

TERREMOTOS

EVALUACIÓN Y MITIGACIÓN DE SU PELIGROSIDAD



EDITORIAL BLUME
Milanesado, 21-23 – Barcelona-17

unesco

7, place de Fontenoy
75700 París

TERREMOTOS



Título original: *The assesment and mitigation of earthquake risk*, © Unesco 1978

Primera edición, 1980

ISBN 92-3-301451-7 Unesco

ISBN 84-7031-155-7 Editorial Blume

Diseño sobrecubierta: Jordi Godia

© Unesco 1980

Impreso en España

Depósito legal: B-8.030-1.980

Impreso por Talleres Gráficos L & E, S.A., Barcelona

Las designaciones empleadas y la presentación adoptada no deben interpretarse como expresión de la posición del Secretariado de la Unesco sobre el estatuto legal o el régimen de un país o territorio cualquiera ni sobre el trazado de sus fronteras.

Presentación

Con motivo de la conferencia internacional sobre evaluación y mitigación de los riesgos sísmicos, realizada en la Sede de la UNESCO en febrero de 1976, se invitó a especialistas cualificados en sismología, en ingeniería antisísmica y en aspectos sociales y económicos de los riesgos que entrañan los terremotos, para que prepararan ponencias de debate sobre los temas incluidos en la agenda de la conferencia. Una vez finalizada la conferencia, los autores revisaron y ampliaron sus aportaciones y las convirtieron en los artículos que forman los distintos capítulos de este libro. Constituyen un resumen del estado actual de conocimientos sobre los terremotos, sobre sus efectos sociales y económicos y sobre las medidas que se pueden tomar para reducir las pérdidas que provocan.

Sería de desear que este libro lo usaran no sólo los especialistas en la materia, sino también todos aquellos a quienes, de uno u otro modo, concierne la reducción de las pérdidas materiales y de vidas humanas provocadas por este fenómeno natural, uno de los más devastadores.

La UNESCO desea expresar su reconocimiento a los autores que tuvieron la gentileza de redactar los distintos capítulos de este libro, al tiempo que señala que el contenido refleja sus opiniones personales y no necesariamente las de la Organización.

Lista de colaboradores

- Dr. S.T. Algermissen*, U.S. Geological Survey, Denver Federal Center, Box 25046 Stop 978, Denver, Colorado 80225, U.S.A.
- Prof. N.N. Ambraseys*, Department of Civil Engineering, Imperial College of Science and Technology, Imperial Institute Road, London SW7 2BU, U.K.
- Prof. Ian Burton*, Department of Geography, University of Toronto, Toronto, Canada
- Dr. A. Ciborowski*, Instytut Kształtowania Środowiska, ul. Bracka 4, Warszawa, Poland
- Mr. J. Douard*, 7 Résidence des Trois Forêts, 78380 Bougival, France
- Prof. D.I. Gough*, Institute of Earth and Planetary Physics, The University of Alberta, Edmonton, Canada T6G 2E1
- Dr. W.J. Hall*, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois 61801, U.S.A.
- Dr. E.L. Jackson*, Department of Geography, The University of Alberta, Edmonton, Canada T6G 2H4
- Dr. V. Karnik*, Geophysical Institute, Sporilov 1401, 14100 Praha 4, Czechoslovakia
- Dr. T. Katayama*, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 7-22-1, Roppongi, Minato-ku, Tokyo, Japan
- Prof. K. Kubo*, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 7-22-1, Roppongi, Minato-ku, Tokyo, Japan
- Mr. T. Whitley Moran*, 142 Meols Parade, Hoylake, Wirral, Merseyside L47 6AN, U.K.
- Dr. I.L. Nersesov*, Institute of Physics of the Earth, Bolskaya Gruzinskaya 10, Moscow 123810, U.S.S.R.
- Prof. N.M. Newmark*, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois 61801, U.S.A.
- Prof. S. Okamoto*, President, Saitama University, Shimo-okubo, Urawa, Saitama, Japan
- Mr. P.C. Perrenoud*, Swiss Reinsurance Company, 60, Mythenquai, CH- 8022 Zurich, Switzerland
- Dr. J. Petrovski*, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, University Kiril and Metodji, P.O. Box 101, 91000 Skopje, Yugoslavia
- Dr. S. Sachanski*, Secretary, National Committee on Earthquake Engineering, Bulgarian Academy of Sciences, Ul. '7 Noemvri' No. 1, Sofia, Bulgaria
- Prof. E.F. Savarensky*, Chairman, Seismological Council of the U.S.S.R., Institute of Physics of the Earth, Bolskaya Gruzinskaya 10, Moscow 123810, U.S.S.R.
- Dr. S.L. Soloviev*, Sakhalin Complex Scientific Research Institute, Academy of Sciences of the U.S.S.R., Novoalexandrovsk, Sakhalin 694050, U.S.S.R.
- Mr. E. Straub*, Swiss Reinsurance Company, 60, Mythenquai, CH- 8022 Zurich, Switzerland

Sumario

Parte I. *Evaluación del riesgo sísmico*

1 Zonificación sísmica, por Vít Kárník y S.T. Algermissen	11
2 Microzonificación sísmica y problemas conexos, por Jakim T. Petrovski .	50
3n Predicción de terremotos, por E.F. Savarenskij e I.L. Nersesov	69
4 Sismicidad inducida, por D.I. Gough	95
5 Tsunamis, por S.L. Soloviev	124
6 Estudio de los terremotos en el terreno, por N.N. Ambraseys	147

Parte II. *Medidas de ingeniería para la reducción de pérdidas*

7 Edificaciones: códigos, materiales, diseño, por S. Sachanski	167
8 Propiedades sísmo-resistentes y diseño de servicios públicos, por Keizaburo Kubo y Tsumeo Katayama	182
9 Tendencia actual del diseño sísmo-resistente de grandes presas, por Shunzo Okamoto	198
10 Diseño sísmo-resistente de plantas de energía nuclear, por Nathan M. Newmark y William J. Hall	212
11 Refuerzo de las estructuras dañadas por los sismos, por T. Whitley Moran	234

Parte III. *Implicaciones del riesgo sísmico*

12 El proceso del ajuste humano al riesgo sísmico, por Edgar L. Jackson e Ian Burton	257
13 El seguro y las consecuencias económicas de los terremotos, por P. Perrenoud y E. Straub	278
14 Algunos aspectos de la planificación del desarrollo físico para asenta- mientos humanos en las regiones propensas a terremotos, por Adolf Ciborowski	292
15 Implicaciones sociales y administrativas: protección, socorro y rehabi- litación, por Jean Douard	304

Parte IV. *Informe final de la Conferencia intergubernamental sobre la evalua- ción y la disminución de los riesgos sísmicos, París, 10-19 de febrero de 1976*

323

Parte I

Evaluación del riesgo sísmico

1 Zonificación sísmica

Por VÍT KÁRNÍK y S.T. ALGERMISSEN

1.1 Introducción

En áreas sujetas a sismos, cualquier toma de decisión referente a la planificación regional y urbana, así como al diseño antisísmico, debe basarse en el conocimiento de las características de los probables terremotos que pueden ocurrir en el futuro. Este conocimiento se obtiene mediante el procedimiento comúnmente llamado «zonificación sísmica». Se debe señalar que esta expresión no se refiere ni a la influencia de las condiciones locales del suelo, que corresponde al dominio de la *microzonificación* sísmica, ni tampoco a los problemas técnicos de la interacción suelo-estructura. En principio, el resultado principal de la zonificación sísmica es un mapa (o mapas) que muestra una cantidad (o cantidades) relacionadas con la frecuencia e intensidad esperadas de la sacudida que pueden provocar los sismos futuros en las cercanías del lugar de que se trate.

Los efectos sísmicos pueden ser divididos en tres categorías (Algermissen y otros, 1975),

- a. Efectos resultantes de un cierto nivel, frecuencia y duración de la sacudida.
- b. Efectos resultantes de las fallas en el área epicentral.
- c. Efectos resultantes de la generación de tsunamis.

Los fenómenos geológicos que acompañan a los terremotos, tales como deslizamientos de tierra, desplomes o licuefacción, suceden como consecuencia de la *constitución física del material* o por las condiciones del emplazamiento, pero todos son desencadenados por la sacudida del terreno. Las relaciones entre la sacudida y los efectos geológicos son bastante complicadas y ningún parámetro simple será óptimo para la estimación de todos los riesgos geológicos. El peligro de los tsunamis representa un problema especial en algunas áreas costeras.

El significado del término «zonificación sísmica» ha experimentado algunos cambios, de modo que ahora existen diferencias en el contenido de los mapas de zonificación. Ciertos mapas de zonas sísmicas sintetizan de manera simple las observaciones de los efectos de sismos pasados y parten del supuesto de que en el futuro se repetirá el mismo modelo de actividad sísmica, otros mapas de zonificación van más allá y extrapolan las regiones y efectos pasados para predecir las nuevas fuentes

potenciales de sismos, y los efectos correspondientes. El primer tipo de mapas, que todavía se sigue utilizando ampliamente, descuida por completo las posibles regiones potenciales de sismos en aquellas áreas en donde ha habido calma en la actividad durante el periodo de observación. Ocasionalmente, estos mapas pueden causar «sorpresas sismológicas» con graves consecuencias económicas. Los mapas del segundo tipo son más difíciles de compilar y los problemas que plantean serán discutidos posteriormente.

Otro problema que se presenta en la compilación de mapas es la elección de los parámetros que deben ser incluidos en la cartografía. Estos mapas se compilan por razones prácticas y su contenido varía de acuerdo con las necesidades y en conformidad con la información de que se dispone para cada región. En la actualidad los mapas de zonificación sísmica que figuran en los códigos oficiales de construcción indican por lo general la división del territorio en dos o tres zonas clasificadas o bien de acuerdo con los grados de intensidad macrosísmica VII, VIII y IX o bien como zonas A, B, C, etc., que están relacionadas a los coeficientes sísmicos tabulados en el código. No obstante, están aumentando las necesidades a este respecto y se requieren datos directamente relacionados con el diseño antisísmico, por ejemplo, para el diseño de determinados tipos de estructuras se necesita conocer la aceleración máxima o velocidad máxima de las partículas, el periodo predominante de sacudida, la densidad espectral y su frecuencia probable. Lo ideal consistiría en disponer para cada punto de los espectros de diseño (o acelerogramas) debidos a terremotos correspondientes a todas las regiones fuente de los alrededores y definir su probabilidad. Sin embargo, estamos aún muy alejados de esa meta y solamente el conocer razonablemente las cantidades que representan las sacudidas fuertes del terreno ya constituiría un gran avance.

Finalmente, habrá que definir las condiciones del terreno de referencia, con las cuales guardan relación las cantidades del mapa. La palabra «roca» no es entendida por los especialistas del mismo modo y debe especificarse exactamente cuando se emplea. Ciertos mapas de intensidad se refieren a las «condiciones promedio del terreno», que se definen como suelo consolidado, arcilla, etc.

La compilación de un mapa de zonificación sísmica debería basarse en una precisa definición de las variables comprendidas. La información puede ser dividida en cuatro categorías (fig. 1.1.).

A. Parámetros sísmicos.

B. Parámetros dinámicos de las ondas sísmicas como funciones de distancia, profundidad focal y magnitud.

C. Observaciones macrosísmicas.

D. Aspectos geotectónicos y geofísicos.

Se debe observar que la información contenida en la categoría B se refiere únicamente a las vibraciones elásticas. Pero las deformaciones permanentes que ocurren por efecto de los terremotos fuertes hacen que su predicción sea muy complicada. Sin embargo, existe la posibilidad de hacer una estimación grosso modo sobre todo en las áreas donde se conocen las condiciones geológicas.

Esta información básica debe ser procesada y analizada antes que se pueda preparar un mapa de zonificación sísmica. Para la estimación de las implicaciones económicas y humanas se necesita información adicional; sin embargo, estas consideraciones están fuera de la finalidad de la zonificación sísmica y pertenecen más al análisis del riesgo sísmico.

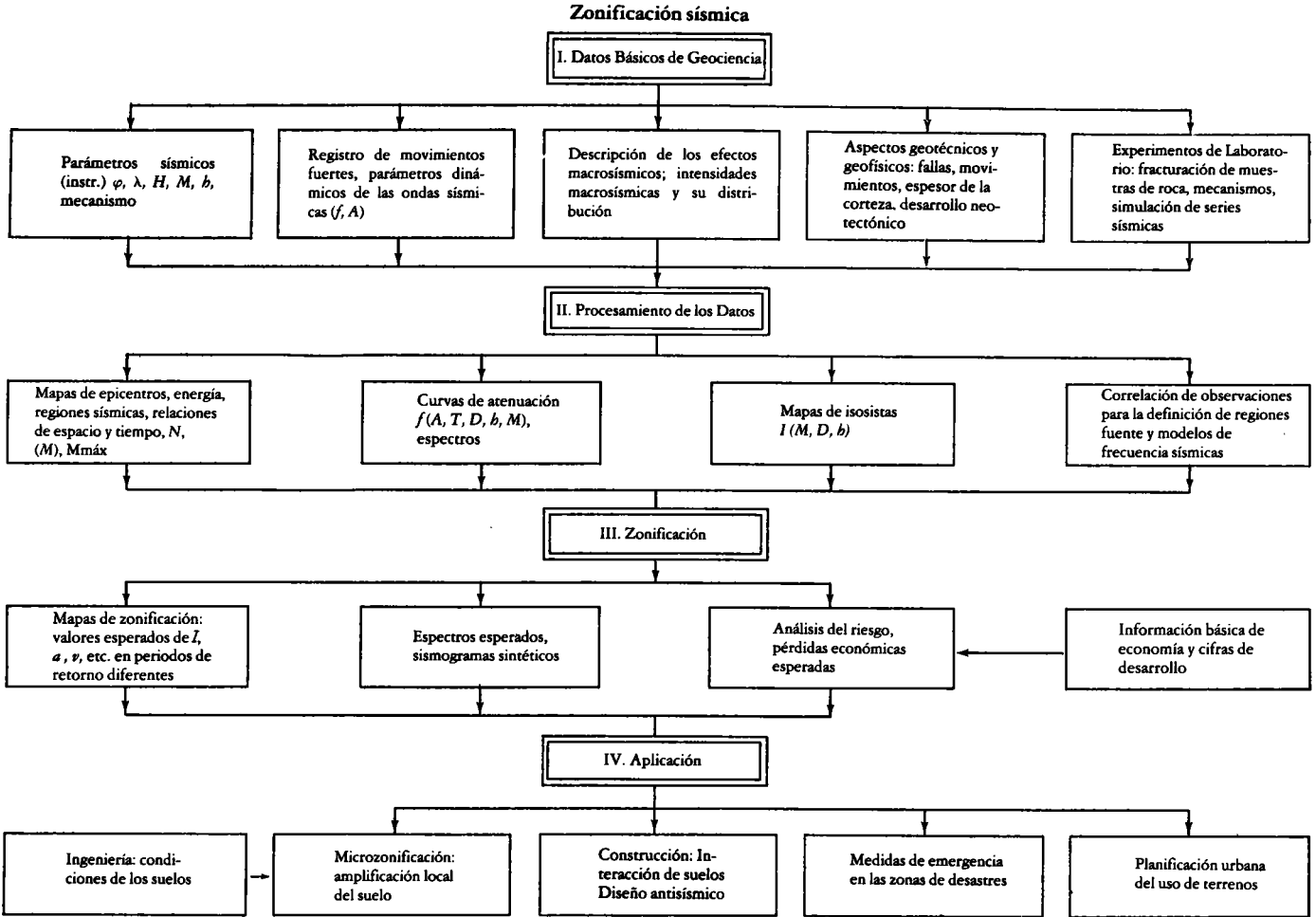


Figura 1.1. Mapa de Zonificación Sísmica.

El tratamiento de los datos originales incluye análisis estadísticos, mapas que exhiban diversas características de los terremotos y de la geotécnica, curvas de atenuación, relaciones espacio-temporales, correlación y modelos de predicción estadística (fig. 1.1.). Luego, los resultados del tratamiento de los datos serán empleados en la zonificación y en el análisis de los riesgos sísmicos y posteriormente se aplicarán al diseño antisísmico y a la planificación urbanística.

1.2 Datos básicos de geociencia

1.2.1 Observación de sismos: parámetros de la fuente

La mayor parte de los focos sísmicos se encuentran concentrados a lo largo de fajas relativamente angostas que señalan los contactos entre las grandes placas litosféricas o bloques. La mayoría de los terremotos se originan dentro de la corteza terrestre; pero en la faja pacífica su profundidad llega hasta 700 km y en la faja asiática mediterránea, hasta 300 km (con algunas excepciones de focos más profundos). En mapas a pequeña escala el modelo mundial de la actividad sísmica parece engañosamente simple; y la definición y descripción de la actividad sísmica para propósitos de zonificación origina problemas de difícil solución.

En general, cuando se prepara un mapa de zonificación sísmica de una región se necesita en primer lugar definir un «modelo generador de eventos sísmicos». Este modelo ha de permitir predecir las futuras secuencias sísmicas posibles de la región. Cada secuencia se describe (por lo menos) por el momento, la ubicación y magnitud de los futuros eventos. El primer paso para establecer un modelo de la frecuencia espacial y temporal de los terremotos consiste en acumular datos sobre los sismos anteriores. Los datos sismológicos básicos se encuentran en los catálogos de los terremotos registrados u observados por encima de un cierto nivel de magnitud (p. ej. $M = 4$). Los parámetros sísmicos básicos son: fecha, tiempo de origen, coordenadas del foco, magnitud e intensidad epicentral; otros parámetros útiles son las dimensiones de las fallas, la disminución del esfuerzo, el momento sísmico y las soluciones de los planos de falla. Se requieren además una documentación detallada sobre los daños acarreados y mapas de isosistas. En todos los casos es importante conocer la precisión de los parámetros medidos.

Hay otras complicaciones y problemas que deberían mencionarse. Las coordenadas epicentrales se conocen con grados variables de precisión que varían entre unos pocos kilómetros y 100 km (el valor más conocido es ± 10 -20 km). Los epicentros de algunos terremotos del siglo XX y todos los de los siglos anteriores se definen como los centros de las áreas más fuertemente sacudidas, es decir el área de intensidad $I_{m\acute{a}x}$.

La profundidad focal se determina con un grado menor de precisión que las coordenadas epicentrales. Por lo común para profundidades mayores de 70-80 km la exactitud es ± 10 -20 km. Para profundidades menores (1-70 km) sólo una red local muy densa puede localizar focos con una exactitud de ± 5 -10 km de profundidad. El foco sísmico se define como un punto fuente, pero esta suposición no es del todo correcta, puesto que la energía sísmica liberada en la fracturación se puede extender a considerable distancia tanto en sentido horizontal como vertical, particu-

larmente si el sismo es bastante grande. Esta distancia puede ser de 200 km o más para $M = 8$. Así, las coordenadas focales corresponden sólo al punto de la falla donde se generó el primer impulso de la onda longitudinal P que llegará a las estaciones.

En las regiones donde existen colecciones completas de observaciones macrosísmicas las profundidades focales se pueden calcular por medio de fórmulas empíricas o curvas que relacionan la intensidad, la distancia epicentral y la profundidad del foco. Estas determinaciones, si se basan en tres o más radios de isosistas, pueden ser consideradas más fiables que las basadas en datos instrumentales incompletos.

Para la clasificación del «tamaño» de un sismo se emplean varias cantidades, especialmente la intensidad macrosísmica en el epicentro (I_0) y la magnitud (M).

La intensidad I_0 es una cantidad no-instrumental que se fija de acuerdo con los efectos geológicos observados, con los daños a las estructuras y con la percepción individual de las sacudidas, y se expresa en grados de una escala de intensidad. Por lo común, en una escala de 12 grados, la intensidad puede ser estimada con una precisión de la mitad de un grado. La magnitud M está basada en la amplitud máxima registrada de las ondas sísmicas. Es una medida instrumental bastante independiente de todo criterio subjetivo. En la práctica existen varias escalas de magnitud que se han basado en la medición de varios tipos de onda. En general, estas escalas variadas coinciden sólo en ciertos aspectos. La escala original de magnitud está basada en la máxima amplitud registrada a una distancia de 100 km del epicentro, en un sismómetro de torsión Wood-Anderson con determinadas constantes instrumentales (Richter, 1935). El error patrón de una determinación de magnitud es por lo común de $\pm 0,3$ unidades de la escala.

Algunos investigadores han clasificado los terremotos usando la energía sísmica (E) liberada en los terremotos o la cantidad definida como $K - \log_{10} E$ (E en joules); ésta se ha empleado en los catálogos de la Unión Soviética. Hay otras cantidades físicamente definidas, como la caída de tensión o disminución del esfuerzo y el momento sísmico. El momento sísmico M_0 se define por la fórmula

$$M_0 = \mu LS, \quad (1.1)$$

donde L es la dislocación promedio de la falla durante un terremoto, μ es la rigidez y S es el área fallada. La disminución del esfuerzo $\Delta\sigma$ es la diferencia entre el esfuerzo de cizalla en la superficie de la falla antes y después de la ruptura

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2. \quad (1.2)$$

Sin embargo esas cantidades, todavía no han sido determinadas para ninguna serie grande de sismos.

Otro punto de información importante sobre el foco sísmico lo dan las soluciones de planos de falla derivados de modelos simplificados de fuerzas, tales como un par simple o-doble actuando en la fuente sísmica. Los planos de falla y su orientación se determinan por lo general analizando la distribución del primer movimiento (compresión o dilatación) de la onda longitudinal P. No obstante, el método no permite distinguir el plano de falla de los planos auxiliares perpendiculares. La solución puede encontrarse investigando el modelo de irradiación de las amplitudes de las ondas S (de cizalla) o haciendo una exploración en el terreno. Se ha evaluado la exactitud de tales soluciones en el análisis hecho en la región balcánica por

Ritsema (1974): el 12 % de las soluciones fueron de calidad A (es decir, la posible variación de los ejes principales fue menor de 10°), el 24 % de calidad B (es decir, la variación de uno de los ejes fue menor de 10°), etc. Por lo general se dispone de soluciones de planos de falla para los terremotos con $M > 6$; sin embargo, no han sido aún determinadas de forma rutinaria por los principales centros sismológicos.

1.2.2 Ondas sísmicas a una corta distancia epicentral

Con el objeto de determinar los efectos sísmicos en un punto determinado, se ha de conocer cómo se originan y se atenúan las ondas sísmicas durante su transmisión. La «atenuación» describe el comportamiento de un parámetro dado en función de la distancia epicentral, de la profundidad de foco, la magnitud y los mecanismos focales. Se puede emplear cualquier parámetro de diseño apropiado; la situación ideal sería disponer de una serie de registros para la gama entera de variables (distancia, profundidad focal, magnitud, región) en relación al terreno en referencia, lo que en la actualidad no es posible. En la práctica, se emplea un solo o varios parámetros para representar el movimiento del terreno, por ejemplo los desplazamientos máximos, la aceleración máxima y los correspondientes periodos de ondas, la duración del movimiento a partir de un cierto nivel de amplitud, la intensidad espectral, etc. A falta de tales datos experimentales, algunos autores de mapas de zonificación han calculado curvas de atenuación de la intensidad macrosísmica. Una curva de atenuación simplificada para un parámetro X se puede describir con la fórmula

$$X = a_1 \exp a_2 MD^{-a_3} \quad (1.3)$$

donde a_1, a_2, a_3 son constantes, M la magnitud y D la distancia hipocentral.

El problema principal es recopilar los datos experimentales a distancias epicentrales que son de importancia para la zonificación, es decir, menores de 300 km. Desafortunadamente, es casi la gama para la cual los datos son escasos, ya que la mayor parte de los sismógrafos tienen un margen dinámico insuficiente para registrar tanto el movimiento fuerte del terreno como las ondas provenientes de sismos pequeños o distantes. Por esta razón, más de 2000 instrumentos de movimientos fuertes, especialmente acelerógrafos, han sido instalados durante la última década para extender el rango dinámico del registro sísmico.

Los problemas de la sismología de movimientos fuertes fueron revisados durante el *Simposium Internacional de Movimientos Sísmicos Fuertes*, realizado en la ciudad de México, del 14 al 18 de agosto de 1972 (para mayores detalles véase el informe SC/WS/535, UNESCO, 11 de mayo de 1973). Al presente hay tres fuentes de información sobre movimientos fuertes: (a) Registro de movimientos fuertes (principalmente datos de aceleración) y las correspondientes funciones distancia-magnitud-aceleración (figs. 1.2 a, b, c). (b) Funciones amplitud-distancia usadas como curvas de calibración de magnitud (desplazamiento o velocidad de la partícula en terremotos de tamaño débil y medio). (c) Relaciones macrosísmicas de intensidad, distancia y profundidad.

El primer grupo proporciona la información más fiable, porque los instrumentos se han diseñado especialmente para registrar los movimientos fuertes del terreno.

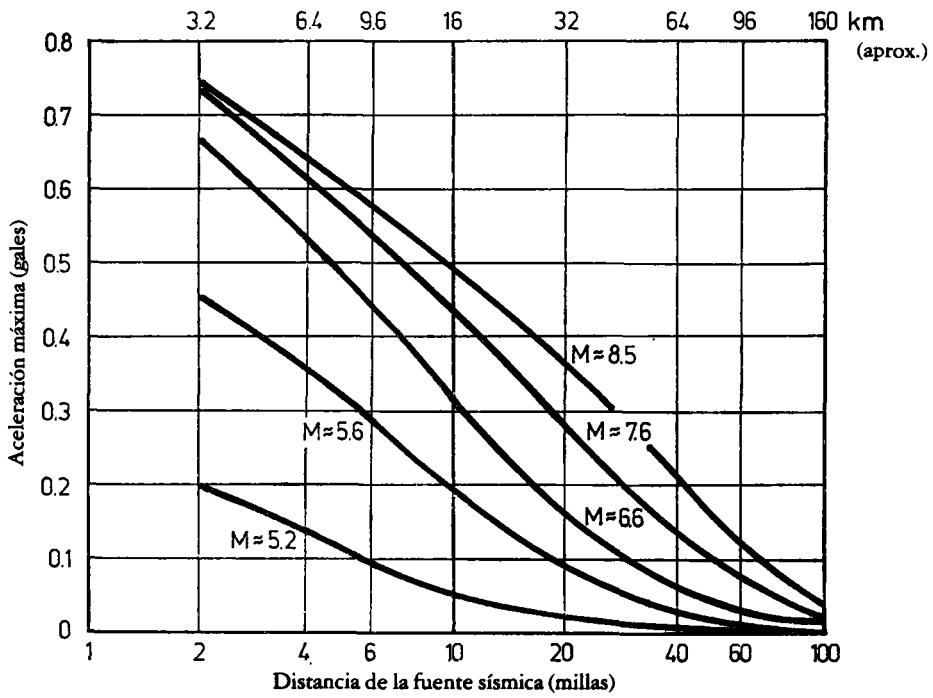


Figura 1.2a. Curvas de atenuación de la aceleración con la distancia. (Schnabel y Seed, 1972.)

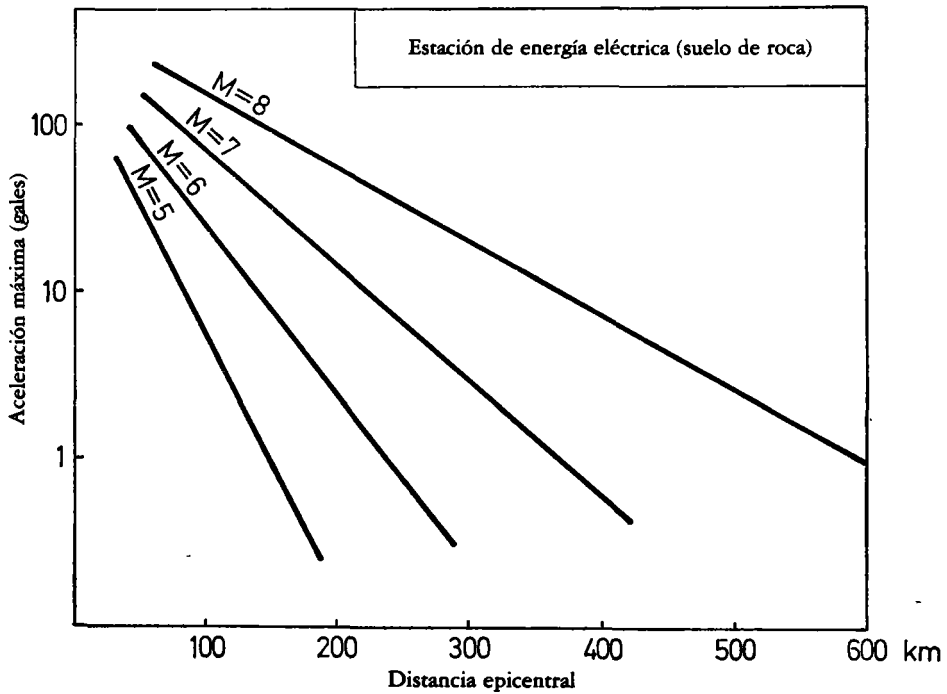
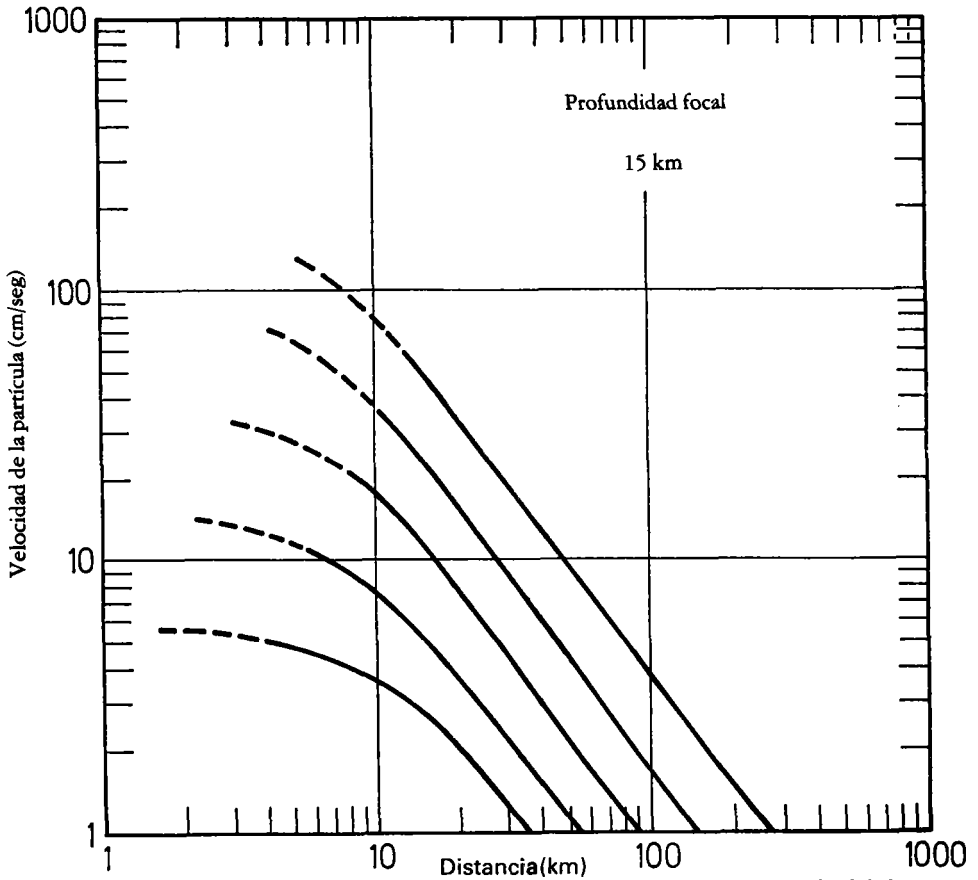


Figura 1.2b. Curvas de atenuación de la aceleración con la distancia. (Okamoto, 1973.)



Atenuación de la velocidad para un foco sísmico normal de 15 km de profundidad
 Figura 1.2c. Curvas de atenuación de la velocidad con la distancia. (Algermissen y otros, 1975.)

$$I_0 - I_n = 3 \log_{10} \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{h} + 3 \log_{10} e \cdot \alpha (\sqrt{r^2 + h^2} - h)$$

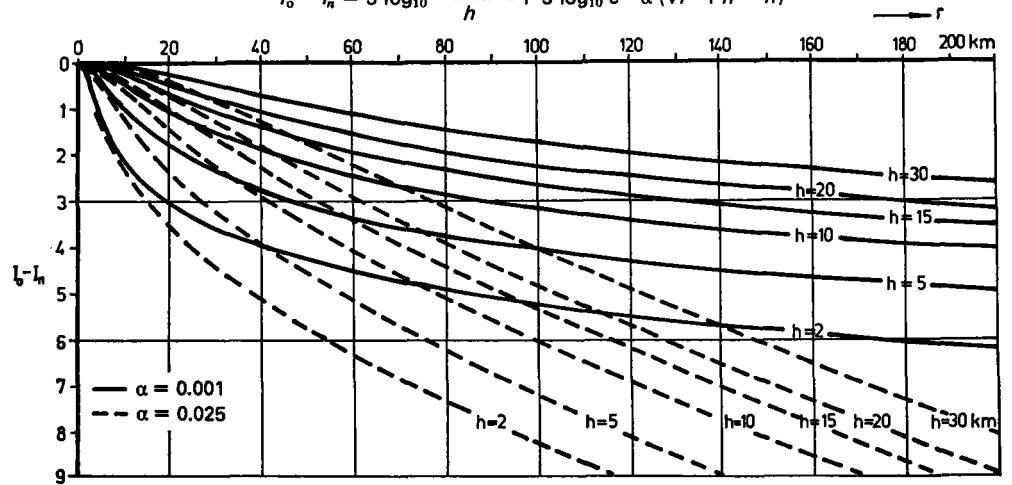


Figura 1.2d. Curvas de atenuación de la intensidad con la distancia epicentral y la profundidad del foco. (Sponheuer, 1960.)

No obstante, debe observarse que los acelerógrafos son muy sensibles sólo a las ondas sísmicas de alta frecuencia y no suministran información relativa a las ondas de periodo largo (por ejemplo, el acelerógrafo SMA-1 tiene una frecuencia natural cercana a 25 Hz). Las curvas de atenuación existentes se basan principalmente en los acelerogramas registrados durante el terremoto de San Fernando de 1971 y en algunos de otros sismos ocurridos recientemente en los Estados Unidos.

Los resultados individuales muestran gran dispersión que refleja o bien los efectos de radiación local y las condiciones geológicas o bien los orígenes diversos de los datos fuente. La mayor parte de los resultados dan la aceleración como una función de la distancia, aunque otros presentan la velocidad de la partícula en relación con la distancia. Los datos relativos a los desplazamientos son raros, aunque se puede obtener esta información de las curvas de calibración de la magnitud, que son funciones promedio amplitud-distancia para los diferentes tipos de ondas Sg, LR, P, S, etc. y que por lo regular están asociadas a una cierta gama de periodo de onda. Por ejemplo en la práctica se usa la curva de calibración de magnitud dada por Tsuboi (Okamoto, 1973) para calcular el desplazamiento máximo esperado en un determinado lugar:

$$\log_{10} A_m = M - 1.73 \log_{10} D - 3.17 \quad (1.4)$$

donde A_m es el desplazamiento máximo del terreno en cm, y D la distancia hipocentral en km (válida para todo $D \leq 500$). En la aplicación de estas curvas a la ingeniería hay varios problemas: en primer lugar, han sido derivadas para distancias $D > 100$ km, y, en segundo lugar, se han basado por lo regular en observaciones de movimientos pequeños del terreno que cubren una gama que va desde varios milimicrones a decenas de micrones. La ley de escalamiento es muy simple, una unidad de magnitud corresponde a un orden de amplitud. Esto es válido si se supone que la forma del espectro de amplitud es idéntica en todas las magnitudes contenidas dentro de una cierta banda de periodo; pero esta suposición es incorrecta cuando se considera una amplia gama de magnitudes y periodos de onda, porque: (a) las frecuencias de los bordes de los espectros varían con la magnitud, (b) las curvas espectrales no son paralelas en ciertos periodos de onda, (c) el nivel espectral no aumenta linealmente con el periodo. La consecuencia de ello es que la ley de escalamiento es variable y no existe una forma sencilla de extrapolación de datos de amplitud de sismos débiles para los de gran magnitud.

La tercera fuente de información sobre la atenuación de las ondas sísmicas son los mapas isosistas y las curvas de intensidad-distancia. Sobre la base de correlación entre los datos de intensidad y las curvas de atenuación instrumental obtenidas en sismos recientes, se puede adoptar alguna otra ley de conversión entre la intensidad y algún otro parámetro (por ejemplo, la aceleración).

Casi todas las curvas de intensidad-distancia-profundidad concuerdan bastante bien con la fórmula de Kövesligethy¹,

$$I_0 - I_n = 3 \log_{10} (D_n/h) + 3\alpha \log_{10} (D_n - h); \quad (1.5)$$

1. El artículo fue escrito en 1975; desde entonces se han publicado algunas fórmulas nuevas sobre amplitudes y espectros de los terremotos fuertes y sobre la intensidad macrosísmica.

una concordancia menor se encuentra en la fórmula simplificada de Blake.

$$I_0 - I_n = \text{const.} \log (D_n/h), \quad D_n = (r^2 + h^2)^{1/2}. \quad (1.6)$$

En la figura 1.2 d se presentan dos series de curvas, calculadas según la fórmula (1.5) para $\alpha = 0.001$ y $\alpha = 0.025$. La relación entre la escala de intensidad Mercalli Modificada I y la velocidad de la partícula V (cm/seg) fue dada por Newmark y Rosenblueth (1971) en la forma

$$I = \log_{10} 14v / \log_{10} 2. \quad (1.7)$$

Una fórmula similar

$$I = \log_{10} 14v / \log_{10} 2.11 \quad (1.8)$$

fue desarrollada por Algermissen y otros (1975) al emplear datos de velocidad obtenidos de la integración de los acelerogramas. Otra fórmula reciente es la de Trifunac y Brady (1975)

$$I(\text{MM}) = 4 \log_{10} v + 1.92, \quad \text{valid for } I = \text{IV-X}. \quad (1.9)$$

Una enumeración de las fórmulas empíricas que relacionan las aceleraciones, distancia y magnitudes ha sido preparada por Donovan (1973) y por Ambraseys (1973).

Por regla general, existe incertidumbre sobre el tipo de terreno de referencia al cual corresponden los resultados empíricos. La definición «roca dura» que es usada por ciertos investigadores presenta varios problemas. Los sismólogos estiman una roca como un medio que tiene una velocidad de onda de cizallamiento de 3.0 a 3.5 km/seg pero para los propósitos de zonificación se debe ampliar la gama de velocidad, de manera que la «roca dura» incluya también la roca sedimentaria bien endurecida y el límite de la velocidad mínima de la onda de cizallamiento sea alrededor de 1.5-1.8 km/seg. El terreno de referencia es otro punto importante de información, porque el factor de amplificación que se aplica a la microzonificación sísmica se define como la amplificación causada por las capas superficiales de material que están encima de la roca en un punto particular. La escala usual de los mapas de zonificación (1:1-3 000 000) nos permite tomar en cuenta las condiciones locales del punto o emplazamiento.

Un argumento que se ha esgrimido en favor de las determinaciones de la aceleración y velocidad del terreno, es el de que al usar ambas cantidades será posible construir la envolvente del espectro de respuesta de la aceleración según el procedimiento descrito por Newmark y Rosenblueth (1971).

Las curvas de atenuación son simples relaciones empíricas que dan las amplitudes máximas como una función de distancia y magnitud. A menudo el tipo exacto de ondas sísmicas no se menciona (por ejemplo P, S, o L) porque la interpretación del registro en este aspecto es de más interés para los sismólogos que para los ingenieros. Cerca de la falla causativa (foco), a distancias menores de 150 km, las ondas P y S directas, refractadas y reflejadas críticas, prevalecen en los sismogramas. A mayores distancias comienzan a dominar las ondas de superficie.

Este panorama es diferente cuando los focos son algo más profundos que lo normal: las ondas P y S forman en el registro dos grupos distintos y las amplitudes de las ondas de superficie disminuyen exponencialmente cuando aumenta la profundidad focal.

La figura 1.3 muestra algunos ejemplos de curvas empíricas establecidas para la aceleración máxima. La mayor dispersión de los datos de observación introduce inexactitudes en el ajuste de las curvas y también supone una menor precisión. La parte más problemática reside en el margen de distancias muy cortas ($D < 50$ km)

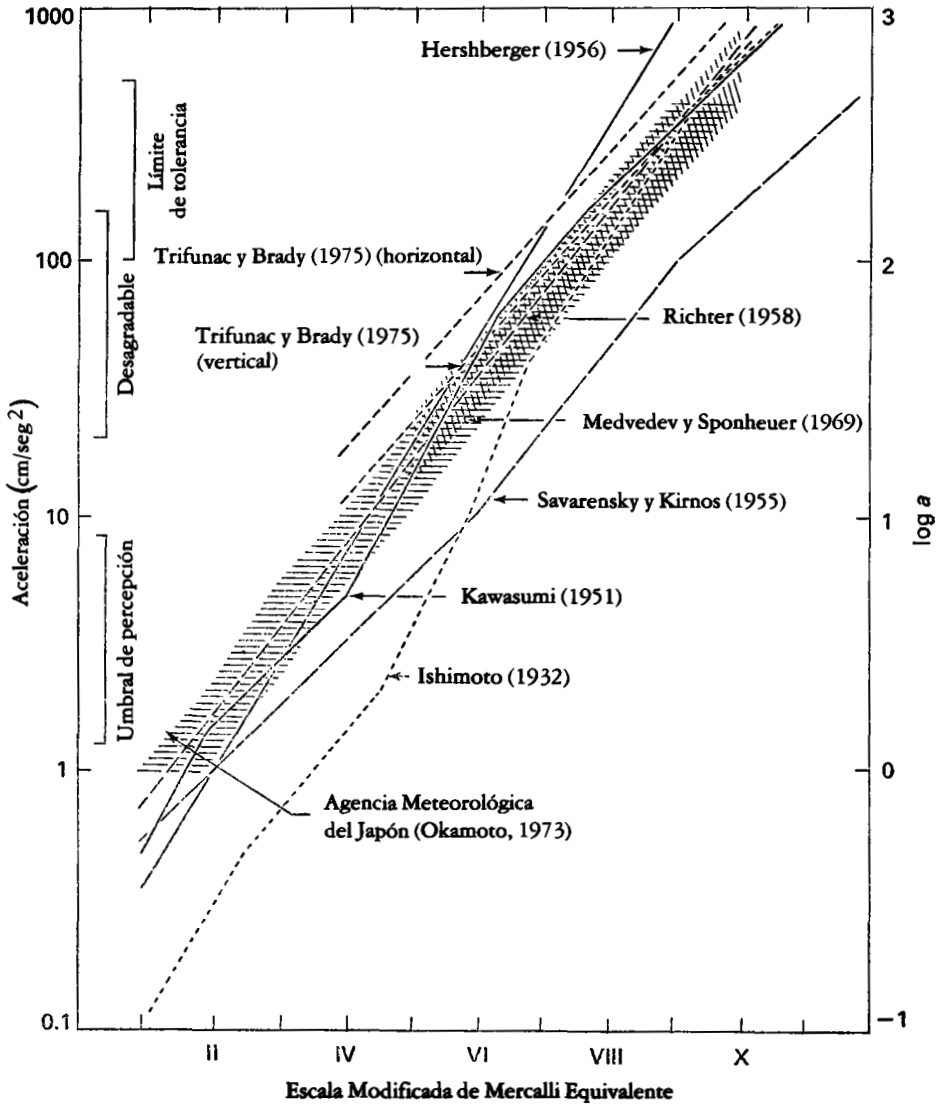


Figura 1.3. Correlaciones de intensidad y aceleración según varios autores. (Trifunac y Brady, 1975.)

es decir dentro del área focal de los grandes sismos, donde no se puede suponer que haya procesos puramente elásticos.

Es también importante en el diseño técnico tomar en cuenta la duración de las sacudidas fuertes, problema que es evidente cuando se inspeccionan los registros. En algunos, la aceleración máxima está sólo representada por una oscilación (un periodo), y en otros es más larga la duración de las sacudidas. Esto naturalmente influye en el comportamiento de una estructura. La observación sobre la duración del sismo es muy escasa y se aplica sólo si la amplitud umbral por la cual se define la duración está indicada claramente (véase Bolt 1974 y Kobayashi 1974).

