}$ = número de edificios de clase k con daño de nivel i.

Np^k = número medio de ocupantes de cada edificio de clase k.

$Dp^{h,i}$ = porcentaje de personas con daño de tipo h para un daño a edificios de nivel i.

Tabla 3. Matriz de probabilidad de daño (Whitman y Cornell, 1976)

Estado de daño	Designación del nivel de daño	Porcentaje de pérdidas		Porcentaje de heridos (1)	Porcentaje de muertos (1)
		rango	valor central		
Sin daños; daños insignificantes en elementos no estructurales	Sin daño	0-0,05	0	0	0
Daños menores, localizados, en elementos no estructurales	Leves	0,05-1,25	0,3	0	0
Daños generalizados en elementos no estructurales; daños fácilmente reparables en elementos estructurales	Moderados	1,25-20	5	1	0
Daños estructurales; posible daño total en elementos no estructurales	Importantes	20-65	30	2	0,25
Daños irreparables	Total	65-100	100	10	1
Desplome total o parcial	Ruina	100	100	100	20

(1) Valor central referido al total de ocupantes.

Entre estas expresiones pueden citarse la dada por Coburn y Spence (1992), empleada también por Chávez et al. (1999).

No obstante, sobre la distribución en estados de daño de los habitantes de una ciudad influyen también factores tales como la ocupación de los edificios a la hora en que ocurre el terremoto (función de a su vez del uso de los mismos) y la condición social de los habitantes de cada zona de la ciudad, por lo que la validez de las relaciones citadas se reduce al área para la que se han obtenido. Por ello proponemos el uso de las relaciones de Coburn y Spence (1992) o las desarrolladas en el trabajo de López Arroyo y Villacañas (1996).

3.2. Desarrollo del cálculo

Aunque el tiempo de cálculo es prácticamente el mismo utilizando la expresión general del Riesgo Sísmico o considerando éste como Daño medio esperado, en algunas aplicaciones se opta por esta última versión (caso de los seguros de terremotos) y, por otra parte, para determinados tipos de estructuras se dispone sólo de curvas de vulnerabilidad, no de MPD. Por ello, en el método abreviado es aconsejable utilizar la segunda opción. Las ecuaciones aplicables son, por lo tanto, la [11] para el cálculo del Riesgo y la [12] para Escenarios de Daño. Todos los datos que aparecen en ellas han sido deducidos en el apartado anterior, así que el resultado final se obtiene de forma directa.

4. CONSIDERACIÓN FINAL

La fiabilidad de los resultados obtenidos mediante este método depende de la aproximación de las hipótesis admitidas a las condiciones reales. Conviene insistir en que el método pretende proporcionar una solución rápida al problema de estimación del riesgo sísmico y que uno de sus objetivos es la identificación de las zonas y poblaciones para las que es necesario llevar a cabo un estudio más riguroso.

El trabajo anterior (López Arroyo y Villacañas, 1996) contiene ejemplos de cálculo de Riesgo Sísmico y Escenario de daños que no han sido incluidos en este resumen.

BIBLIOGRAFÍA

- ALGERMISSEN, S. T. y STEINBRUGGE, K.V. (1984). "Seismic Hazard and Risk Assessment. Some Case Studies". *The Geneva Papers on Risk and Insurance*, v. 9, n.º 30, pp. 8-26.
- BOISSONNADE, A. C. y SHAH, H. C. (1984). "Seismic Vulnerability and Insurance Studies", *The Geneva Papers on Risk and Insurance*, v. 9, n.º 39, pp. 223-254.
- BRAGA, F., DOLCE, M. y LIBERTORE, D. (1982). "A Statistical Study on Damaged Buildings and an ensuing Review of MSK-76 Escala". 7th European Conf. Earthq. Eng.
- BRAGA, F., DOLCE, M. y LIBERTORE, D. (1985). "Statistical Study of Damage Data from 23.11.1980 Italy Earthquake". U.S.-Italy Workshop on Seismic Hazard and Risk Analysis, Varena, Italy.
- BRAGA, F., DOLCE, M. y LIBERTORE, D. (1986). "Assesment of the Relationship between Macroseismic Intensity, Type of Building and Damage, based on recent Italy Earthquake Data". Proc. 8th European Conf. Earthq. Eng., Lisboa, 3.1., 39-46.
- COBURN, A. y SPENCER, R. (1992). "Earthquake Protection". J. Wiley, Great Britain, 355 p.
- CHÁVEZ, J. (1998). "Evaluación de la Vulnerabilidad y el Riesgo Sísmico a Escala Regional: Aplicación a Cataluña". Tesis Doctoral, Univ. Barcelona.
- CHÁVEZ, J., GOULA, X., ROCA, A., MAÑA, F., PRESMANES, J. y LÓPEZ ARROYO, A. "Preliminary Risk Assesment for Catalonia (Spain)".
- DUTTON, C. E. (1904). "Earthquakes in the Light of the New Seismology". John Murray, London, 314 p.
- EERI COMMITTEE ON SEISMIC RISK (1989). "The Basics of Seismic Risk Analysis". *Earthquake Spectra*, vol. 5, 675-702.
- EUROPEAN SEISMOLOGICAL COMMISSION (1998). "European Macroseismic Scale 1998, EMS-98". Grüntal ed. Luxembourg.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (1994). "Norma de Construcción Sismorresistente (parte general y edificación). NCS-94".
- KIRCHER, C. A. y McCANN, M. W. (1983). "Development of Seismic Fragility Curves for sixteen Types of Structures common to Cities of the Mississippi Valley Region". J. R. Benjamin Assoc., Mountain View, California.
- KIREMDJIAN, A. (1992). "Methods for Regional Damage Estimation". Proc. 10WCEE, Madrid, pp. 6753-6762.
- LÓPEZ ARROYO, A. (1991). "Macroseismic Intensity Scales in Hazard and Risk Studies". Comm. Europ. Comm., "Earthquake Hazard Assesment", Fantechi y Almeida ed. 1-18.

- LÓPEZ ARROYO, A. y VILLACAÑAS, J. (1996). "Análisis del Riesgo Sísmico: Metodología". OFITECO-IOMA.
- PROTECCIÓN CIVIL (1995). "Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico".
- ROJAHN, C. y SHARPE, R. L. (1985). "Earthquake Damage Evaluation Data for California". Report ATC-13 del Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency, U.S.
- SAUTER, F. (1979). "Damage Prediction for Earthquake Insurance". Proc. 2nd U.S. Nat. Conf. Earthq. Eng. Stanford.
- UNDRO (1979). "Natural Disasters and Vulnerability Analysis". Report Expert Group Meeting, Geneva, 49 p.
- WHITMAN, R.V. (1988). "Earthquake Loss Estimation Methodology" en Earthquake Prognostics, ed. A. Vogel y K.Brandes, Vieweg, pp. 259-278.
- WHITMAN, R.V. y CORNELL, C.A. (1976). "Design". In: Seismic Risk and Engineering Decisions, ed. Lomnitz y Rosenblueth, Elsevier, pp. 339-380.