1.2.3 *Intensidad macrosísmica*

La intensidad macrosísmica se expresa por un número que mide los efectos del sismo sobre el hombre, las construcciones y la superficie de la tierra; estos efectos están descritos en el texto que define la escala.

Como está basada en efectos macroscópicos, la intensidad es una cantidad no instrumental y se ha obtenido utilizando criterios cualitativos que no están exentos de subjetividad y de otras influencias. Es por esto que se han encontrado discrepancias cuando se combinan los datos de intensidad de grandes áreas. Se ha intentado correlacionar la intensidad con ciertas cantidades instrumentales pero han fracasado las repetidas pruebas para elaborar una simple relación entre los valores de la aceleración y los grados de intensidad.

Actualmente, están en uso las siguientes tres escalas:

- a. MM, escala de Mercalli Modificada, de 12 grados, versión 1956
- b. MCS (escala de Mercalli-Cancani-Sieberg) o MSK (Medvedev-Sponheuer-Kárník) versión 1974, ambas de 12 grados y muy similares a la MM-1956 y a la GOST (URSS).
- c. JMA, escala de la Agencia Meteorológica del Japón, de 7 grados.

Existen modificaciones de las escalas MM y MSK para que puedan aplicarse a ciertas regiones en especial.

A pesar del progreso alcanzado en la sismología instrumental, la escala de intensidad continúa jugando aún un importante rol. Todos los terremotos anteriores a 1900 y un considerable número de sismos posteriores se han clasificado sólo a base de intensidad. Las observaciones macrosísmicas continúan siendo la manera más sencilla para determinar la distribución superficial de los efectos de los terremotos, si no se cuenta con una red densa de instrumentos de movimientos fuertes. No obstante en todas las aplicaciones se debe poner de relieve que la intensidad constituye un número descriptivo y su uso es limitado. Los intentos para reemplazar los datos instrumentales por la intensidad o para tratar la intensidad como una cantidad física han conducido algunas veces a conclusiones erróneas, porque han ido más allá de las posibilidades de la escala de intensidad.

La intensidad puede ser siempre usada como una indicación aproximada de la fuerza de un terremoto en un lugar en particular si se necesita sólo un parámetro para sustituir una larga descripción o comentarios de los efectos del sismo. Es útil para cartografiar, para indicar irregularidades locales en la radiación de la energía sísmica y para indicar el tamaño del campo macrosísmico; también puede usarse para comprobar el orden de la profundidad focal.

Cuando existen datos macrosísmicos e instrumentales homogéneos se puede establecer una fórmula de conversión empírica. Empero su aplicación debe quedar limitada a la región considerada y ser usada sólo para una estimación. Se muestra un ejemplo en la figura 1.4.

La intensidad también requiere atención porque sigue siendo la cantidad utilizada en la mayor parte de los mapas de zonificación que constituyen parte de los códigos oficiales de construcción antisísmica.

1.2.4 Aspectos geotectónicos y geofísicos

La predicción de los futuros riesgos sísmicos no puede hacerse exclusivamente a partir de la información sismológica, ya que ésta cubre un periodo demasiado breve como para poder poner de manifiesto las tendencias de la actividad sísmica o para definir toda la zona sismogénica potencial.

Se pueden establecer modelos satisfactorios de la actividad sísmica en el espacio y el tiempo si se emplea además otra indicación; pero incluso entonces sólo se puede dar una evaluación probabilística del riesgo sísmico.

En el análisis de la información geológica y geofísica hay que tomar en consideración tanto la situación local como la estructura general y la evolución de la zona. Se requieren los siguientes tipos de información:

- a. Anomalías isostáticas y sus gradientes.
- b. Estructura de la corteza terrestre.
- c. Fallas activas o recientemente reactivadas.
- d. Tectónica regional.
- e. Movimientos corticales recientes.
- f. Movimientos contemporáneos (datos geodésicos).

Esta información debería correlacionarse con datos sismológicos para establecer criterios a partir de los cuales se determinan las zonas de origen de terremotos. (Véase URSS *Metodicheskiye Rekomendatsii* de 1974, también la sección 1.3.2; o Gorshkov y otros, 1974.)

1.2.5 Experimentos de laboratorio

Los experimentos de laboratorio complementan los actuales datos de observación de la sismología y geología y son particularmente útiles en el desarrollo y en la comprobación de varios modelos de desarrollo de terremotos.

Los objetivos de los estudios rutinarios son:

- a. Descubrir e investigar los tipos de inestabilidad mecánica que probablemente causan sismos en la corteza.
- b. Estudiar cambios en las propiedades de las rocas cuando el esfuerzo es aplicado y aumentado hasta el punto de inestabilidad.
- c. Estudiar los procesos que producen súbita disminución del esfuerzo en las rocas, especialmente fracturas frágiles y deslizamiento friccional inestable (*stick-slip*) y la distribución de microfracturación antes de las fracturas.
- d. Explorar la posibilidad de cambiar el deslizamiento inestable (*stick-slip*) a un deslizamiento uniforme en los sistemas de falla.

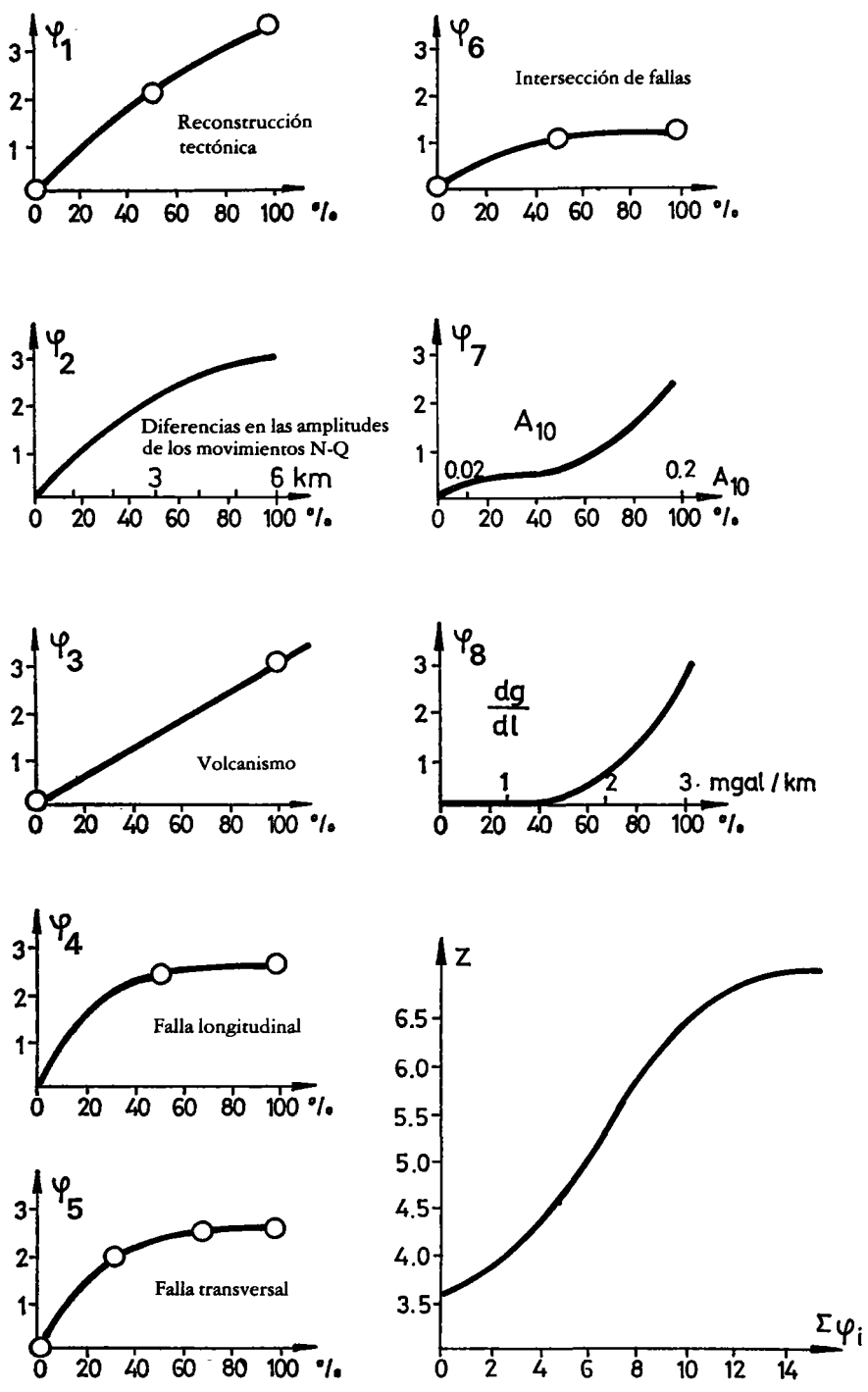


Figura 1.4. Clasificación de fenómenos individuales geológico-geofísicos que se relacionan con M_{\max} (Bune y otros, 1974).

- e. Investigar los cambios en la velocidad de las ondas P y S, en la resistividad eléctrica y susceptibilidad magnética bajo la acción de esfuerzos variables y en cambios de fase determinada.
- f. Encontrar la relación entre la energía de los sismos, las propiedades elásticas de material y la velocidad del esfuerzo.
- g. Elaborar relaciones de similitud para confeccionar modelos de procesos tectónicos.

Los resultados pueden ayudar a ilustrar los mecanismos fuente, a explicar los modelos de secuencias sísmicas y las relaciones entre las propiedades de las rocas, la velocidad del esfuerzo y la magnitud sísmica.

1.3 Tratamiento de datos

1.3.1 Cartografía de diversos parámetros sísmicos

La zonificación sísmica comprende, en las diversas etapas de trabajo, la preparación de mapas de epicentros, de magnitudes observadas máximas, de profundidad de los focos, de soluciones de los planos de falla y de los límites correspondientes a los campos de tensión o compresión, de periodos de repetición con respecto a distintas magnitudes, de energía total liberada por unidad de tiempo y espacio, de número de sismos, etc.

1.3.2 Definición de las regiones sísmicas existentes

Se identifican las diversas zonas como unidades, de modo que cada una comprenda una región fuente sismogénica que pueda estar regida por el mismo proceso de la producción de sismos. La delimitación de las fronteras es muy importante para los efectos de un ulterior trabajo estadístico. No existen patrones para delinear las regiones fuente y por lo regular se considera cada enjambre de focos o fallas como una región origen. Depende muchas veces del criterio personal el modo como se fijan las fronteras. Si se combinan dos o más regiones con diferentes regiones sísmicas, se introduce un factor de incertidumbre, ya que entonces los resultados estadísticos podrían representar algún promedio de condiciones inexistentes.

1.3.3 Relaciones entre los datos instrumentales y los macrosísmicos

Estos datos se tratan de un modo uniforme, es decir, se preparan los mapas de isosistas y se confeccionan los gráficos de intensidad-distancia, y utilizando esa serie de mapas se trazan los mapas de intensidad máxima observada. También a partir de esa distribución, cuando se carece de datos instrumentales, se calculan las magnitudes o las profundidades focales mediante las siguientes fórmulas empíricas:

$$I_0 - I_n = a_1 + b_1 \log D + c_1 D \quad (1.10)$$

$$\circ I_0 - I_n = a_2 + b_2 \log D \quad (1.11)$$

$$\circ M = a_3 + b_3 \log h + c_3 I_0 \quad (1.12)$$

$$\circ M = a_4 + b_4 \log h + c_4 h \quad (1.13)$$

$$\circ M = a_4 + c_4 I_0 \quad (1.14)$$

donde I_0 es intensidad epicentral, M = magnitud, D = distancia hipocentral, H = profundidad del foco, $D^2 = r^2 + h^2$, r = distancia epicentral, a_n , b_n y c_n son constantes.

Luego de asignar valores de intensidad a todas las localidades del área, afectadas por un terremoto, viene el trazado del mapa de isosistas. Las técnicas difieren ligeramente según los países. Algunos sismólogos trazan las isosistas como envolventes muy aproximadas a las intensidades observadas, otros prefieren unas isosistas poco o muy generalizadas.

Es imprescindible que los mapas isosísmicos contengan todos los valores individuales de intensidad en los que se basa el trazado de una isosista. Por lo común, las isosistas se indican por la intensidad que encierran, por ejemplo la isosista $I = VII$, aunque una notación más apropiada sería $I = VI-VII$ porque las isosistas separan las áreas con intensidades de VI y VII. La notación debería verificarse, antes de que se emplee el mapa, y un sistema más ventajoso sería escribir la intensidad en los espacios comprendidos entre las isosistas.

Los mapas isosistas son la fuente principal de compilación de los mapas de intensidad integrada (generalizada) y muestran las intensidades máximas observadas. Estos mapas a menudo son usados como mapas de zonificación si se supone que la distribución futura de intensidades será idéntica a la pasada. No obstante esta suposición puede conducir a graves errores.

Por lo general se confecciona un diagrama de puntos con el radio medio de las líneas isosistas y la distancia epicentral, y los datos empíricos sirven para determinar las constantes en las fórmulas de tipo (1.10-1.14).

Se usan a veces las fórmulas (1.12 y 1.14) para transformar I_0 a M con el fin de lograr homogeneidad en los catálogos sísmicos. Se debe entender que estas magnitudes así determinadas son de una exactitud mucho menor que las instrumentales.

Comparando las curvas teóricas, calculadas para diferentes profundidades y coeficientes de absorción de acuerdo con la fórmula (1.10), con los diagramas de intensidad-distancia observadas, se pueden estimar las profundidades focales; la fórmula (1.11) proporciona valores menos fiables.

1.3.4 *Relaciones de espacio y tiempo*

Los terremotos no son eventos independientes sino que tienden a aglomerarse en el espacio y el tiempo. En primer término, hay una conexión causal entre las sacudidas premonitoras, las principales y las réplicas. Se han observado diversos tipos de secuencias sísmicas, a saber, sacudidas múltiples, réplicas de réplicas, enjambres de terremotos, etc. Algunas regiones se caracterizan por un definido tipo de secuencias sísmicas y reflejan la influencia de propiedades mecánicas y de la velocidad del esfuerzo. En ciertas áreas se han observado migraciones verticales y horizontales de focos; por lo común hay tendencia a una migración hacia arriba de la profundidad a la superficie. También hay una tendencia a que los sismos se produzcan en «lagunas», es decir, en lugares situados a lo largo de una faja sísmica, donde no se habían observado anteriormente movimientos fuertes.

El conocimiento de estas tendencias en el tiempo o en el espacio ayuda a definir las regiones fuente de sismos futuros.

1.3.5 Relaciones de magnitud y frecuencia

Como Gutenberg y Richter lo observaran por primera vez, una línea recta en un gráfico semilogarítmico se adapta perfectamente a la mayoría de las distribuciones de magnitud y frecuencia dentro de una cierta gama de magnitud y se puede escribir la siguiente relación:

$$\log N(M)dM = (a - bM)dM \quad \text{or} \quad N(M)dM = 10^{a-bM}dM \quad (1.15)$$

donde N es el número de sismos correspondientes a una determinada categoría de magnitud; a y b son constantes, la primera depende del número de eventos (tamaño del área, número de años) mientras b es la pendiente de la distribución y es influida por las propiedades físicas del medio y por el propio proceso de generación. No todas las distribuciones $N(M)$ encajan en una línea recta y se han sugerido otras fórmulas aproximadas (véase por ejemplo, Purcaru, 1973).

$$\log N(M)dM = (a + bM - cM^2)dM \quad (1.16)$$

$$\text{o} \quad \log N(M) = a - bM + \log(c - M) \quad (1.17)$$

$$\text{o} \quad \log N(\log M)d(\log M) = (a + b \log M - c \log^2 M)d \log M \quad (1.18)$$

es decir, la distribución log-normal.

La relación $N(M)$ es la base para estimar la frecuencia sísmica en todas las regiones sísmicas. Por razones físicas se tiene que limitar en los dos extremos mediante $M_{\text{mín}}$ y $M_{\text{máx}}$ que son las magnitudes mínimas y máximas posibles en un determinado volumen.

Resulta evidente que existe un valor límite M de los más grandes sismos en un determinado volumen de material de ciertas propiedades físicas y que está sujeto a una determinada distribución (régimen) de esfuerzos. En el otro extremo de la distribución $N(M)$ la limitación es debida o bien a la falta de datos de observación por limitaciones en la sensibilidad del sistema o bien a que las sacudidas más débiles no se pueden originar por razones físicas (presión, homogeneidad, resistencia). El valor $M_{\text{máx}}$ tiene gran importancia práctica y su cálculo es una de las principales tareas de la zonificación sísmica. La fórmula (15) es usada algunas veces en la forma

$$\log n(M)dM = (a' - b'M)dM \quad (1.19)$$

donde n es la frecuencia acumulativa de terremotos de una magnitud M o mayor. Se debe observar que, para la misma serie de observaciones, b es igual a b' sólo para distribuciones ilimitadas y continuas, lo que no ocurre en la práctica.

Por lo común la fórmula es calculada para una unidad de tiempo (por ejemplo, un año) y una unidad de superficie (1000 km², etc). Las relaciones magnitud-frecuencia se pueden comparar o combinar sólo si se utilizan gamas, escalas y clases de magnitud idénticas. El método de cálculo también debe ser idéntico, y si se descuidan esas reglas, se originan errores estadísticos internos. Tanto el parámetro a , como el b , varían de una región a otra; a (volumen y tiempo unitario) es la medida de la actividad sísmica e igual a $\log N$ para $M = 0$. Si b es constante en una determinada área, se pueden cartografiar los valores N correspondientes a una

cierta magnitud M . Este procedimiento fue elaborado por Yu. V. Riznichenko (1966) y se emplea en la URSS para la construcción de mapas de actividad sísmica A ($A = N$ que corresponden por ejemplo a $K = 10$ en las fórmulas $\log N = A - \gamma K$, $K = \log E$, E en joules).

1.3.6 Modelos estadísticos

Aunque por lo general, se acepta que la producción de sismos no es un proceso aleatorio, hasta ahora sólo se han utilizado métodos que tratan los datos de observación como muestras de espacios de probabilidad, porque hasta el presente ha resultado imposible predecir los fenómenos sísmicos de un modo determinista.

Los modelos estadísticos han de permitir predecir en términos probabilísticos las futuras secuencias sísmicas en una región dada. La información mínima que se requiere «para un modelo generador de futuros sismos» es la que va asociada al modelo más simple, a saber, el modelo de Poisson espacial y temporal de futuros sismos. En este caso necesitaremos conocer:

- a. Una delimitación espacial de las fuentes potenciales de sismos.
- b. La tasa media de actividad en cada fuente, la distribución de probabilidad de las magnitudes, incluida una magnitud que hace de límite superior $M_{\text{máx}}$ y la distribución de probabilidad de otros parámetros de la fuente (dimensiones, orientación, movimiento de las fallas, etc.).
- c. A ser posible, la especificación de las leyes de probabilidad que determinan los momentos de inicio y la ubicación de los focos, incluido el grado de correlación o memoria espacial y temporal.

La construcción de un modelo representa la síntesis final de la información sísmológica y geotectónica. El modelo más usado es el modelo de Poisson que supone que los sismos (o por lo menos las principales sacudidas) se producen de un modo aleatorio o independiente, es decir, los tiempos origen, las coordenadas de los focos, las magnitudes, etc. son variables mutuamente independientes. El modelo está basado en dos suposiciones que se pueden formular como sigue (Lomnitz, 1974): (a) el número de terremotos en un año es una variable aleatoria de Poisson con un promedio α , (b) la magnitud sísmica M es una variable aleatoria con una función de distribución acumulativa.

$$F(M) = 1 - e^{-\beta M}, \quad M \geq 0. \quad (1.20)$$

Este modelo que puede ser llamado el «modelo del sismo fuerte» conforma los grupos de sismos fuertes y facilita la predicción de periodos medios de retorno, el máximo sísmico modal y el número esperado de sismos que superarán un determinado M (Lomnitz, 1974). La incorporación de las secuencias post-sísmicas requiere modelos más complejos. Los intentos de confeccionar modelos de secuencias de réplicas a base de un simple proceso de Markov por lo general fracasan.

En el modelo heurístico al que llamaremos «modelo Klondike» hay una clara distinción entre las series espaciales fundamentales y las series temporales de sacudidas, lo que puede ser considerado como un proceso de muestreo que opera sobre las series espaciales. El proceso de Klondike es un ejemplo de proceso generalizado no markoviano donde cada evento depende de todos los eventos anteriores. A fin

de aplicar este modelo a los sismos será necesario probar que el proceso sísmico se puede resolver en dos procesos independientes, uno de los cuales está incluido en el otro. Podemos proponer la siguiente hipótesis: en cualquier realización dada del proceso sísmico, la distribución de magnitud es (a) estacionaria, (b) independiente de la velocidad de ocurrencia de los sismos. Esta hipótesis implica que la magnitud de los terremotos es una variable regionalizada y que el proceso de distribución de la magnitud se puede describir por una serie espacial que es independiente del tiempo. Por lo tanto, una secuencia de sismos puede ser descrita como un muestreo aleatorio de esta serie espacial fundamental. La distribución de magnitud en el espacio está enteramente determinada, con mucha aproximación, por la distribución en el espacio de la magnitud media M y el empleo de un modelo de tipo Klondike de la ocurrencia sísmica proporciona un valioso conocimiento en el mecanismo del proceso sísmico, que puede ser usado para propósitos de predicción con tal de que se comprendan bien las variables usadas para describir el tamaño del sismo.

El número de sismos de una región disminuye exponencialmente con su magnitud. Esta relación se expresa en general por las ecuaciones magnitud-frecuencia (1.15) o (1.19). La ecuación (1.19) puede ser normalizada para dar la distribución de frecuencia en una región:

$$f(M) = \beta e^{-\beta M}, \quad M \geq 0, \quad (1.21)$$

donde $\beta = b'/\log e$ y $f(M)$ es la primera derivada de la distribución de probabilidad acumulada de las magnitudes sísmicas.

La energía E de un sismo se puede representar como el producto del tamaño de una falla por la energía media liberada por unidad de área, la última es proporcional a la disminución del esfuerzo. Se puede derivar la distribución de las áreas de falla por medio de un modelo que en su forma más general fue propuesto por Kolmogorov (1941). Consideremos el área total de la corteza terrestre rota, en sucesivas etapas, en áreas cada vez menores. Sea y el área en tensión que es tributaria a una falla de tamaño S (proporcional a alguna potencia de y). Entonces, de acuerdo con este modelo de la partición de la energía sísmica

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F_n(y) = \text{Erf} [\log (y/\bar{y})/\sigma^2] \quad (1.22)$$

donde $F(y)$ es la distribución acumulativa de y . La función error del logaritmo de una variable se llama la distribución «log-normal». De acuerdo con un teorema relativo a las propiedades reproductivas de la log-normalidad, si las regiones de la superficie terrestre que son tributarias del esfuerzo son log-normales, y si las superficies de falla están relacionadas con aquellas áreas por una ley exponencial, de ello se desprende que la superficie de la falla también es una variable de log-normal. Si la caída de esfuerzo media es estacionaria, la distribución de energía sísmica sería también log-normal. Puesto que la magnitud M es proporcional al logaritmo de la energía, se deduce que la magnitud M debe estar distribuida normalmente.

En conclusión, el proceso de Kolmogorov, de fragmentación al azar, probablemente representa un modelo adecuado para la distribución energía-frecuencia observada. Desde el punto de vista del riesgo sísmico, no tiene importancia si las magnitudes sísmicas obedecen a la ley normal o a la exponencial, ya que ambas tienen la misma distribución de valores extremos. Generalmente, en las aplicacio-

nes para predecir el riesgo sísmico se prefiere la forma exponencial de distribución de la magnitud, porque una distribución de un parámetro único suministra una descripción más condensada de la sismicidad, sin pérdida alguna de generalidad en la gama de las grandes magnitudes.

Cuando el efecto de cada evento se superpone a los efectos acumulados de todos los eventos precedentes se obtienen unos tipos de procesos no markovianos, lineales, que se pueden llamar procesos Boltzmann. El proceso Boltzmann describe una clase amplia de procesos de la física y, bajo ciertas condiciones, se puede derivar de este proceso la ley de Omori relativa a los movimientos post-sísmicos o réplicas que no son sino la envolvente de las funciones de atenuación exponencial. Al integrar la ley de Omori, se encuentra que el número acumulado de movimientos post-sísmicos guarda una relación logarítmica con el tiempo. Si la magnitud promedio de las réplicas es estacionaria en el tiempo también lo será la liberación de la deformación media por sacudida. En consecuencia, resulta el conocido principio, que dedujo Benioff, de que la liberación en los movimientos post-sísmicos de la deformación acumulada guarda una relación logarítmica con respecto al tiempo.

De manera general y por medio del modelo de Kolmogorov, se ha derivado la partición de energía de los sismos. Sin embargo, ese modelo no proporciona ningún discernimiento sobre la distribución espacial o modelo que cabe esperar de tal proceso. Un modelo topológico que puede proporcionar tal conocimiento se consigue cuando se emplea una analogía hidrológica, en la cual los sistemas de fallas se comportan como sistemas de corrientes, desde el punto de vista topológico.

1.3.7 *Definición de las regiones que son fuente de sismos*

En base al conocimiento de las condiciones geofísicas y geológicas en puntos en los que ha habido fuertes sismos, se puede intentar definir, mediante una simple analogía y extrapolación, las zonas de características geológicas idénticas o similares en las que pueden producirse sismos fuertes en el futuro, y estimar los límites y la magnitud umbral de esas zonas potenciales. Otro problema es el de sacar conclusiones con respecto a los periodos medios de retorno de sacudidas fuertes en esas zonas, por lo general la predicción se basa en observaciones de una zona geológicamente similar. Esos intentos de definir los criterios geológicos para determinar las regiones origen de sismos se han efectuado principalmente en la URSS (véase por ejemplo Borisov y otros, 1975, o *Metodicheskiye Rekomendatsii*, 1974).

Al definir regiones fuente de sismos, se hace uso de toda la información disponible sobre las relaciones que existen entre los sismos y otros fenómenos geológicos y geofísicos; por ejemplo, los movimientos horizontales y verticales de gran extensión señalan las regiones de movilidad y que están en actividad tectónica, donde la probabilidad de ocurrencia de sismos es mayor que en las áreas estables. La estabilidad y variabilidad de la dirección de movimiento es también importante. Los límites de los bloques corticales que están sufriendo desplazamientos contrastados, son zonas potenciales de acumulación de esfuerzo tectónico. Por tanto, se cartografían las fallas y áreas de recientes levantamientos o de subsidencia. No obstante, las relaciones entre los movimientos pasados, puestos de manifiesto por la geología y la sismicidad presente, son muy complejas y la interpretación de las evidencias geológicas requiere gran experiencia.

La sismología puede proporcionar algunos datos generalizados sobre el campo de esfuerzo, la orientación de los principales planos focales, la orientación predominante del campo macrosísmico, la distribución espacial de los focos sísmicos que superan determinadas magnitudes, etc. El estudio reiterado y preciso de niveles indica áreas de elevación o de subsidencia actuales. Los levantamientos gravimétricos proporcionan datos sobre las anomalías isostáticas. Toda esta información tiene que ser correlacionada y analizada antes de que se pueda trazar un mapa de las regiones que pueden ser fuente de origen de terremotos.

En la URSS, tomando el área del Cáucaso como ensayo, se ha intentado aplicar un método patrón de reconocimiento, a fin de evitar en lo posible el efecto de la subjetividad personal (véase Borisov y otros, 1975; *Metodicheskiye Rekomendatsii*, 1974). El método se basa en la clasificación de los fenómenos geofísicos y geológicos que se sabe que están relacionados con la ocurrencia de los sismos, y da una estimación del umbral máximo de magnitud para una unidad de área. La fórmula básica es

$$M_{\text{máx}} = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = Z \left[\sum_{i=1}^n \varphi_i(x_i) \right] \quad (1.23)$$

donde los x_i designan los parámetros geológicos individuales (características) y Z , φ_i son funciones de un parámetro que aumentan de manera monótona. Las funciones $\varphi_i(x_i)$ reflejan la influencia de fenómenos particulares sobre el valor de $M_{\text{máx}}$. La suma de todas las contribuciones da el valor previsto de $M_{\text{máx}}$. La figura 1.4 muestra las funciones empíricas φ_i y Z desarrolladas para la región del Cáucaso. Las funciones han sido compiladas para los siguientes parámetros:

- φ_1 = tectónica reciente
- φ_2 = diferencias en amplitud de los movimientos verticales durante el periodo neógeno del cuaternario
- φ_3 = volcanismo reciente
- φ_4 = fallas profundas longitudinales activas en época reciente
- φ_5 = existencia de fallas profundas transversas
- φ_6 = intersección de fallas
- φ_7 = actividad sísmica A
- φ_8 = gradiente horizontal de la anomalía isostática.

Se emplean también otros dos fenómenos: la amplitud de movimientos recientes y la heterogeneidad geotectónica. La función resultante Z (fig. 1.4) se usa luego para cartografiar el valor de $M_{\text{máx}}$ en unidades de área. El mapa resultante representa el mapa fuente y los valores de $M_{\text{máx}}$ servirán para la truncación de las curvas de frecuencia-magnitud correspondientes a regiones fuente particulares.

1.3.8 *Estimación de la magnitud umbral superior*

Como ya se ha mencionado, el valor de la máxima magnitud posible es una cantidad importante porque limita la distribución de magnitud y frecuencia. Se lo puede estimar de varias maneras, según:

- a. Estadísticas del valor extremo (teoría de Gumbel).
- b. Correlación de la «actividad sísmica» con los M máximos observados.
- c. Análisis sismo-tectónicos.
- d. La curvatura del gráfico $N(M)$.

- e. La gama de oscilación de la curva de Benioff.
- f. La resistencia de materiales.
- g. El espesor de los «estratos sismo-activos».
- h. Las anomalías isostáticas.

1.3.8.1 El método del valor extremo

Este método es muy ventajoso porque los valores extremos de una variable geofísica son determinados de manera fácil y exacta, siendo además más homogéneos que los eventos considerados en la serie temporal de observaciones. El método es simple y no necesita conocerse la distribución principal. De acuerdo con Gumbel (1958) hay tres tipos de distribuciones asintóticas de valores extremos y cada uno corresponde a un tipo específico de comportamiento de los grandes valores de la variable. En el primer tipo, la variable no está limitada y la distribución de los valores más grandes se define por

$$H(y) = \exp [- \exp (- y)]_i, \quad y = C(x - u) \quad (1.24)$$

donde C y u son parámetros y la magnitud sísmica se considera como una variable independiente dentro de la función de distribución acumulada.

$$F(x) = 1 - \exp (- x), \quad x \geq 0. \quad (1.25)$$

El segundo tipo introduce un límite inferior y el tercer tipo, un límite superior para la variable. El análisis siguiente se basa en el primer tipo de distribución. Si el número de sismos es una variable aleatoria de Poisson con un promedio α , entonces la magnitud anual máxima sigue la función de distribución (fig. 1.5)

$$G(y) = \exp [- \alpha \exp (- \beta y)]_i, \quad y = C(x - u). \quad (1.26)$$

Los valores de α y β se estiman a través de un ajuste con los mínimos cuadrados y en un papel de probabilidad especial para valores extremos (fig. 1.5):

$$\log [- \log G(y)] = \log \alpha - \beta y.$$

Los valores anuales máximos y_1, y_2, y_n se disponen de manera creciente. Los valores de $G(y)$ se estiman usando la fórmula:

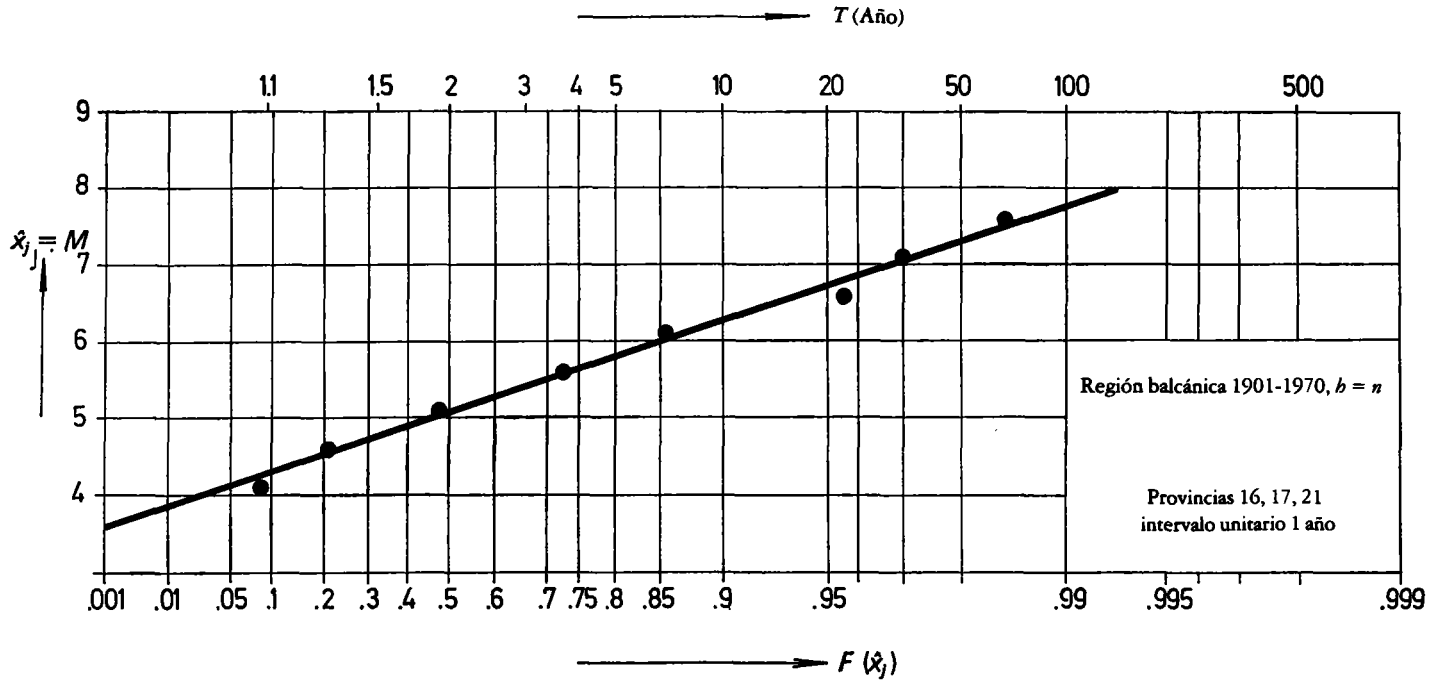
$$G(y_i) = j/(n + 1)$$

donde n es igual al número de intervalos (años) y $n = 1, 2, \dots, j, \dots, n$.

La ventaja de este método estriba en que se pueden solucionar varios problemas al emplear α y β , por ejemplo (Lomnitz 1974):

Magnitud media:
$$\bar{M} = M_{\min} + \beta^{-1} \quad (1.27)$$

Figura 1.5. Un ejemplo de estadísticas de valores grandes de Gumbel (Kárník, 1975).



Número de sacudidas de magnitud superior a M_{\min} en D años:

$$DN_y = D\alpha \exp(-\beta M_{\min}) \quad (1.28)$$

Período medio de retorno: $T = \frac{1}{Ny} = \exp(\beta y)/\alpha \quad (1.29)$

Máximo anual modal: $\tilde{y} = (\ln \alpha)/\beta \quad (1.30)$

Probabilidad de excedencia: $T\tilde{y} = 1$ año
 $\text{Prob}(Y \geq y) = 1 - G(y). \quad (1.31)$

La primera distribución asintótica no proporciona la magnitud umbral máxima para una región, sólo da la probabilidad con la cual cierta magnitud será excedida. Luego habrá que decidirse sobre el nivel de probabilidad de la magnitud más grande «posible». Por lo común se consideran niveles muy bajos, donde $P = 1\%$ o menor.

1.3.8.2 Correlación de la magnitud umbral superior con la actividad sísmica

Este método fue elaborado por Yu. V. Riznichenko (1966) y se usa ampliamente en la URSS. Los sismos se clasifican por la cantidad de $K = \log E$ (E en joules) y A designa la «actividad» es decir el número de sismos de una determinada clase de energía (normalmente $K = 10$) por 1000 km² y por año. Correlacionando A del mapa de actividad que contiene isolíneas de A y el valor observado de K_{\max} , se obtiene un gráfico, y la línea envolvente trazada corresponde a

$$\log A = 2.84 + 0.21 (K_{\max} - 15). \quad (1.32)$$

Esta fórmula se usa luego para preparar los mapas del esperado K_{\max} . El índice de actividad A sólo se puede usar en áreas que tienen pendientes idénticas de la curva magnitud-frecuencia (valores iguales de b).

1.3.8.3 Tamaño de las fallas y análisis sismo-tectónicos

Algunos investigadores han intentado correlacionar la longitud de las fallas activas con las magnitudes observadas, para luego predecir el valor de M_{\max} . Este procedimiento no está bien definido e implica un alto grado de subjetividad. Para presentar un ordenamiento de la clasificación sismo-tectónica y geofísica del valor de M_{\max} , el Prof. V.I. Keilis Borok y colegas (1973) elaboraron funciones empíricas simples de escala (sección 1.3.7). Los resultados obtenidos para la región del Cáucaso son alentadores.

1.3.8.4 Gráfico $N(M)$

En algunas regiones muy activas, el gráfico magnitud-frecuencia muestra un cambio de pendiente en la gama de las magnitudes altas o se detiene en cierto valor que no cambia cuando se extiende el periodo de observación. Los valores asintóticos de M

en el primer caso, o los valores límites en el segundo caso pueden considerarse como la magnitud umbral. Se debería recalcar que probablemente esto sólo se justifica para las series extensas de observaciones y que cubren grandes periodos de tiempo, que exceden la duración de cualquier probable ciclo en actividad. El valor $M = a/b$ que corresponde a $N = 1$ en la ecuación $N = a - bM$, se puede tomar como un índice del nivel de actividad, pero no puede representar el valor de $M_{\text{máx}}$ como se ha sugerido algunas veces.

De acuerdo con los experimentos realizados por S.D. Vinogradov (1962), K. Mogi (1967) y C.W. Scholz (1968), cuando menor es la pendiente del gráfico $N(M)$, más grande será la tasa de esfuerzo y mayor la homogeneidad de la muestra.

1.3.8.5 Curvas de Benioff

Las curvas de recuperación o liberación de la deformación de Benioff, es decir las gráficas acumulativas de los valores $E^{1/2}$ ($\text{erg}^{1/2}$) con respecto al tiempo, oscilan para la mayoría de las regiones dentro de ciertos límites. La pendiente de la curva da la velocidad promedio de la liberación de la deformación, la cual se puede emplear para el cálculo de una magnitud ficticia que equivaldría a la deformación media liberada durante un cierto periodo de tiempo.

Se debe notar que en algunas regiones sólo ha ocurrido una pulsación de actividad sísmica durante el periodo de observación y las tendencias generales no son muy claras. Para estas regiones es pues casi imposible o muy problemático sacar conclusiones de las curvas de Benioff.

1.3.8.6 Propiedades elásticas y estados del material rocoso

Para un volumen finito V de roca que corresponda a la fuente del mayor terremoto posible la energía sísmica liberada se puede escribir, de acuerdo con K.E. Bullen:

$$E_{\text{máx}} = \frac{1}{2} \mu \sigma_{\text{máx}}^2 k V \quad (1.33)$$

donde μ , es la rigidez; $\sigma_{\text{máx}}$, la resistencia del material; k un coeficiente de proporcionalidad y V el volumen.

Sin embargo, la mayor parte de los parámetros descritos son aún desconocidos y esta ecuación sólo tiene un valor teórico.

1.3.8.7 Espesor de la capa activa

Bath, Duda y otros llegaron a la conclusión de que la magnitud es independiente de la deformación de la corteza y que los terremotos grandes y pequeños se diferenciaban sólo por el volumen implicado. Así, un terremoto de gran magnitud no puede originarse cerca de la superficie. Además, la resistencia del material de la corteza aumenta por lo general con la profundidad. Una «capa activa» de un cierto espesor, que comprenda la corteza entera, puede por lo tanto producir terremotos más grandes que una capa activa superficial. N.V. Shebalin (1971) ha presentado un

gráfico empírico que relaciona el valor observado de $M_{\text{máx}}$, la profundidad del foco y la intensidad epicentral.

1.3.8.8 Anomalías isostáticas

Las observaciones hechas en la URSS muestran una correlación positiva entre los gradientes horizontales de las anomalías isostáticas y el valor de $M_{\text{máx}}$; esta correlación puede ser usada para regiones donde se dispone de tales datos.

1.4 Mapas de zonificación sísmica

1.4.1 Tipos de mapas de zonificación

En las secciones anteriores se han discutido el concepto de mapa de zonificación, y la información básica que se utiliza en su preparación.

Se pueden definir los diferentes tipos de mapas de zonificación de acuerdo con los datos y con las suposiciones empleados en su preparación. La suposición principal implica la calidad de los datos sismológicos usados. ¿Son acaso esos datos completos y representativos de la ocurrencia futura de los sismos, o se necesita de información adicional para definir las regiones de posibles sismos?

Otro de los criterios para clasificar los mapas de zonificación es su contenido. Se definen cuatro categorías:

- a. Mapas de intensidad máxima.
- b. Mapas de zonificación «técnica» que definen zonas mediante unos números de identificación que corresponden, por ejemplo, a coeficientes sísmicos del código de construcción.
- c. Aceleración máxima (velocidad, desplazamiento, etc.) con respecto a distintos periodos de retorno.
- d. Mapas de riesgos sísmicos.

Se debe observar que la zonificación sísmica no sólo supone la confección de un mapa, ya que para muchas tomas de decisión, se requerirá más información de la que puede figurar en uno de esos mapas; así, por ejemplo, se pueden también incluir en la zonificación sísmica ciertos documentos preliminares, tales como mapas de epicentros, mapas de regiones fuente de terremotos, registros de movimientos sísmicos fuertes, mapas de isosistas, mapas neotectónicos, cuadros estadísticos, etc. Para una aplicación práctica e inmediata, el mapa de zonificación sísmica deberá ir acompañado por el mayor número posible de registros de movimientos fuertes, que representan las distintas condiciones (D , M , h , suelo) o por la síntesis de ellos contenidos en un conjunto de espectros de movimientos fuertes representativos. Deberá llevar además un comentario sobre su empleo y sobre la precisión de la información facilitada.

1.4.2 Mapas de intensidad máxima

El primer tipo de mapa de zonificación sísmica puede ser o bien un «mapa de intensidad máxima observada» con unas isolíneas simplificadas o un «mapa de intensidades previstas máximas». Este último se puede confeccionar con arreglo al plan normal, región de origen, estadísticas sobre sismos pasados, funciones de atenuación $I(D, b)$ empíricas, mapas de zonificación. El mapa resultante indicará o bien isolíneas de intensidades distintas para un periodo dado de retorno o bien isolíneas de periodos de retorno para una intensidad dada.

Las regiones fuente pueden ser definidas o bien estrictamente, sobre la base de la actividad pasada, o usando relaciones sismo-tectónicas para su extrapolación (sección 1.3.7). Algunos mapas de intensidad prevista no indican el periodo de tiempo en base al cual fueron preparados.

Merece la pena señalar que pese a los inconvenientes del empleo de la intensidad macrosísmica como parámetro, en el nuevo mapa de zonamiento sísmico de la URSS se ha vuelto a emplear según el procedimiento descrito en *Metodicheskiye Rekomendatsii* (1974), que muestra como se ha confeccionado este tipo de mapa de zonificación. Procede destacar que se requieren datos instrumentales como apéndices del mapa.

El método de confección de mapas de «sacudibilidad» (repetición de intensidad) fue concebido por Yu. V. Riznichenko (1966) y se aplica ampliamente en la URSS. La «sacudibilidad» $B(I)$ en un punto dado se define como la frecuencia media de unas intensidades iguales o mayores que una cierta intensidad I , con arreglo a la fórmula:

$$B(I) = \iiint_v N(I) dx dy dz \quad (1.34)$$

donde $N(I)$ es la frecuencia de I en un volumen elemental de una zona focal situada a una distancia dada del punto de que se trata. La función $B(I)$ representada por un gráfico indica el riesgo sísmico en cada punto, como efecto integral de la sacudida debida a todas las zonas focales circundantes (regiones fuente de sismos).

$$B(I) = \sum_s A \frac{\{[10^{2-(Cp/b)} r^{Sp/b} 10^{(p/b)I}]^{-\gamma} - (10^{K_{\max}})^{-\gamma}\} 10^{\gamma K_0}}{10^{0.5\gamma} \pm 10^{-0.5\gamma}} \Delta S \quad (1.35)$$

donde A , γ , K_{\max} son parámetros de la región fuente que están calculados para superficies elementales ΔS (en km^2), K_0 es una cantidad fija ($K_0 = 10$ si $A = 10$); otros parámetros se deducen de las relaciones:

$$I = bM + C - s \log D$$

$$K = \log E \text{ (joules)} = pM + q; \quad (1.36) \text{ y } (1.37)$$

numéricamente, $K = 1.8 M + 4$.

Los mapas de sacudibilidad han sido compilados ya sea para valores individuales de $I = \text{VI, VII, VIII, ...}$, con isolíneas correspondientes a diferentes periodos de retorno $T = 10, 20, 50, 100, 200, 500$ años, o para periodos fijos con isolíneas correspondientes a diferentes intensidades.

El nuevo mapa de zonificación de la URSS muestra las zonas donde se espera una intensidad máxima; en el mapa se diferencian las áreas definidas por los valores de intensidad observadas de las definidas en base a criterios geotectónicos o de otro tipo (fig. 1.6).

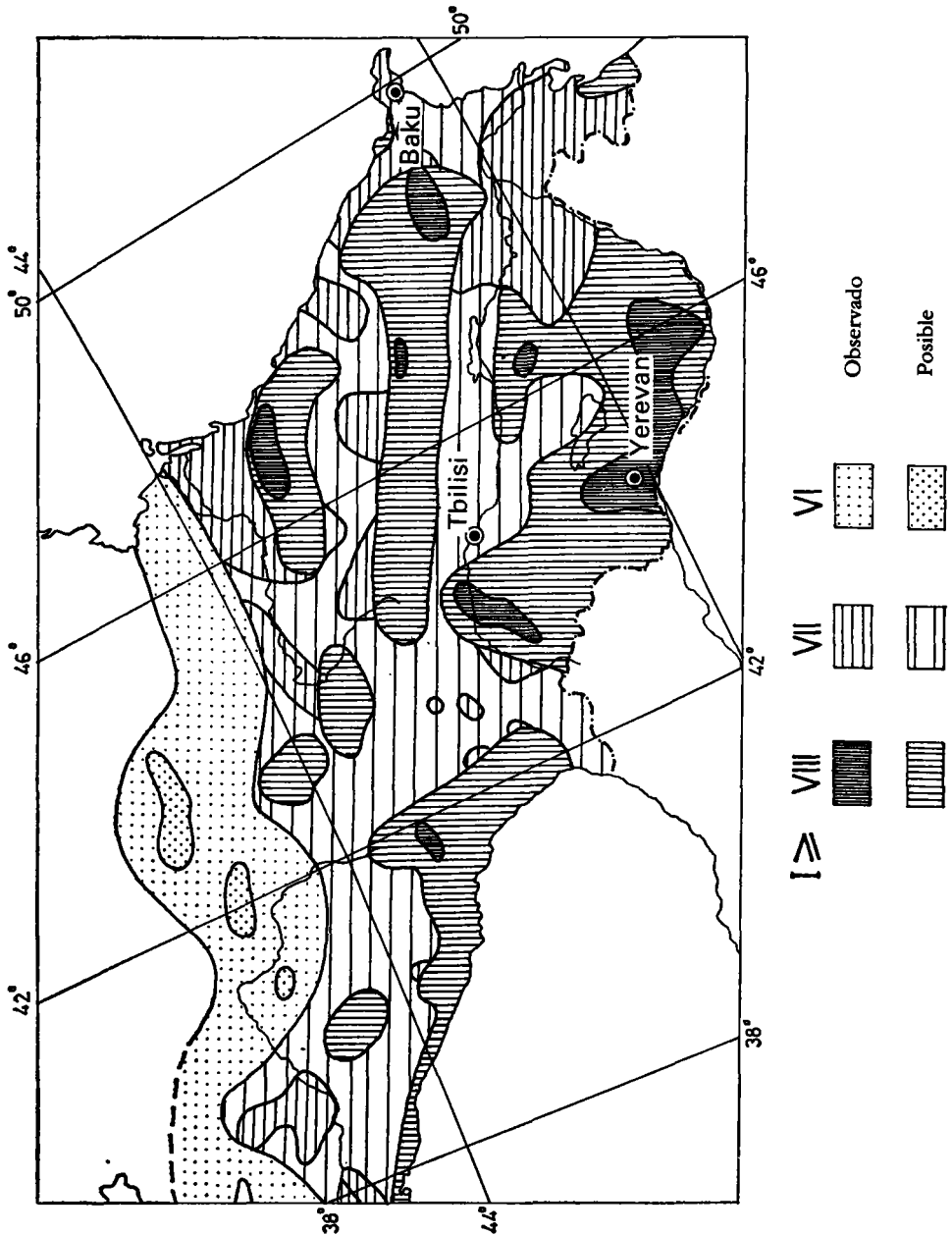


Figura 1.6. Mapa de la intensidad máxima que se puede esperar en la región de Crimea-Cáucaso. (Véase *Methodicheskie Rekomendatsii*, I.V. Ananin y otros, 1974.)

1.4.3 *Mapas de zonificación «técnica»*

Ciertos mapas de zonificación clasifican las zonas sísmicas basándose en otras cantidades, siendo las más corrientes los coeficientes sísmicos relacionados a un código de construcción. En el código se especifica la variación del coeficiente de acuerdo con las condiciones del suelo y el tipo de estructura. Otros mapas simplemente delimitan zonas de efectos destructivos, moderados y débiles *sin cifras cuantitativas*: por ejemplo la serie de mapas que acompañan el Código Uniforme de Construcción (California, 1973).

1.4.4 *Movimiento sísmico máximo (aceleración, velocidad, etc.) para diferentes periodos*

Se ha intentado cartografiar parámetros de los movimientos sísmicos tales como la velocidad de las partículas y la aceleración máxima. Se prefieren estas cantidades a la intensidad como base para los mapas de zonificación porque son más fácil y directamente utilizables a efectos de construcción o diseño de estructuras.

Desafortunadamente, los valores reales de aceleración, de velocidad, etc., no se han registrado hasta ahora en todo el mundo. En general, los movimientos fuertes del terreno se registran en la forma de aceleración, y la velocidad y el desplazamiento se obtienen por integración de los acelerogramas. Debido a la naturaleza de la respuesta de los acelerógrafos y a las dificultades encontradas en la integración de los acelerogramas, los datos relativos a la velocidad de la partícula son menos numerosos que los de aceleración; asimismo, se tienen menos datos de los desplazamientos bruscos del terreno y se piensa con fundamento que la cantidad de datos disponibles es insuficiente para confeccionar curvas de atenuación útiles para propósitos de zonificación. La mayor parte de los datos de fuertes movimientos, registrados instrumentalmente provienen de California (EE.UU.) y del Japón. Consecuentemente, los mapas de zonificación basados en la aceleración o la velocidad se basan ya sea en las relaciones de atenuación, extrapoladas de los datos registrados en esas dos áreas, o en los datos de atenuación de aceleración y velocidad obtenidos de las curvas de atenuación de la intensidad o de las relaciones entre intensidad y aceleración o velocidad. Algunos autores consideran (Housner, 1965) que las relaciones entre intensidad y aceleración no son fiables, aunque se han empleado de forma generalizada para establecer normas del movimiento del terreno para importantes instalaciones (Coulter y otros, 1974). Se cree que las relaciones de velocidad-intensidad son más dignas de confianza que las relaciones de aceleración-intensidad (Nuttli, 1973 a, b, c; Newmark y Rosenbleuth, 1971).

En la actualidad la preparación de mapas de aceleración o velocidad suelen basarse en: (1) datos de atenuación extrapolados de una región a otra y (2) datos de atenuación basados en su correlación con la intensidad observada.

Como en el caso de los mapas de zonificación basados en intensidad, los mapas de zonificación basados en la aceleración o velocidad se pueden trazar en base a suposiciones probabilísticas o determinísticas. El mapa de California preparado por Greensfelder (1974) es un buen ejemplo de un mapa determinístico de aceleración máxima. Greensfelder empleó, como lugar geométrico de los hipocentros sísmicos, las fallas que se sabía o se suponía que habían sido activas en los pasados diez mil años, conjuntamente con fallas seleccionadas que mostraban desplazamientos en el

cuaternario. A cada falla se le asignó una magnitud de un «probable sismo máximo». Las aceleraciones fueron cartografiadas empleando las curvas de atenuación-aceleración de Schnabel y Seed (1972).

La principal desventaja de los mapas de aceleración determinística y de velocidad es que no dan información relativa a la frecuencia de repetición de movimientos del suelo severos. Esto representa una seria desventaja, ya que por lo menos para ciertos tipos de estructuras (viviendas familiares sencillas), se ha demostrado que hay una mayor acumulación de daños, como consecuencia de los sismos moderados y frecuentes, que la que acarrea una gran sacudida ocasional (Algermissen y otros, 1972).

Cornell (1968, 1969, 1971) presentó un método detallado para la evaluación probabilística de los parámetros de los movimientos sísmicos y ya anteriormente existía una abundante literatura sobre esta materia.

El artículo de Cornell (1968) contiene una buena bibliografía de estos trabajos anteriores. Este autor emplea líneas, puntos y formas geométricas simples (círculos, anillos y sectores de círculos y de anillos) para llegar a una aproximación de las zonas de origen de terremotos. La técnica toma en cuenta la incorporación de información geológica para la selección de áreas fuente. En el método de Cornell se parte de la siguiente suposición básica: (1) en un área o en una línea fuente, los sismos son igualmente probables en toda la fuente o a lo largo de ella; (2) la tasa media de frecuencia de los sismos en un área es constante con el tiempo; (3) se supone una curva de Poisson en la distribución de la frecuencia. También supone ese autor una función exponencial ilimitada de la distribución de las magnitudes de los sismos. No obstante, esa distribución puede limitarse sin que repercuta considerablemente en el método. El procedimiento de Cornell fue aplicado por Kallberg (1969) para estimar los periodos de retorno de las aceleraciones en California del Sur. Merz y Cornell (1974) han considerado la contribución de los movimientos post-sísmicos al problema del movimiento del terreno.

Un método algo diferente ha sido empleado por Milne y Davenport (1965) en la preparación de un mapa de aceleración de la costa occidental de los Estados Unidos y parte del Canadá. Empleando los registros históricos de los terremotos como «fuentes» sísmicas, aplicaron la ley de atenuación a esas fuentes, obteniendo distribuciones acumuladas de frecuencia en una serie de puntos de una red arbitraria. La desventaja del método empleado por Milne y Davenport reside en la definición de las fuentes sísmicas, en la que no se ha empleado la información geológica.

El mapa tiene capacidad de previsión sólo en tanto el registro histórico sea representativo de futuras repeticiones de sismos.

Algermissen y sus colegas (1972, 1975) han desarrollado y ampliado una técnica para la estimación probabilística del movimiento sísmico, que en esencia es el mismo método de Cornell, con la excepción de que ciertas integraciones han sido reemplazadas por sumas discretas, lo cual trae consigo una cierta flexibilidad en la representación de las funciones de atenuación y de las áreas fuente. Los elementos implicados en esa técnica se ilustran de manera esquemática en la figura 1.7. La parte A de la figura 1.7, ilustra un área fuente hipotética. Los terremotos conocidos se indican por triángulos, las fallas conocidas por líneas continuas, y las fallas inferidas por las líneas de trazos.

Se elige un área fuente tal que encierra una superficie de sismicidad discreta y hasta donde se conoce, una zona de elementos tectónicos relacionados.

La parte B de la figura 1.7 indica la supuesta relación de $\log N$ con M para el área

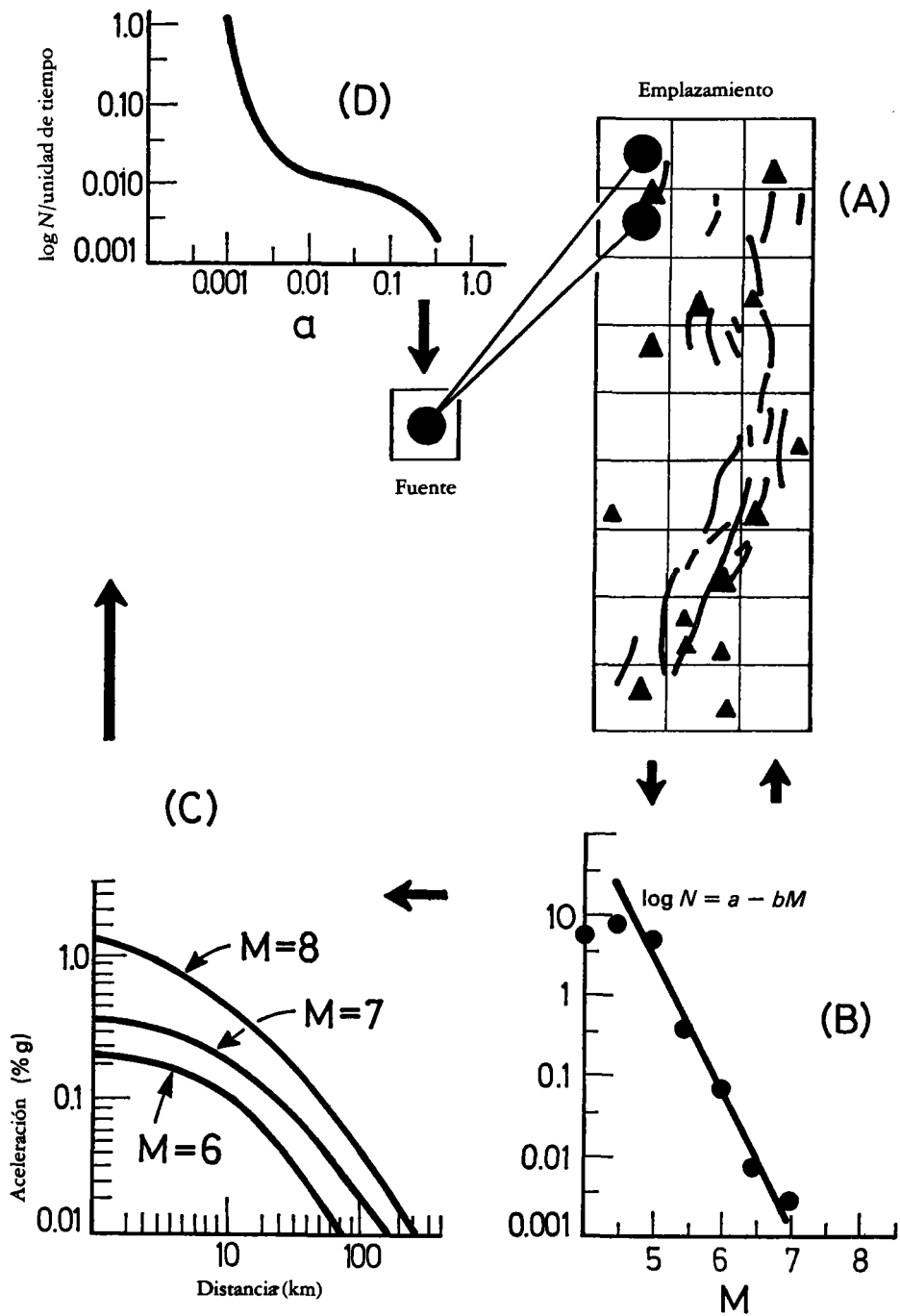


Figura 1.7. Elementos del método de zonificación (Algermissen y Perkins, 1972).

fuente que se muestra en la parte A. La relación $\log N = a - bM$ se especifica para cada área fuente empleando los datos de los sismos históricos corregidos para suplir sus insuficiencias. La relación $\log N$ con M determina la distribución de la actividad sísmica en el tiempo, lo que se supone sea una representación válida de la actividad futura. Espacialmente, los sismos dados por la relación $\log N$ con M , se supone que tienen la misma probabilidad de producirse en cualquier parte del área fuente.

Utilizando curvas adecuadas de atenuación (parte C, fig. 1.7) se puede determinar la distribución de las sacudidas sísmicas en cada punto (o área) de interés. A partir de esta distribución, se puede calcular la sacudida máxima en un número dado de años a cualquier nivel de probabilidad. Para propósitos cartográficos, se calcula la sacudida máxima para un nivel dado de probabilidad y en número dado de años en todos los puntos de una cuadrícula, trazando los contornos correspondientes.

La sacudida máxima del suelo en un determinado punto y en un número de años y a un cierto nivel de probabilidad, se calcula de la siguiente manera. Por el momento, supongamos que la medida particular de intensidad que deseamos emplear es la aceleración máxima que designamos como (a) o (A). Luego

$$F(a) = P[A \leq a; M \geq M_{\text{mín}}] \quad (1.38)$$

es la probabilidad de que la aceleración observada A sea menor o igual al valor a , dado que haya ocurrido un sismo con magnitud M , mayor que una cierta magnitud mínima de interés. El cálculo se hace para cada aceleración a de interés, por

$$F(a) = \frac{\text{Número de ocurrencias esperadas con } A \leq a \text{ and } M \geq M_{\text{mín}}}{\text{Número total de ocurrencias esperadas } (M \geq M_{\text{mín}})} \quad (1.39)$$

supongamos N eventos independientes, a los que acompañan las aceleraciones A_i . La distribución acumulada de las aceleraciones máximas de N aceleraciones está dada por:

$$F_{\text{máx}}(a) = P(\text{la máxima de las } N \text{ aceleraciones es menor o igual que } a); \quad (1.40)$$

$$= P(\text{cada una de las aceleraciones es menor o igual que } a);$$

$$= P(A_1 \leq a) P(A_2 \leq a) \dots P(A_n \leq a), \text{ ya que los eventos son independientes};$$

$$= F(A)^N, \text{ si los eventos están distribuidos de manera idéntica.} \quad (1.41)$$

Si N es una variable aleatoria

$$\begin{aligned} F_{\text{máx}}(a) &= F(a)^0 \cdot P(N=0) + F(a)^1 \cdot P(N=1) + \dots + F(a)^j \cdot P(N=j) + \dots \\ &= \sum_{j=0}^{\infty} F(a)^j \cdot P(N=j). \end{aligned} \quad (1.42)$$

Si N viene dado por una distribución de Poisson con una tasa promedio λ ,

$$\begin{aligned} F_{\text{máx}}(a) &= \sum_{j=0}^{\infty} F(a)^j \frac{\lambda^j e^{-\lambda}}{j!} = e^{-\lambda} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{[\lambda F(a)]^j}{j!} = e^{-\lambda} e^{\lambda F(a)} = \\ &= e^{-\lambda[1-F(a)]}. \end{aligned} \quad (1.43)$$

Ahora si $\lambda = \phi t$, donde ϕ es la tasa media anual y t es el número de años en un cierto periodo de interés, la probabilidad extrema es:

$$\begin{aligned} F_{\text{máx}, t}(a) &= e^{-\phi t(1-F(a))} \\ &= e^{-\phi t/R(a)} \\ &= e^{-t/R_y(a)} \end{aligned}$$

donde $R(a)$ es el número promedio de eventos que pueden ocurrir para obtener una aceleración que exceda de a . El periodo de retorno en años viene dado por:

$$R_y(a) = \frac{R(a)}{\text{Número esperado de eventos por año } (M \geq M_{\text{mín}})}, \quad (1.44)$$

$$R(a) = \frac{1}{1 - F(a)}.$$

La figura 1.8a muestra una aplicación de la técnica (Algermissen y Perkins, 1972) hecha en Utah y Arizona (EE.UU.).

Posteriormente el mismo método (fig. 1.8b) se aplicó a la región de los Balcanes (Algermissen y otros, 1975).

Un número de investigadores ha sugerido el uso de la estadística bayesiana a fin de estimar los parámetros de los movimientos del suelo. El empleo del teorema de Bayes requiere un conocimiento o suposición de una distribución probabilística, hecha a priori, de la variable bajo estudio. Luego, se incorporan los datos estadísticos y posteriormente se calcula una distribución de probabilidad. Un buen sumario, y una bibliografía del uso de las técnicas de Bayes ha sido dada por Newmark y Rosenbleuth (1971). Una discusión interesante es la hecha recientemente por Esteva y Villaverde (1974).

La principal dificultad en el empleo de la estadística de Bayes para estimar los parámetros del movimiento sísmico reside en suponer (o tener conocimiento de) una distribución idónea de probabilidad a priori. Con la cantidad creciente de investigación dirigida hacia un entendimiento de los mecanismos sísmicos se cree que la aproximación bayesiana encontrará más aplicación en el futuro.

1.4.5 Mapas de riesgo sísmico

La definición de riesgo sísmico no es uniforme, en todos los países; por ejemplo, en la URSS incluye «los efectos económicos y de otra índole de los sismos durante un largo periodo de tiempo; en relación con cada efecto, hay que determinar las características de la función de probabilidad». Tras ello se evalúa el riesgo sísmico en unas tablas que indican las estimaciones de probabilidad con respecto a las distintas categorías de estructuras (*Metodicheskiye Rekomendatsii*, 1974).

Donovan (1973) establece que el riesgo sísmico debería estar expresado en términos de periodos de retorno de intensidad o magnitud.

De acuerdo con D. Vere-Jones (1973), el concepto de riesgo sísmico se puede considerar desde tres puntos de vista:

- a. El riesgo geofísico que se refiere a la probabilidad de repetición de un terremoto catastrófico en una región específica.

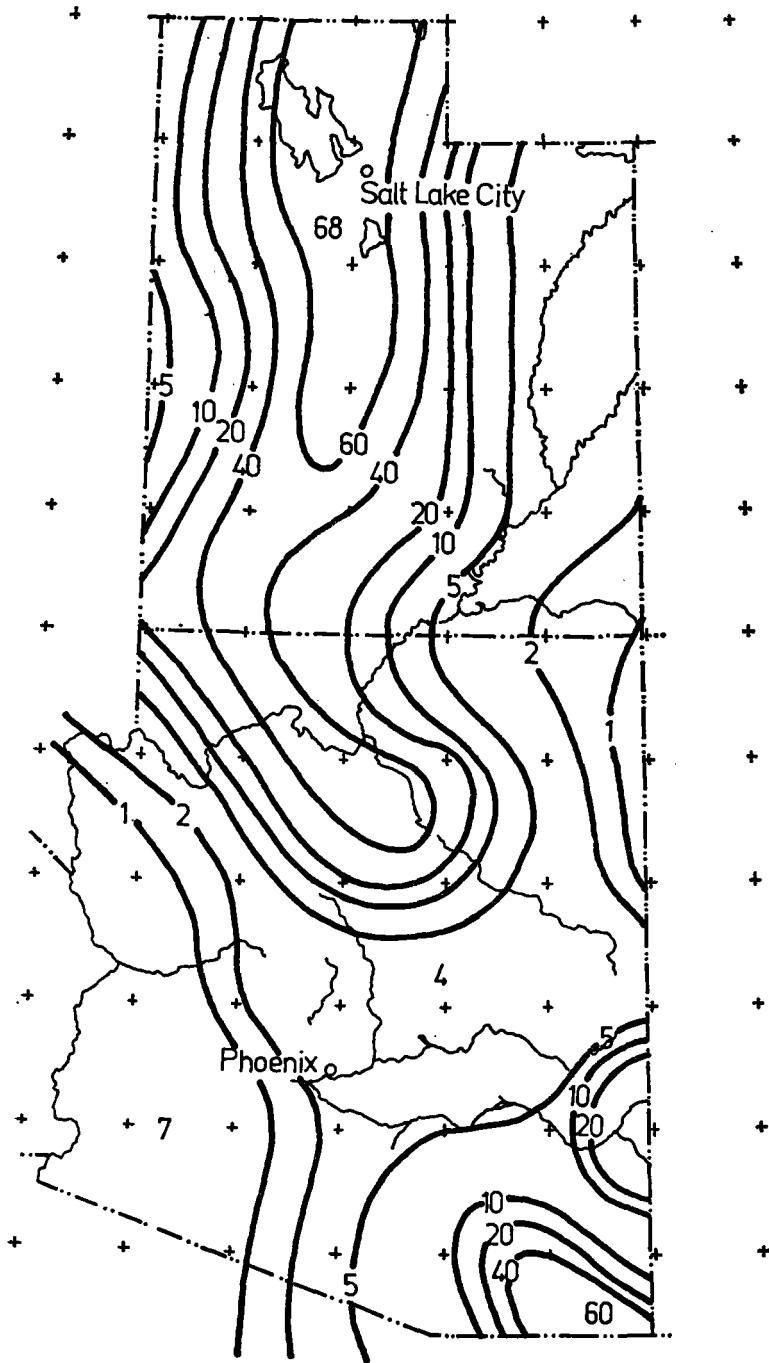


Figura 1.8a. La aceleración horizontal extrema 90 % probable (porcentaje de gravedad) en Utah y Arizona durante un periodo de 50 años. (Algermissen y Perkins, 1972.)

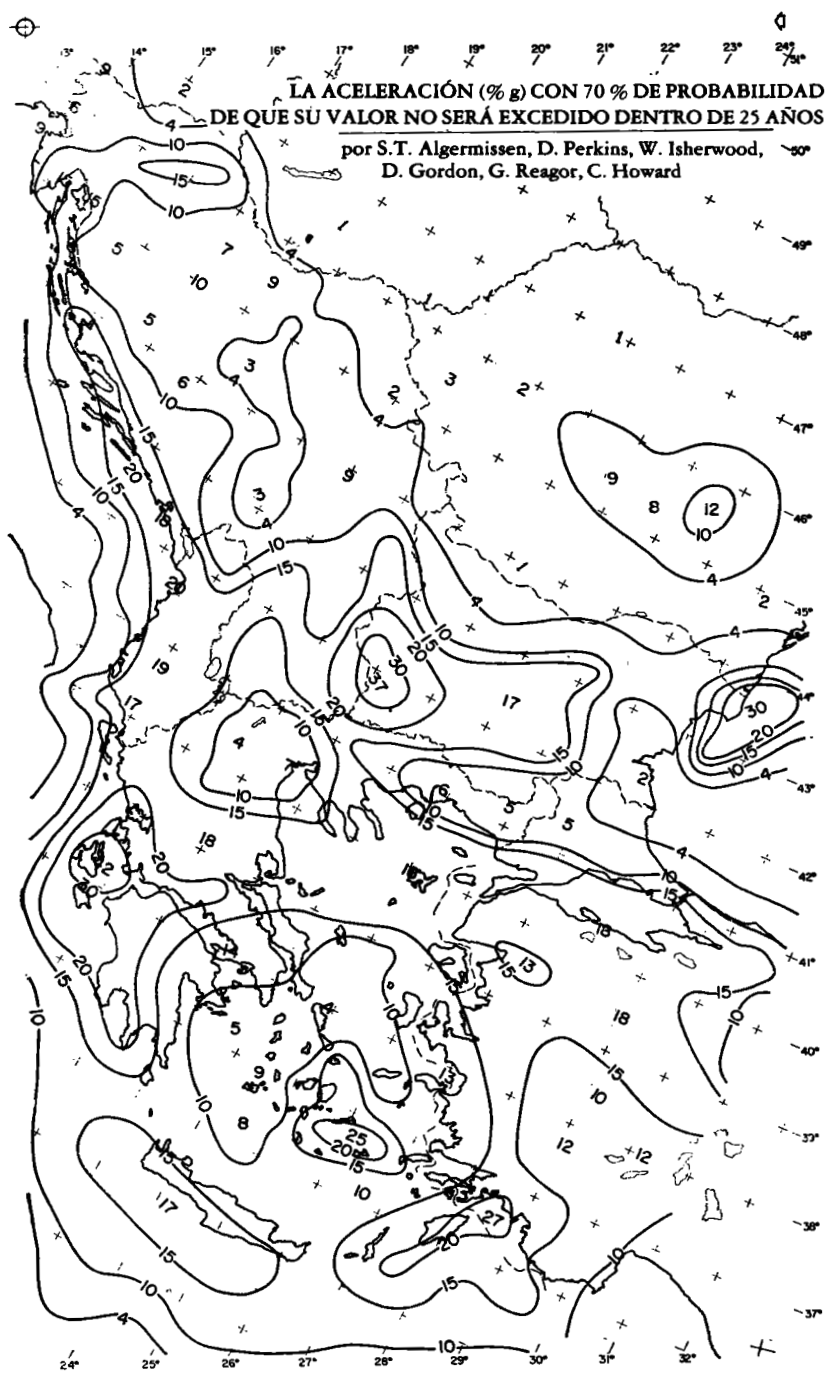


Figura 1.8b. Mapa de zonificación que muestra la aceleración máxima que se espera en la región de los Balcanes para un intervalo de 25 años, con una probabilidad de un 70 % de que no sea mayor (Algermissen y otros, 1975).

- b. El riesgo técnico, que se refiere a la probabilidad de que falle un tipo de estructura particular.
- c. El riesgo de seguro, que se refiere a la probabilidad de que las reclamaciones se atengan a una cantidad determinada. El grupo de trabajo de la UNESCO reunido en París (25-28 de abril de 1972) para el estudio estadístico de los peligros naturales llegó a la definición de que «un riesgo es una posibilidad de pérdida; el riesgo sísmico se refiere a la posibilidad de pérdidas provocadas por sismos, etc. y que un peligro natural es un estado de riesgo debido a la posibilidad de que se produzca una calamidad natural».

Así pues, los mapas de riesgo son o bien mapas que pertenecen a una de las categorías anteriores (es decir, lo que entendemos como mapas de zonas sísmicas) o bien mapas que proporcionan información sobre la amplitud y probabilidad de pérdidas en el caso de ciertos elementos (carreteras, edificios, etc.). Convendrá reservar la denominación de mapas de riesgo sísmico para los del segundo tipo. Basado en el trabajo realizado por Keilis-Borok y sus asociados en la URSS, se ha hecho ahora considerable labor de investigación de los sistemas de riesgo sísmico en los EE.UU. (Taleb-Agha y Whitman, 1975). El problema es determinar la probabilidad de que ocurran fallos simultáneos en dos o más instalaciones de un sistema durante un solo terremoto de manera que el sistema dejaría de funcionar eficazmente. Las instalaciones independientes pueden estar en lugares dispersos geográficamente. El trabajo es particularmente aplicable a las tuberías, redes de transporte, redes de comunicación y de energía, etc. Los métodos empleados comprenden una extensión de los métodos usados en los análisis aleatorios de la probabilidad, que han sido ya discutidos.

1.5 Conclusiones

Los resultados de la zonificación sísmica se aplican a las actividades de ingeniería, de planificación del uso de terrenos, en las medidas de prevención para los casos de urgencia, seguros e información pública. No obstante, nuestro conocimiento de los principios fundamentales sismológicos, geofísicos, geológicos, tectónicos y de mecánica de suelos no son todavía adecuados para nuestras necesidades y será preciso perfeccionarlos considerablemente en todos estos campos, a fin de poder reducir las grandes imprecisiones en la mayoría de los métodos descritos en las secciones anteriores.

Las metas principales son las siguientes:

- a. Establecimiento de las bases geológicas y geofísicas para evaluar la probabilidad de los sismos y las características de frecuencia y periodicidad.
- b. Conocimiento fundamental del comportamiento físico de las rocas y los suelos en condiciones sísmicas.
- c. Determinación, caracterización y cartografía de los datos superficiales de los sismos (fallas, quiebras de terreno, cambios de elevación, efectos relacionados con el agua).
- d. Determinación de la relación entre las propiedades geológicas y de los suelos y los movimientos sísmicos fuertes.

e. Definición y evaluación del riesgo sísmico a efectos de aplicación práctica (ingeniería, consecuencias sociales y económicas e industria).

Se pueden elaborar programas de investigación, pero el ritmo del progreso dependerá en primer término de los recursos humanos y materiales que se dediquen a ella. El desarrollo industrial de nuevas zonas y el crecimiento demográfico plantearán con frecuencia y urgencia todavía los mayores problemas de riesgo sísmico y de su reducción. Tan sólo un amplio programa de investigación pura y aplicada puede proporcionar orientación necesaria para determinar unas medidas económicamente coherentes y limitar o evitar los costos y pérdidas excesivos en los que se incurre cuando los conocimientos son insuficientes.

Reconocimientos

Este trabajo se originó durante la Misión de Reconocimiento de la Sismicidad en la región de los Balcanes en 1975, que fuera patrocinada por la UNDP-UNESCO. Estamos muy agradecidos por los comentarios de N.V. Shebalin y V.I. Bune y por las discusiones de D. Perkins, D. Procházková y Z. Schenková.

1.6 Referencias

- ALGERMISSEN, S. T. 1973. The problem of seismic zoning. In: U.S. National Bureau of Standards, *Building Practices for Disaster Mitigation*, p. 112-125 (Building Science Series 46, Feb. 1973).
- ; et al. 1975. *Seismic risk evaluation of the Balkan Region. Report for UNDP/Unesco Survey of the Seismicity of the Balkan Region*. Denver, U.S. Geological Survey.
- ; PERKINS, D. M. 1972. A technique for seismic zoning: General considerations and parameters. *Proc. Intern. Conf. on Microzonation for Safer Construction, Research and Application, Seattle, Wash.*, vol. II, p. 865-878.
- ; RINEHART, W. A.; STEPP, J. C. 1972. A technique for seismic zoning: economic considerations. *Proc. Intern. Conf. on Microzonation for Safer Construction, Research and Application, Seattle Wash.*, vol. II, p. 943-956.
- AMBRASEYS, N. N. 1973. Dynamics and response of foundation materials in epicentral regions of strong earthquakes. *Proc. Vth World Conf. Earthqu. Engng., Rome*, pp. CXXVI-CXLVIII.
- BOLT, B. A. 1974. Duration of strong ground motion. *Proc. Vth World Conf. Earthqu. Engng., Rome*, vol. 1, p. 1304-1313.
- BORISOV, B. A.; REISNER, G. I.; SHOLPO, V. N. 1975. Vydeleniye seismoopasnykh zon v alpiyskoy skladchatoy oblasti. Nauka, Moscow. 138 pp.
- BULLEN, K. E. 1955. On the size of strained region prior to an extreme earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 45, no. 1.
- CORNELL, C. A. 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 58, p. 1583-1606.
- . 1971. Probabilistic analysis of damage to structures under seismic loads. *Dynamics in Civil Engineering*, p. 473-493. Wiley.
- ; VANMARIKE, E. H. 1969. The major influence on seismic risk. *Proc. IVth World Conf. Earthqu. Engng.*, IAEE, Santiago.
- COULTER, H. W.; WALDRON, H. H.; DEVINE, J. F. 1974. Seismic and geologic siting considerations for nuclear facilities. *Proc. Vth World Conf. Earthqu. Engng., Rome*, p. 2410-2421.
- DONOVAN, N. C. 1973. *Earthquake Hazard. for Buildings*. U.S. National Bureau of Standards. (Building Science series, 46).
- ESTEVA, L.; VILLAVERDE, R. 1974. Seismic risk design spectra and structural reliability. *Proc. Vth World Conf. Earthqu. Engng., Rome*, vol. 2, p. 2586-2596.
- GORSHKOV, G. P.; KÁRNÍK, V.; SIKOŠEK, B. (eds.). 1974. *Proceedings of the seminar on the seismo-*

- tectonic map of the Balkan Region, Dubrovnik, 17-26 April 1973*, Skopje, Unesco Project Office, 290 pp, 58 maps.
- GREENSFELDER, R. W. 1974. *Maximum credible rock acceleration from earthquakes in California. Map sheet 23*. California Div. of Mines and Geology, 12 pp.
- GUMBEL, E. J. 1958. *Statistics of Extremes*. New York, Columbia University Press. 375 pp.
- GUTENBERG, B.; RICHTER, C. F. 1949. *Seismicity of the Earth*. Princeton Univ. Press. 310 pp.
- HOUSNER, G. W. 1965. Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault. *Proc. IIIrd World Conf. Earthqu. Engng., New Zealand*, vol. III, p. 94-115.
- KALLBERG, K. T. 1969. *Seismic risk in Southern California*. (M.I.T. School of Engineering, Research Report. R69-31) 70 pp.
- KÁRNÍK, V.; SCHENKOVÁ, Z. 1976. Application of the largest value theory to Balkan Earthquakes. *Proc. Seminar on Seismic Zoning Maps*, Unesco Project, Skopje, vol. 1, p. 193-205.
- KELLIS-BOROK, V. I.; KRONROD, T. L.; MOLCHAN, G. M. 1973. Algoritm dlya otsenki seismicheskogo riska, Vychislitelnye i statisticheskie metody interpretatsii seismicheskikh dannyykh, Nauka, Moscow, p. 21-43.
- KOBAYASHI, Y. 1974. Duration of strong ground motion. *Proc. Vth World Conf. Earthqu. Engng., Rome, IAEE*, vol. 1, p. 1314-1315.
- KOLMOGOROV, A. N. 1941. Über das logarithmisch normale Verteilungsgesetz der Dimensionen der Teilchen bei Zerstückelung. *Izv. AN S.S.S.R.* vol. 31, p. 1-99.
- LOMNITZ, C. 1974. *Global tectonics and earthquake risk*. Amsterdam, Elsevier. 320 pp.
- MERZ, M. A.; CORNELL, C. A. 1974. Aftershocks in engineering risk and analysis. *Proc. Vth World Conf. Earthqu. Engng., Rome, IAEE*, vol. 2, p. 2568-2571.
- (BUNÉ, V. I., ed.) 1974. *Metodicheskie rekomendatsii po seismicheskomu rayonirovaniyu territorii S.S.S.R.* Moscow Institut Fiziki Zemli, Academy of Sciences, 195 pp.
- MILNE, W. G.; DAVENPORT, A. G. 1965. Statistical parameters applied to seismic regionalisation. *Proc IIIrd World Conf. Earthqu. Engng., New Zealand*, vol. III, p. 181-194.
- MOGI, K. 1967. Earthquakes and fractures. *Tectonophysics*, vol. 5, no. 1, p. 35-55.
- NEWMARK, N. M.; ROSENBLUETH, E. 1971. *Fundamentals of Earthquake Engineering*. Prentice Hall, 640 pp.
- NUTTLI, O. W. 1973a. Design earthquakes for the Central United States, Report I, State of the Art for Assessing Earthquake Hazards in the U.S.A., publ. by U.S. Army Waterways Experiment Station, Soils and Pavements Laboratory, Vicksburg, Miss., 48 pp.
- . 1973b. The Mississippi Valley earthquakes of 1811 and 1812: intensities, ground motion and magnitudes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 63, p. 227-248.
- . 1973c. Seismic wave attenuation and magnitude relations for Eastern North America. *J. Geophys. Res.*, vol. 78, no. 5, Feb. 10, 1973, p. 876-885.
- OKAMOTO, S. 1973. *Introduction to Earthquake Engineering*. Tokyo, Univ. of Tokyo Press, 571 pp.
- ORPHAL, L. D.; LAHOUD, J. A. 1974. Prediction of peak ground motion from earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 64, p. 1563-1574.
- PURCARU, G. 1973. The informational energy and entropy in statistics and prediction of earthquakes. *Riv. Ital. Geofis.*, vol. XXII, no. 516, p. 323-355.
- Report on Proceedings of the International Symposium on Strong Earthquake Motion, Mexico City, 14-18 Aug. 1972*. Paris, Unesco, (SC/WS/535), 11 May 1973, 15 pp.
- Report of the Working Group on the definition of seismicity and strong ground motion, Paris, 17-19 July 1974*. Paris, Unesco, 8 Nov. 1974, 14 pp.
- RICHTER, E. F. 1935. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 25, p. 1-32.
- RITSEMA, A. R. 1974. *The earthquake mechanisms of the Balkan Region*. Report for UNDP/ Unesco Survey of the Seismicity of the Balkan Region. K.N.M.I., De Bilt, (Sc. Rep. No. 74-4).
- RIZNICHENKO, Yu. V. 1966. *Raschet sotryasaemosti tochek zemnoy poverkhnosti ot zemletryaseniya v okruzhayushey oblasti*. Moscow, Nauk. (Fizika Zemli no. 5).
- . 1971. Ot maksimalnoy ballnosti zemletryaseniya k spektralno-vremennoy sotryasaemosti. *Izuchenie seismicheskoy opasnosti*, Tashkent, 3-14.
- SCHNABEL, B.; SEED, H. BOLTON. 1972. *Accelerations in rock for earthquakes in the Western United States*. University of California, Berkeley. Earthqu. Engng. Res. Center, Rep. No. EERC 72-2, July 1972.
- SCHOLZ, C. H. 1968. The frequency-magnitude relation of micro-fracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* vol. 58, p. 399-415.

- SHEBALIN, N. V. 1971. On maximum magnitude and maximum intensity of an earthquake. *Izvestiya AN S.S.S.R., Fizika Zemli*, no. 6.
- TALEB-AGHA, G. 1975. *Seismic Risk Analysis of Networks*. Dept. of Civil Engineering, MIT, 128 p. (MIT-CE R75-43).
- ; WHITMAN, R. V. 1975. *Seismic Risk Analysis of Discrete Systems*. Dept. of Civil Engineering MIT, 72 pp. (MIT-CE R75-48).
- TRIFUNAC, M.; BRADY, A. G. 1975. Correlations of peak acceleration and intensity. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 65, p. 139-162.
- UNIFORM BUILDING CODE, 1973. *International Conference of Building Officials*. Whittier, California, 702 p.
- VERE JONES, D. 1973. The statistical estimation of earthquake risk. *Bull. N.Z. Soc. Earthqu. Engng.*, 6 Sept. 1973, p. 122-127.
- VINOGRADOV, S. D. 1962. Experimental study of the distribution of the number of fractures in respect to the energy liberated by the destruction of rocks. *Bull. Acad. Sci. U.S.S.R., Geophys. Ser.*, p. 1292-1293.

2 Microzonificación sísmica y problemas conexos

Por JAKIM T. PETROVSKI

2.1 Introducción

Las grandes devastaciones que afectan la economía de los países situados en regiones de gran sismicidad ponen claramente de manifiesto la necesidad de tomar enérgicas medidas para reducir las pérdidas de vidas humanas y bienes materiales durante los sismos catastróficos. Los países en desarrollo, con grandes concentraciones de inversiones sociales en zonas sísmicas, deben dedicar especial atención a la futura protección de unos sistemas vitales y onerosos, a fin de evitar graves quebrantos económicos. Igualmente vulnerables son los países que cuentan con una tecnología muy desarrollada. Muchas grandes regiones urbanizadas e industrializadas situadas en sectores de gran sismicidad se han desarrollado sin tomar debidamente en consideración los efectos de los posibles sismos. Al progresar la economía y construirse estructuras importantes tales como presas, centrales de energía, edificios e instalaciones industriales, la sociedad estima procedente proteger esas considerables inversiones contra los sismos. Se observa que cuanto más desarrollada es una economía, tanto mayores esfuerzos está dispuesta a desplegar la sociedad para protegerse contra los sismos.

El mejor modo de determinar la protección adecuada contra los sismos consistiría en establecer unos criterios, técnicamente coherentes y económicamente justificados, aplicables a la concepción de estructuras asísmicas en todo el país. A efectos de planificación regional y de urbanismo, así como de concepción de estructuras antisísmicas, la determinación de zonas y microzonas sísmicas parece ser un buen modo de llegar a establecer criterios uniformes. En la zonificación sísmica se toma en consideración la distribución de los peligros sísmicos en todo el país o en regiones más extensas; la microzonificación sísmica se refiere en cambio a una distribución más detallada de riesgo sísmico en cada una de las zonas definidas en la zonificación sísmica.

Es esencial conocer de manera cabal la índole de los daños provocados por los grandes sismos para poder establecer y mejorar los criterios de concepción de estructuras antisísmicas. Ahora bien, la mayoría de los estudios sobre la distribución de las calamidades causadas por los sismos indican que las zonas de daños intensos

están muy localizadas y que la envergadura de esos daños puede cambiar bruscamente en una distancia apenas de 0.5 a 1 km. Algunas variaciones de los daños de las estructuras se han atribuido a menudo a las condiciones del suelo, y a la geología local, especialmente cuando se trataba de materiales de cimentación débiles. Incluso no habiendo tales problemas de cimiento, se ha observado que las intensidades de las sacudidas sísmicas varían considerablemente en distancias muy cortas (Hudson, 1972a). Esto ha incitado a ciertos investigadores a pensar que el factor esencial para la evaluación del daño en las estructuras son las condiciones del subsuelo local.

Se sabe que los daños que padecen las estructuras debido a los sismos dependen de la índole del flujo de energía sísmica recibida y de las características de las propias estructuras. A efecto de concepción de estructuras, los principales parámetros de las sacudidas sísmicas son la amplitud, la distribución de la frecuencia y la duración de la sacudida. Estos parámetros dependen de varios factores, tales como el mecanismo de la fuente sísmica, la orientación del lugar con respecto a la fuente (Udwadia; 1972), la topografía superficial, la configuración subsuperficial (Trifunac, 1973) y las propiedades físicas de los medios a través de los cuales se propagan las ondas. Debido al carácter complejo del mecanismo de la fuente sísmica y a las irregularidades y falta de homogeneidad de los estratos superficiales, resulta difícil determinar su influencia real en las sacudidas del suelo local. Dado el número relativamente pequeño de mediciones significativas de los movimientos sísmicos fuertes en regiones epicentrales, se sabe muy poco sobre los numerosos factores que afectan a los movimientos de tierra en un lugar dado. Uno de los factores que ha sido estudiado más exhaustivamente es el relacionado con las propiedades del subsuelo y geológicas locales. Las conclusiones derivadas de los estudios relativos a las condiciones locales del suelo han ejercido una fuerte influencia sobre la metodología de microzonificación sísmica.

Las principales características de los métodos de microzonificación sísmica empleados en la evaluación del riesgo sísmico y en los parámetros de diseño antisísmico en Japón, la URSS, los Estados Unidos de América y en otros países, se compendian en el presente trabajo. Se discuten algunos de los principales aspectos de la evaluación y aplicación de los métodos y técnicas corrientes, como también las necesidades futuras para la evaluación del riesgo sísmico y para el desarrollo de criterios de diseño a prueba de terremoto. La cantidad y diversidad de la materia a tratar no permite una discusión y una documentación detalladas. Ciertos aspectos importantes del tema tienen —y sin duda seguirán teniendo— un carácter claramente especulativo, y no cabe realmente pensar en unas respuestas exactas ni siquiera a las preguntas más básicas. Hay entre los expertos grandes diferencias de opinión y no cabe intentar en este trabajo presentar una evaluación equilibrada de todos los puntos de vista.

2.2 Métodos de microzonificación sísmica desarrollados en Japón

De sus experiencias relacionadas con los efectos destructores de los pasados sismos, varios investigadores japoneses reconocieron que podía existir una relación entre los daños y las condiciones del suelo. Consecuentemente y sobre esas bases, se desarrolló en 1950, un método para la microzonificación sísmica. Se propuso clasifi-

car las condiciones del suelo en cuatro categorías y se incorporaron a los códigos de construcción los coeficientes sísmicos de diseño requeridos en los diversos tipos de edificios (enmaderados, acero, hormigón armado y albañilería) como también las categorías correspondientes de suelos (zonas). Ejecutando estos adelantos, se hizo un primer mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Yokohama (Ohsaki, 1972); luego, la ciudad de Tokio y otras ciudades publicaron sus mapas de microzonificación. Todos esos mapas presentan subdivisiones de las áreas de la ciudad de acuerdo con las condiciones del suelo.

Los investigadores japoneses al interpretar los efectos sísmicos sugirieron que existía una relación muy íntima entre los daños causados a los edificios y los periodos naturales predominantes de las capas del suelo. Kanai desarrolló una técnica para la medición de las características dinámicas del terreno utilizando microtemblores (Kanai y Tanaka, 1961; Kanai y otros, 1966).

Los microtemblores son vibraciones continuas del terreno con amplitudes pequeñas, del orden 0.1 a 1 micrón. Su origen está relacionado con perturbaciones naturales y artificiales tales como el viento, las olas marinas, el tráfico, los ruidos industriales y otras causas. Al analizar un gran número de registros de microtemblores, obtenidos en diferentes sitios y con variadas condiciones de suelo, Kanai dedujo que se da una distribución de microtemblores representativa para cada tipo de suelo mencionado en el código, con sus correspondientes periodos predominantes de vibración y amplitudes. Sugirió que la medición de los microtemblores constituiría una herramienta efectiva para la microzonificación sísmica. Para la clasificación de zonas sísmicas en base al tipo de suelo propuso dos métodos, el primero basado en los periodos medio y más largo de los microtemblores y el segundo en la amplitud máxima y en el periodo predominante. Esta clasificación se hizo a partir del conocimiento de los daños causados en los terremotos anteriores.

Debido a su simplicidad, el método se ha aplicado extensivamente en Japón y en muchos otros países para propósitos de microzonificación sísmica (Ergunay y Bayulque, 1974; Kirijas y Stojkovic, 1968; Kobayashi y Kárník, 1974; Latrico y Moge, 1972; Leventakis y Roussopoulos, 1974; Roussopoulos y Leventakis, 1974; Stojkovic y Mihajlov, 1971, para la evaluación de daños sísmicos Espinosa y Algermissen, 1972, Stojkovic, 1974 y para la estimación del peligro potencial, Stojkovic, 1974).

Al ponerse en marcha instrumentos destinados a medir las fuertes sacudidas del terreno en Japón, se comenzó la recolección de acelerogramas y se desarrolló un método que usaba el concepto de espectro para el análisis de las respuestas de las estructuras, obteniéndose así espectros de respuestas de aceleración normalizada, tanto para terrenos firmes como blandos. El espectro de respuesta para terrenos firmes mostraba un pico pronunciado a una frecuencia relativamente alta, mientras que el espectro de respuesta para terrenos blandos indicaba un pico aplanado en una gama de frecuencia más amplia, con valores significativamente menores de pico (Ohsahi, 1972).

Los investigadores japoneses, después de haber analizado veinticuatro registros acelerográficos del terremoto de Higashi-Matsuyama de 1968, que se obtuvieron en el sótano de un edificio de hormigón armado en Tokio, y después de haber examinado los daños sufridos por los edificios de hormigón en el terremoto de Tokachi-Oki de 1968, llegaron a la conclusión de que se deberían aumentar los coeficientes de cizalla de la base en el diseño; adoptaron también nuevos factores en los códigos de construcción que eran representativos de las condiciones del suelo,

del tipo de estructura y del periodo fundamental. En cada una de las cuatro zonas, se adoptaron en forma de espectros de diseño los coeficientes de cizalla para el diseño de estructuras de hormigón armado y de acero. En los edificios de albañilería en suelos firmes se aumentaron esos coeficientes, mientras que en las estructuras de madera se conservaron los mismos valores.

En síntesis, la experiencia japonesa en la microzonificación sísmica se basa en los daños observados en los edificios tradicionales de madera, en las estructuras modernas de hormigón armado, en las de albañilería y en las de acero, y se basa también en los registros acelerográficos y en las investigaciones minuciosas de las características dinámicas de las capas superficiales por medio del estudio de los microtemblores. El punto más crítico de la clasificación japonesa del suelo está relacionado con el uso de los microtemblores.

La validez del empleo de los microtemblores en la evaluación de las propiedades dinámicas de las capas superficiales del suelo durante las sacudidas fuertes se presta a la discusión, ya que existen diferencias de varios órdenes de magnitud en los niveles de deformación. Otros investigadores (Udwadio y Trifunac, 1973) no han encontrado ni siquiera una correlación simple. Si se espera un comportamiento no lineal de los suelos en la región epicentral (Ambraseys, 1970, 1972, 1973; Arsovski y otros, 1970; Kobori y otros, 1972; Papastamatiou, 1973; Peacock y Seed, 1968; Petrovski y otros, 1967; Petrovski, 1974) habría ciertos deterioros de las propiedades de la rigidez del suelo y por lo tanto ocurrirían cambios significativos en la frecuencia y amplitud de la respuesta.

Kanai y sus colaboradores, que estudiaron microtemblores y pequeños terremotos, desarrollaron modelos de reflexión múltiple de ondas S para los análisis de respuesta de los medios multiestratificados (Kobayashi y Kazami, 1972). Se estableció una fórmula empírica para el cálculo de la velocidad en el substrato rocoso, formulándose también las características de las ondas incidentes en el mismo (Kobayashi y Kazami, 1972; Ohsaki, 1972). Este procedimiento se ha empleado en Japón y en otros países para la evaluación de la distribución de los daños en terremotos pasados y para la microzonificación sísmica (Kobayashi y Kazami, 1972; Seed y Schnabel, 1972; Stojkovic y otros 1973; Stojkovic y otros, 1974).

Con el desarrollo de los modelos y métodos para el análisis de la respuesta de las capas del suelo y de las técnicas de campo y de laboratorio para la medición de las propiedades dinámicas de los suelos, la microzonificación sísmica está comenzando a ser un método mucho más consistente desde el punto de vista físico. Varios estudios recientes hechos en Japón (Kobayashi y Kazami, 1972; Kobayashi, 1974), como también en otros países (Dezfulian y Seed, 1970; Espinosa y Algermissen, 1972; Idriss y Seed, 1968, 1970; Seed e Idriss, 1970 a, b; Schnabel y otros, 1971; Seed y otros, 1972; Stojkovic y otros, 1973; Stojkovic y otros, 1974; Tezcan y Durgunoglu, 1974), han demostrado que existe una correlación satisfactoria entre la evaluación de los daños sísmicos, la estimación de los daños potenciales y la microzonificación sísmica de áreas urbanas. Un ejemplo particularmente completo es el caso de la ciudad de Osaka (Kobori y otros, 1972). Este estudio se emprendió para evaluar el peligro sísmico, e ilustra el uso de métodos modernos que incluían la sismología, la dinámica de suelos y la ingeniería sísmica. Sobre la base de la sismicidad histórica de Osaka se seleccionaron dos tipos de diseños sísmicos (uno cercano y el otro distante), para la representación del movimiento del substrato rocoso. Se consideraron varios modelos de terreno con diferentes espesores de aluvión y con

diferentes profundidades del substrato. Los movimientos sísmicos del terreno se presentaron en la forma de espectros de respuesta que dependían de las condiciones locales del suelo y de las características de la deformación. Luego se perfeccionó un modelo práctico para evaluar la respuesta elasto-plástica al sismo del sistema de interacción suelo-estructura, el cual se basó en la linealización y espectro de respuesta, que incluía una relación de proporción entre los coeficientes de cizalla y el índice máximo de ductilidad. Empleando tales procedimientos, se efectuó esta microzonificación que tuvo como fin la evaluación de los riesgos sísmicos de los edificios existentes y el establecer criterios de diseño óptimos para las futuras edificaciones. Es interesante observar que el cálculo de la aceleración en superficie para el que se emplearon unas características de suelo dependientes de la deformación, proporcionó resultados que estaban de acuerdo con los valores obtenidos en un terremoto distante, y que fuera registrado en 1971.

2.3 Métodos de microzonificación sísmica desarrollados en la URSS

Los investigadores de la URSS, encabezados por S.V. Medvedev (1962, 1972) perfeccionaron un método para la microzonificación sísmica que se basó en el comportamiento de los edificios bajos de albañilería durante los sismos destructores. De acuerdo con sus recomendaciones, la fuerza lateral ($F = k_c \beta \eta Q$) en el diseño antisísmico de estructuras, está dada como el producto del coeficiente sísmico (k_c), el coeficiente dinámico (β), un factor nodal (η) y el peso de la estructura (Q). Los mapas de zonificación sísmica en la URSS definen un grado de intensidad para las condiciones medias del terreno según la escala de intensidad MSK (Medvedev, 1962). La microzonificación sísmica consiste en la evaluación del incremento de la intensidad sísmica de diseño, debido a las condiciones del lugar y tiene en cuenta los tipos de suelo en las capas más superficiales y la profundidad del nivel freático. La intensidad sísmica de diseño —con una correlación según la importancia de la estructura considerada— se obtiene al sumar un incremento al nivel básico de sismicidad. Los coeficientes de diseño sísmico se seleccionan para la intensidad correspondiente de diseño contemplada en el código. El coeficiente dinámico (β), como espectro uniforme para todas las estructuras, está especificado en el código. La evaluación de las fuerzas laterales de diseño se hace por medio del método espectral de análisis. El método de «rigidez sísmica» que fuera perfeccionado para la microzonificación sísmica, se basa en una relación entre los daños causados, que se expresa como intensidad sísmica y la rigidez de las capas superficiales del suelo. Por lo general se encuentra que, cuando disminuye la rigidez del terreno, aumenta la destrucción. Medvedev (1962), empleando los resultados de las observaciones de los daños sísmicos y la determinación geofísica de las velocidades de las ondas longitudinales en las capas de superficie, propuso una fórmula empírica para la evaluación de la intensidad sísmica:

$$\Delta J_i = 1.67 \log_{10} \frac{\rho_0 V_0}{\rho_1 V_1} + e^{-0.04h_i^2}$$

donde ρ_0 , V_0 y ρ_1 , V_1 son las densidades y las velocidades de la onda longitudinal en el tipo patrón y en los tipos de suelo considerados, respectivamente. El segundo

término expresa la influencia del nivel freático sobre el incremento como una función de la profundidad (b_1) del nivel freático bajo la superficie. En las observaciones realizadas en Ulan-Bator, se dedujo que, cuando disminuía la profundidad del nivel freático, aumentaba la amplitud de vibración de los suelos no consolidados (Ershov, 1965) y que los efectos sísmicos en terrenos granulares saturados dependían en gran parte de la presencia de rellenos arcillo-arenosos. Cuanto más grande era la cantidad del relleno de arcilla-arenosa, tanto mayor era el aumento de la intensidad sísmica debida a la saturación del agua.

Los investigadores de la URSS, reconociendo la importancia de la velocidad de la onda transversal (V_s) en las propiedades dinámicas del suelo y la gran dispersión observada en los valores de V_p (velocidad de la onda longitudinal) modificaron la fórmula básica para el cálculo del incremento de la intensidad sísmica, introduciendo la velocidad de la onda transversal y omitiendo de la fórmula el segundo término relativo a la influencia del nivel freático.

Recientemente, y en un intento para derivar las relaciones correspondientes para la microzonificación sísmica, se han estudiado registros de pequeños sismos, encontrándose una fórmula empírica (Ershov, 1965) en la que el incremento de intensidad sísmica es proporcional a la razón de amplitudes entre un punto determinado y un punto de referencia. Un método más refinado de la microzonificación sísmica que utiliza los registros de pequeños temblores, consiste en estimar el posible espectro de respuesta del movimiento del terreno correspondiente a las características espectrales de la capa de suelo y al espectro de respuesta del substrato rocoso. Este método se aplicó en el estudio de la ciudad de Petropavlovsk-Kamchatsky (Steinberg, 1973) en donde se seleccionaron emplazamientos típicos para investigaciones detalladas de geología y de suelos y los resultados se compararon con la distribución observada de daños producidos por el sismo del 4 de mayo de 1959. En tres estaciones sismológicas temporales, en que una de ellas servía como referencia en un terreno patrón, se registraron varios sismos con magnitudes que variaban de 2 a 6 ($\Delta = 100$ km). En cada punto de observación se registraron de 8 a 10 sismos, los cuales se analizaron por el método de Fourier, para obtener un espectro de respuesta promedio para los registros de sismos con magnitudes similares. Las características espectrales de las capas de suelo en los lugares de observación se determinaron como una razón entre el espectro promedio para cada lugar y el espectro de la estación de referencia. Se estableció la relación entre los parámetros del espectro de respuesta promedio de movimiento del substrato y la magnitud de los temblores registrados y luego se calculó el espectro de respuesta para un posible sismo máximo de magnitud $M = 8.3$. Los espectros de respuesta del movimiento del substrato se emplearon como datos de entrada en el cálculo del espectro de respuesta para varias localidades. Finalmente, para la microzonificación sísmica de la ciudad se seleccionaron seis diferentes tipos de suelo y se dedujo para cada uno de ellos un espectro de respuesta de velocidad media, para el sismo máximo probable ($M = 8.3$).

En síntesis, los métodos de microzonificación sísmica en la URSS se basan principalmente en la experiencia adquirida con los sismos destructores y en los registros de temblores pequeños. El método de «rigidez sísmica» es un procedimiento rápido y simple que permite estimar la sismicidad local. Sin embargo, el método se ha desarrollado a través de la experiencia obtenida con los edificios bajos y con los estudios de las propiedades dinámicas de las capas superiores de suelo de

10 a 16 m de espesor. Los métodos basados en los estudios de los temblores ligeros deben tomarse con cierta cautela, a causa de las características no-lineales esfuerzo-deformación, que exhiben los suelos durante las fuertes sacudidas sísmicas. Se deben tomar precauciones especiales cuando se emplean los temblores ligeros en la determinación del periodo predominante de las capas del terreno. También se puede poner en duda el significado del término «intensidad sísmica», en relación con los parámetros de diseño (Ambraseys, 1973). Hay poca o ninguna perspectiva de poder establecer una relación empírica exacta entre la intensidad y la aceleración máxima, o velocidad del terreno.

2.4 **Análisis y evaluación del riesgo sísmico y parámetros de diseño en los Estados Unidos**

Probablemente, durante los diez últimos años los más grandes esfuerzos para estudiar los efectos de las condiciones geológicas y del suelo como respuesta a los emplazamientos de los sismos se han hecho en los Estados Unidos de América. Se hicieron numerosas observaciones de movimientos fuertes e investigaciones de la naturaleza de los emplazamientos, se idearon técnicas, se crearon equipos de laboratorio y se desarrollaron estudios teóricos y técnicos de computación. Este esfuerzo de investigación se debe al reconocimiento por parte de la comunidad, de la importancia que tiene la reducción del riesgo sísmico en el rápido desarrollo de los costosos complejos industriales y de energía. Los métodos empleados en la determinación del parámetro del riesgo sísmico para el planeamiento del uso de tierras o para el diseño de estructuras, que tienen en cuenta los efectos de las condiciones geológicas y del suelo, tienen muchos rasgos en común con los empleados en la microzonificación sísmica de otros países. En algunos casos se han llevado a cabo estudios experimentales y analíticos en gran detalle, en particular, de las costosas e importantes estructuras, tales como represas, plantas nucleares y estructuras similares, donde existen posibilidades de desastres secundarios mucho mayores que los generados por los mismos terremotos. Se han realizado estudios comparativos de la distribución de daños, ocurridos en los sismos pasados, a fin de verificar los procedimientos analíticos y experimentales. La investigación se ha dirigido a los siguientes problemas básicos: parámetros sísmicos para el diseño de estructuras importantes; planeamiento del uso de tierras y evaluación del peligro potencial de los terremotos futuros; evaluación de la distribución de daños de los terremotos pasados.

2.4.1 *Parámetros de diseño sísmico para estructuras importantes*

Los parámetros sísmicos para el diseño de estructuras importantes, tales como las plantas de energía nuclear, represas, edificios elevados, puentes largos, complejos industriales y otros, se han definido en función de la sismicidad local y regional, de la vida útil probable de la estructura y de los riesgos de operación, como también de otros factores sociales y económicos. Se simulan acelerogramas del movimiento del substrato o se modifican acelerogramas registrados para simular movimientos de substratos con características estadísticas apropiadas para las fuentes conocidas o

probables de sacudidas sísmicas. Los estudios detallados de geología y de suelos permiten establecer subdivisiones adecuadas del emplazamiento y construir perfiles modelos típicos que muestren las propiedades del suelo en profundidad, o hasta el existente o supuesto substrato rocoso. Las propiedades del suelo compatibles con la deformación se determinan a través de estudios de campo y de laboratorio, los análisis de respuesta se hacen empleando modelos de capas de suelo, en una o dos dimensiones.

Finalmente, los parámetros de diseño sísmico se presentan en la forma de espectros de respuesta o como histogramas de tiempo-aceleración, que corresponden a las normas de diseño de la estructura considerada. En la mayor parte de casos se utiliza una aproximación determinística o probabilística para seleccionar la envolvente del espectro de respuesta (Donovan y Valera, 1972). Para las estructuras cuyos riesgos de operación pueden ser muy altos hay tendencia a adoptar una aproximación probabilística más consistente, para la evaluación de las normas de diseño a prueba de terremotos. Los estudios de esta clase, están aún en una etapa experimental, debido probablemente a que esos procedimientos necesitan mucho tiempo y a las dificultades encontradas en la práctica.

2.4.2 *Planeamiento del uso de tierras y evaluación del peligro potencial*

Recientemente, se han llevado a cabo varios estudios (Armstrong, 1973; Cluff y otros, 1972; Diplock y Nichols, 1972) sobre planeamientos adecuados del uso de tierras para reducir el peligro potencial en las regiones de alta sismicidad. Este tipo de investigación proporciona la información que se necesita para la llamada zonificación de riesgo, cuyo propósito práctico es la subdivisión del área estudiada en zonas de acuerdo con los efectos esperados de los futuros sismos. Se examinan los efectos sísmicos en la superficie del terreno, las deformaciones, tales como deslizamientos, licuefacción y asentamiento diferencial. El método más conservador para fijar la zona de riesgo se basa en la consideración de las deformaciones esperadas en superficie o en la información geológica. A menudo se han empleado esos estudios para la programación de investigaciones detalladas y para la zonificación preliminar del riesgo. La fiabilidad de la zonificación de riesgo depende en gran parte de la cantidad de información y de los datos que se disponga tanto de las investigaciones geológicas y de suelos como de los modelos matemáticos y de los procedimientos analíticos empleados. Los criterios de diseño se relacionan a los sistemas estructurales involucrados y a criterios socioeconómicos con niveles de riesgo aceptables.

En áreas afectadas por fallas bien conocidas se tienen en cuenta los efectos del movimiento de falla y las deformaciones de superficie (California, Division of Mines and Geology, 1975; Cluff y otros, 1972; Diplock y Nichols, 1972; Slemmons, 1972; Shah y Dalal, 1972). Las zonas de riesgo se definen a base de las deformaciones del terreno estimadas en superficie y en especial cuando se tienen evidencias de actividad pasada. Por las observaciones de los daños sísmicos ha quedado bien establecido que la intensidad del movimiento del terreno no es necesariamente la más alta cerca de la falla causante (Espinosa y Algermissen, 1972; Mihailov y Petrovski, 1974). Por lo tanto, para el planeamiento del uso de tierras en las cercanías inmediatas a las fallas, se ha prestado atención a las deformaciones superficiales del terreno debidas a la reptación de fallas, más que a los propios sismos. Pero en las

etapas de diseño también se evalúan las características del movimiento fuerte y se toman en cuenta los peligros potenciales. Así pues, se considera que el mayor riesgo a que está sometido un lugar puede estar causado por un desplazamiento de falla, cuya traza es visible en superficie. Para cada zona de riesgo, en adición a las previstas por el código, se formulan recomendaciones relativas al diseño, construcción e inspección.

Se han publicado recientemente algunos resultados de un análisis estadístico de los espectros de respuesta de más de 100 registros de movimientos del suelo (Seed y otros, 1974) correspondientes a 23 terremotos, que han demostrado que aún con una limitada cantidad de datos instrumentales, es posible evaluar los espectros de respuesta dependientes del emplazamiento. Se han identificado claramente diferencias en las formas espectrales correspondientes a diferentes condiciones geológicas y de suelo, las cuales se deben tomar en cuenta cuando se adoptan las normas de diseño a prueba de terremotos.

Sin embargo, no ha quedado aún bien establecido que tanto la amplificación como la atenuación del movimiento del suelo en el lugar, sea un criterio importante en la selección de los parámetros de diseño. Hay muchos casos en que los modelos simplificados en una y dos dimensiones, que se han empleado en el análisis de los espectros del suelo, muestran muy buena correlación en un número limitado de observaciones, pero esos métodos muestran muchos defectos y queda aún la necesidad de comprobar más adecuadamente la aplicación del procedimiento. Las determinaciones de las características del suelo a base de los estudios de campo y de laboratorio aún son inciertas. En gran parte de los casos, no se considera importante la interacción suelo-estructura y la evaluación de los parámetros de la interacción es asunto de un juicio técnico, más que de un análisis de probabilidades.

En conclusión, no cabe duda de que los investigadores en los Estados Unidos, se han comprometido en un gran esfuerzo, para establecer las pautas físicas de la evaluación de los parámetros sísmicos de diseño. No obstante, debido a la escasez de datos de movimientos fuertes, no han podido verificar los métodos que han propuesto. Algunos de los procedimientos que se han estudiado están aún en la etapa de investigación y desarrollo. Las aplicaciones prácticas de los métodos (excepto en los casos de estructuras importantes) sólo se conocen en áreas limitadas del país (Armstrong, 1973; Cluff y otros, 1972; Diplock y Nichols, 1972; Fisher y McWhirter, 1972).

2.5 Experiencias en otros países

En el examen que se ha hecho más arriba se han descrito algunos de los rasgos más importantes de la investigación sobre los parámetros de diseño sísmico, hechos en Japón, URSS y EE.UU. Es evidente que en esos países, debido a sus condiciones naturales, sociales y económicas, se hacen esfuerzos para desarrollar los procedimientos fiables para la evaluación y mitigación de los riesgos sísmicos. Otros países situados en regiones de alta sismicidad encaran similares problemas y la mayor parte de sus esfuerzos se han orientado en la aplicación de los métodos y técnicas conocidas, al estudio detallado de la sismicidad y de las condiciones locales, y a la aplicación de criterios de diseño acordes con sus necesidades sociales y económicas. No

hay duda de que la experiencia ganada en estos países representa una contribución significativa al desarrollo de procedimientos fiables, particularmente en lo que se refiere a las aplicaciones prácticas y a su verificación.

Con la ayuda financiera de la UNDP, se han llevado a cabo dos importantes proyectos de UNESCO: 1. Una investigación de la sismicidad de la región de los Balcanes, con un proyecto piloto de microzonificación y 2. Investigación de la dinámica de suelos en la Universidad Nacional Autónoma de México. En el contexto del proyecto de los Balcanes se han hecho estudios comparativos de los procedimientos de observación existentes y de los métodos de microzonificación sísmica de las ciudades de Tesalónica, Grecia (Kobayashi y Kárník, 1974; Kobayashi, 1974a) Eskel, Turquía (Ergunay y Bayulke, 1974; Kobayashi y Kárník, 1974; Kobayashi, 1974a) y Skopje, Yugoslavia (Bubnov y otros, 1974; Kobayashi y Kárník, 1974; Kobayashi, 1974a; Stojkovic, 1974). Se debe esperar que de esos estudios surjan otros métodos de mayor fiabilidad para la microzonificación sísmica. Las investigaciones sobre dinámica de suelos de la Universidad Nacional Autónoma de México pueden conducir al desarrollo de nuevas técnicas para la evaluación de las propiedades dinámicas de los suelos, proporcionando así importantes eslabones en la cadena de los procedimientos de microzonificación sísmica.

2.6 Otros aspectos importantes de la microzonificación sísmica

En la respuesta de un lugar dado a un sismo, pueden influir de diversas maneras las condiciones geológicas y de suelos subyacentes a la superficie del terreno. En ciertos casos, se puede producir una gran inestabilidad del suelo, con grandes desplazamientos permanentes del terreno y con la consiguiente deformación de las estructuras que en él se apoyan. Los suelos granulados sueltos pueden quedar compactados por las vibraciones suscitadas por el sismo, a consecuencia de lo cual pueden producirse asentamientos importantes y diferenciales de la superficie del terreno. En algunos casos de materiales granulares sueltos y saturados, la compactación puede engendrar presiones hidrostáticas de magnitud suficiente como para provocar una licuefacción del suelo, produciendo grandes asentamientos e inclinaciones de las estructuras. Una combinación de los esfuerzos dinámicos unidos a las presiones intersticiales en los sedimentos de arcilla blanda y arena, pueden causar grandes deslizamientos de tierra que perturban las comunicaciones y acarrear daños y pérdidas de vidas humanas. Cabe asociar efectos similares, pero a gran escala, a los desplazamientos de falla, cuando las estructuras están situadas en su traza.

La mayoría de estos efectos se toman en consideración en los métodos de microzonificación sísmica de carácter empírico, conjuntamente con los relacionados a la sacudida del terreno. Es evidente que no hay razón para aumentar las fuerzas laterales en el diseño, cuando no se puede controlar la estabilidad de los cimientos. Por tanto, es de importancia tratar por separado la inestabilidad y la sacudida del suelo. La inestabilidad del suelo puede ser evitada o prevenida por estudios apropiados de cimentación y de diseño. Algunos aspectos de la microzonificación sísmica asociada con los problemas de inestabilidad de los suelos se discutirán en las siguientes páginas.

2.6.1 *Licuefacción potencial*

Cuando los materiales sueltos o sin cohesión de los suelos de densidad media y saturados están sujetos a vibraciones sísmicas, la tendencia a la compactación está acompañada de un aumento de la presión del agua en el suelo, que produce un movimiento del líquido a través de los poros. El flujo de agua dirigido hacia la superficie del terreno emerge en forma de manchas húmedas de arena o de barro. En estas condiciones el material inconsolidado y saturado pierde toda o casi toda su resistencia a la cizalla y se deforma como un líquido. Un ejemplo notable de los daños producidos durante un terremoto es pues la licuefacción de los suelos. En el gran sismo de Niigata de 1964 (Seed e Idriss, 1967), la licuefacción de arenas causó grandes daños, muchas estructuras se asentaron más de un metro en terreno licuado, lo que estuvo acompañado de una basculación de hasta 80 grados. Efectos similares a los observados en Niigata ocurrieron en Puerto Montt, durante el terremoto de 1960 en Chile. Si la licuefacción ocurre dentro o debajo de una masa inclinada de terreno, la masa entera puede fluir lateralmente hacia el lado que está sin apoyo. Tales deslizamientos se han observado en los materiales sueltos, saturados y sin cohesión durante los terremotos de Chile (1960), Alaska (1964) y Niigata (1964).

La licuefacción de suelos saturados juega un rol importante en la concepción de grandes estructuras. Puesto que éstas se diseñan para resistir altos grados de intensidad de movimiento del suelo, la licuefacción potencial de los emplazamientos se debe determinar de manera realista, segura y además económica. La evaluación de la licuefacción potencial de arenas saturadas implica la estimación de la densidad relativa de campo, los ensayos en muestras de laboratorio a densidades apropiadas en las pruebas cíclicas de carga y el empleo de datos de campo y de laboratorio para pronosticar su comportamiento en el terreno (Ambraseys, 1972; Finn y otros, 1971; Finn, 1972; Maslov, 1957; Peacock y Seed, 1968). Parece que existe un procedimiento racional para la evaluación de la licuefacción potencial a pesar de las diferencias encontradas entre las condiciones de laboratorio y las del emplazamiento real. A fin de evaluar el riesgo de licuefacción en los suelos es necesario estimar la posible aceleración a la profundidad a la cual se encuentra la capa concreta del suelo cuyas propiedades dinámicas se determinan en las pruebas de laboratorio (Finn, 1972; Seed e Idriss, 1970a). La exactitud con que se delimite el área de licuefacción potencial dependerá en gran parte de la cantidad disponible de datos de subsuperficie y de su fiabilidad.

2.6.2 *Deslizamientos*

Los mayores deslizamientos provocados por los terremotos se han producido principalmente en terrenos arcillosos. No hay evidencia de que la arcilla se licue durante un terremoto —como lo hacen las arenas— aunque ciertos tipos de arcilla pueden perder una pequeña parte de su resistencia y las fuerzas de inercia inducidas por el sismo pueden causar roturas y desplomes del talud. También la licuefacción de los lentes y bolsones de arena, contenidos en los terrenos de arcilla, pueden ocasionar importantes deslizamientos. Uno de los más espectaculares derrumbes en terrenos arcillosos ocurrió a lo largo de la línea costera de Turnagain Heights en Anchorage,

Alaska, durante el terremoto de 1964 (Seed y Wilson, 1967). El deslizamiento se extendió a lo largo de la línea de escarpe unos 2550 m y penetró hacia el interior unos 300 m. Parece, que la licuefacción de lentes de arena contenidos en la arcilla jugó un rol importante en el desarrollo de este deslizamiento.

Algunas veces las arenas y los limos sueltos y saturados aparecen estratificados, casi horizontalmente, en forma de capas delgadas, subyacentes a materiales más firmes. En estos casos, la licuefacción de la arena ocasionada por un movimiento sísmico puede provocar que una masa inclinada situada encima se deslice lateralmente a lo largo de la capa licuada de la base. Cuando sucede esto, la zona de suelo que está en el dorso de la capa deslizada se hunde en el vacío dejado por el traslado de la masa, causando así una zona de depresión, más conocida como un graben. Durante los movimientos de esta índole, las estructuras situadas encima de la masa deslizante se trasladan lateralmente, sin que sufran daños de importancia, pero las estructuras ubicadas en la zona deprimida están sujetas a tan grandes presiones diferenciales que a menudo quedan completamente destruidas. Asimismo las estructuras de las inmediaciones de la base del área deslizada pueden ser levantadas o sobre-empujadas por el corrimiento lateral.

Los deslizamientos son muy comunes en las áreas sísmicas y en algunos casos causan tantos daños durante y después de los terremotos como la propia sacudida del suelo. Para efectos de una planificación del uso de tierras en áreas de posibles deslizamientos, será necesario disponer de datos de fotografías aéreas, de estudios geológicos y de suelos, y de análisis de estabilidad de las pendientes, todo lo cual permitirá la obtención de mapas generalizados que muestren la estabilidad relativa de los taludes de la región en estudio. A fin de minimizar los daños que pueden causar los deslizamientos se requieren una evaluación y una cartografía cuidadosas de los posibles deslizamientos, y una interpretación adecuada en la etapa de planificación del uso del terreno.

2.6.3 *Significado de las fallas*

La ubicación de las fallas es uno de los parámetros básicos de los estudios de sismicidad local, en primer lugar porque se cree que las fallas son las fuentes más probables de liberación de energía sísmica y, en segundo lugar, porque muestran las zonas donde se produce la rotura del terreno y a lo largo de las cuales se debe esperar reptación. Se han emitido algunos conceptos equivocados (y algunas diferencias significativas de opinión) sobre la relación entre las fallas geológicas y el riesgo sísmico. La experiencia recogida en los pasados terremotos ha confirmado (Hudson, 1972a) que las sacudidas del terreno no son necesariamente máximas en las inmediaciones de la falla causante. En particular, el terremoto de San Fernando (1971) suministró numerosos casos de fallamiento superficial a través de áreas muy pobladas; y aunque en muchos casos ocurrieron serias deformaciones en las estructuras, que trajeron pérdidas económicas, los colapsos catastróficos con pérdidas de vida y serios daños no estuvieron directamente asociados con las fracturas de superficie. Los colapsos peligrosos que se extendieron en una área grande fueron en todos los casos las consecuencias de una fuerte sacudida del terreno que afecta a una gran extensión y no está confinada a las inmediaciones de la falla. Además, durante este terremoto los máximos desplazamientos horizontales (1.9 metros) ocurrieron en

fallas no reconocidas, mientras que muchas fallas recientes y bien conocidas por su actividad, al estar sujetas a las fuertes sacudidas no mostraron movimientos perceptibles (Hudson, 1972b; Slemmons, 1972). El rol de las fallas sísmicas en la evaluación del riesgo sísmico es más a través de la información de los procesos tectónicos que las fallas revelan. Sin embargo, la posibilidad de que ocurran deformaciones locales del terreno en las fallas superficiales es de importancia en relación con la planificación económica del uso de tierras y con la salvaguarda de las funciones indispensables de la comunidad y de los medios de comunicación, especialmente las que se necesitan en el periodo de emergencia posterior al desastre.

2.7 Sumario de los conocimientos actuales y medidas que se sugieren

La zonificación y la microzonificación sísmicas persiguen la finalidad de evaluar los riesgos sísmicos a efectos de planificación regional y urbanística, y los niveles de las fuerzas o movimientos para la concepción de estructuras antisísmicas. Esta tarea resulta muy difícil por el conflicto que se presenta entre la necesidad de seguridad y economía por una parte y por la falta de datos adecuados sobre la frecuencia de los sismos y las características detalladas de los movimientos sísmicos que pueden acarrear daños. Bajo tales condiciones sería absurdo pensar que los ingenieros proyectistas pueden formular un juicio sobre el peligro sísmico en un punto concreto. Se debe comprender que las estimaciones de fuerza sísmica deducidas de la zonificación y microzonificación sísmicas son tan sólo una parte de las técnicas de concepción del diseño antisísmico. Para determinar el verdadero nivel de resistencia sísmica de una estructura será necesario conocer los esfuerzos, deformaciones, deflexiones, amortiguación, ductibilidad y otras propiedades de los materiales utilizados en la concepción.

Hay tres métodos básicos para determinar los parámetros de concepción de estructura basados en investigaciones recientes: el empleo de microtemblores de tierra y de sismos pequeños, los métodos analíticos y la extrapolación de los datos de acelerogramas existentes.

2.7.1 *Microtemblores de tierra y pequeños sismos*

Las características de los movimientos sísmicos en un punto dado, podrían determinarse fácilmente si fuera posible usar microtemblores de tierra y sismos pequeños como base para determinar los efectos in situ. Se podrían emplear unas instalaciones móviles para registrar directamente esos efectos, ya que la frecuencia de los microtemblores y de los sismos pequeños permitiría obtener datos a intervalos muy cortos. Desafortunadamente, debido a las características no lineales de esfuerzo y deformación de los suelos, no cabe utilizar la respuesta local, en niveles bajos de deformación, durante los sismos pequeños, para determinar la respuesta en niveles altos de deformación durante los sismos fuertes. Se puede decir lo mismo del empleo de datos correspondientes a microtemblores de tierra

para determinar el periodo fundamental de sedimentos de los suelos. Ciertos estudios recientes (Udwadia y Trifunac, 1972), han puesto de manifiesto que no cabe identificar unas periodicidades locales a partir de esos estudios, y que los fenómenos propios de los microtemblores son esencialmente distintos de los procesos de los terremotos. El empleo de microtemblores y sismos pequeños, con fines de microzonificación sísmica, es probablemente un tema justificado de investigación científica, pero por el momento no resulta un método fiable para evaluar las características de los movimientos sísmicos fuertes.

2.7.2 *Métodos analíticos*

Últimamente se han propuesto varios métodos analíticos para calcular los movimientos superficiales durante un sismo de una magnitud dada y en una determinada falla. Los principales factores que entran en juego en ese cálculo son las características del mecanismo fuente, las funciones de atenuación de las ondas sísmicas y el efecto de las condiciones locales en el movimiento de la superficie. Combinando esto con una estimación probabilística de la frecuencia de sismos en esa falla, se obtiene una forma de microzonificación sísmica. Se han empleado tales análisis para estimar los movimientos sísmicos en el diseño de importantes estructuras.

No obstante, esas hipótesis son a menudo poco seguras y pueden entrañar errores superiores a los que se deriven de una estimación directa de los movimientos superficiales, mediante la extrapolación de datos conocidos (Housner y Jennings, 1973). Por ejemplo, los datos sobre movimientos fuertes, registrados en El Centro (Udwadia y Trifunac, 1972, 1973) indican que, en el caso de suelos firmes, los efectos de las características locales pueden ser menos importantes que los efectos de diferentes mecanismos fuente y los de las trayectorias de transmisión. Análogamente, los movimientos registrados en Pasadena durante el terremoto de San Fernando mostraban un comportamiento incompatible con los resultados habituales de las técnicas de cálculo (Hudson, 1972a). Tales observaciones y la inexistencia actual de datos sobre los movimientos fuente y el substrato rocoso, ponen de manifiesto que muchos de los métodos que se emplean son demasiado simplistas y no permiten, por el momento, predecir de un modo fiable el movimiento superficial en la mayoría de los casos prácticos.

2.7.3 *Extrapolación de los acelerogramas existentes de movimientos fuertes*

Acumulando datos suficientes sobre la respuesta del suelo en un gran número de puntos que abarquen una amplia gama de condiciones de suelo, frente a terremotos de diferentes magnitudes y a distintas distancias del epicentro, llegará a ser posible, en último término, predecir los movimientos probables en un nuevo punto mediante una extrapolación directa de los registros existentes. Estudios muy recientes, relativos a los espectros de respuestas locales, a partir de datos sobre movimientos fuertes obtenidos en diferentes condiciones locales (Seed, Ugas y Lysmer, 1974), han dado resultados muy alentadores. Así pues, parece que el modo más adecuado de seleccionar los movimientos sísmicos a efectos de concepción de estructuras, consiste en reunir un número de datos sobre movimientos fuertes, obtenidos en

condiciones que sean lo más comparables posible y extrapolar mediante un simple escalamiento. Este método sencillo parece ser el más idóneo, dado los conocimientos actuales, y explica a los usuarios potenciales la índole de los juicios formulados. Los métodos más complejos, que introducen estimaciones y aproximaciones adicionales sin proporcionar nuevos datos básicos, tienden a encubrir la distinción entre la información derivada de unos datos fiables y la suministrada por métodos de cálculo aproximados.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, se observa que las técnicas y métodos actuales, basados en la experiencia de los daños acarreados a las estructuras en sismos pasados y en el examen de las condiciones locales, resultan difícilmente fiables para la evaluación de los parámetros de concepción de estructuras antisísmicas. No obstante, hay que tener presente la importancia de las condiciones geológicas y de suelo locales, en el caso de roturas del suelo durante los sismos, que traen consigo grietas en los cimientos, licuefacción y deslizamientos de tierra. Esa inestabilidad potencial del suelo debería ser un elemento importante de la microzonificación sísmica. Las influencias de las condiciones de suelo y geológicas locales sobre todo el régimen de sacudidas sísmicas es probablemente significativo, pero no es el único factor de importancia en la evaluación de los movimientos sísmicos. La compilación y análisis de los datos sobre movimientos fuertes, obtenidos en condiciones previstas típicas, con la correspondiente evaluación probabilística de los movimientos de tierra, previstos en zonas sísmicas conocidas y potenciales, es uno de los métodos más adecuados en el estado actual de los conocimientos. Semejante moderación es el precio que hay que pagar por nuestra falta de conocimientos.

Es también importante decidir cuál es la presentación más apropiada de los movimientos sísmicos, a efectos de evaluación de los criterios de concepción de estructuras y sus aplicaciones prácticas. La descripción más completa de los movimientos de tierra en los sismos es el propio acelerograma, que contiene todo el historial de la verdadera aceleración del terreno. No obstante, se tiende fuertemente a expresar la información esencial en forma de uno o varios parámetros simples, debido a la necesidad de hacer hincapié en los aspectos de los datos obtenidos que están directamente relacionados con la respuesta de las estructuras. La aproximación más corriente es la aceleración horizontal máxima, que puede determinarse fácilmente a partir del acelerograma y de la que se suele pensar que está estrechamente relacionada con las fuerzas laterales que se ejercen sobre la estructura. Esto es lo que ocurre, de hecho, en los sistemas estructurales de alta frecuencia, pero en las estructuras de frecuencia media y baja, dicha aceleración máxima no es ni siquiera una indicación aproximada de las fuerzas sísmicas laterales reales. Se obtendría una descripción global más satisfactoria indicando además el desplazamiento y la velocidad máximas, dado que estas cantidades son significativas en los regímenes de frecuencia baja y media, respectivamente. De insistir en un solo parámetro simple, el óptimo sería sin duda la velocidad máxima. Para abarcar debidamente una amplia gama de frecuencias, la mejor representación de los movimientos sísmicos es el espectro de respuesta, que indica directamente los efectos de una aceleración dada sobre una estructura simple típica, incluida su respuesta dinámica, y todos los pormenores del contenido de frecuencia. La única dificultad estriba en que los espectros de respuesta han de expresarse con una familia de curvas, y no como un número único. No obstante, empleando espectros de respuesta medios para condiciones específicas de mecanismos fuente, trayectorias y condiciones loca-

les, se llega a una representación simplificada de los movimientos sísmicos, que bastará para este fin (Housner, 1970). Por tanto, suponiendo que las formas de los espectros de respuesta medios vienen definidos para condiciones sísmicas dadas, sigue pendiente el problema de llegar a un equilibrio aceptable entre el grado de seguridad y los factores limitadores económicos. La solución no depende sólo de la fase de desarrollo económico del país, sino que en ella influye fuertemente la vida útil de los sistemas estructurales, el tipo de estructura y los materiales estructurales utilizados. También la influencia de la interacción suelo-estructura sobre la respuesta dinámica de los sistemas estructurales ha de tomarse en consideración en la formulación de las normas de diseño. Puede no ejercer una profunda influencia sobre la forma de los espectros de respuesta pero convendrá tener en cuenta su influencia sobre la respuesta dinámica de los sistemas estructurales de alta frecuencia y, por ende, sobre las normas de concepción de las estructuras.

Se observa que los eslabones más débiles de la cadena que conduce a la formulación de criterios de diseño antisísmico adecuado son la falta de datos y registros sobre los movimientos del terreno y sobre el comportamiento inelástico de sistemas estructurales y materiales de los cimientos. Por consiguiente, en los futuros intentos de reducir al mínimo los riesgos sísmicos, habrá que hacer hincapié en la rápida extensión de redes de instrumentos capaces de medir movimientos fuertes en las regiones sísmicas del mundo, así como también en estudios intensivos sobre el comportamiento inelástico de los sistemas estructurales y de los materiales de cimentación.

Los datos históricos, los registros relativos a movimientos fuertes, los estudios de campo y de laboratorio sobre los materiales, los sistemas estructurales y los métodos analíticos y técnicas basadas en ellos no son todavía adecuados para poder formular criterios de concepción de estructuras antisísmicas, sin un grado considerable de prácticas de ingeniería. Se requiere una más estrecha cooperación internacional, en materia de investigación con el objeto de obtener resultados más económicos en un plazo de tiempo más breve.

Por último, procede tener presente la necesidad de poner periódicamente al día los criterios de concepción de estructuras antisísmicas en cada país, debido al aumento de conocimientos sobre los efectos de los sismos, a la mayor protección que exige la sociedad y a la generalización de la urbanización y la industrialización.

Reconocimientos

El autor desea expresar su gratitud y aprecio a los profesores D.E. Hudson y M.F. Trifunac del Instituto Tecnológico de California, Pasadena; a los profesores J. Penzien y A.K. Chopra de la Universidad de California en Berkeley y a sus colegas T. Kirijas; M. Stojkovic y D. Petrovski, del Instituto de Ingeniería Sísmica y Sismología Técnica de la Universidad «Kiril y Metodij», Skopje por sus sugerencias valiosas y discusiones durante la preparación de este trabajo.

2.8 Referencias

AMBRASEYS, N. N. 1970. Factors Controlling the Earthquake Response of Foundation Materials. *Proc. 3rd European Symposium on Earthquake Engineering*, vol. 1, p. 309-317, Sofía, ECCE.

- . 1973. Behavior of Foundation Materials During Strong Earthquakes, *Proc. 4th European Symposium on Earthquake Engineering*, p. 11–12, Sofia, ECEE.
- . 1973. Dynamics and Response of Foundation Materials in Epicentral Region of Strong Earthquakes. *Proc. Vth World Conf. Earthqu. Engng, Rome*, p. CXXVI–CXLVIII.
- ARMSTRONG, D. 1973. *The Seismic Safety Study for the General Plan. Tri-Cities Seismic Safety and Environmental Resources Study*.
- ARSOVSKI, M. *et al.* 1970. The Banja Luka Earthquakes of October 26 and 27, 1969. Paris, Unesco (Unesco Report, Serial No. 1919/BMS RD/SCE).
- BUBNOV, S.; STOJKOVIC, M.; MIHAJLOV, V.; PETROVSKI, D.; PETROVSKI, J. 1974. Report on Seismic Microzoning Studies in Yugoslavia, in Report on Unesco Seminar on Seismic Microzoning, Unesco, Skopje.
- CALIFORNIA DIVISION OF MINES AND GEOLOGY. 1975. *Fault Hazard Zones in California*. (Special Publication 42, Revised Edition, March 1975).
- CLUFF, L. S.; HANSEN, W. R.; TAYLOR, C. L.; WEAVER, K. D.; BROGAN, G. E.; IDRIS, I. M.; McCLURE, F. E.; BLAYNEY, J. A. 1972. Site Evaluation in Seismically Active Regions—An Interdisciplinary Team Approach. *Proc. Intern. Conf. Microzonation, Seattle*, p. 957–987.
- DEZFULIAN, HOUSHANG; SEED, H. BOLTON. 1970. Seismic Response of Soil Deposits Underlain by Sloping Rock Boundaries. *Jl. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, vol. 96, no. SM6, November 1970.
- DIPLOCK, L. R.; NICHOLS, D. R. 1972. Government Responses to Development Hazards in California. *Proc. Intern. Conf. Microzonation, Seattle*, p. 837–844.
- DONOVAN, N. C.; VALERA, J. E. 1972. A Probabilistic Approach to Seismic Zoning of an Industrial Site. *Proc. Intern. Conf. Microzonation, Seattle*, vol. II, p. 559–576.
- ERGUNAY, O.; BAYULKE, N. 1974. Microzoning Studies in Turkey, in Report on Unesco Seminar on Seismic Microzoning, Unesco, Skopje.
- ERSHOV, I. A. 1965. Comparison of Seismic Wave Velocities in the Soils with Amplitudes and Periods of the Ground Vibrations for Seismic Microzoning. *Proc. Inst. Phys. Earth*, no. 36, p. 203, Moscow.
- ESPINOSA, A. F.; ALGERMISSEN, S. T. 1972. *A Study of Soil Amplification Factors in Earthquake Damage Areas, Caracas, Venezuela*. NOAA—Environmental Research Laboratories, Earth Sciences Laboratory (Technical Report 280-ESL 31), Boulder.
- FINN, W. D. L. 1972. Soil Dynamics—Liquefaction of Sands. *Proc. Intern. Conf. Microzonation, Seattle*, vol. 1, p. 87–112.
- ; EMERY, J. J.; GUPTA, Y. P. 1971. Liquefaction of Large Samples of Saturated Sand on a Shaking Table. *Proc. 1st Canad. Conf. Earthqu. Engng*, p. 97–110, Vancouver, University of British Columbia.
- FISHER, J. A.; McWHIRTER, J. G. 1972. The Microzonation of New York State, *Proc. Intern. Conf. Microzonation, Seattle*, vol. I, p. 283–298.
- HOUSNER, G. W. 1970. Strong Ground Motion. In: R. L. Wiegel (ed.) *Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- ; JENNINGS, P. C. 1973. Problems in Seismic Zoning. *Proc. Vth World Conf. Earthqu. Engng., Rome*, p. 1626–1635.
- HUDSON, D. E. 1970. Ground Motion Measurements. In: R. L. Wiegel (ed.) *Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- . 1972a. Local Distribution of Strong Earthquake Ground Motions. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 62, p. 1765–1786.
- . 1972b. Strong Motion Seismology. *Proc. Intern. Conf. Microzonation, Seattle*, vol. 1, p. 29–60.
- IDRIS, I. M.; SEED, H. BOLTON. 1968. An Analysis of Ground Motions During the 1957 San Francisco Earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 58, no. 6, December 1968, p. 2013–2032.
- ; —. 1970. Seismic Response of Soil Deposits. *Jl. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, vol. 96, no. SM2, Proceedings Paper 7175, March 1970, p. 631–638.
- KANAI, K.; TANAKA, T. 1961. On Microtremors, VIII. *Bull. Earthqu. Res. Inst.*, Tokyo, vol. 39, pp. 97–114.
- ; *et al.* 1966. On Microtremors, X. Earthquake Damage to Wooden Houses. *Bull. Earthqu. Res. Inst.*, Tokyo, vol. 44, part 2.
- KIRIJAS, T.; STOJKOVIC, M. 1968. *Seismic Microzoning Map of Skopje Urban Area*. University of Skopje. (Publication No. 12, IZIIS).

- KOBAYASHI, H. 1974. On Some Results and Aspects of Microzoning in the Balkan Region. Appendix IV to Report on Seminar on Seismic Microzoning, Unesco, Skopje.
- ; KAZAMI, H. 1972. A Method for Local Seismic Intensity Zoning Maps on the Basis of Subsoil Conditions. *Proc. Intern. Conf. Microzonation, Seattle*, vol. II, p. 513–528.
- ; KARNIK, V. 1974. Report on Unesco Activities in Seismic Microzoning from 1971 to 1974. Appendix III to Report on Seminar on Seismic Microzoning, Unesco, Skopje.
- KOBORI, T.; YOSHIKAWA, S.; MINAI, R.; SUZUKI, T.; IWASAKI, Y. T. 1972. Effects of Soil and Geological Conditions on Structural Responses in the Osaka Area. *Proc. Intern. Conf. Microzonation, Seattle*, p. 719–734.
- LATRICO, R. M.; MOGE, J. E. 1972. Chilean Experience in Seismic Microzonation. *Proc. Intern. Conf. Microzonation, Seattle*, vol. I, p. 231–248.
- LEVENTAKIS, G.; ROUSSOPOULOS, A. 1974. Progress Report on Microzoning in Greece. Report on Seminar on Seismic Microzoning, Unesco, Skopje.
- MASLOV, N. M. 1957. Questions of Seismic Stability of Submerged Sandy Foundations and Structures. *Proc. 4th Intern. Conf. Soil Mech. Found. Engng., London*, vol. 1, pp. 368–372.
- MEDVEDEV, S. V. 1962. *Engineering Seismology*. Moscow, Gosstroyizdat.
- ; et al. 1971. *Recommendations for Seismic Microzoning*. Moscow, Stroyizdat.
- MIHALOV, V.; PETROVSKI, D. 1974. Importance of Strong-Motion Network in Yugoslavia or, Seismic Zoning and Microzoning. Report on Seminar on Seismic Microzoning, Unesco Skopje.
- OHSAKI, Y. 1972. Japanese Microzonation Methods. *Proc. Intern. Conf. Microzonation*, vol. I, p. 161–182.
- PAPASTAMATIOU, D. 1973. *Ground Movements and Response of Earth Structures to Strong Earthquakes*. University of London.
- PEACOCK, W. H.; SEED, H. B. 1968. Sand Liquefaction under Cyclic Loading Simple Shear Conditions, *Jl. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, vol. 94, no. SM3, May 1968, p. 689–708.
- PETROVSKI, J. 1974. *Modelling of Soil-Structure Interaction Parameters from Dynamic Response of Embedded Foundations*. University of Skopje. (Publ. No. 42, IZIIS).
- ; et al. 1967. *Determination of Forces of July 1963 Skopje Earthquake*. Vol. I, II and III, University of Skopje (Special Report, IZIIS).
- ROUSSOPOULOS, A.; LEVENTAKIS, G. 1974. Microzoning in Thessaloniki. Report on Seminar on Seismic Microzoning, Unesco, Skopje.
- SCHNABEL, P.; SEED, H. B.; LYSMER, J. 1971. Modifications of Seismograph Records for Effects of Local Soil Conditions. Berkeley, California, Earthquake Engineering Research Center, University of California. (Report No. EERC 71-8).
- SEED, H. B.; IDRIS, I. M. 1970a. Analyses of Ground Motions at Union Bay, Seattle, during Earthquakes and Distant Nuclear Blasts. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, February 1970.
- ; —. 1970b. A Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Jl. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, vol. 97, no. SM9, September 1970, p. 1249–1274.
- ; WILSON, S. D. 1967. The Turnagain Heights Landslide, Anchorage, Alaska. *Jl. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, vol. 93, no. SM4, Paper 5320, July 1967, p. 325–353.
- SEED, H. B.; WHITMAN, R. V.; DEZFULIAN, H.; DOBRY, R.; IDRIS, I. M. 1972. Soil Conditions and Building Damage in 1967 Caracas Earthquake. *Jl. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, vol. 98, no. SM8, August 1972.
- ; SCHNABEL, P. B. 1972. Soil and Geologic Effects on Site Response during Earthquakes. *Proc. Intern. Conf. Microzonation, Seattle*, vol. I.
- ; UGAS, C.; LYSMER, J. 1974. Site Dependent Spectra for Earthquake Resistant Design. Berkeley, University of California, (Report No. EERC 74-12).
- SHAH, H. C.; DALAL, J. C. 1972. Damage and Risk Analysis for the Greater San Francisco Bay Area due to Earthquake Loading. *Proc. Intern. Conf. Microzonation, Seattle*, p. 671–692.
- SLEMMONS, D. B. 1972. Microzonation for Surface Faulting. *Proc. Intern. Conf. Microzonation, Seattle*, vol. I, p. 347–362.
- STEINBERG, V. V. 1973. The Methods of Seismic Microzoning Developed in U.S.S.R. Report for UNDP/Unesco Survey of the Seismicity of the Balkan Region, Skopje.
- STOKOVIC, M. 1974. Correlation Between Dynamic Properties of the Ground, Buildings and Damage Ratio due to Skopje Earthquake of 1963. University of Skopje, IZIIS. (Publication no. 45).
- ; PETROVSKI, D.; ALEKSOVSKI, D. 1973. Seismic Stability of Large Panel Prefabricated Twenty

- Storey Buildings in Zemun: Site Investigation and Determination of the Design Earthquake. University of Skopje, IZIIS (Report no. OIS 73-5).
- ; —; ARSOVSKI, M.; MIHAJLOV, V.; ALEKSOVSKI, D.; CVIJANOVIC, D.; RIBARIC, V. 1974. Nuclear Power Plant Krshko—Site Investigation and Determination of Design Earthquakes Parameters. University of Skopje, IZIIS.
- TEZCAN, S.; DURGUNOGLU, T. 1974. Soil Amplification Studies at Bursa Tofas Factory Area. Report on Seminar on Seismic Microzoning, Unesco, Skopje.
- TRIFUNAC, M. D. 1973. A Note On Scattering of Plane SH Waves by a Semi-Cylindrical Canyon. *Int. J. Earthqu. Engr. Struct. Dynamics*, no. 1, p. 267–281.
- UDWADIA, F. E. 1972. *Investigation of Earthquake and Microtremor Ground Motions*. Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology. (Report EERL 72-02).
- ; TRIFUNAC, M. D. 1972. Studies of Strong Earthquake Motions and Microtremor Processes. *Proc. Intern. Conf. Microzonation, Seattle*, vol. I, p. 319–334.
- UDWADIA, F. E.; TRIFUNAC, M. D. 1973. Comparison of Earthquake and Microtremor Ground Motions in El Centro, California. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 63, p. 1227–1253.

3 Predicción de terremotos

Por E.F. SAVARENSKIJ e I.L. NERSESOV

3.1 Estado actual de los estudios sobre predicción sísmica

La predicción de los terremotos, cuyo propósito es reducir pérdidas de vidas y daños materiales, se puede considerar bajo los cuatro siguientes aspectos: el lugar, la intensidad, el momento de graves perturbaciones sísmicas y sus efectos en la superficie de la tierra.

El proceso de predicción comienza con la delimitación de las zonas de riesgo sísmico. Para el pronóstico de la hora, las observaciones especiales requeridas deberían circunscribirse a zonas de alto riesgo sísmico, de gran densidad de población o que contuvieran instalaciones importantes.

La zonificación sísmica se apoya en un cuerpo de datos geológicos y geofísicos (sismológicos principalmente). Se traen a colación las evidencias, que incluyen los resultados de las investigaciones de campo especiales, que posibilitan la preparación de mapas de las áreas en estudio y que se basan en datos geodésicos relativos a la velocidad de los movimientos actuales de la corteza y en datos geomorfológicos relacionados con la intensidad con que actúan los esfuerzos tectónicos en tiempos geológicamente recientes (es decir, en el post-neoceno, el periodo cuaternario) y que reflejan las características geológicas principales de esas áreas desde la era mesozoica. Se sabe que la mayor parte de terremotos graves que han ocurrido en lo que es ahora el territorio de la Unión Soviética, han estado asociados a las fracturas profundas que han dividido la corteza terrestre en bloques móviles y en los mapas soviéticos se presta atención especial a esas fracturas tectónicas y al desplazamiento a lo largo de ellas. El interés principal del sismólogo reside en conocer la longitud y la edad de esas fracturas, de qué manera se interceptan y cuáles son los movimientos contrastados de los diferentes bloques corticales. Los mapas muestran además las áreas que han sufrido modificaciones tectónicas en el pasado geológico reciente, por ejemplo, el reemplazo de una depresión de la corteza por un pliegue.

Esos mapas, conjuntamente con otros que contengan datos de gravimetría, de la actividad volcánica presente y pasada, y otros, proporcionarán una descripción multifacética y sintética de la geología presente y pasada de la región que interesa.

La siguiente etapa consiste en cartografiar los fenómenos sísmicos que se conocen en la región y, en particular, los epicentros de sismos de diferente magnitud.

En la etapa final se comparan los datos sísmicos con los rasgos geológicos del área de estudio, con el fin de que se puedan establecer relaciones entre ambos. Se confecciona un mapa de microzonificación sísmica basado en la hipótesis de que bajo una serie de condiciones geológicas, los sismos pueden ocurrir en un punto cualquiera de una falla en que se den aquellas condiciones y con una intensidad máxima tal, que no excede a las allí observadas durante los más severos terremotos del pasado. Tal mapa comprende una porción considerable de extrapolación e interpretación a base de los datos disponibles. El empleo de las computadoras, que se ha generalizado, ha hecho posible que se lleven a cabo tales operaciones, las computadoras, además, permiten correlacionar el vasto y complicado volumen de datos geológicos y sísmicos. Si se conoce la intensidad máxima de un sismo hipotético, conjuntamente con datos relativos a su punto de origen, se podrá estimar cómo se distribuye la intensidad de los temblores alrededor de su epicentro.

Los mapas de zonificación sísmica que se han confeccionado, siguiendo esos delineamientos, cubren el territorio entero de la Unión Soviética pero sólo indican los valores medios de intensidad para cada región. Así, para fines prácticos, la información que contienen debe ser complementada con la de los datos locales relativos a las estructuras corticales y a otros aspectos geomorfológicos. Aunque este método de zonificación sísmica es el mejor que se ha hecho hasta la fecha, muestra ciertas deficiencias y necesita perfeccionarse.

La energía probable liberada por un sismo hipotético en una determinada área geológica se precisa a partir de la magnitud de sismos ya observados en esa área. Sin embargo, en muchos casos, el periodo de observación ha sido demasiado corto como para pretender afirmar con certeza que los sismos observados fueron realmente de una intensidad que era la máxima posible o aun para estar seguros de que alguna vez en el pasado no hubieron terremotos más fuertes, que podrían repetirse en el futuro. En muchos casos, las indicaciones geológicas sugieren la posibilidad de que ocurran terremotos de mayor magnitud, pero no se han establecido aún las pautas para el pronóstico de la magnitud máxima probable de un terremoto cuando esas indicaciones no se apoyan en los datos sísmicos. Por ahora, pues, cabe esperarse que en los mapas de zonificación sísmica haya errores, lo cual ya se ha demostrado.

Por otra parte, no se puede afirmar de manera categórica, que en todas las regiones donde no ha habido sismos y cuya geología de superficie no muestra signos de actividad tectónica estén libres de los riesgos sísmicos. En este caso, la investigación geofísica de los niveles más profundos de la corteza terrestre puede ser de gran utilidad para poder predecir la posibilidad de temblores en tales áreas «quietas». Se puede obtener información que sea útil para este propósito, pero debido al carácter altamente específico de los factores involucrados, se está muy lejos todavía del entendimiento del cuadro completo. Por tanto, se deduce que la predicción de la localización de los sismos por medio de la zonificación sísmica plantea aún una serie de problemas difíciles.

No obstante, se han trazado muchos mapas de zonificación sísmica a base de la información geológica, la sísmica y la geofísica; y los datos obtenidos mediante investigaciones microsísmicas de la corteza terrestre, conjuntamente con indicaciones relativas a la probabilidad de terremotos y datos cuantitativos concernientes a

movimientos superficiales en el transcurso de grandes terremotos, hacen posible localizar las zonas de origen de los eventos sísmicos y estimar su periodicidad media. En la URSS, estos mapas sirven de base para el establecimiento de patrones de construcción que son obligatorios en todo el país.

La predicción de los movimientos del suelo producidos por sismos de gran intensidad es un tema de investigación de la ingeniería sísmica. Como en el caso de la zonificación sísmica, no se han solucionado todos los problemas en este campo, pero los logros alcanzados en el campo de las construcciones resistentes a los terremotos son considerables y se encuentran en una etapa de rápido desarrollo, lo cual ha permitido una mejora importante de las medidas de protección contra los posibles daños y pérdidas de vidas.

La coordinación de los datos de zonificación sísmica, conjuntamente con la información proporcionada por la ingeniería y las ciencias económicas y demográficas, han conducido a otros campos de investigación, relacionada con la previsión de las pérdidas debidas a los terremotos, especialmente la evaluación del riesgo sísmico. Esto implica la predicción del potencial de pérdidas causadas por los terremotos o los cálculos de los niveles aceptables de riesgos máximos sobre un periodo determinado de tiempo (por lo general entre 10 y 50 años). Tales cálculos no quieren decir que la seguridad se sacrifique a la economía. Por el contrario, el objeto de tal evaluación es garantizar un grado mayor de seguridad a través del desarrollo óptimo de los recursos.

Los daños causados por los terremotos se deben no sólo a la sacudida de la superficie de la tierra, sino también a los fenómenos concomitantes: desprendimientos de tierras en las zonas montañosas, «licuefacción» de suelos no coherentes, la destrucción local de lagos naturales y artificiales. También pueden ocasionar considerables daños los tsunamis generados por los terremotos oceánicos de gran intensidad. También hay que tener en cuenta los incendios en las grandes ciudades, que representan una de las consecuencias más peligrosas de los terremotos fuertes.

En la actualidad, el empleo de las computadoras electrónicas en la gestión de las industrias, los bancos, los sistemas de transportes plantea un problema especial en las grandes ciudades, ya que el sistema de gestión o de comunicaciones puede quedar inutilizado, ocasionando daños tan importantes como los causados directamente por el terremoto.

Un conocimiento preciso del tiempo y del lugar de los terremotos de gran intensidad, así como de su magnitud probable, puede salvar vidas mediante la pronta evacuación de los habitantes de las zonas peligrosas y la aplicación de medidas preventivas. Esto ha podido constatarse en dos terremotos recientes que tuvieron más o menos la misma magnitud, el ocurrido en Guatemala, en febrero de 1976, donde perdieron la vida más de 23 000 personas y el ocurrido en China, el 14 de febrero de 1975, en donde —de acuerdo con los científicos chinos— no hubo prácticamente pérdidas de vidas, ya que con anticipación se predijo el terremoto lo cual permitió la evacuación de las áreas pobladas.

La determinación simultánea del tiempo, lugar e intensidad de un terremoto constituye la esencia de la previsión o predicción sismológica. La dificultad de este problema dimana en primer lugar de que nuestro conocimiento de las condiciones y causas de la producción de los terremotos es limitado. Hasta ahora, no se ha logrado realizar observaciones directamente en el foco de un futuro terremoto, las investigaciones sólo pueden efectuarse en la superficie o en minas y pozos.

Existe otro factor —social— del problema: la predicción sismológica debería ser de una mayor fiabilidad. De otra forma se producirá el pánico entre los habitantes con consecuencias desastrosas. A comienzos del presente siglo A. Imamura en el Japón, B.B. Galitzin en Rusia, H.F. Reid en los Estados Unidos, propusieron las ideas generales y los posibles métodos de predicción sísmica. En la actualidad, se tiene a nuestra disposición un gran número de indicadores geofísicos que en cierta medida preceden a los terremotos de gran intensidad.

Los progresos encaminados a encontrar una solución del problema dependen fundamentalmente de que se logre un mayor grado de precisión en las mediciones y de que se mejoren las técnicas de investigación de diversos fenómenos geológicos. En el progreso de la predicción sísmica han desempeñado un importante papel las investigaciones de laboratorio sobre el comportamiento de las rocas bajo la acción de elevadas presiones y temperaturas, así como los trabajos teóricos relativos a la naturaleza de los focos sísmicos.

Una predicción fiable de la hora y de la posición de un sismo intenso se basa en los fundamentos físicos de los procesos precursores y de los mecanismos focales, lo que a su vez depende de los conceptos relativos a la fracturación de las rocas bajo la acción de esfuerzos tectónicos. En años recientes, el Instituto de Física Terrestre de la Academia de Ciencias de la URSS ha inventado un generador de eventos sísmicos que ha ayudado a explicar, sobre bases cualitativas, todos los fenómenos reconocidos hasta ahora como precursores de los sismos. Este modelo llamado falla de deslizamiento se basa en los principios generales que rigen la ruptura de los materiales estructuralmente heterogéneos, y toma en cuenta las características especiales de la ruptura que tiene lugar en el foco sísmico; es decir, el rol preponderante que juegan las fuerzas de compresión y de cizallamiento, cuando actúan en largos periodos de tiempo y las limitaciones que impone el material circundante que no está fracturado.

En los términos más generales, el modelo ilustra la génesis de un sismo tal como sigue: bajo condiciones prolongadas de esfuerzo tiene lugar un proceso lento de compleja microfisuración, el cual está acompañado de un proceso inverso en el que hay cierre de fisuras. En términos macroscópicos, este proceso se conoce como una reptación o fluencia. En el caso de los movimientos sísmicos se dice que la fluencia implica fracturas que guardan una cierta proporción con las dimensiones focales de los sismos más débiles. La microfisuración ocurre de una manera espasmódica. En la terminología sismológica se la puede describir como una sismicidad de fondo. La rapidez con que se multiplican las fracturas depende de la relación que exista entre el nivel del esfuerzo considerado y la resistencia del material; los experimentos demuestran que generalmente esto es muy exacto. Por ejemplo, en las pruebas de estabilidad a largo plazo, el tiempo de ruptura es una función exponencial del esfuerzo, de manera que los cambios porcentuales del esfuerzo traen consigo cambios en el tiempo de ruptura del orden de una magnitud. Por esta razón un aumento local en el esfuerzo o una disminución de la resistencia del material conduce a una situación tal, que las fisuras se forman de una manera más rápida de lo que se cierran. Esto es lo que se conoce en la mecánica de suelos como la fase de reptación o fluencia acelerada, que en sismología indica la aparición de un foco sísmico.

Cuando se intensifica el proceso de fisuración, las fisuras actúan unas sobre las otras y las que están orientadas paralelamente al plano de falla, en el foco de la perturbación principal, se ensanchan y se convierten en fallas, lo que da origen a una

reorientación del plano, en el curso de la cual se establecen los mecanismos focales de las perturbaciones menores. Finalmente, la interacción entre las fallas conduce a la formación de la falla por deslizamiento, un proceso de deformación a gran escala en el que aumenta la inestabilidad y se reduce la tensión. Esta deformación inestable tiende a concentrarse a lo largo de una zona estrecha que sigue el plano de la falla principal. El esfuerzo se acumula en los bordes de esa zona, mientras que la tensión se libera en la mayor parte de la región focal. El proceso de deformación se retarda en este punto aun cuando se mantiene la presión del área circundante, claro está que que el proceso se puede invertir. La fracturación dentro de esta zona conduce al desarrollo de un gran número de fallas menores separadas por bloques de material más denso, lo cual impide el crecimiento de estas fallas, y la zona entera entra en un periodo de calma o quietud sísmica, durante el cual no vuelven a ocurrir los movimientos premonitores débiles que se experimentaron antes. Finalmente uno o más bloques resistentes ceden de una manera súbita, desarrollándose dinámicamente la falla principal y dando lugar a un gran terremoto.

Un carácter distintivo de este modelo es su aplicabilidad a los fenómenos de escala variada. Se le puede usar no sólo para describir los procesos que originan los sismos de diferente magnitud, sino también para predecir las caídas de rocas en los socavones de las minas y el colapso de las grandes obras de ingeniería bajo la acción prolongada de cargas críticas. Esa universalidad, debida a que el modelo se basa en principios muy generales que rigen la ruptura de los diversos materiales, supone que los resultados a que se han llegado se pueden comprobar a través de las experiencias de laboratorio.

El Instituto de Física de la Tierra en la URSS ha realizado un gran número de experimentos para estudiar la formación de fisuras aisladas y su interacción, como también para observar los fenómenos que preceden a la ruptura, y ha verificado los resultados logrados por la aplicación del modelo de referencia, por ejemplo, la forma de arco de los temblores preliminares. El proceso de la formación de los sismos basados en ese modelo y en otro diseñado en los EE.UU. se muestra en la figura 3.1.

La determinación a largo plazo de las características y valores de los campos geofísicos en el tiempo y en el espacio, junto con el estudio subsiguiente de la desviación de los parámetros geofísicos, respecto de los valores medios, forman la base de los estudios modernos de los signos precursores de terremotos, que se han desarrollado en el Instituto de Física de la Unión Soviética en la década del 60. Se trata de la definición de los procesos mecánicos de deformación en la corteza de la tierra por medio de técnicas geodésicas (triangulación y nivelación), de medidores de la deformación y del basculamiento, mediante el estudio de las presiones intersticiales en los pozos y en los sondeos y mediciones de cambios de nivel. Prácticamente, todos estos métodos empleados revelan que antes de las sacudidas fuertes hay deformación (figs. 3.2 y 3.3). El objeto de las investigaciones es encontrar, en las zonas sísmicas, los puntos que pueden reaccionar de manera más violenta en un proceso de deformación general y, ante todo, los puntos de activa fracturación tectónica. Los métodos geomorfológicos que permiten la evaluación de los movimientos tectónicos en los periodos del tiempo «geológico» son también de gran utilidad en el estudio de las deformaciones.

Las investigaciones sismológicas dan una serie de índices adicionales para la predicción. El estudio de la repetición de los sismos permite determinar las caracte-

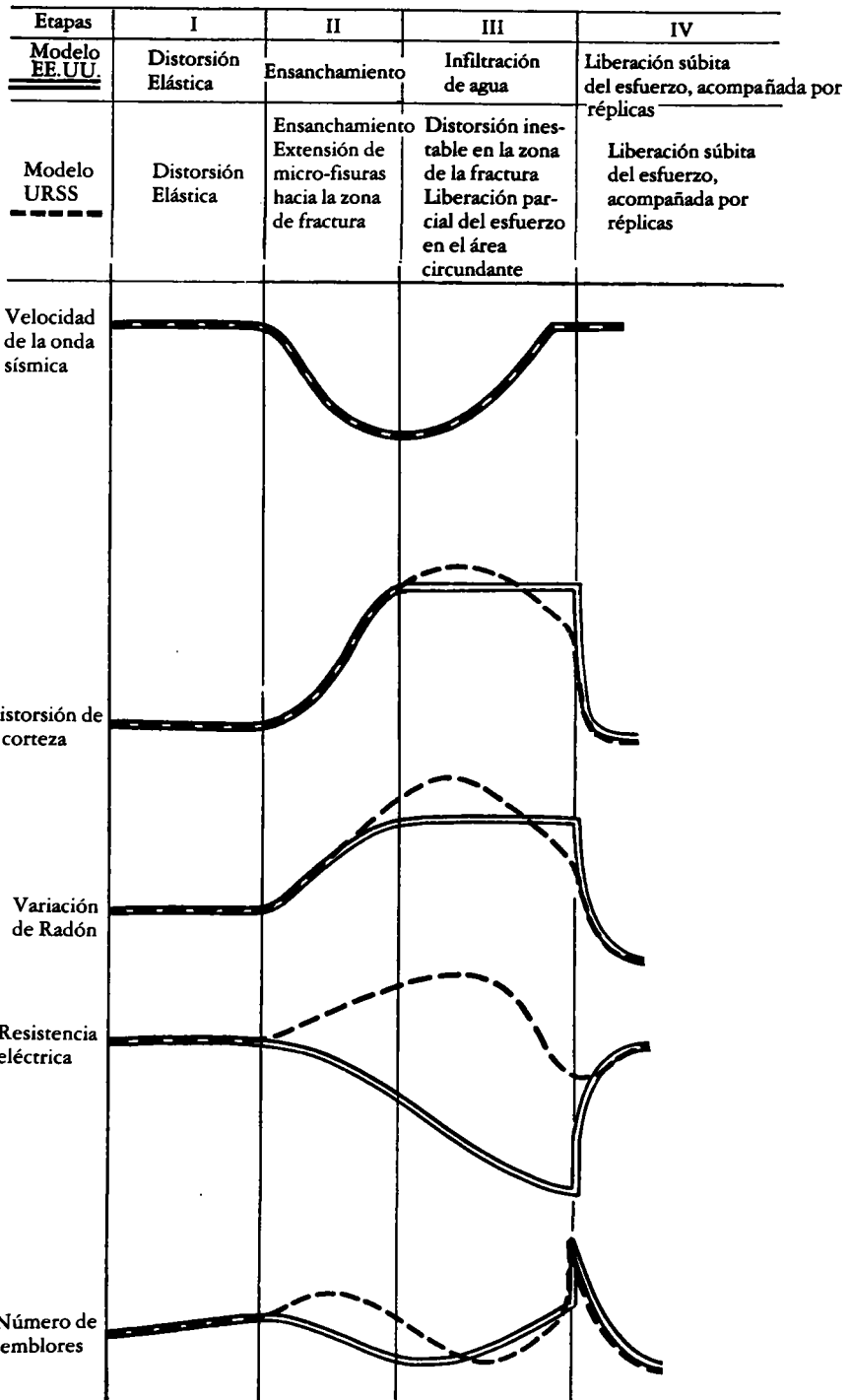


Figura 3.1. Procesos modelo de formación de sismos.

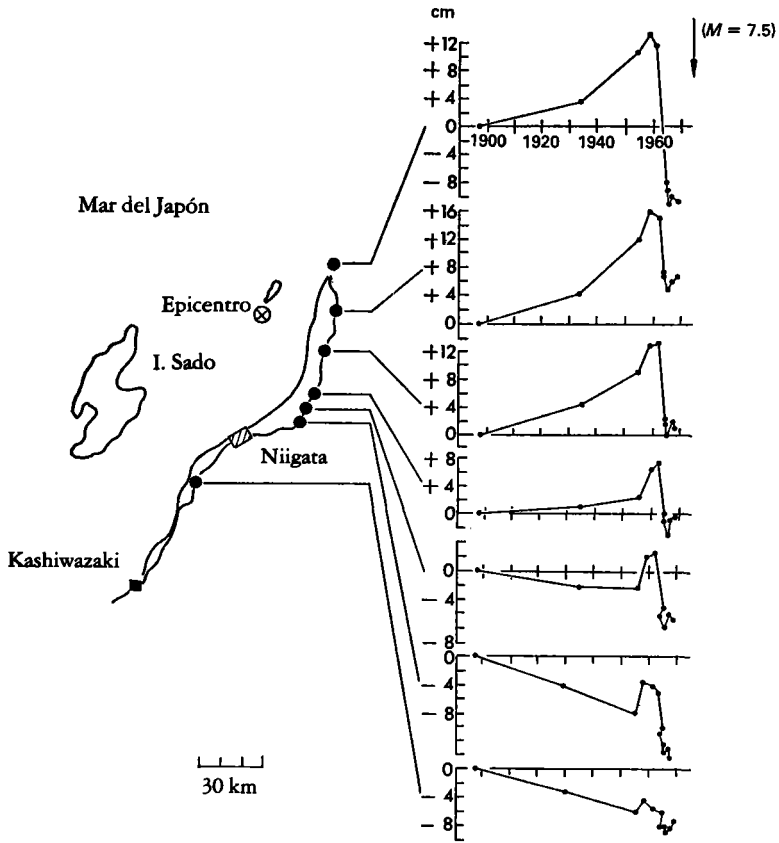


Figura 3.2. Deformaciones de superficie observadas antes del terremoto de Niigata (Japón) determinadas por levantamientos topográficos (1). Los círculos en negro indican las estaciones observadas.

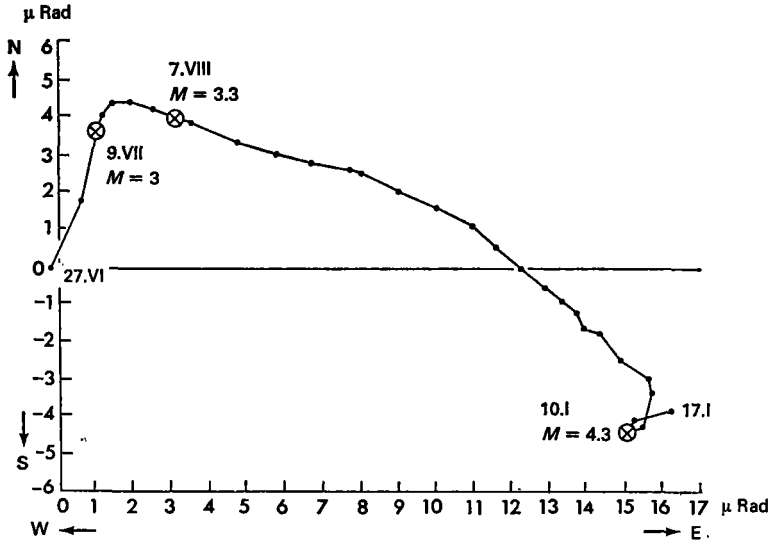


Figura 3.3a. Cambios en inclinación observados en California antes de varios sismos. (2) Los círculos con aspa indican los sismos.

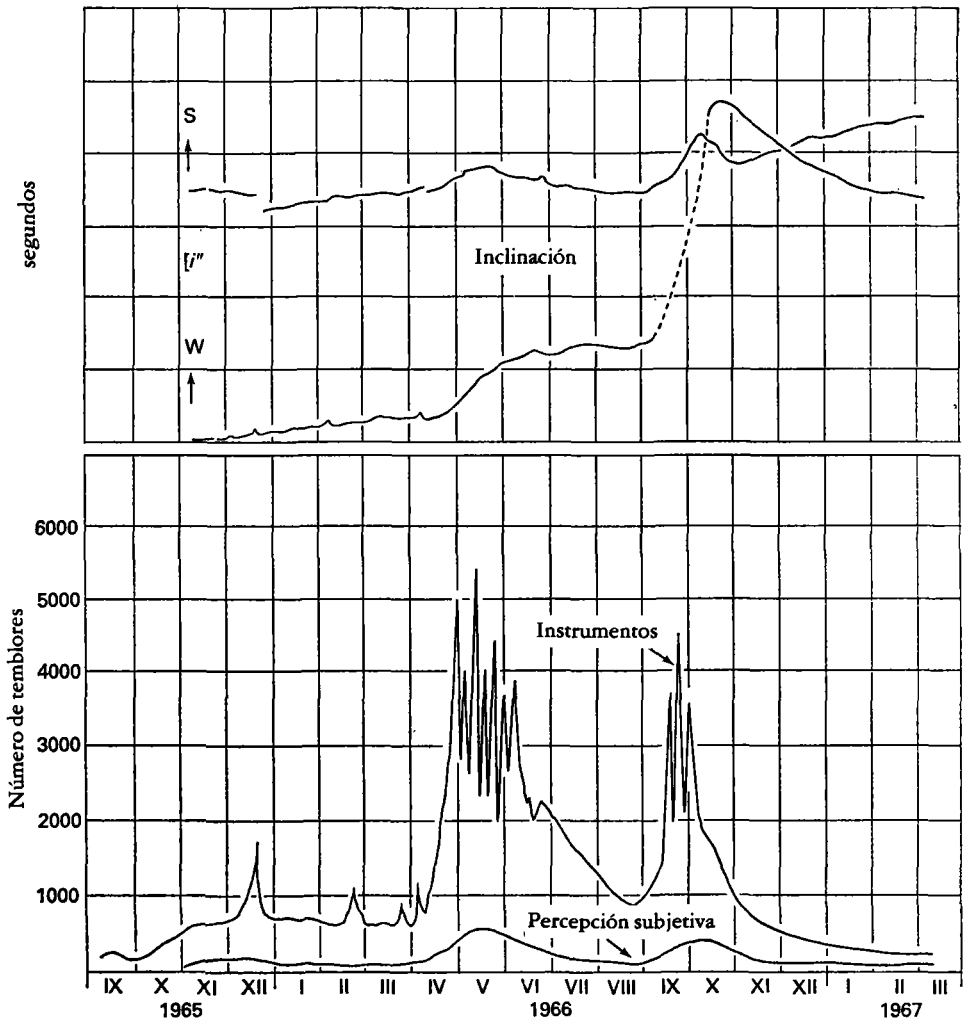


Figura 3.3b. Relación entre los cambios de inclinación (diagrama superior) y la actividad sísmica (diagrama inferior). Matsushiro, Japón.

rísticas de la periodicidad de los sismos de gran intensidad y la estimación del grado de la actividad sísmica en una región dada. En ciertos casos se puede establecer una correlación entre la pendiente de las curvas de repetición y el proceso de gestación de grandes terremotos.

Una sucesión de pequeños sismos de diversa intensidad con magnitudes que oscilan entre -2 y $+2$ sugiere cambios sísmicos precursores de una sacudida más fuerte (fig. 3.4). También una alteración en la profundidad focal de los microtemblores puede indicar que está aproximándose un gran sismo. Los valores de la razón entre la velocidad de la onda P (longitudinal) y la S (transversal) presentan anomalías bastante persistentes cuando preceden a las grandes sacudidas y permiten pre-

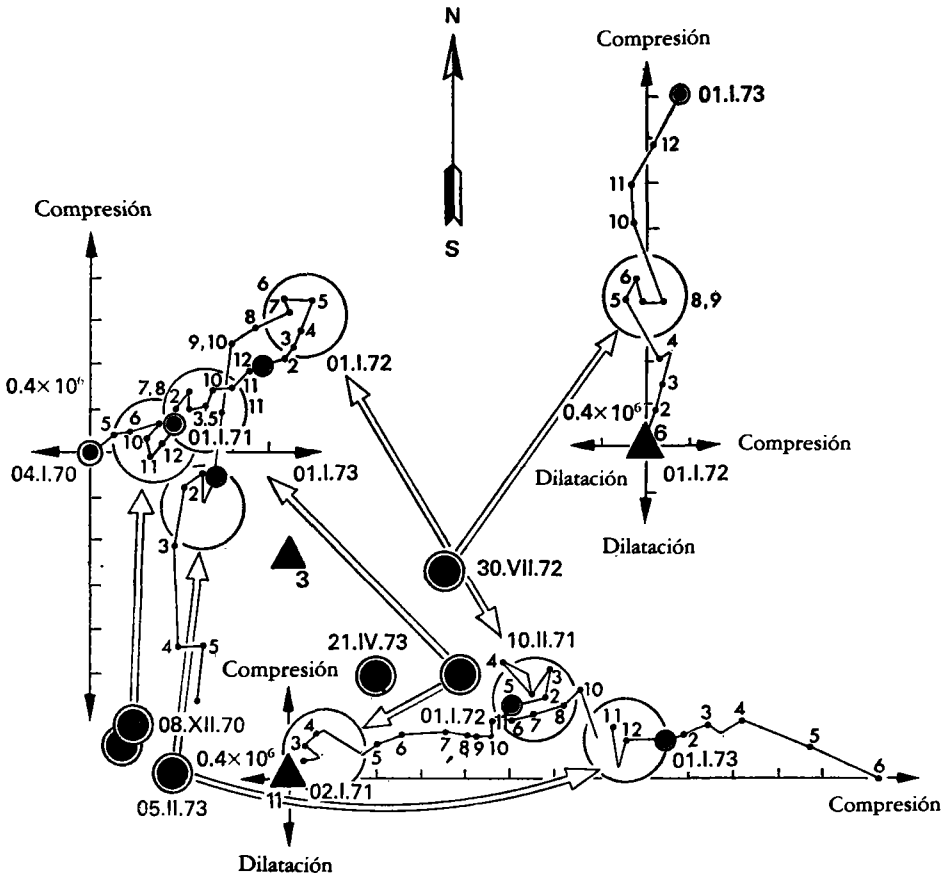


Figura 3.4. Variaciones en el proceso de deformación producidas antes del sismo de Garm (magnitud 4,5). Los triángulos indican las estaciones de observación; los círculos en blanco y negro representan los epicentros; las cifras señaladas en las líneas de trazo son los meses; los círculos grandes indican los puntos de cambio en el proceso deformativo.

decir la inminencia y localización de éstas. En muchos casos, los sistemas de fuerza que actúan en la región hipocentral experimentan una reorientación de sus direcciones durante el periodo de los microtemblores antes de producirse terremotos de gran intensidad. Las velocidades de las ondas sísmicas en un perfil fijo que atraviese la región focal experimentan cambios (fig. 3.7).

Las observaciones magnetoteléuricas revelan variaciones locales debidas, o bien a fluctuaciones del campo magnético natural de la tierra, o bien a fuentes artificiales de corriente continua o alterna antes de producirse grandes sacudidas sísmicas (figs. 3.8 y 3.9).

Los indicios precursoros geoquímicos de los sismos pueden jugar un rol importante en la predicción, ya que reflejan los cambios que se están operando en el estado de esfuerzo de la corteza terrestre durante el periodo que precede a sismos muy intensos (figs. 3.10 y 3.11). Un cambio en el estado de esfuerzo de la corteza

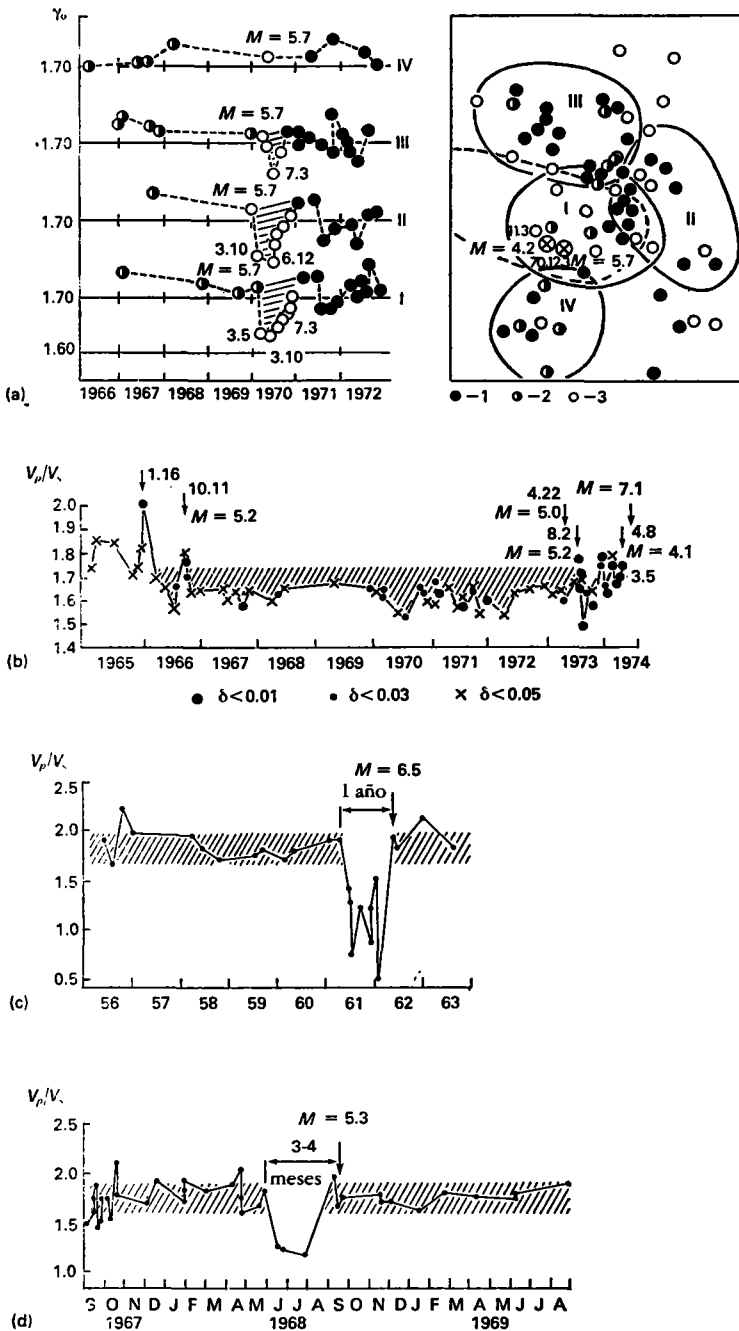


Figura 3.5. Cambios en la velocidad relativa de las ondas P y S en la República Popular de China (a y b) y Japón (c y d). En (a), se indican los temblores preliminares por ●, el periodo de anomalías ○, y el periodo de réplicas por ●. Las regiones III y IV, situadas fuera de la zona en la que se prepara el sismo, muestran sólo pequeñas anomalías (3, 4). Las fechas están dadas con el mes primero, de tal modo que 3.10 significa marzo 10.

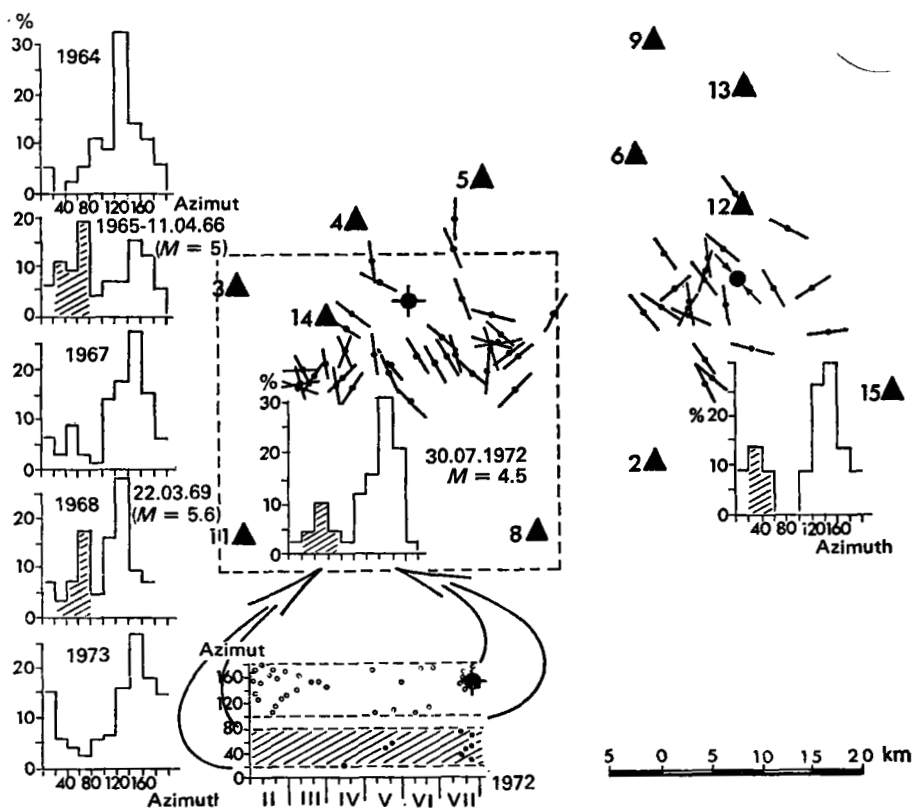


Figura 3.6. Variaciones en la orientación de las líneas de compresión antes del sismo de Garm (URSS). Los círculos indican lecturas normales; los puntos en negro indican anomalías. Los diagramas del lado izquierdo muestran las orientaciones de las líneas de compresión en el periodo 1966-1969, que difieren de las obtenidas en periodos de tranquilidad (las anomalías se muestran en sombreado). El acimut corresponde al eje de compresión.

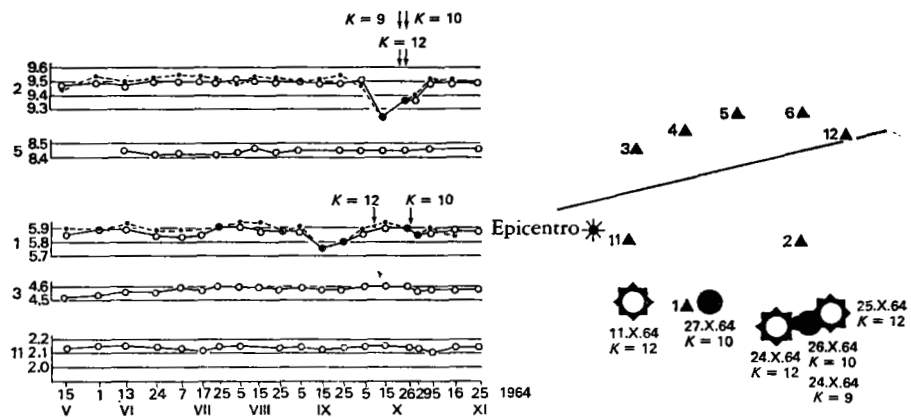


Figura 3.7. Cambios en la velocidad de las ondas P provocadas por una fractura, antes del sismo ocurrido en la región de Garm (magnitud 4.5). Las estaciones sismológicas 3, 5 y 11, situadas fuera de la zona sísmica, no registraron cambios en el tiempo de recorrido de la onda.

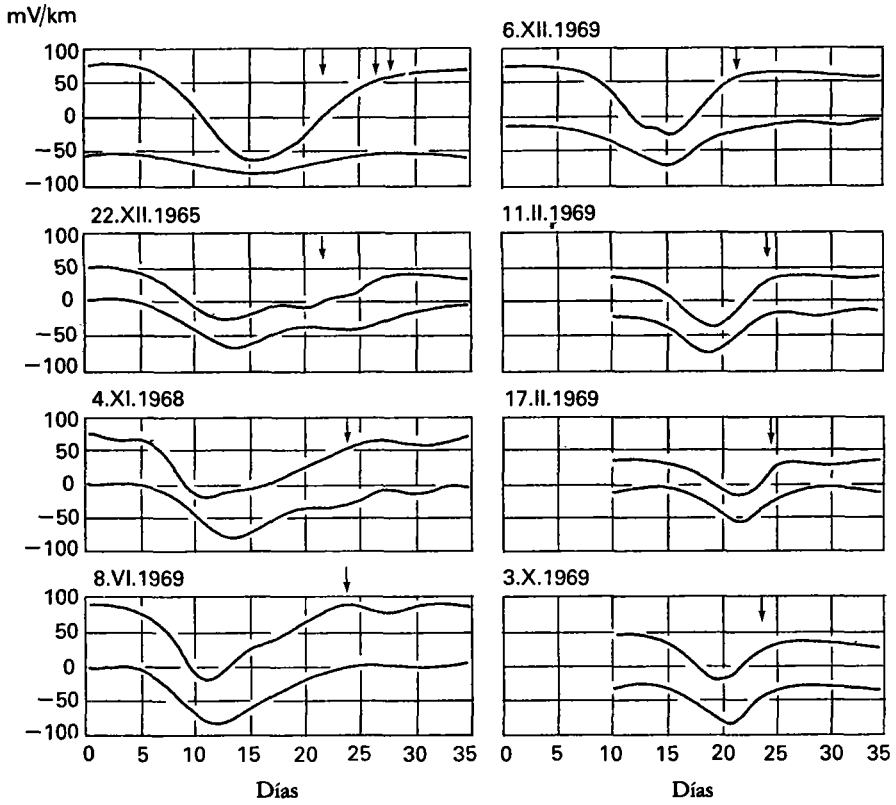


Figura 3.8. Cambio en el campo telúrico antes del terremoto de Kamchatka.

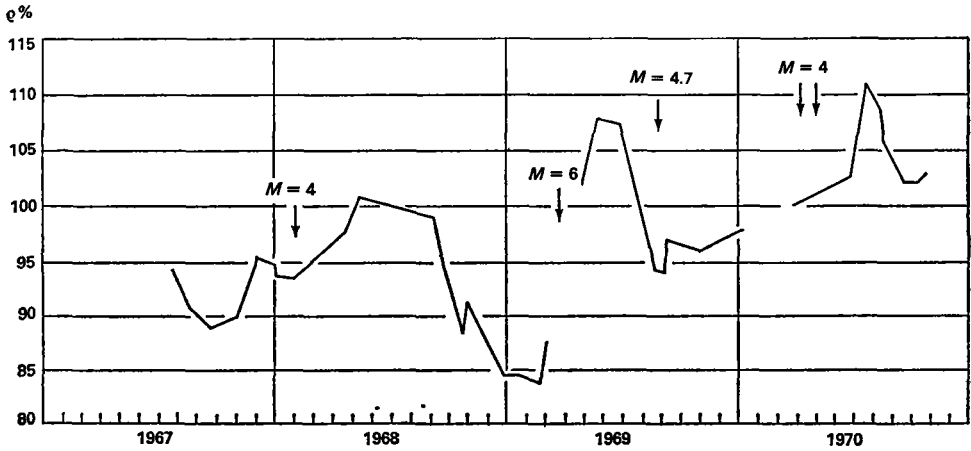


Figura 3.9. Cambio en la resistencia eléctrica aparente de la corteza de la tierra antes del terremoto de Garm.

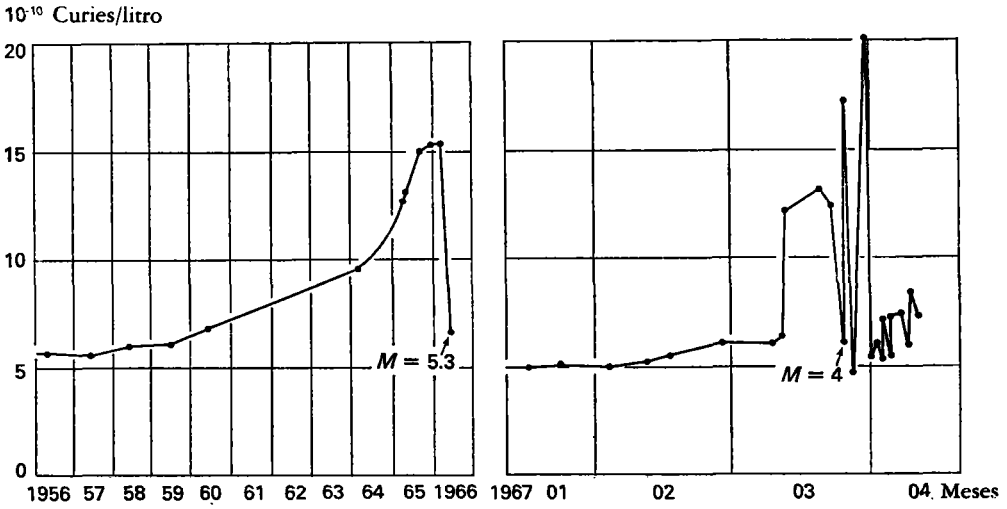


Figura 3.10. Cambios de radón en un manantial de una perforación profunda, en Tashkent, antes del terremoto de Tashkent (gráfico de la izquierda) y antes de una de las réplicas (gráfico de la derecha).



Figura 3.11. Cambios de radón antes del terremoto de Tajikistan.

terrestre traerá consigo un cambio de presión, el cual se transmite a los líquidos y gases encerrados en la corteza y, consecuentemente, modificará su equilibrio físico y mecánico. La solubilidad de los compuestos químicos aumenta según la concentración de gases que están disueltos en el agua del suelo.

El comportamiento de un gas en un volumen V_i a la profundidad H_i , que está sujeto a una presión P_i y que no está combinado químicamente con las paredes del recipiente, se describe por medio de la ecuación Mendelyeev-Clapeyron:

$$P_i V_i = \frac{M_i}{\mu_i} k T_i$$

donde M_i es la masa del gas, μ_i su peso molecular, T la temperatura y K la constante de Boltzmann. Para un volumen constante dado, allí donde es mínimo el peso molecular del gas, la presión ejercida en el recipiente será máxima. Esto quiere decir, que para condiciones y concentraciones iguales a la misma profundidad, la velocidad de difusión hacia la superficie de la tierra será mayor para gases de menor peso molecular que para moléculas complejas.

Se deduce que, en el campo geoquímico, los signos precursores deben buscarse entre los gases de peso molecular bajo y, por tanto, de mayor movilidad.

Entre los gases de peso molecular bajo, se prestará más atención a los gases inertes cuya absorción es muy pequeña dentro de la corteza terrestre. Los gases inertes más sensibles a cambiar sus condiciones físicas en las profundidades de la corteza terrestre y en un periodo presísmico son el helio, neón, argón, xenón y radón.

Por otra parte el hidrógeno, el deuterio, el mercurio, el metano, el amoniaco y el bióxido de carbono tienen una mayor capacidad de absorción que los gases inertes, de manera que se deben esperar variaciones considerables en sus concentraciones, las cuales dependen del lugar y de la hora de observación.

La información que proporcionan los signos geoquímicos precursores de los sismos aumenta al crecer la diferencia de presión en la zona considerada entre las condiciones normales y las extremas.

Cualquier cambio en el equilibrio de las aguas y gases subterráneos trae consigo, evidentemente, un cambio general de sus estados físico y químico —la conductividad eléctrica de las aguas, la concentración de diferentes iones (cationes y aniones), iones de hidrógeno (ρ^H) y electrones (E_H), etc.

En relación a este asunto, se deberían tomar muestras de gas y aguas del subsuelo, de la mayor profundidad posible para analizar los compuestos químicos y los gases disueltos.

Puesto que la permeabilidad de las diferentes rocas varía de manera considerable, tanto para los gases como para los líquidos, se cree que las zonas de falla son los sitios más apropiados para las observaciones geoquímicas. Para que los análisis tengan mayor fiabilidad, las muestras deberían provenir de diferentes profundidades, recogiénolas de cuatro o cinco puntos bien separados del área en estudio.

Se debe recordar que hay deformaciones de la corteza que están causadas por las mareas lunares y solares y también por los cambios en la presión barométrica. Por lo tanto, se deben esperar cambios estacionales significativos, los cuales necesitan aún ser estudiados.

En algunos casos se han observado cambios en el campo magnético de la tierra y en la luminiscencia de la atmósfera cerca de los epicentros de sismos de fuerte intensidad.

Los datos sobre los signos precursores se presentan en la tabla 3.1 y en la figura 3.12.

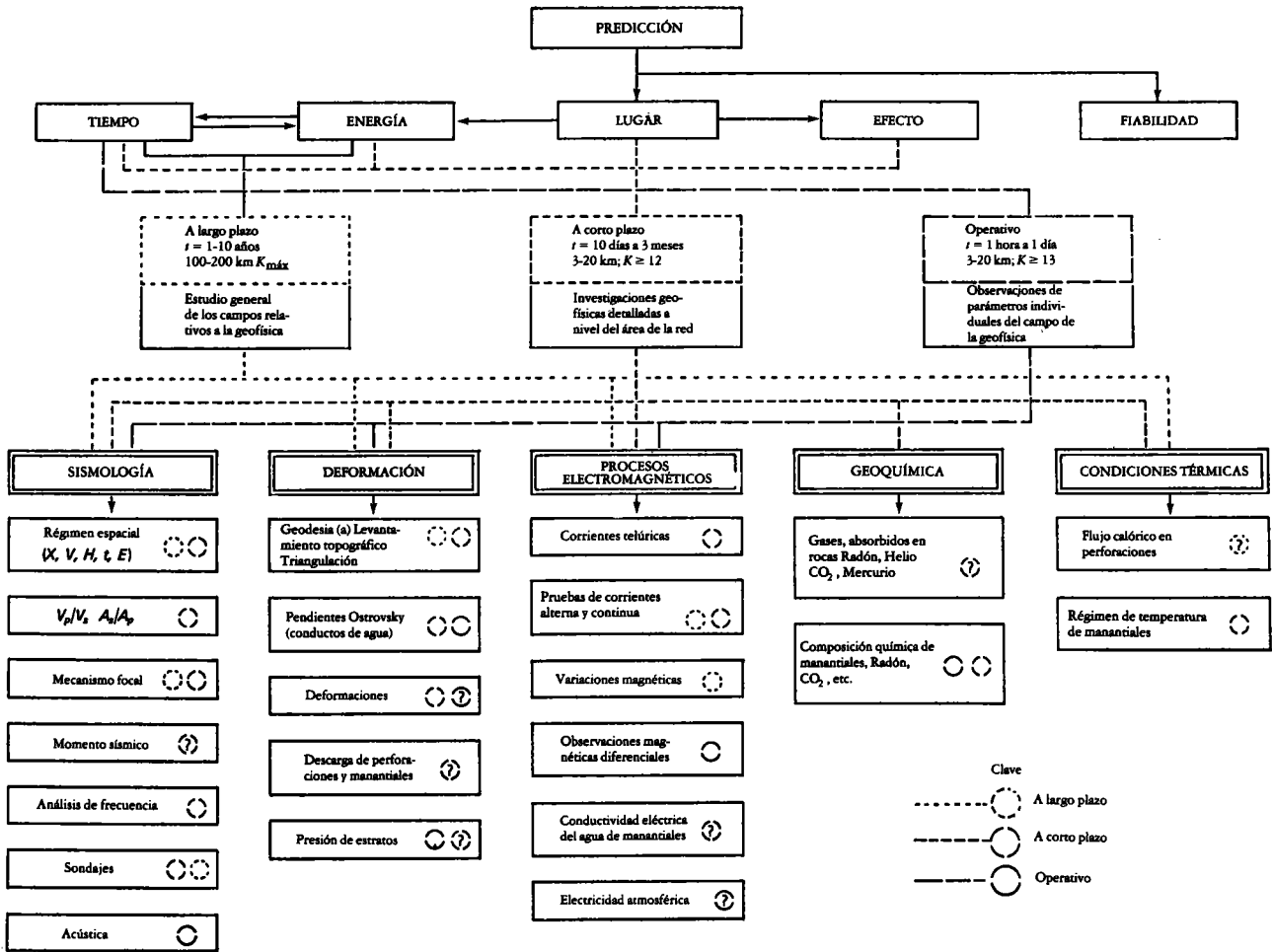


Figura 3.12. Factores en la predicción sísmica. Los signos de interrogación significan que los métodos requieren verificación.

Tabla 3.1

Número de serie ¹	Tipo de precursor	Número de casos observados
1	Deformación de la superficie	19
2	Inclinación y deformación	84
3	Réplicas	73
4	Pendiente de la curva de frecuencia	11
5	Microtemblores	3
6	Mecanismo focal	6
7	Reptación o fluencia de falla	2
8	Razón de velocidad entre las ondas longitudinales y transversales	27
9	Cambios en velocidad de las ondas longitudinales y transversales	11
10	Anomalías magnéticas	2
11	Corrientes telúricas	13
12	Resistencia eléctrica	17
13	Cambio en el contenido de radón	9
14	Cambio en la composición química del agua subterránea	2
15	Nivel del agua subterránea	—
16	Anomalías en la descarga de petróleo	3
TOTAL		282

1. El «número de serie» corresponde a los números empleados en la figura 3.14.

El comportamiento de varios signos precursores en tiempo, se presentan de manera diagramática en la figura 3.13.

En el lado derecho de la tabla 3.1 se dan algunos datos relativos al número de ocasiones en que se han observado signos precursores. Se debe tener en cuenta que los datos dados en esa tabla se obtuvieron en varios países con procedimientos diferentes, en horas distintas y bajo condiciones geológicas variadas, lo cual los hace menos representativos. Aunque los datos que se presentan no son completos, señalan un buen número de casos de signos precursores observados. La hora de ocurrencia de los precursores (diferentes de los que están relacionados con los procesos de deformación) depende de la magnitud de los sismos, tal como se muestran en el gráfico de la figura 3.14, en donde se debe prestar atención a la manera como se distribuyen los puntos. Los precursores se clasifican en dos categorías: los dependientes de la magnitud del sismo y los que son casi independientes. Estos últimos, comprenden los precursores que ocurren poco antes de un fuerte sismo. Son precisamente estos precursores, junto con los procesos anticipatorios a largo plazo, los que sugieren la posibilidad de predecir el momento en que ocurrirá un sismo.

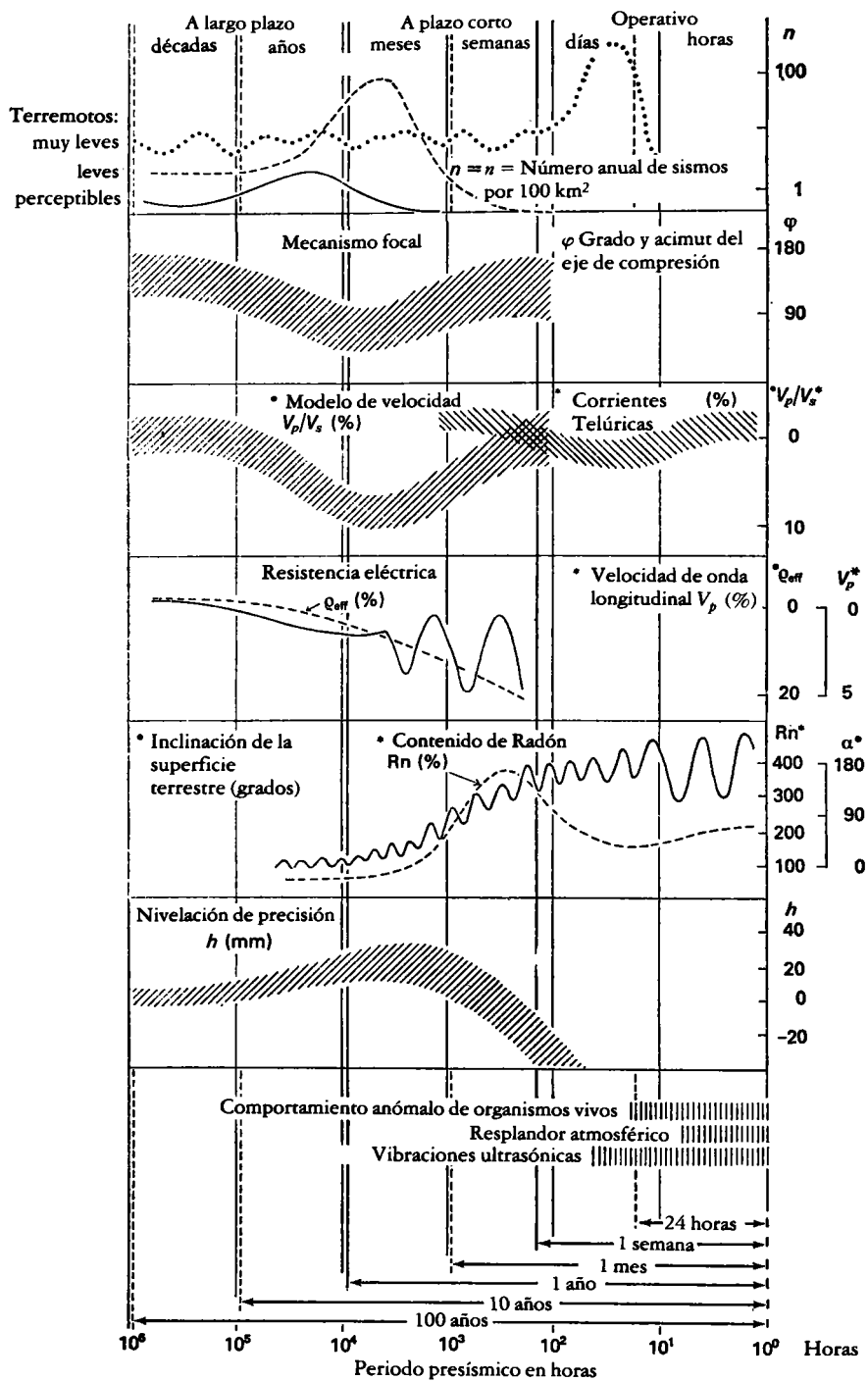


Figura 3.13. Indicadores sísmicos.

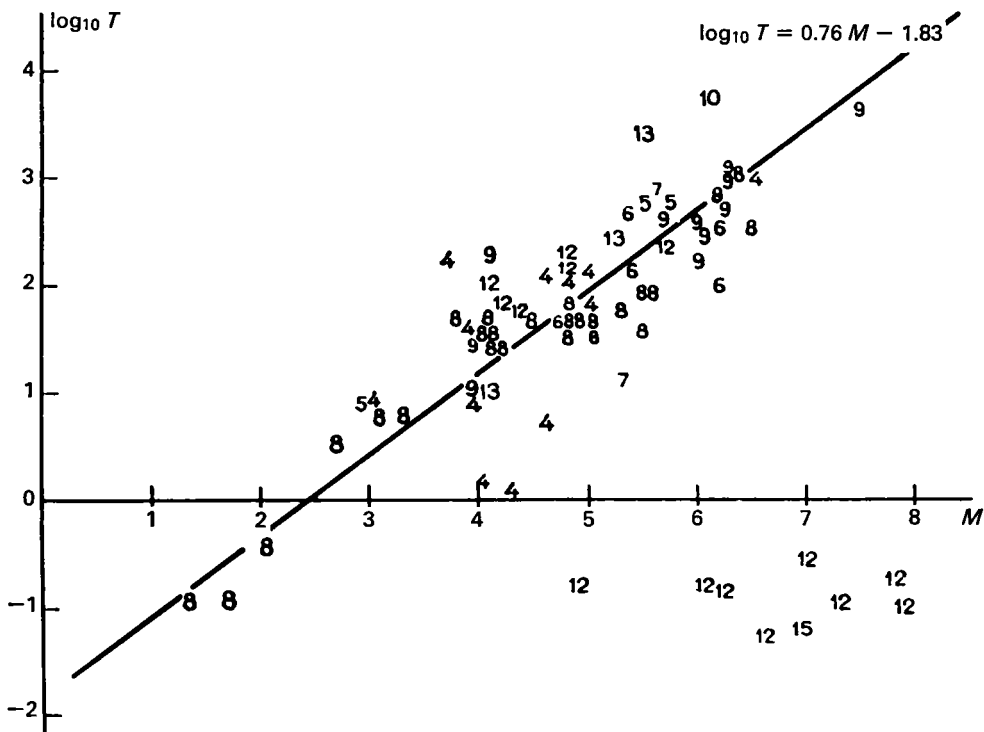


Figura 3.14. Cambios en el tiempo (T) en que ocurren diferentes precusores (expresados en días anteriores al sismo) en función de magnitud (M). Las figuras corresponden a los números convencionales asignados en la tabla 3.1.

La aplicación de la estadística y de la teoría de las probabilidades a los precusores aparentes demuestra que, aun con un material tan incompleto, será posible evaluar, aunque sin detallar, la probabilidad de que ocurran terremotos fuertes y, cuando existan precusores a corto plazo, con signos de fondo a largo plazo, se predecirán los sismos de manera casi exacta.

En la URSS y en otros países se han iniciado tentativas para predecir los terremotos en forma experimental. Del estudio de la actividad sísmica a largo plazo se ha demostrado que en los lugares donde ocurren sismos muy intensos, se puede hacer el pronóstico con cincuenta años de anticipación. Se ha probado que los mapas de riesgo sísmico de Kamchatka y de las islas Kuriles, hechos para 1965-1970, son correctos en un 80 %. En particular, se pronosticaron las posiciones de dos fuertes sismos que sobrepasaban la magnitud 7. Ello da una base para que investigaciones futuras proporcionen predicciones más exactas en las áreas de alto riesgo sísmico.

En la predicción a corto plazo se ha intentado utilizar una combinación de los precusores que se han mencionado. Estos intentos fueron hechos por los Institutos de Geofísica de la Tierra y de Vulcanología de la Academia de Ciencias de la URSS en la región de Kamchatka. Usando estadísticas sísmicas y datos sobre modificaciones telúricas y sobre la razón de velocidades entre las ondas longitudinales y transversales, la predicción a corto plazo de los sismos fuertes en la región es correcta en

un 70 % de casos. Sin embargo, para fines prácticos, este grado de fiabilidad es insuficiente, y la proporción de falsas alarmas ha sido alta. No obstante, estas tentativas iniciales señalan la posibilidad de una predicción efectiva.

En la República Popular de China se han llevado a cabo ciertas pruebas relativas a la predicción de terremotos que son bien conocidas. En la actualidad existe en ese país una red amplia de estaciones sismológicas, instituciones asociadas y trabajadores aficionados que se dedican a la predicción sísmica. Se pronosticaron nueve terremotos y antes del movimiento devastador del 4 de febrero de 1975, en la provincia de Liaoning, los habitantes de los centros densamente poblados fueron evacuados a zonas más seguras. A pesar del considerable daño que causó el terremoto en muchas localidades deshabitadas, la población salió ilesa. Sin embargo, y como lo han observado los propios sismólogos chinos, hubo un gran número de falsas alarmas y la predicción no es aún lo suficientemente fiable; no obstante esperan que como consecuencia de sus investigaciones, aumentará el grado de fiabilidad de los pronósticos.

El programa de predicción sísmica en EE.UU. se basa en un aumento rápido del número de estaciones de observación geofísica, que envían sus datos por telégrafo y radio a varios centros de computación. Se han hecho tentativas para lograr una automatización instrumental completa en el proceso de la información que se recibe. El empleo intensivo de los sistemas de telecomunicaciones, que incluye satélites, es notable y es la base de las investigaciones norteamericanas sobre predicción, que asegura observaciones a gran escala y con amplia cobertura.

En EE.UU. se ha dado mucha importancia a las investigaciones de laboratorio en base a modelos de los procesos sísmicos lo que se lleva a cabo en muchas instituciones. Los científicos norteamericanos están prestando considerable atención a la evaluación de daños que acarrearían las grandes sacudidas intensas en los complejos industriales y en los centros urbanos muy poblados. Tales evaluaciones, con las descripciones detalladas de los probables daños, harían posible la planificación de las construcciones futuras en las áreas sujetas a sismos, evaluar los daños anticipadamente y planificar las medidas de emergencia y los esquemas de evacuación. Ha habido algunos casos de predicción de temblores poco intensos en California y en la parte norte de Nueva York.

En Japón y en particular en la región de Tokio, se hicieron intentos de pronósticos sísmicos. Es a partir de 1964 cuando comienza el desarrollo planificado de los observatorios geofísicos a través de todo el país y los datos que se obtienen se reúnen y se procesan a fin de acumular toda clase de información geofísica para la predicción.

Este es pues el actual estado de las investigaciones realizadas sobre predicción de los terremotos, y parece razonable abordar una etapa posterior, que cubra la preparación, los ensayos, y las aplicaciones prácticas para estimar el momento y la localización de los terremotos.

3.2 Líneas generales de los estudios de predicción sísmica

La sección anterior se ha dedicado a describir principalmente la situación actual relativa a la predicción de la hora de ocurrencia de los sismos. El problema de la

predicción se debería contemplar de una manera más amplia, ya que el propósito básico de la predicción, como un todo, es prevenir las consecuencias de los terremotos de gran intensidad; por lo tanto, vamos a recapitular de manera breve todas las cuestiones relativas a la predicción. El esquema general de la investigación se muestra en el cuadro 3.2.

3.2.1 *Zonificación sísmica y evaluación del riesgo*

Objetivos básicos:

1. Cartografía de la sismicidad y elaboración de métodos para fijar las posiciones de los sismos muy intensos a partir de los datos geológicos, geomorfológicos, sísmicos, geofísicos y geodésicos.
2. Elaboración de métodos para la evaluación de riesgos sísmicos con el fin de sentar las especificaciones de los edificios y tomar otras decisiones apropiadas en los campos económico y social.
3. Encontrar las características del comportamiento del suelo durante los sismos fuertes por medio de métodos geológicos y geofísicos.

3.2.2 *Evaluación de las consecuencias de los terremotos*

El propósito básico es el de obtener una idea preliminar de los daños que se pueden producir en el caso de sismos muy intensos. Esta clase de evaluación debería ser hecha en las grandes ciudades situadas en áreas muy activas sísmicamente y también en los complejos industriales.

La evaluación en una etapa posterior implica el tomar en cuenta las condiciones locales del terreno. El empleo de los datos relativos a la atenuación de los efectos sísmicos posibilita la construcción de las isosistas teóricas de un probable terremoto.

De acuerdo con el tipo de estructura que existe en el área donde se espera un terremoto, se puede evaluar el carácter de los posibles daños y se puede tomar una decisión respecto de las medidas que se necesitan para mitigarlo, como operaciones técnicas, provisión de esquemas para evacuar la población, cuidados médicos, abastecimiento de alimentos, etc. (tabla 3.3).

Esta clase de evaluación facilitará de una manera considerable la tarea de tomar todas las medidas de protección necesarias en el caso de un grave terremoto.

3.2.3 *Predicción de terremotos*

Se debe recordar que en los países propensos a terremotos, el tema de la predicción sísmica se ha vuelto difícil en vista del crecimiento rápido de las poblaciones y del aumento de los centros urbanos e industriales.

Objetivos básicos:

1. Mejora de los modelos físicos de mecanismos fuente de terremotos, sobre la base de estudios de campo y de laboratorio.
2. Determinación de los precursores sísmicos más efectivos y fiables en base al es-

Tabla 3.2. Plan general de investigaciones sobre predicción a fin de mitigar las consecuencias de los terremotos.

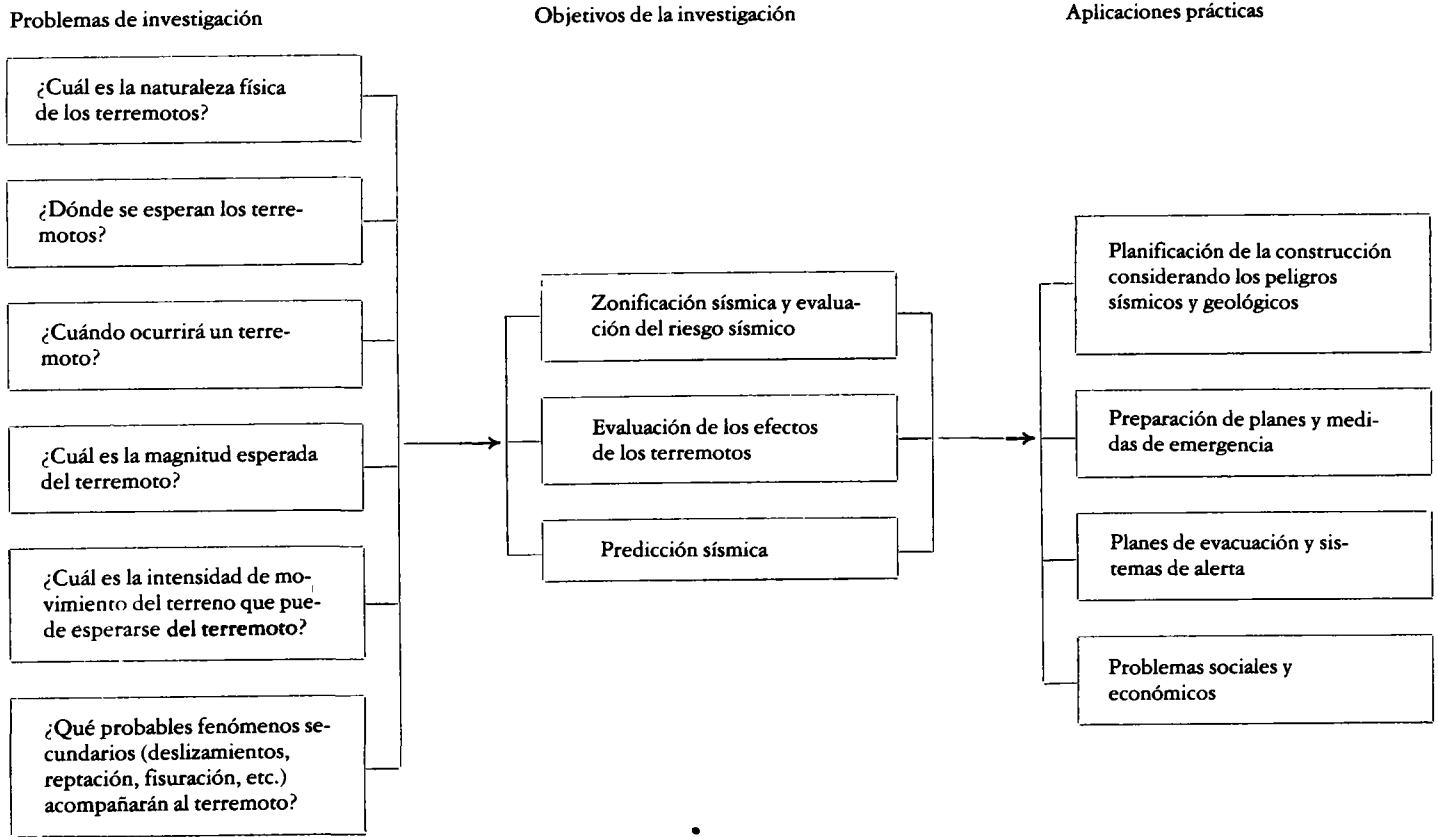


Tabla 3.3. Medidas que surgen en la predicción sísmica.

Periodo de predicción	Edificios	Bienes materiales	Salvaguardia de la vida	Medidas especiales
Operativo (horas a 1-2 días)	Evacuación de edificios peligrosos. Cese de actividad en lugares de reunión (cineemas, teatros, escuelas)	Evacuación de los bienes materiales más importantes	Asignación de equipos de emergencia a las zonas de peligro. Preparación de establecimientos médicos	Corte de la corriente eléctrica y cierre de los conductos de gas, paralización de plantas químicas peligrosas, de centrales nucleares, etc.
Corto plazo (2-4 meses)	Evaluación de posibles daños. Planes de evaluación pública.	Conservación de los bienes más importantes	Disposición de medidas de emergencia y de establecimientos médicos.	Eliminación o protección de sustancias tóxicas, disminución de los niveles en los embalses, etc.
Largo plazo (12 meses)	Fortalecimiento de los edificios más inseguros		Planificación de provisiones alimenticias de emergencia. Planificación del uso que se debe hacer de los servicios médicos y sanitarios.	Traslado de sustancias peligrosas a otros lugares de almacenaje.
10años	Demolición de los edificios que están en peligro de desplome y refuerzo de los inseguros			

tudio de los diferentes tipos de precursores; evaluación de su fiabilidad y determinación de qué es lo que los provoca o los atenúa.

3. Elaborar procedimientos para el uso continuado de todos los precursores a fin de que se haga más fiable la predicción.
4. Elaborar procedimientos para la compilación automatizada de datos geofísicos, y elaborar métodos de procesado que permitan el uso de la computadora.

El logro de estos objetivos implica:

- a. Investigaciones teóricas, de campo y de laboratorio sobre la física de los focos sísmicos. Una de las tareas básicas de los experimentos de laboratorio sería el estudio de la etapa final de ruptura de rocas y materiales —la etapa de deformación inestable. Estos experimentos deberían efectuarse con rocas y materiales diferentes y con un margen de presión y temperatura tan amplio como fuera posible para medios tanto monofásicos como multifásicos.

Los experimentos de campo deben ser precedidos, dentro de lo posible, por trabajos de laboratorio, a fin de economizar tiempo y elegir los métodos más económicos para efectuar los estudios de campo.

Paralelamente a los experimentos de laboratorio, se necesita una gran preparación de investigación teórica, conjuntamente con el establecimiento de analogías matemáticas de procesos que se desarrollan en la corteza terrestre en el periodo anterior a un terremoto.

Una condición esencial para los experimentos del laboratorio es que tengan un vínculo estrecho con los estudios de campo.

- b. Establecimiento de una red suficientemente densa de puntos de observación geofísica, «polígonos de predicción», en las principales áreas sísmicamente activas y, en particular, en aquellas que amenazan a las grandes ciudades y a los complejos industriales.

Con el propósito de reducir las interferencias del fondo (ruido) será aconsejable tomar lecturas de pozos, que deberían tener una profundidad de algunos centenares de metros, lo cual depende de las condiciones geológicas en cada lugar. La estación geofísica debería tener el siguiente equipo de observación: sismómetros (con dos niveles de amplificación) indicadores de fuertes movimientos (en la superficie), dispositivos acústicos, manómetros de presión intersticial, detectores geoquímicos (helio, radón, CO₂, H₂, etc.), sensores del campo magnético, sondas y registradores electrotelúricos. Las estaciones particulares deberían ser equipadas para el estudio de la electricidad atmosférica.

La distancia promedio que debe existir entre las estaciones cercanas a las grandes ciudades debería ser del orden de 10 a 15 km. En otras áreas sísmicamente activas, las estaciones geofísicas deberían estar situadas donde se intersectan las principales estructuras tectónicas activas. Un cierto número de estaciones geofísicas de zonas particularmente activas de intersección tectónica deberían equiparse con medidores de la deformación y de la basculación del terreno.

Los datos geofísicos deberían compilarse con la ayuda de sistemas telegráficos o de radio. Estos datos se procesarían en un centro de computación.

Después del estudio de todo el conjunto de signos precursores geofísicos, los más fiables deberían cotejarse con condiciones geológicas dadas y, lo que es más importante, se debería evaluar la dependencia estadística de cada precursor y de todos los precursores en conjunto. Este material provee las bases para la predicción y para la evaluación de la fiabilidad de las predicciones.

- c. Una parte esencial del estudio de los precursores es la creación de dispositivos de observación suficientemente simples y fiables que tengan una amplia gama de frecuencias y de condiciones dinámicas.
- d. Elaboración de métodos automáticos de procesamiento de datos. El volumen de datos geofísicos compilados en una zona por una red de estaciones es tan grande, que su procesamiento requiere de computadoras de gran capacidad, que puedan aceptar la entrada simultánea de muchos y variados parámetros geofísicos, el establecimiento de programas especiales de cálculo, la condensación de la información para poder transmitir al centro regional y otras disposiciones especiales relativas a la computación. Uno de los requisitos más importantes para la predicción operativa de los terremotos es el tratamiento matemático de datos a nivel de la red del área.

Esta relación de tendencias en los estudios de predicción sísmica demuestra que el problema total representa una tarea compleja y multifacética que requiere grandes inversiones materiales.

3.3 Cooperación internacional en la predicción

Debido a las complejidades que se han mencionado, solamente la labor conjunta de especialistas de diferentes países y la cooperación internacional podrán desembocar en un éxito próximo y en la elaboración de métodos para la predicción eficaz de los terremotos desastrosos.

El primer país que emprendió investigaciones sistemáticas sobre la predicción de los terremotos fue la Unión Soviética. En 1949, a raíz del terremoto de Ashkhabad de 1948, se proyectó la realización de estudios para investigar los signos precursores de los terremotos; el programa de investigación había sido delineado por los académicos S.I. Vavilov, y G.A. Gamburtsev. Sin embargo, el nivel técnico de la época no permitió elaborar un método de predicción sísmica. Con todo, se lograron algunos resultados importantes, sin los cuales difícilmente habría sido posible realizar las actuales investigaciones sobre los signos precursores de los terremotos.

En 1960, se establecieron las bases de la predicción sísmica en los programas nacionales de Japón y EE.UU. En 1965, en Tiflis, durante la reunión del Comité Consultivo de la UNESCO, a propuesta de la delegación soviética, se decidió pedir a la Asociación Internacional de Sismología y Física del Interior de la Tierra (IASPEI) que organizase, dentro de la Organización, un grupo de trabajo que coordinaría los esfuerzos de los diferentes países encaminados a elaborar métodos para la predicción de los terremotos. Ese grupo se organizó durante la Asamblea del IASPEI de 1967 y se eligió como primer presidente del mismo al profesor T. Hagiwara. Concretamente, los primeros descubrimientos de la Unión Soviética fueron comunicados a este grupo. El primer simposio del grupo se celebró durante la Asamblea del IASPEI, en Madrid en 1969, y el programa de la Asamblea de Moscú de 1971 incluyó un segundo simposio, que versó sobre la investigación de signos precursores de los terremotos. Esta vez, el grupo de trabajo se transformó en la Comisión sobre Predicción de Terremotos del IASPEI y fue elegido presidente uno de los autores del presente artículo.

El tercer simposio, sobre un tópico similar, se reunió en Lima (Perú) en 1973 y

se presentaron en él más de 20 trabajos científicos. Este simposio revistió particular importancia, dado que los países de América del Sur están situados en una de las zonas sísmicas más activas del mundo, y que las investigaciones sismológicas, especialmente las que se refieren a la investigación de los signos precursores de los terremotos, están aún avanzando muy lentamente en esos países.

La Comisión sobre Predicción de Terremotos aceptó la invitación de la Academia Uzbeke de Ciencias para celebrar el siguiente simposio en Tashkent, del 27 de mayo al 3 de junio de 1974. En este simposio se presentaron más de 50 comunicaciones científicas e informes, algunos de los cuales se referían a programas de cooperación bilateral y multilateral.

Hay que señalar que la Comisión Internacional sobre Predicción de Terremotos del IASPEI ha tratado repetidamente de aunar los esfuerzos de los países situados en las zonas sísmicas activas del mundo. Se dio por descontado que la cooperación sería beneficiosa a todos los sismólogos de esos países.

En particular, la Comisión recomendó en 1973 que se reuniera información sobre el contenido de los programas nacionales de predicción de terremotos y que se preparara un proyecto de recomendaciones internacionales sobre las líneas o metodologías más eficaces para identificar los signos precursores de los grandes terremotos.

A pesar del gran volumen de resultados presentados en las reuniones de la Comisión Internacional en Tashkent en 1974, la cooperación internacional activa de los países interesados en este campo ha resultado infructuosa y la cooperación ha quedado limitada a la URSS, los EE.UU. y Japón. Como puso de manifiesto el simposio de Tashkent de 1974, una cooperación bilateral constituye una modalidad de trabajo prometedora. Representa un ejemplo de ello la cooperación soviético-norteamericana en la búsqueda de signos precursores de terremotos. Otro ejemplo conocido es el programa japonés-norteamericano. Durante las sesiones de la Comisión sobre Predicción de Terremotos en Tashkent se procuró una vez más atraer a la cooperación activa a los sismólogos de distintos países situados en el cinturón activo de la tierra.

La comisión también recomendó que se contemplara la ayuda de especialistas experimentados para desarrollar investigaciones sobre predicción de terremotos en los países que proyectan e inician estudios en esta materia, y establecer contactos con la UNESCO para la organización de consultas y de asistencia a los países que deseen elaborar planes y realizar investigaciones sobre el tema de la búsqueda de signos precursores de los terremotos.

En vista de los resultados satisfactorios que se han obtenido, gracias a que los trabajos sismológicos unificados por la UNESCO se realizan a nivel intergubernamental será deseable que esta oficina se encargue de organizar un centro internacional permanente, para estimular y coordinar los esfuerzos de los países situados en las zonas de alta sismicidad del mundo.

3.4 Bibliografía

- [1] RIKITAKE, T. 1975. Earthquake precursors. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 65, no. 5, p. 1133-1162.

- [2] PRESS, F. 1975. Earthquake prediction. *Scientific American*, vol. 232, no. 5.
- [3] *Earthquake frontiers*, no. 2, p. 14–19, Peking.
- [4] FENG, TE-JI; TAN, AI-NA; WANG, KE-PEN. 1974. Velocity anomalies of seismic waves from near earthquakes and earthquake prediction. *Acta Geophysica Sinica*, vol. 17, no. 2.
- [5] SADOVSKY, M. A.; NERSESOV, I. L.; NIGMATULLAEV, S. K.; LATYNINA, L. A.; LUKK, A. A.; SEMENOV, A. N.; SIMBIREVA, I. G.; ULOMOV, V. I. The processes preceding strong earthquakes in some regions of Middle Asia. *Tectonophysics*, vol. 14 (3/4), p. 295–307.

4 Sismicidad inducida

Por D.I. GOUGH

4.1 Introducción

Los sismos han sido provocados de un modo no deliberado por tres tipos de acciones humanas: construcción de presas para formar grandes embalses, excavación de minas, inyección de líquidos en los poros y grietas de las rocas de la corteza terrestre. También pueden provocar sismos las grandes explosiones subterráneas (como los ensayos de armas nucleares) pero este aspecto no será examinado en este capítulo. Los sismos inducidos abarcan una gama de magnitudes que van desde los microtemblores detectables con los sismogramas, hasta los sismos de magnitud 6 en la escala de Richter. Como sus hipocentros suelen situarse a profundidades de entre 5 y 10 km, las magnitudes superiores a 5 entrañan peligro para la vida y la propiedad de las poblaciones cercanas. La sismicidad provocada por embalses, excavaciones mineras e inyecciones de líquido fue el tema del primer simposio internacional sobre la sismicidad inducida, que se celebró en setiembre de 1975 en Banff, Alberta (Canadá), y su discusión se basa, en parte, en los trabajos que se presentaron en ese simposio.

4.2 Sismicidad inducida por los embalses

4.2.1 *Estadísticas de los fenómenos*

Recientemente, Simpson (1976) ha revisado más de 20 casos en los cuales se produjo un aumento de la actividad sísmica con el llenado de los grandes embalses. Otros trabajos han sido presentados recientemente por Rothé (1970, 1973), por Gupta y otros (1972 a, b) y por Rastogi (1976). Los movimientos inducidos cubren una gama de magnitudes que van desde un límite inferior impuesto por el nivel general de ruido sísmico —y, por tanto, indefinido— hasta las magnitudes cercanas a 6 de la escala de Richter; por ejemplo, las grandes secuencias sísmicas inducidas por embalses en Koyna, India (Narain y Gupta, 1968), en Kremasta, Grecia (Com-

minakis y otros, 1968), en Kariba, África (Gough y Gough 1970 a, b) y en Hsinfengkiang, China (Wang y otros 1975, 1976). El límite superior, si es real, puede estar relacionado con el área de la falla que ha sido afectada por un gran sismo artificial. Los grandes sismos a los que se asocia como provocados por el llenado de embalses se enumeran en la tabla 4.1, por cortesía de D.W. Simpson, 1975a. En adición a los cuatro sismos cercanos en magnitud se conocen unos doce que están situados en el intervalo $3.5 \leq m \leq 5.0$. Todas esas sacudidas fueron precedidas por otras precursoras, y seguidas por otras muchas réplicas.

No se conocen las dimensiones mínimas de los embalses que pueden inducir sismos y aún menos se puede pronosticar que los que exceden un determinado volumen causarán un terremoto. Rothé (1973) ha observado que la altura de la

Tabla 4.1 Sismicidad inducida por los embalses (según Simpson, 1975a).

Nombre del embalse	País	Altura m	Volumen $\times 10^6$ m ³	Año de embalse	Año del sismo mayor	Magnitud o intensidad ¹
(A) Grandes sismos inducidos						
Kyona	India	103	2780	1964	1967	6.5
Kremasta	Grecia	165	4750	1965	1966	6.3
Hsinfengkiang	China	105	10500	1959	1961	6.1
Kariba	Rodesia	128	160368	1959	1963	5.8
Hoover	U.S.A.	221	36703	1936	1939	5.0
Marathon	Grecia	63	41	1930	1938	5.0?
(B) Pequeños sismos inducidos						
Benmore	N. Zelanda	118	2100	1965	1966	5.0
Monteynard	Francia	155	240	1962	1963	4.9
Kurobe	Japón	186	199	1960	1961	4.9
Bajina-Basta	Yugoslavia	89	340	1964	1967	4.5-5.0
Nurek	URSS	317	10400	1972	1972	4.5
Mangala	Pakistán	116	7250	1967	1970	4.2
Talbingo	Australia	162	921	1971	1972	3.5
Keban	Turquía	207	31000	1973	1974	3.5
Vajont	Italia	261	61	1963		
Pieve de Cadore	Italia	112	68	1949	1951	
Grandval	Francia	88	292	1959		V
Canalles	España	150	678	1960	1962	V
(C) Cambios en la actividad de microtemblores						
Grancarevo	Yugoslavia	123	1280	1967		1-2
Hendrik Verwoerd	S. África	88	5954	1971	1971	< 2
Schlegeis	Austria	130	129	1971		< 0
(D) Cambios transitorios en la sismicidad						
Oued Podda	Argelia	101	228	1932		
Camarilles	España	44	40	1960	1961	3.5
Piasta	Italia	93	13	1965	1966	VI-VII
Vouglans	Francia	130	605	1968	1971	4.5
Contra	Suiza	220	86	1965	1965	

1. La intensidad se indica en números romanos.

presa parece ser más importante que el volumen total del agua y que la actividad sísmica era más común cerca de los embalses con una altura de presa superior a 100 m. No obstante, se puede observar en la tabla 4.1 que embalses someros han inducido un número considerable de sismos y que muchos de ellos son asísmicos a pesar de que la altura de la presa es superior a 100 m. La tabla 4.1 muestra que seis de los siete embalses que han inducido sismos de $m \geq 5.0$ tienen un volumen de agua $> 10^9$ m³.

Cuando se proyecta la construcción de grandes embalses se deben tomar decisiones en lo que respecta a su concepción, a la vigilancia de la posible actividad sísmica y a las mediciones del esfuerzo inicial. Para tales proyectos se puede calificar de «gran embalse» (en el sentido de que puede inducir terremotos), aquél cuya profundidad exceda de 100 m y cuyo volumen sea mayor de 1 km³, aun teniendo en cuenta que la mayor parte de estas grandes presas son asísmicas y que una mínima parte de las menores son sísmicas.

El primer punto queda bien ilustrado en la figura 4.1 (Simpson 1975a). Se indican con rectángulos 31 de los embalses mayores, con volúmenes comprendidos entre 10 y 180 km³ y profundidades de más de 100 metros; el largo de los rectángulos representa el volumen del agua, y el ancho, la altura máxima de las presas. De los cinco embalses gigantescos que se muestran en la parte superior, sólo uno de ellos (Kariba) ha inducido sismos; de los veintiséis «grandes» embalses, cuatro han inducido sismos. Las presas de Koyna y Kremasta, que han producido los más grandes movimientos sísmicos relacionados con embalses, son muy pequeñas para que se les pueda incluir en la figura 4.1 y el de Hsinfengkiang está cerca del límite inferior, tanto en altura como en volumen de agua (tabla 4.1). Hay, evidentemente, un factor diferente de las dimensiones del embalse que tiene gran importancia en la determinación de los procesos de sismicidad inducida por los embalses. Cuando se examinen otras evidencias se sugerirá que este factor es el esfuerzo inicial, de origen tectónico, ejercido en la parte superior de la corteza, cerca del embalse, con relación a la resistencia de las fracturas ya existentes.

De los treinta y un embalses mayores, mencionados en la figura 4.1, cinco han inducido terremotos. Entre los de altura de presa superior a 100 m y volumen de agua superior a 10 km³, la probabilidad de que un embalse provoque sismos de magnitud ≥ 2 es por lo tanto de un 17 %. Simpson (1975a) informa de que existen más de 275 embalses con alturas de presas superiores a 100 m. En la tabla 4.1 se enumeran 20 embalses con alturas de presa mayores de 100 m. Para las series de embalses con alturas superiores a 100 m, en los que se incluyen algunos con volúmenes de agua menores a 1 km³, la probabilidad de que provoquen sismos es de 7 %, o quizá mayor, puesto que los microtemblores no han podido ser detectados en algunos embalses existentes. Se puede tomar como una guía aproximada, que los sismos inducidos ocurrirán en un 10 % de los embalses que sobrepasen una altura de presa de 100 m y de 1 km³ de volumen de agua. En la hipótesis arriba mencionada el esfuerzo inicial es casi igual a la resistencia de las fracturas en uno de cada diez emplazamientos. Es indudable que en muchos casos, la sismicidad inducida de bajo nivel ha quedado sin observarse, debido a la falta de sismógrafos en las cercanías del embalse. De acuerdo con Simpson (1975a) la vigilancia sísmica de diez grandes embalses confirmó que se había producido un aumento significativo en la sismicidad. Uno de ellos (Oroville, EE.UU.) fue asiento de una considerable actividad sísmica, casi al mismo tiempo de que apareciera el trabajo de ese autor (1975).

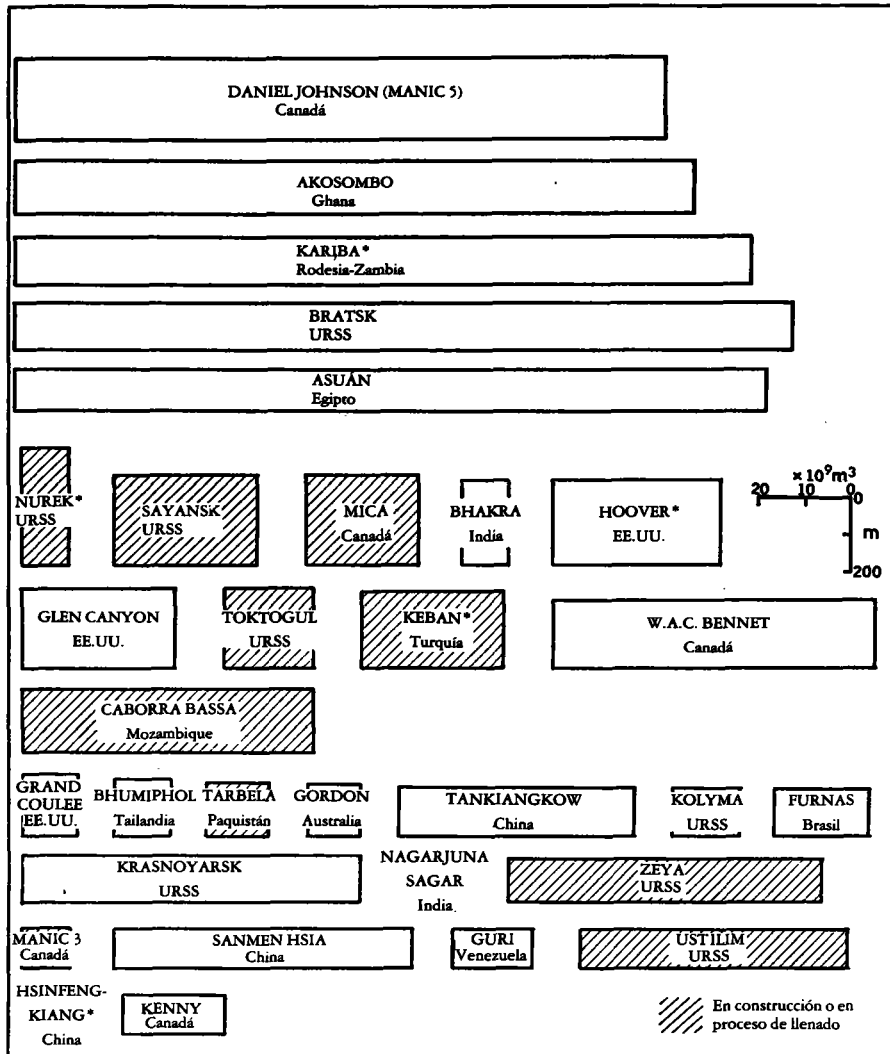


Figura 4.1. Estadísticas de los embalses más grandes del mundo, según Simpson (1975a). El largo de cada rectángulo representa el volumen de agua y la altura, la máxima profundidad del agua en la cara de la presa, de acuerdo con las escalas indicadas. Los embalses marcados con un asterisco (*) tienen un incremento asociado de sismicidad durante o después del embalsado. Los embalses que se reseñan tienen una profundidad máxima > 100 m y un volumen de agua > 10 km³.

Las posiciones (con una altura máxima en metros) de los otros nueve, han sido dadas por Simpson como sigue: Bhakra, India (226 m); Glen Canyon, EE.UU. (216 m); Daniel Johnson, Canadá (214 m); W.A.C. Bennett, Canadá (183 m); Flaming George, EE.UU. (153 m); Serre-Ponçon, Francia (129 m); Bratsk, URSS (125 m); Nagarjuna Sagar, India (124 m) y Asuán, Egipto (111 m).

Es evidente que el tiempo comprendido entre el relleno de un embalse y cualquier actividad sísmica inducida es de vital importancia para tratar de comprender los procesos mediante los cuales aumenta la actividad sísmica y esta dependencia con respecto al tiempo parece ser muy variada entre unos y otros embalses. Un tipo extremo de comportamiento fue el del caso de Kremasta, que fue llenado en unos cuantos meses y provocó movimientos premonitorios cuando todavía estaba subiendo el nivel de las aguas. La sacudida principal ($m = 6.3$) se registró cuando el nivel del agua alcanzaba su máximo; esta sacudida fue seguida de réplicas que declinaron después de unos cuantos meses. El otro caso extremo, el de Koyna, soportó cinco ciclos anuales de fluctuación del nivel de agua antes de que se produjera la sacudida principal, poco después del sexto llenado máximo —más de 5 años después de la puesta en funcionamiento.

Casi todos los autores han comparado la sismicidad (expresada en términos de eventos sísmicos por unidad de tiempo) con el nivel del embalse. La única ventaja de considerar el nivel del agua como medida de la sismicidad inducida, es que se lo puede medir y registrar de manera sencilla. Gough y Gough (1970 a, b) sugirieron que se podía usar como medida el volumen de roca en el cual el esfuerzo de cizalla superaba un valor preestablecido, ya que era más adecuado para compararlo con la sismicidad. Su propósito fue examinar el posible efecto del esfuerzo incrementado debido al peso de la masa de agua (efecto de carga). El «volumen de esfuerzo aumentado», que así se definió, crece de manera pronunciada con el nivel de agua del embalse y muestra una dependencia no lineal marcada con la altura de la presa de agua (fig. 4, de Gough y Gough, 1970 b). Naturalmente, la razón era la de que el fondo del embalse tenía una pendiente pequeña y variable, de manera que la laguna artificial aumentaba rápidamente su área cuando subía el nivel. Como este caso es muchas veces probable, el parámetro de interés es el volumen de roca, donde aumenta la presión intersticial encima de un cierto valor; se debe esperar que a medida que sube el nivel del agua, este «volumen de presión aumentada» crezca de manera exponencial y no lineal, de forma semejante a como lo hace el «volumen de esfuerzo aumentado». En ningún caso se debe considerar el nivel del agua como una medida adecuada de la sismicidad inducida, aunque sería un parámetro excelente, en el caso de que el embalse tuviera la forma de un tubo vertical de sección transversal constante.

En el caso de Kariba, Gough y Gough (1970a) calcularon el volumen de roca en el cual el máximo esfuerzo incremental de cizalla era de más de 1 bar (10^5 N/m^2). El «volumen sujeto a esfuerzo» definido se dobló cuando la profundidad de la presa aumentó de 121 m a la profundidad de explotación de 128 m; por lo general, el nivel del agua es una medida no lineal del efecto del embalse, ya sea por un aumento del esfuerzo de los sólidos o por la presión del agua en la litosfera. Los diagramas que se han publicado en muchos trabajos y que muestran la variación del nivel del agua y la sismicidad con el tiempo, han descuidado señalar el volumen casi despreciable de litosfera afectado por el embalse hasta que el nivel del mismo se acerca a su máximo. Se ha subrayado este punto porque tiene gran importancia. Puesto que aún no han sido estudiados los campos de esfuerzo cerca de los embalses, como se ha hecho en Kariba (Gough y Gough, 1970a), las variaciones de esos campos en el tiempo no se pueden relacionar con la sismicidad; pero en cada caso se debe

suponer que, cuando se alcanza el nivel máximo del agua en el embalse, hay un crecimiento abrupto del volumen de roca sujeto a esfuerzo. Esto quiere decir que la diferencia de tiempo entre la primera obtención del máximo nivel del agua y la sacudida principal es más significativa que la existente entre el cierre de la presa y dicha sacudida.

El lapso de tiempo, entre el primer nivel máximo del agua y la sacudida principal, para los más grandes embalses que han provocado sismos, se enumera en la tabla 4.2. Los lapsos de tiempo caen en dos categorías. Los de Kremasta (donde la sacudida principal ocurrió tres meses *antes* de que se alcanzara el nivel máximo en el embalse) y Kariba, donde fue menor de un año, y los otros, donde fue del orden de un año o más. En una sección posterior se indicará que las diferencias a corto plazo corresponden a un efecto desencadenante motivado por el aumento del esfuerzo de cizalla en la roca, mientras que las diferencias a largo plazo corresponden a un efecto desencadenante motivado por el aumento de la presión intersticial del agua.

Tabla 4.2. Lapso de tiempo comprendido entre el primer nivel máximo del agua y la sacudida principal

Embalse	Lapso de tiempo (años)	Magnitud del sismo principal
Hsinfengkiang	~1.8	6.1
Koyna	3	6.5
Kariba	0.10	5.8
Hoover	0.8	5.0
Kremasta	-0.26	6.3

4.2.3 *Mecanismos sísmicos*

Se han estudiado los mecanismos sísmicos de algunos de los principales sismos inducidos por embalses, los cuales han sido revisados por Gupta y otros (1972b). Las sacudidas principales en Kariba y Kremasta muestran rupturas de falla normal de buzamiento fuerte. En el principal sismo de Koyna, los diferentes autores dan soluciones diferentes, inclinándose la mayoría por un movimiento de desgarre, probablemente lateral izquierdo. En Hsinfengkiang (Wang y otros, 1975), el mecanismo del principal sismo fue de desgarre lateral izquierdo, en una falla casi vertical con rumbo NNW, con caída de tensión de unos 9 bares. Mecanismos de desgarre semejantes se encontraron en 56 movimientos premonitores y en 46 réplicas, y mecanismos de deslizamiento según el buzamiento se hallaron en 17 premonitorios y en 19 réplicas. En Hsinfengkiang el mecanismo predominante para los premonitorios y las réplicas fue de tipo de desgarre similar al de la sacudida principal.

Por ahora entre los mecanismos conocidos de sismos provocados por los embalses predominan dos tipos de ruptura: las fallas normales y las de desgarre. Un caso de sismo, relacionado con un tipo de falla inversa, sucedió en Nurek (Soboleva y Mamadaliev, 1976).

4.2.4 *Procesos de inducción sísmica por los embalses*

Los esfuerzos originados por el peso de la masa de agua en el embalse son dema-

siado pequeños para provocar fracturas en una roca competente. Quedan dos posibilidades, una de ellas es que el embalse produzca un campo de esfuerzos que cause un esfuerzo de cizalla a través de una fractura preexistente suficiente para dar origen al deslizamiento, esto se denominaría inducción sísmica por acción directa del embalse; la segunda posibilidad es que los esfuerzos iniciales de origen tectónico sobre las fracturas existentes sean suficientes como para producir deslizamiento y que el embalse cause una pequeña perturbación que provoque el deslizamiento sobre la fractura. Un razonamiento simple muestra que los sismos de magnitudes ≥ 5 y probablemente aquellos con $4 < m < 5$, no son inducidos por la acción directa del embalse, de manera que para los grandes sismos sólo parece probable el mecanismo desencadenante de disparo (Gough y Gough, 1970b). Este razonamiento se subraya a continuación.

Un sismo de magnitud m tiene un volumen característico B , dentro del cual ocurre la deformación principal, que se puede derivar de la magnitud m por medio de relaciones tales como:

$$\log_{10} B = 1.47m - 5.42.$$

Por lo tanto, la profundidad mínima para un hipocentro es el radio de la esfera que tiene un volumen B . Las fallas con fuerte buzamiento y muchas otras formas requerirán de un hipocentro más profundo. Para $m = 5$ el hipocentro debería tener por lo menos 1 km de profundidad y para $m = 6$, por lo menos 3 km de profundidad. Una fractura a la profundidad z , está en un campo de esfuerzos que es del orden de los esfuerzos litostáticos, en que el esfuerzo principal es máximo: $\sigma_z = gpz$ actúa verticalmente y $\sigma_y = \sigma_x [\gamma/(1 - \gamma)] \sigma_z$, donde γ es la razón de Poisson.

Una fractura vertical con coeficiente de fricción μ tendrá una resistencia al cizallamiento $\tau_{sm} = \mu gpz\gamma/(1 - \gamma)$ y las fracturas no verticales serán más consistentes que ese valor. Con $\mu = 0.5$ (un valor bajo), $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 0.27$ y $z = 1 \text{ km}$, la resistencia mínima al cizallamiento, para una fractura vertical seca, será de 49 bares. Si un agua de densidad ρ a una presión hidrostática dada, empapa los poros y fracturas de la roca, la resistencia de la falla es reducida por la razón $(\rho - \rho_w)/\rho$ (Hubbert y Rubey, 1959), de manera que la resistencia mínima al cizallamiento para una fractura vertical humedecida, a 1 km de profundidad es de 31 bares. Un embalse de 150 m de profundidad producirá un esfuerzo máximo de cizallamiento cercano a 5 bares, en un volumen de roca y en una posición fijada por las dimensiones horizontales del embalse. El esfuerzo de cizalla debido al peso del embalse es de un orden de magnitud demasiado pequeño para inducir sismos por acción directa. Se requeriría un esfuerzo inicial de decenas de bares para inducir a las fracturas preexistentes a un deslizamiento (rotura).

Los microtemblores de magnitudes superiores a 3 pueden tener hipocentros cercanos a la superficie y podrían ser inducidos por los esfuerzos de carga causados por el embalse, sin una tensión inicial crítica. Sin embargo, asociados con la mayoría de los microtemblores probablemente hay esfuerzos iniciales altos los cuales serían necesarios para producir eventos mayores de una magnitud límite, probablemente más cercana a 4 que a 5. Este razonamiento sugiere que un sismo de magnitud 4 debe tener su hipocentro por lo menos a 340 m de profundidad, donde la resistencia al cizallamiento de una falla vertical humedecida, es cercana a los 10 bares, valor que es aún mayor que el máximo esfuerzo de cizalla producido por los mayores

embalses. Por lo tanto, los sismos de $m \geq 4$ pueden ser inducidos por un embalse, sólo a través de un proceso de desencadenamiento, de disparo.

4.2.5 *Relaciones entre frecuencia y magnitud*

El enjambre de sismos de una determinada región muestra una dependencia lineal de la frecuencia con la magnitud de la forma:

$$\log_{10} N = a - bm,$$

donde N es el número de sismos con magnitudes $\leq m$. Una región fuente de alta resistencia y de esfuerzo variable se caracteriza a menudo por bajos valores de la pendiente b , mientras que una región fuente en la que hay muchas fracturas sometidas a un esfuerzo casi crítico tiene altos valores de b (Mogi, 1967; Scholz, 1968; Berg, 1968). Los movimientos premonitorios que anteceden a los grandes sismos muestran a menudo bajos valores de b (0.3 — 0.6), mientras que las réplicas del mismo terremoto dan valores mucho más elevados (0.7 — 1.2) (Berg, 1968). Los cálculos de b , tanto para los premonitorios como para las réplicas, han sido hechos en Kariba (Gough y Gough, 1970b) y estimaciones similares se han hecho en Kremasta y Koyna por Gupta y otros (1972b) (con las dos estimaciones de Kariba transpuestas). En esos tres casos, el valor de b fue muy alto para los premonitorios y para las réplicas —y aún mucho más alto para los premonitorios que para las réplicas—. Todos los valores son altos incluso para las réplicas de los sismos tectónicos. Esto implica que los tres embalses suscitaron una actividad sísmica, porque las fracturas preexistentes estaban cercanas a deslizarse bajo los esfuerzos iniciales.

4.2.6 *Procesos desencadenantes*

El llenado de un embalse en una cuenca rocosa previamente fracturada y sometida a esfuerzos tectónicos tiene dos efectos. El primero, sin desfase de tiempo, superpone esfuerzos de unos cuantos bares al campo preexistente de esfuerzos iniciales. En el segundo, con un desfase de tiempo que se demuestra ser del orden de 1 a 2 años, hay también un aumento de unos cuantos bares en la presión intersticial en los poros y fracturas de la roca, situada debajo de la cuenca y, posiblemente, en gran parte del área circundante. El embalse puede desencadenar una actividad sísmica cuando en el transcurso del tiempo varían o bien el esfuerzo de los sólidos o bien la presión del agua, que incluye, en algunos casos, una reducción en el aumento del esfuerzo de los sólidos. El que sea uno u otro el proceso desencadenante más probable depende del estilo tectónico del esfuerzo y de la fracturación. En algunos casos se pueden excluir ciertos procesos, luego de que se consideren los mecanismos de la fuente sísmica o la variación de la sismicidad con el tiempo.

Los tres tipos más comunes de fracturación tectónica son: fallas normales o de deslizamiento según el buzamiento (el esfuerzo principal máximo σ_1 , es vertical), fallas de deslizamiento según el rumbo o fallas de desgarre (σ_2 , es vertical) y fallas inversas (σ_3 , es vertical). En relación con cada tipo de falla se pueden considerar las condiciones para que los embalses desencadenen una actividad sísmica. La fractura-

ción debida a una presión hidráulica en un campo tectónico de esfuerzos ha sido examinada por Morgenstern (1962), y sus aplicaciones a los embalses han sido consideradas por Snow (1972), cuyo procedimiento se seguirá aquí en parte.

El criterio de ruptura de Mohr con su envolvente lineal, que corresponde al análisis de fricción de Coulomb (Jaeger y Cook, 1969), ha sido empleada para representar las condiciones de esfuerzo en esos tipos de falla (fig. 4.2), y podrían sustituirse por las envolventes curvadas sin que cambien las conclusiones.

Se supone un campo inicial de esfuerzo de origen tectónico, asociado con cada tipo de falla, el cual está orientado de tal manera como para ocasionar la ruptura, pero que es demasiado débil como para causar un deslizamiento. Los círculos 1 en la figura 4.2 representan los esfuerzos iniciales que caen justo debajo de las líneas de ruptura. Se supone luego que un embalse, de profundidad h y dimensiones lineales grandes en relación con la profundidad de la falla, es instalado en la superficie de la tierra, encima de la falla, en un tiempo $t = 0$. Esto superpone un esfuerzo vertical ρgb , y esfuerzos horizontales $\rho gb \gamma / (1 - \gamma)$, sobre el esfuerzo inicial preexistente, produciendo, en cada caso, los círculos de Mohr 2. Si $\gamma = 0.25$, el aumento sobre los esfuerzos horizontales es $\rho gb/3$. Después de un tiempo de relajamiento, que depende de la porosidad de las rocas (incluidas las fisuras), la presión del fluido aumenta en la falla y disminuye los esfuerzos principales máximo y mínimo σ_1 y σ_3 , ambos en la cantidad ρgb . Esto conduce al desplazamiento del círculo 3 hacia la izquierda del círculo 2, sin cambiar el radio, en ambos casos el desplazamiento está representado por ρgb .

4.2.6.1 Fallas normales o de deslizamiento según el buzamiento

En el campo inicial de esfuerzos, el esfuerzo principal máximo σ_1 es vertical; por lo tanto, el campo de esfuerzo incrementado adicional ρgb a σ_1 y $\rho gb/3$ a σ_3 . El círculo de Mohr se desplaza a la derecha y aumenta su radio en $\rho gb/3$. Si la línea de ruptura tiene una pendiente menor que 30° (el coeficiente de fricción en la falla $\mu < 0.577$), el círculo 2 está más próximo a la línea de ruptura que el círculo 1. Si el círculo 1 ya estaba muy cerca de la línea, es decir, si el esfuerzo inicial estaba cerca de un estado próximo al necesario para producir el desplazamiento, la carga elástica puede provocar un sismo sobre la falla normal de $\mu < 0.577$. En la figura 4.2a, la carga elástica desencadena un sismo sobre una falla, cuya resistencia está representada por la línea inferior. Cuando aumenta la presión del agua, con su tiempo de relajación característico, el círculo de Mohr se desplaza a la izquierda, a la posición final 3, y se producen sismos en cualquiera de las otras fallas cuyas líneas de ruptura yacen entre las dos líneas que se muestran.

Así pues, parece que un embalse puede desencadenar un deslizamiento según el buzamiento en una falla normal, por aumento del campo de esfuerzo de los sólidos si el esfuerzo inicial ya es críticamente próximo al capaz de provocar deslizamiento. En tales casos se pueden desencadenar sismos antes de que aumente la presión del agua de una manera significativa. A medida que aumente la presión del agua, se deslizarán las fallas más consistentes.

Las secuencias de «réplicas» en los enjambres de sismos asociados con los embalses pueden no ser, por lo tanto, réplicas en el sentido de que tengan una relación de causa con la sacudida principal.

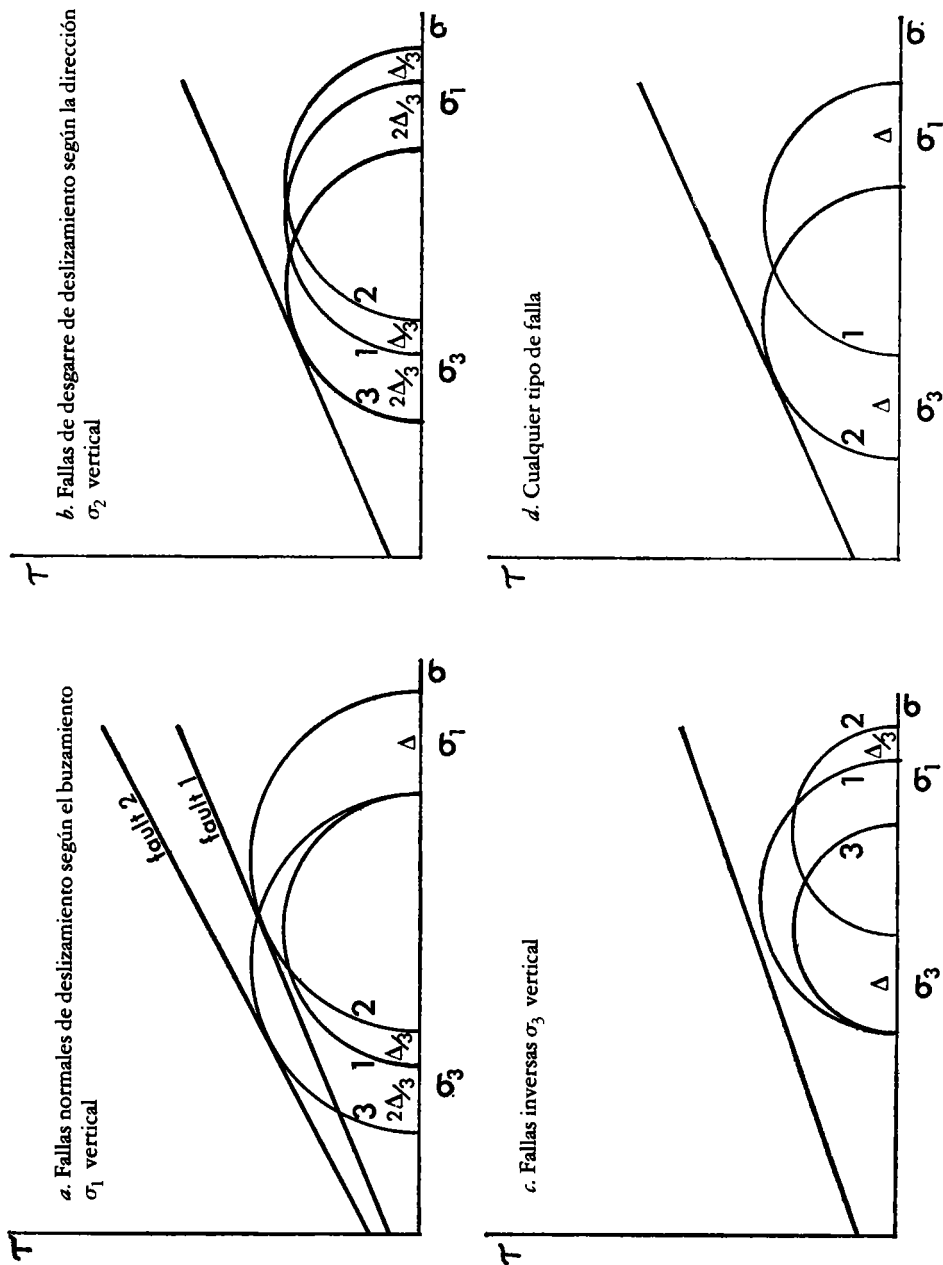


Figura 4.2. Criterio del fallamiento según Mohr para fallas que tienen fricción de Coulomb. *a, b, c*, fallas debajo de un embalse grande, de profundidad b . $\Delta = \rho gb$. En el caso *a*, los sismos son provocados en la falla 1 por un incremento de las tensiones elásticas, en la falla 2 por el posterior aumento de la presión de agua en los poros y en las grietas. Los círculos 1, esfuerzo inicial; los círculos 2, esfuerzo inicial + carga elástica; los círculos 3, esfuerzo (inicial + carga elástica) — incremento de la presión del agua. *d*, esfuerzo inicial (círculo 1) y esfuerzo efectivo (círculo 2) después del aumento de la presión de agua en la roca, causada por la elevación de la capa freática cercana a un embalse o por un incremento en la presión del agua cerca de un pozo de inyección.

4.2.6.2 Fallas de desgarre o de deslizamiento según la dirección

En este caso el esfuerzo σ_2 es vertical. La carga suma el valor ρgb a σ_2 pero esto es irrelevante para causar un deslizamiento de la falla. Los incrementos $\rho gb/3$ se suman a los esfuerzos σ_1 y a σ_3 , de manera que el círculo 2 (fig. 4.2b), igual en radio al círculo 1, se desplaza a la derecha en un valor $\rho gb/3$. Esto origina que la falla esté más estable que bajo el esfuerzo inicial. Cuando aumenta la presión del agua, el círculo de Mohr —todavía con radio inalterado— se desplaza a la izquierda, puesto que σ_1 y σ_3 están disminuidos por el valor ρgb . En la etapa final, el círculo 3 estará a la izquierda del círculo 1, desplazado en una cantidad igual a $2\rho gb/3$. Entre las posiciones 1 y 3, el círculo intersecta la línea de ruptura de falla, en cuyo caso se puede producir un sismo. Este sencillo análisis indica que el deslizamiento en una falla de desgarre no puede ser desencadenado por un aumento en el campo de esfuerzo, pero sí lo puede ser cuando aumenta la presión del agua, lo cual ocurriría posteriormente al llenado del embalse, por el tiempo de relajamiento para la difusión de la presión del agua en la roca.

4.2.6.3 Fallas inversas

En este caso, el aumento de esfuerzo debido al peso del embalse, añade ρgb al esfuerzo principal mínimo σ_3 , que es vertical, pero añade sólo $gb/3$ a σ_1 . El círculo de Mohr se desplaza a la derecha y su radio se encoge en una magnitud $\rho gb/3$. Cuando aumenta la presión del agua, el círculo se desplaza a la izquierda y reduce σ_3 a su valor inicial y, no obstante la diferencia de esfuerzo y el círculo quedan disminuidos en comparación con el esfuerzo inicial. Por lo tanto, el peso del embalse estabiliza la falla inversa, situada debajo, y no se desencadenan sismos cuando bajo el embalse hay mecanismos de falla inversa.

4.2.7 *La región marginal circundante a un embalse*

Según Snow (1972), en zonas de rocas muy porosas o fisuradas, un embalse puede elevar el nivel freático de la región marginal adyacente, tal como lo haría un pozo que alcanzase una capa acuífera más profunda; en muchos casos, el área marginal puede exceder al área del embalse. Por lo general, el aumento del esfuerzo debido a la sobrecarga del agua en la región marginal es pequeño, y el único proceso desencadenante significativo sería la reducción de los esfuerzos efectivos mediante el aumento de la presión del agua. El círculo de Mohr, sin cambiar su radio, se desplaza a la izquierda en una magnitud $\rho gb'$, donde b' es la elevación del nivel freático. Si la línea representativa de la ruptura llega a ser tangente en un punto del círculo que se desplaza, puede ocurrir un sismo por un movimiento de falla de los tipos normal, de desgarre o inversa. Los sismos con mecanismos de falla inversa sólo pueden ser desencadenados en la región marginal.

4.2.8 *Tiempo de relajamiento para la presión del agua*

Para discernir si la causa desencadenante se debe a un aumento del esfuerzo de los

sólidos o a un aumento de la presión del agua en las cavidades rocosas será necesario conocer el orden de magnitud del tiempo de difusión o de la presión del agua añadida hacia el hipocentro sísmico. Ciertos epicentros se encuentran en zonas de embalse y otros, a más de 20 km de distancia, de modo que la distancia desde el fondo de la masa de agua al hipocentro también varía respecto a la profundidad hipocentral en valores de hasta 20 km. Para una distancia de 10 km, Howell (1974) calculó un tiempo de relajamiento para la transmisión de la presión del orden de un año. Withers y Nyland (1976), trabajando sobre suelos teóricos, calcularon uno o más años para una litosfera cristalina de baja permeabilidad. Probablemente, la mejor evidencia de campo sobre el tema es la de los terremotos de Denver (Healy y otros, 1968). Los tres mayores se produjeron a distancias de entre 4 y 5 km del pozo de inyección de fluidos residuales Arsenal de las Montañas Rocosas y al cabo de 14 a 21 meses después de que cesó la inyección. Se considera casi seguro que los grandes sismos se desencadenaron cuando el aumento de presión llegó a sus regiones hipocéntricas, y que el frente de presión tardó un año o más en recorrer 5 km a través de las rocas corticales. El lapso mucho más corto, del orden de 10 días, correspondiente a las primeras sacudidas de Denver, estuvo asociado a hipocentros mucho más cercanos al pozo de inyección. Más adelante se analiza la inducción de sismos por inyección de fluidos.

Hace falta realizar mucho más trabajo teórico y de observación sobre la propagación de frentes de presión en las rocas a través del agua intersticial que ocupa poros y fisuras. La limitada información de la que hoy se dispone sugiere que el frente de presión puede alcanzar una profundidad de unos 10 km bajo un embalse durante un tiempo del orden de un año. A lo largo de zonas de fractura muy importantes, el tiempo de transmisión puede ser mucho menor.

4.2.9 *Procesos desencadenantes en los embalses sísmicos*

Con las indicaciones que da la teoría de Mohr-Coulomb sobre la forma en que ceden las rocas sometidas a esfuerzos, la comparación de datos de los grandes sismos inducidos por embalses arroja algunas conclusiones provisionales relativas a los procesos probables desencadenantes.

En Kremasta (Comminakis y otros, 1968; Gupta y otros, 1972) y en Kariba (Gough y Gough, 1970b) las sacudidas principales se produjeron en un lapso de mucho menos de un año después de que se alcanzara por vez primera el máximo nivel de agua (tabla 4.2). Ello indica un desencadenamiento por aumento de un esfuerzo inicial casi crítico, tal como se propuso en Gough y Gough (1970b) para Kariba. Los mecanismos revelan para ambos casos un fallamiento normal, de deslizamiento según el buzamiento, y éste es precisamente el único tipo para el cual el criterio de Mohr indica que puede ocurrir desencadenamiento de sismos por incremento del esfuerzo de los sólidos. El lago Kariba está situado en un ramal del sistema africano de rift (Gough y Gough, 1970b; de Beer y otros, 1975) en el cual se observa esfuerzo desviatorio tensional perpendicular al eje del rift en mecanismos sísmicos (Fairhead y Girdler, 1971) y en microsismos (Scholz y otros, 1976). Un esfuerzo inicial crítico con σ_1 vertical, es, por tanto, coherente con la tectónica regional. Gough y Gough (1976) han sugerido recientemente que la presión del agua tardó unos tres años en convertirse en agente desencadenante a partir de los

grandes sismos iniciales, y el análisis de Mohr-Coulomb indica que esto probablemente ocurrirá en la mayoría de los casos en que el primer desencadenante es el esfuerzo de los sólidos.

En Koyna y Hsinfengkiang, los sismos principales ocurrieron al cabo de 5 y 1.8 años respectivamente de haberse alcanzado los niveles máximos del agua en el embalse (tabla 4.2). El mecanismo focal fue de desgarre y el análisis de Mohr indica que el aumento de la presión del agua es el único proceso conocido capaz de provocar tales rupturas.

El análisis de Mohr-Coulomb permite formular pronósticos que, por lo general, concuerdan con la actividad sísmica desencadenada por primera vez, en Kariba y Kremasta, por el aumento del esfuerzo de sólidos y que, probablemente, fue seguida en Kariba por causa de la presión del agua; y en Hsinfengkiang y Koyna provocada únicamente por la presión del agua. El análisis de Mohr predice que no se desencadenan sismos bajo embalses emplazados sobre fallas inversas; esos mecanismos de falla inversa fueron determinados en los grandes sismos inducidos en Nurek (Soboleva y Mamadaliyev, 1976), pero los epicentros se localizaron en el área marginal donde sí se pueden desencadenar sismos, como ya se ha visto. Simpson (1976) también ha señalado que los sismos causados por los mecanismos de falla inversa, pueden ocurrir con la rápida caída del nivel piezométrico del embalse.

4.3 Sismos inducidos por la inyección de fluidos

La mayor parte de nuestro conocimiento de la sismicidad inducida por la inyección de fluidos, proviene de dos sismos ocurridos en EE.UU. Estos dos estudios dan luz al problema de la sismicidad inducida por los embalses. Ya se ha mencionado que en los sismos de Denver existía un tiempo de relajación, del orden de un año, para que se pudiera transmitir la mayor presión del fluido, a través de una distancia de unos pocos kilómetros por las rocas de la corteza. Las observaciones hechas en Denver y en Rangely han verificado el principio del esfuerzo efectivo de Hubbert-Rubey. Como este principio es clave para explicar el proceso que provoca, tanto la sismicidad inducida por los embalses, como la provocada por la inyección de fluidos, será apropiado hacer un resumen del estudio de los sismos de Denver y de Rangely.

4.3.1 *Los sismos de Denver*

El pozo de evacuación del Arsenal de las Montañas Rocosas se perforó en las inmediaciones de la ciudad de Denver, con el objeto de evacuar los desechos fluidos residuales. La perforación atravesó unos 3761 m de rocas sedimentarias de la cuenca de Denver (Healy y otros, 1968). La inyección se hizo desde el mes de marzo de 1962 al mes de setiembre de 1963, en las proporciones indicadas en la figura 4.3, y que promediaban unos 2.1×10^7 litros/mes. La inyección cesó durante el periodo comprendido entre octubre de 1963 y agosto de 1964 y fue reanudada, por gravedad, en proporciones promedias de 7.5×10^6 litros/mes, desde setiembre de 1964 a marzo de 1965, y luego se continuó la inyección a un ritmo más fuerte, en la proporción promedio de 1.7×10^7 litros/mes hasta febrero de 1966. Las inyec-

ciones se tuvieron que suspender en vista de que se las asoció con la gran actividad sísmica que se desató en esa zona. Evans (1966), que fue el primero en hacer estas indicaciones después de aprovechar el trabajo de Wang (1965), relativo a la posición de los epicentros de los sismos, señaló la notable correlación que existía entre la velocidad de la inyección del fluido en el pozo y la frecuencia de los sismos (figura 4.3). La lectura de los registros de una densa red de sismógrafos, que se instaló en esa área entre enero y febrero de 1966, permitió localizar muchos epicentros con una precisión de 0.3 km en sentido horizontal y de unos 0.5 km, ya que se conocía la velocidad como una función de la profundidad a través de los perfiles de refracción sísmica. Los epicentros de esos temblores se muestran en la figura 4.3, reproducida del trabajo de Healy y otros (1968). Los epicentros se encuentran localizados en una zona casi lineal que se extiende en una dirección noroeste-sureste con el pozo de evacuación cerca de su centro.

A partir de la sismicidad de la región, Healy y otros (1968) han examinado la probabilidad de una asociación fortuita, casual, tanto en espacio como en tiempo, entre la inyección del fluido y el enjambre de sismos producidos. Los cálculos de esta probabilidad son de 1 a 2.5 millones de veces.

4.3.2 *Dependencias con respecto al tiempo*

La sismicidad de Denver mostró una serie compleja de dependencias con respecto al tiempo. El diagrama de Evans (figura 4.3) muestra una correlación muy ajustada entre la velocidad de inyección y la frecuencia de eventos sísmicos, con un tiempo de desfase del orden de unas pocas semanas después de la inyección. Los epicentros de esos eventos distaban menos de 6 km del pozo (figura 4.3). Cuando cesó la inyección de fluidos, los sismos continuaron, migrando sus focos al noroeste. Los tres sismos más grandes de la secuencia sísmica de Denver, todos ellos con magnitudes ≥ 5 , ocurrieron al cabo de 14, 18 y 21 meses de terminada la inyección. Los epicentros de dos de las sacudidas principales y las envolventes epicentrales de dos enjambres de réplicas, se muestran en la figura 4.3 (según Healy y otros, 1963), donde se evidencia un desplazamiento de la actividad sísmica al noroeste, en relación con las sacudidas anteriores.

También se observó un cambio secular en la relación de frecuencia-magnitud. La pendiente b de la relación lineal

$$\log_{10} N = a + bm$$

varió de -0.90 en 1966 a -0.60 en 1967. Los datos de 1967, no se ajustan a una línea recta, porque los tres eventos mayores fueron próximos a $m = 5$, pero uno de ellos permitiría tal ajuste. Después de que terminó la inyección en 1967 se apreció un aumento desproporcionado de grandes eventos. La explicación que ha sido dada por Healy y otros (1968) comprende tanto la migración de la sismicidad al noroeste, como el aumento de las sacudidas grandes. Si un frente de presión se difunde a través del agua intersticial hacia el exterior del pozo de evacuación y es causante de la sismicidad, sería de esperar una migración de hipocentros, alejándose del pozo. Al mismo tiempo que ocurre este proceso de difusión, el volumen de roca afectado

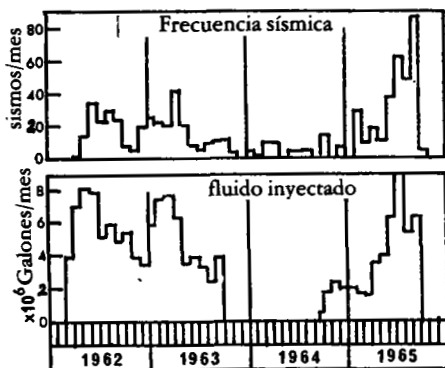
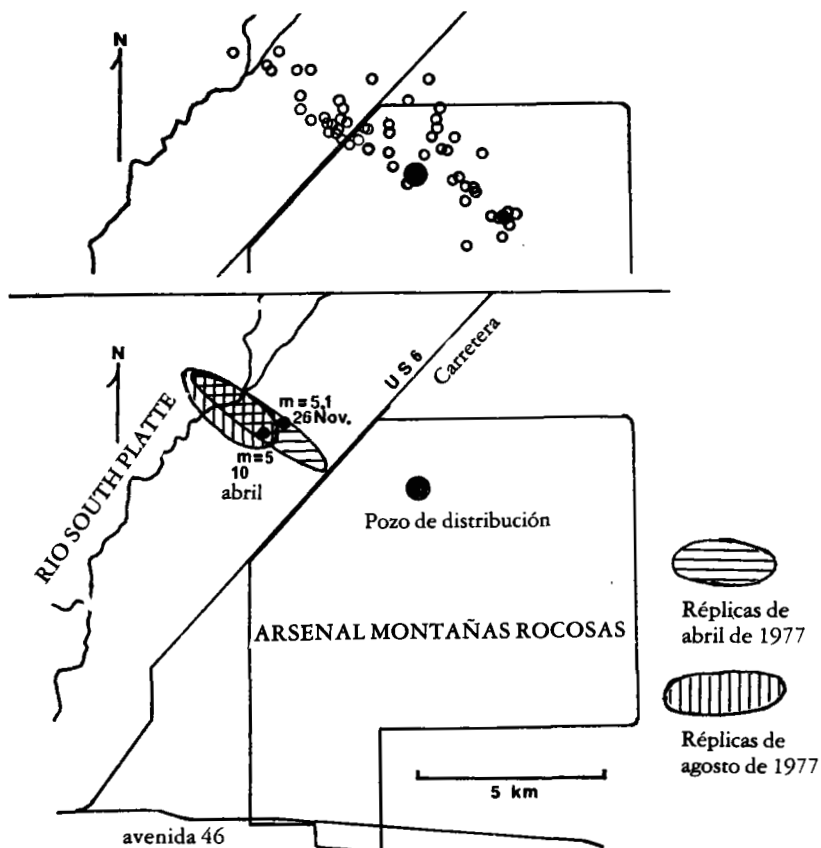


Figura 4.3. Los sismos de Denver, según Healy y otros (1968) y Evans (1966). Los histogramas de la parte inferior muestran las relaciones en tiempo entre la inyección de fluido residual en un pozo de exploración y la sismicidad hasta la finalización de la inyección. El mapa de la parte superior del grabado muestra los epicentros de los sismos que ocurrieron en los dos primeros meses de 1966, en relación con el pozo. El mapa inferior muestra los epicentros de las sacudidas principales de abril y noviembre de 1967 y las envolventes de las zonas de réplica de las sacudidas principales de abril y agosto de 1967. Toda la actividad que se indica en el mapa inferior fue más de un año posterior a la fecha de finalización de la inyección.

por el aumento de la presión del agua crece igualmente y, con tal volumen deformado, aumenta la probabilidad de las grandes sacudidas.

4.3.3 *Mecanismos de los sismos de Denver*

Healy y otros (1968) determinaron las distribuciones de radiación sísmica para 37 eventos, de los cuales 34 mostraban dos planos nodales casi verticales, indicadores de un movimiento de desgarre. Una serie de planos nodales tenía una distribución en acimut que oscilaba en 65° oeste del norte, muy próxima a la tendencia noroeste de la zona epicentral, lo que permitió identificar la dirección dominante del plano de falla, en el cual el movimiento era lateral derecho.

4.3.4 *Los procesos de inducción*

Para la inducción sísmica debida a inyección fluida se necesita un esfuerzo inicial de origen tectónico, casi suficiente como para causar un deslizamiento en las fallas existentes o para fracturar la roca intacta consolidada. Este enunciado resulta del hecho simple de que el aumento de presión del fluido p , en los poros y fisuras de las rocas, no produce esfuerzos de cizalla, y por lo tanto, por sí mismo, no causa un sismo; sin embargo, en presencia de un esfuerzo inicial casi crítico, el aumento de la presión del agua puede precipitar la rotura. Como se ha hecho notar en la discusión de la sismicidad provocada por los embalses, la resistencia a la rotura por cizalla se expresa mediante la relación de Coulomb

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma_n$$

donde τ_0 es la resistencia por cohesión (que es pequeña para una fractura existente), μ , el coeficiente de fricción y σ_n , el esfuerzo normal a través del plano de falla. La misma ecuación se utiliza para la formación de una fractura, donde τ_0 representa ahora la resistencia al cizallamiento de la roca intacta y μ la fricción interna de la roca. La hipótesis de Hubbert-Rubey (1959) exige que, si los poros y fisuras de las rocas están embebidas de agua a una presión p , el esfuerzo normal se convierta en ($\sigma_n - p$), y la resistencia de la rotura (o de la roca intacta) es:

$$\tau = \tau_0 + \mu(\sigma_n - p).$$

Si p aumenta por la inyección del fluido, la resistencia al cizallamiento de la falla (o la roca intacta) se reduce, y se puede producir un sismo si es que la falla (o la roca intacta) estuvo sometida a un esfuerzo de cizallamiento de origen tectónico tal, como para causar la rotura antes de la inyección. Éste es el punto de vista formulado por Healy y otros (1968), que, en apoyo al origen tectónico del campo inicial de esfuerzos, observaron que la relación magnitud-frecuencia (pendiente b), era similar a la de California y que la elongación de la zona epicentral, en una dirección oeste-noroeste, indicaba la presencia de una zona de fracturas verticales en esa dirección, existente ya antes de la inyección del fluido y, por consiguiente, producida en un campo regional de esfuerzo tectónico. Los testigos extraídos de la roca del

basamento antes de la inyección habían mostrado esa clase de fracturación. Si bien parece que los sismos de Denver tuvieron relación con fracturas preexistentes, estas fracturas no son necesarias para que el fenómeno sísmico sea inducido por la inyección de fluidos, ya que a la introducción del fluido se añaden fuertes presiones y éstas pueden fracturar la roca consolidada como en el caso de la fracturación hidráulica.

A este respecto, la inducción por inyección de fluidos difiere de la inducción por embalses, en los que se requiere una fracturación preexistente. El diagrama de ruptura de Mohr-Coulomb para el proceso desencadenante, se presenta en la figura 4.2d. El círculo de Mohr se desplaza a la izquierda una distancia p , que por lo general es mucho mayor que en el caso del embalse; este último puede causar un aumento pequeño y relativamente uniforme de la presión del fluido en un volumen grande de roca; mientras que la inyección en un pozo causa un aumento grande y no uniforme de la presión, que se difunde partiendo de una fuente lineal. El volumen de roca afectado puede ser mucho menor que en el caso de un gran embalse. Por supuesto, que las rocas —y especialmente las fracturadas— son altamente anisótropas y, por lo tanto, no se puede predecir la distribución espacial de la presión así adicionada, ni siquiera después de un tiempo prolongado.

4.3.5 *El experimento de los campos petrolíferos de Rangely*

La explicación de la sismicidad inducida en Denver, dada por Healy y otros (1968) ya resumida, es coherente y, hasta ahora, es la única explicación de este fenómeno; no obstante, no se ha podido comprobar de una manera cuantitativa. En los yacimientos petrolíferos de Rangely, en el noroeste de Colorado, se logró la verificación cuantitativa del fenómeno a través de un experimento controlado de inyección, realizado por el Servicio Geológico de los EE.UU. (Raleigh y otros, 1972, 1976).

La roca almacén de los yacimientos principales de este campo petrolífero es la arenisca Weber, plegada en forma anticlinal cuyo ápice está situado a una profundidad de 1700 m debajo de la superficie. La presión propia del pozo petrolífero fue de 170 bares; disminuyendo después del primer bombeo efectuado entre 1945 y 1957, y, a fin de estimular la productividad de ese campo, se recurrió a la inyección de agua en los pozos petrolíferos periféricos. Las mediciones hechas en 1962 para el control de la presión mostraron que las presiones de los fluidos en las areniscas Weber habían aumentado considerablemente, respecto a la presión original de 170 bares. En 1967, cuando se comenzaron a sentir muchos sismos en la región, en algunos pozos se observaron presiones del orden de 290 bares. Con el fin de estudiar ese fenómeno, se instaló una red de 14 estaciones sismográficas que comenzaron los registros a finales de 1969, y el control de las velocidades de las ondas sísmicas fue tan excelente que permitió localizar, de manera relativa, los hipocentros de los sismos con una exactitud cercana a unos 200 m en distancia horizontal y dentro de unos 400 m en profundidad. La anisotropía de la velocidad condujo a gran incertidumbre en la determinación absoluta de las posiciones. En la figura 4.4 (copiada de Raleigh y otros, 1972) se muestran los epicentros resultantes, que se determinaron en el primer año de operación sismográfica, conjuntamente con las curvas de nivel de la presión del fluido en el fondo de los pozos petrolíferos. Los epicentros caían dentro de un área alargada en la dirección oeste-suroeste, este-nordeste, con el eje mayor alineado con una falla, que había sido cartografiada en un

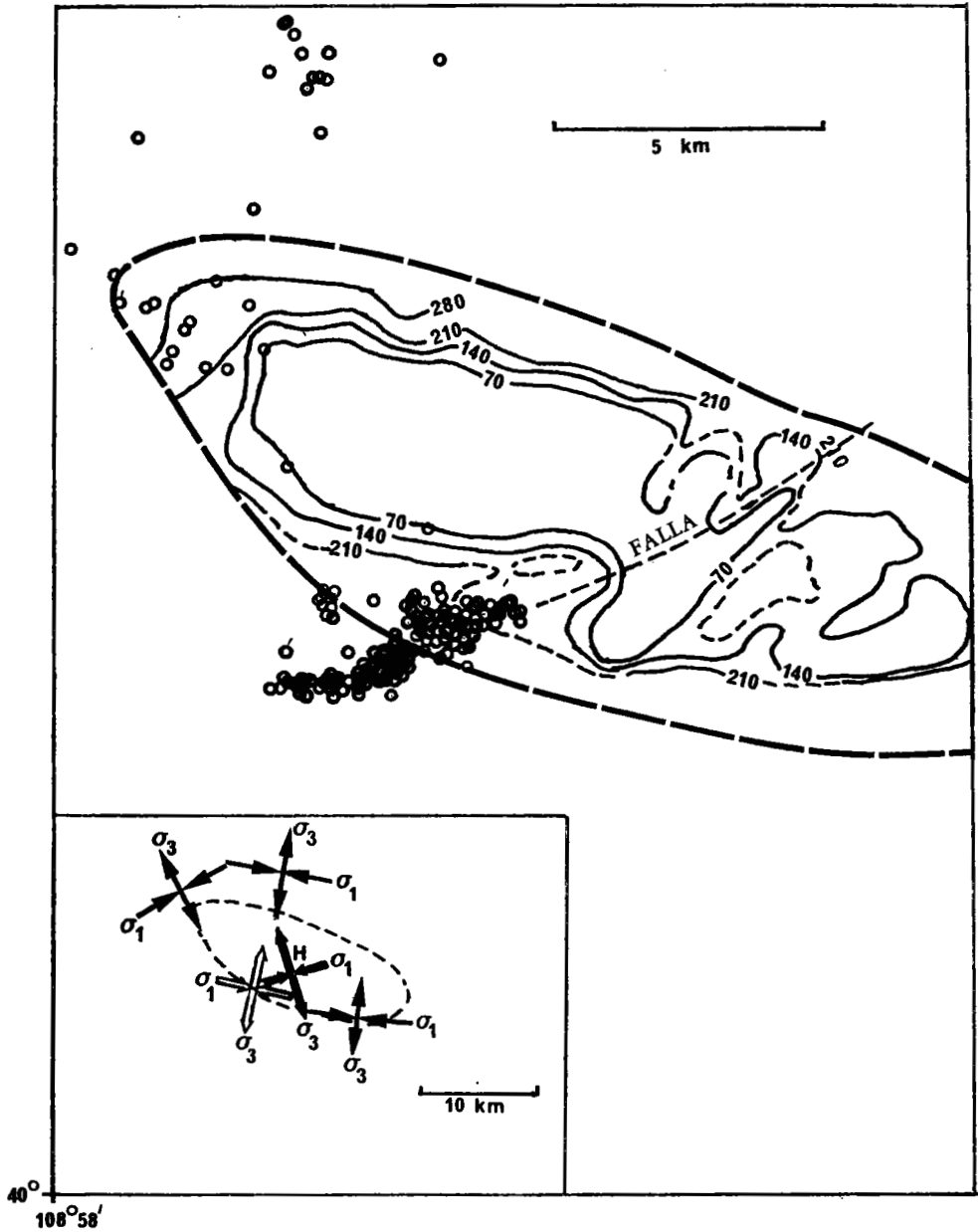


Figura 4.4. El experimento de los campos petrolíferos de Rangely, según Raleigh y otros (1972). Las curvas de distribución del mapa representan la presión del fluido en bares, en la arenisca Weber, tal como era en setiembre de 1969, algunos años después de la inyección del fluido. La falla cartografiada está situada en la parte superior de la arenisca Weber. Los pequeños círculos son epicentros de sismos con $M_L > -0.5$ y fueron determinados durante un año a partir de octubre de 1969.

El mapa intercalado muestra cinco apreciaciones de la dirección de los esfuerzos principales máximos (σ_1) y mínimo. El valor de H se determinó a través de la fracturación hidráulica de las areniscas Weber; el valor marcado por flechas en blanco se dedujo de los mecanismos sísmicos y del plano de falla indicado por la distribución de epicentros. Las otras tres determinaciones provienen de mediciones hechas en afloramientos de las areniscas Mesa Verde, con el método de las rosetas de deformación.

mapa superficial en base a datos de reflexión. El grupo más occidental de eventos tenía profundidades centradas a unos 3.5 km de profundidad, muy por debajo de la arenisca Weber; en el otro grupo los focos oscilaban entre los 2 a 2.5 km de profundidad, algunos de ellos en la formación Weber y otros inmediatamente debajo de ella. Las magnitudes fueron variables entre -0.5 a 3.1 . En los eventos más profundos, situados al suroeste, la pendiente b de la relación magnitud-frecuencia fue de 0.81 y en los eventos más superficiales del noroeste fue de -0.96 . En las soluciones de plano focal de 34 eventos preponderaban los movimientos de desgarre, con una serie de planos nodales que tenían rumbos cercanos a la orientación oeste-suroeste,-este-nordeste de la falla; en este plano nodal el movimiento fue lateral derecho.

Se observó que en los numerosos pozos del campo petrolífero, la presión del agua, dentro del margen de profundidad de los sismos, era una función de la posición y del tiempo: se controló la presión reduciendo el bombeo del agua tanto de entrada como de salida de los pozos, a fin de someter a la región a una presión crítica, P_c , a un estado de desequilibrio provocador de sismos; esto se llegó a realizar en el primer semestre de 1973, después de las observaciones sismológicas apropiadas. En una etapa inicial se empleó la medición del esfuerzo *in situ*, y del coeficiente de fricción estática determinados para las areniscas Weber, para predecir el valor de P_c , de acuerdo con la teoría de Coulomb-Mohr, de la rotura por cizallamiento y del principio de Hubbert-Rubey del esfuerzo efectivo. El valor de P_c encontrado por Raleigh y otros (1972) fue verificado posteriormente al aumentar o disminuir la presión del fluido respecto a ese valor. Se empleó la técnica de la fracturación hidráulica para medir el esfuerzo de las rocas; estas mediciones, a su vez, facilitaron el cálculo de los esfuerzos principales en el fondo del pozo.

Cuando la muestra de fondo indicaba que se había llegado a una roca inalterada, se taponaba la sección del fondo y se elevaba la presión del líquido en esa sección, hasta que la caída súbita de la presión indicaba que había tenido lugar una fractura. La presión P_f de la fractura está relacionada a los esfuerzos principales máximo y mínimo, S_1 y S_3 , por

$$P_f = T + 3S_3 - S_1 - P_0$$

donde T es la resistencia al esfuerzo de tensión de la roca y P_0 es la presión del fluido preexistente de la roca. Los ensayos de laboratorio permiten estimar T y las mediciones directas dan el valor de P_0 . Si después de la fracturación se inyecta agua en la fractura y se cierra la sección terminal del pozo, el cierre de presión proporciona S_3 . Se asumió que la orientación de la fractura era normal a S_3 y para localizarla se utilizó un balón de caucho suave inflable, encontrándose una grieta vertical con un acimut de $N 70^\circ E$, lo que permitió determinar S_1 y S_3 , tanto en dirección como en magnitud. Esas direcciones concuerdan con las encontradas para S_1 y S_3 en las rocas superficiales cercanas, determinadas por el método de la roseta de deformación. Las direcciones se muestran en la figura 4.4 (según Raleigh y otros, 1972). En ese trabajo presenta una amplia información y numerosas referencias.

El ensayo de fractura hidráulica dio los siguientes valores: $S_1 = 552$ bares, $S_3 = 314$ bares. Se supuso que el esfuerzo principal intermedio, paralelo a la fractura y, por lo tanto, vertical, era igual al esfuerzo de sobrecarga a 427 bares.

Raleigh y otros (1972), a partir de la solución dada por los planos nodales de los

sismos cercanos, hallaron la orientación media de la falla y estimaron el esfuerzo normal S_n a través de esos planos en unos 342 bares y el esfuerzo de cizallamiento en 72 bares. A su vez, las mediciones de laboratorio determinaron el coeficiente de fricción estática $\mu = 0.81$. Por lo tanto, según la teoría de Mohr-Coulomb, de resistencia a la ruptura por cizallamiento y la del esfuerzo normal efectivo de Hubbert-Rubey,

$$\tau = (S_n - P_c)\mu,$$

la rotura ocurriría cuando $\tau = 72$ bares, lo que permitió calcular P_c . El valor previsto fue de 257 bares.

En las variaciones controladas de la presión del fluido en el campo petrolífero, se encontró que la presión crítica estaba comprendida dentro de un intervalo de 265 a 275 bares. Como las diversas fallas están situadas en ángulos poco diferentes del campo de esfuerzos, y tienen distintos coeficientes de fricción, no se debe esperar un punto perfecto de corte, pero en el intervalo citado, la frecuencia sísmica en los pozos aumentó desde menos de 1 a 6 por mes. La concordancia que existe con el valor previsto es excelente, si se tienen en cuenta las incertidumbres encontradas en la determinación de los parámetros.

La verificación cuantitativa de la teoría de Mohr-Coulomb con el principio del esfuerzo efectivo de Hubbert-Rubey, da validez a la hipótesis de la sismicidad inducida por el aumento que causan en la presión del agua subterránea los embalses y la inyección de fluidos. Raleigh y otros (1976), han señalado que esta comprobación también tiene importancia para el control de los sismos naturales, por lo menos en los casos en los que es posible aumentar o disminuir la presión del líquido en la falla activa. Posiblemente, el esfuerzo podría ser liberado disminuyendo, en primer lugar, la presión del líquido de los pozos en dos puntos, A y B, para fortalecer la falla en estos puntos y luego inyectando líquido en estos puntos para provocar el sismo. Este esquema sencillo de liberación de tensiones sucesivas, controladas en las secciones de una falla, fueron propuestas por esos autores.

4.4 Sismos inducidos por la minería

Se ha demostrado que el llenado de embalses o la inyección de fluidos en los pozos, pueden desencadenar una actividad sísmica cuando el campo de esfuerzo regional —que puede desviarse bastante, con respecto a la tensión litostática— se modifica por las pequeñas variaciones que provocan estas operaciones en la resistencia de la roca o en el campo de esfuerzo. En contraste, las excavaciones profundas de la minería producen unos cambios en los campos locales de esfuerzo, como para quebrar las rocas más sólidas, tanto si el esfuerzo inicial era litostático antes de la excavación como si no lo era. En el caso de la sismicidad inducida por la minería, no se requieren ni fracturas preexistentes ni un esfuerzo inicial anormal. Consecuentemente, las labores mineras de profundidad provocan siempre temblores por sí mismas, cuyas características físicas son diferentes a las de los procesos inducidos por embalses y por la inyección de fluidos, que son sólo desencadenantes.

Mientras no se pueda evitar la fracturación de las rocas, ni la sismicidad que

engendra, cabe modificar la forma de la excavación y su ensanche, a fin de disminuir los riesgos a que están sometidos los trabajadores en las minas. Hodgson y Joughin (1967) han señalado que en la región de las minas de oro de Witwatersrand, la sismicidad está relacionada con la velocidad de liberación de la energía a medida que avanza la excavación. Las empresas mineras han adoptado el concepto de liberación de energía, para la planificación de la forma de excavación y sus variaciones en el tiempo, con el fin de minimizar los efectos de los sismos grandes y peligrosos (Cook, 1976). Obert y Duvall (1967) y Osterwald (1970) clasifican los desplomes de las rocas producidos por las excavaciones mineras como: (a) caídas de piedras, que se desprenden de los techos de las minas y que pueden prevenirse mediante pilares y puntales; (b) desplomes, donde las violentas roturas de roca, causadas por los altos esfuerzos, dañan las excavaciones, las masas de roca peligrosas varían desde una fracción de metro cúbico hasta miles de metros cúbicos; (c) explosiones que son usuales en las minas de carbón o de sal, se asemejan a los desplomes excepto que estos últimos no liberan energía del gas atrapado. Los desplomes y las explosiones que provocan temblores, no pueden ser prevenidos con puntales. Los más grandes desplomes que se conocen se produjeron en las minas de oro de Witwatersrand, con magnitud $m = 5$.

La excavación modifica los esfuerzos a distancias que son del orden de las dimensiones de la excavación. La distribución espacial de los esfuerzos inducidos depende, a su vez, de la forma de la excavación. Cuando el yacimiento metalífero está ubicado en una capa delgada —no necesariamente horizontal— paralela a los antiguos planos de estratificación de la roca encajante, la explotación económica se realiza extrayendo esa capa fina, produciendo una cavidad cuyo espesor es pequeño en comparación con sus otras dimensiones, lo que se conoce como un tajo. En las minas de oro de Witwatersrand un tajo típico a frente largo medía 1 m, entre el techo y el piso de la caja, y con dimensiones del orden de 1 km a lo largo del plano de estratificación, y limitado por tajos largos de 1 m de altura y de 1 km de largo, que fueron removidos por perforaciones y voladuras diarias. La distribución del esfuerzo en las proximidades de un tajo horizontal se muestra en la figura 4.5 según Cook (1976). La mitad superior de la figura muestra los esfuerzos totales alrededor de la excavación, que incluían el esfuerzo inicial supuestamente litostático. Esfuerzos totales casi simétricos, que no se indican, están bajo el tajo. La mitad inferior de la figura muestra los esfuerzos inducidos, es decir los esfuerzos totales menos el litostático. El esfuerzo total es el parámetro determinante de la fractura por cizallamiento en la roca sólida. La región sombreada, en la parte superior de la figura, muestra la zona donde se espera una fractura por cizallamiento —lo cual se basa en los parámetros de resistencia encontrados para la cuarcita de Witwatersrand— para un tajo situado a una profundidad de 3 km (representativo de la minería aurífera contemporánea en África del Sur), donde existe una región de fractura casi simétrica, debajo del tajo, que no se muestra en la figura. Como dimensión unitaria se ha tomado la semilongitud del tajo a frente largo, de manera que el volumen de la fractura se extiende unos 30 m encima y debajo del tajo, para una excavación a frente largo de 600 m de longitud. Se relaciona el deslizamiento de los bordes de falla preexistentes a la tensión inducida, que debe esperarse encima del tajo y que está representado, en la región sombreada de la parte inferior, y en la región simétrica que no se muestra en la figura. Ambas regiones sombreadas encierran las mayores diferencias de esfuerzo. Los esfuerzos principales inducidos son iguales en

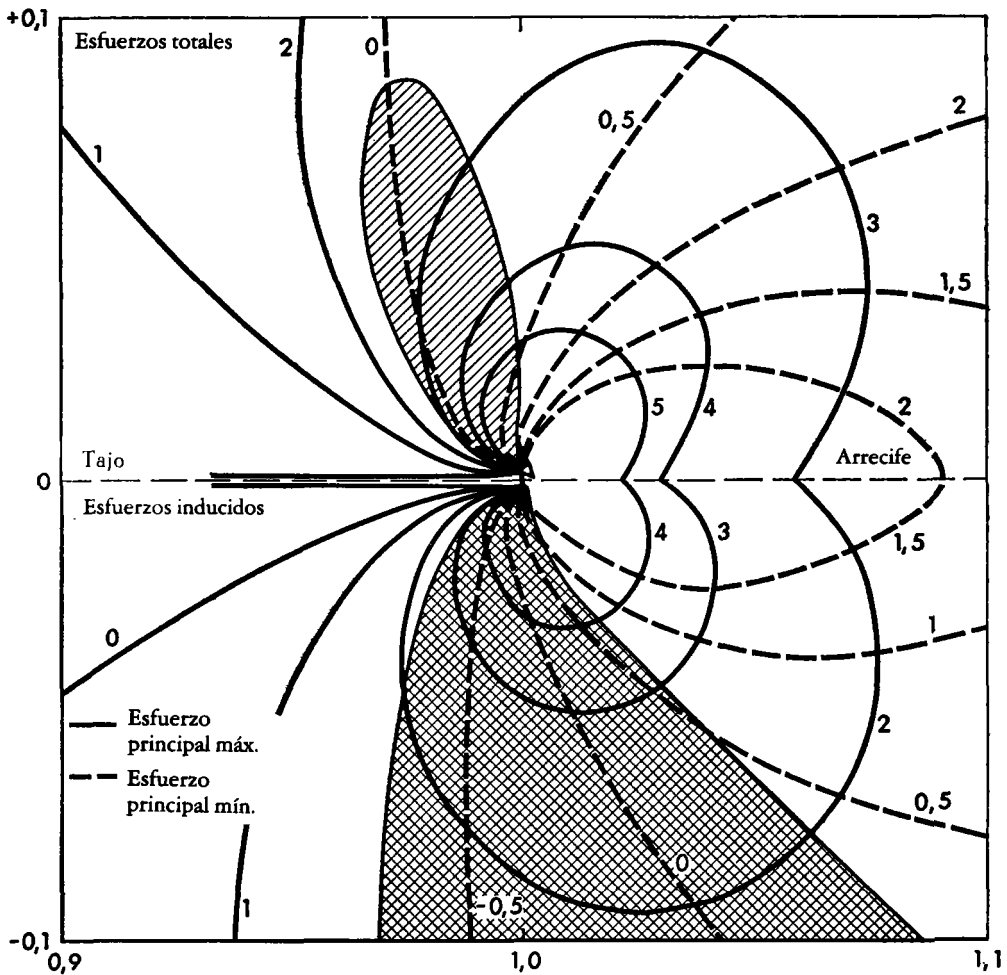


Figura 4.5. Sección de un tajo ideal a frente largo, en las vecindades de la cara de trabajo, que muestra en la mitad superior de la figura los contornos de los esfuerzos principales totales, máximo y mínimo, y en la mitad inferior los esfuerzos inducidos. Las dimensiones están dadas en función de la semiextensión del tajo = 1. El área sombreada, en la parte superior, indica la zona donde existe la posibilidad de que la roca se fracture por cizallamiento a la profundidad de 3 km; el área sombreada a líneas cruzadas, en la parte inferior, indica la zona donde se puede iniciar un deslizamiento en las fallas preexistentes en la dirección apropiada (según Cook, 1976).

el tajo, con excepción de la parte situada más adelante de la cara a tajo largo y en donde son más probables los desplomes. Las casi nulas diferencias de esfuerzo inducido entre el techo y piso de la caja, impiden el deslizamiento y hacen posible las labores mineras. Muchas otras cuestiones de interés se describen en el trabajo de Cook (1976).

Gane y otros (1946, 1953), emplearon una serie de sismógrafos instalados en superficie según una configuración determinada para establecer el origen de los temblores en la región de las minas de oro de Witwatersrand. Recientemente, Cook

(1963), Joughin (1965), McGarr y otros (1975), han usado configuraciones tridimensionales para localizar los focos sísmicos y han obtenido precisiones de ± 5 metros. Las posiciones de los focos encontrados por Cook (1976), en relación con los tajeos hechos con taladros largos, se muestran en la figura 4.6, en donde es evidente la concordancia que existe con la distribución del esfuerzo. Joughin (1965) ha encontrado que las profundidades de los focos se desplazaban de manera sistemática y se aproximaban a unos 60 m por encima del tajo. En las minas que estudió, encontró una capa pizarrosa, delgada, a unos 80 m encima del arrecife, que evidentemente cedería ante la sólida cuarcita situada encima y debajo de esa capa.

Cuando se excava una roca y se la traslada a la superficie, se suma al sistema una energía potencial que es igual al peso de la roca desplazada, multiplicado por la profundidad de la mina; sólo la mitad de esa energía se almacena en forma de energía de deformación elástica (Cook 1963, 1967; Jager y Cook, 1969) y el resto queda liberado al final de la excavación en el campo inicial de esfuerzos. Parte de esta energía final se manifiesta como una energía de radiación sísmica, cuya eficiencia puede ser estimada como la razón de la energía radiada a la energía liberada al final y tiene un valor comprendido entre 1 % (Cook, 1963) y 0.1 % (Hodgson y Cook, 1971).

McGarr y Green (1975), que investigaron el basculamiento de las rocas cerca de los hipocentros de los temblores inducidos por las labores mineras, demostraron que tanto la reptación continua como los cambios escalonados de inclinación podían asociarse con temblores, al encontrar una buena correlación entre la velocidad de cambio de la inclinación y la velocidad de frecuencia de los temblores y sugirieron que la probabilidad de un temblor en un periodo dado de tiempo, podía ser proporcional a la velocidad de cambio de la deformación de la roca. Encontraron que los momentos sísmicos eran, aproximadamente, proporcionales al tamaño de los cambios escalonados de inclinación asociados y que la mayor parte de la deformación de la roca se debía a la acción de las grandes sacudidas. En el caso de los temblores de magnitudes M_L comprendidos entre 0.5 y 2.5, con momentos sísmicos entre 10^{11} y 10^{14} joules, dentro de unos 200 m del inclinómetro, las inclinaciones variaban desde 10^{-7} a casi 10^{-3} radianes y estaban diseminados alrededor de una línea

$$\log_{10} (\text{inclinación}) = -17.3 + 1.0 \log_{10} (\text{momento})$$

McGarr y Green (1975) y Spottiswoode y McGarr (1975), estudiando los análisis de espectros sísmicos, encontraron que las dimensiones de la fuente, para esa gama de magnitudes, se aproximaba a 100-200 m. En el último de esos estudios, la disminución de esfuerzo variaba entre 5 a 50 bares y M_L entre 0 a 2.5, sin mayor cambio en el volumen de la región fuente.

En general, los estudios detallados de esos fenómenos, tanto en las regiones de falla como en las regiones próximas, tienen una gran importancia para la sismología y en especial para la investigación de la sismicidad inducida por la minería, como también para la mecánica de rocas de deformación no lineal y elevada. Es posible hacer en algunos casos, estudios detallados de las fallas después de sus deslizamientos (Spottiswoode, 1975).

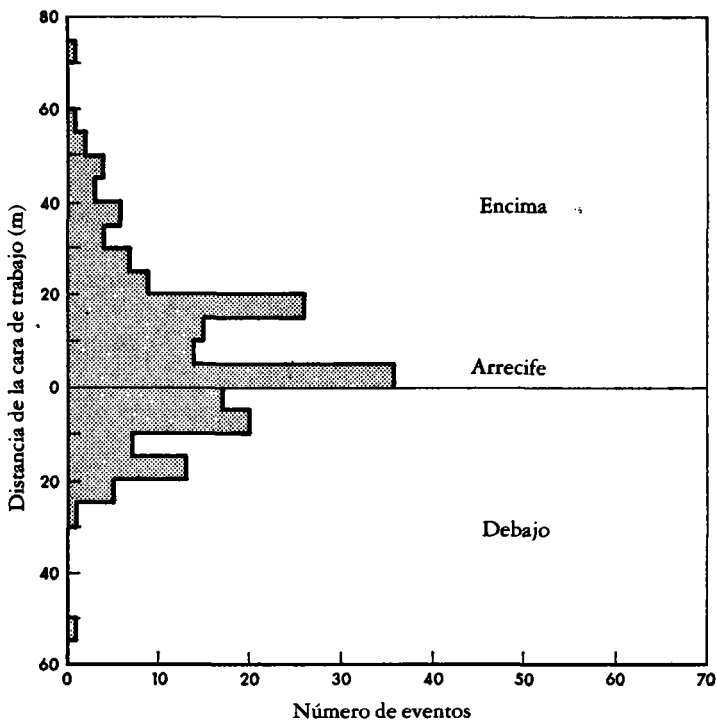
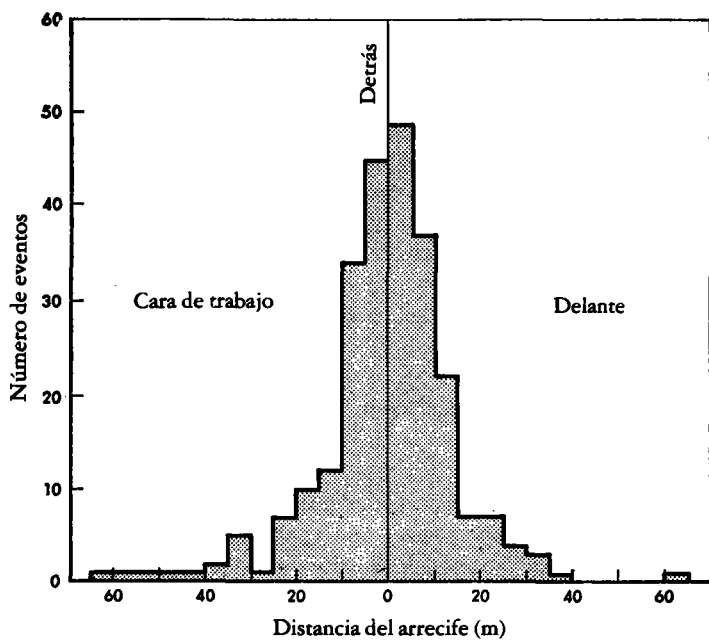


Figura 4.6. Histogramas que muestran (a) el plano de posición de los focos sísmicos relativos a la posición de la cara de trabajo en el momento de la ocurrencia, (b) su elevación relativa al plano del arrecife (según Cook, 1976).

4.5 Casos de interés especial

En adición a los trabajos que ya se han referido, también fueron presentados al Primer Simposio Internacional sobre Sismicidad Inducida (ISIS), celebrado en 1975 en Banff, Alberta (Canadá), tres casos de sismicidad inducida por la extracción de fluido de los campos petrolíferos. En uno de ellos, Lee (1975) trató de los sismos de hundimiento ocurridos hasta 1958 en los yacimientos petrolíferos de Wilmington (California) y que se detuvieron al elevarse la presión de la roca almacén mediante la inyección de agua salada. Esos pequeños sismos, con focos muy superficiales, dañaron los horizontes de los pozos situados entre 200 y 1200 m que estaban constituidos por capas delgadas de pizarra. El estudio, que utilizó un modelo de elementos finitos del campo petrolífero, apoya la hipótesis de que los sismos de este tipo deben satisfacer dos condiciones. La primera, es que ocurra un considerable descenso del terreno, la segunda, que exista una zona débil con posición y profundidad críticas, en la concavidad de hundimiento. Lee propuso que los sismos de hundimiento no son comunes en los campos petrolíferos, ya que ambas condiciones raramente se cumplen. Nason (1975), hizo otros comentarios sobre los sismos de Wilmington y —estando de acuerdo con Lee— presentó otros casos de hundimiento del terreno originados por la extracción de fluidos de los campos petrolíferos. En la mayoría de estos casos, el movimiento de falla es causado por una reptación asísmica. En la falla de Buena Vista, cerca de Taft (California) Nason dio cuenta de un deslizamiento de más de 1 m con una velocidad de 2.8 cm/año. Yerkes y Castle (1975), dieron más detalles de los sismos por hundimiento en el área de Wilmington y agregaron datos relativos a un sismo por hundimiento que ocurrió en 1925 y que originó una ruptura de superficie en el campo petrolífero de Goose Creek (Texas). Estos autores, informaron de otros nueve casos de sismos asociados con la explotación somera en los grandes campos petrolíferos, como también de trece casos de hundimiento asísmico que comportaron ruptura en superficie. Las mediciones de subsuperficie y los estudios de modelos muestran una variedad de mecanismos que incluyen aumento y disminución de la presión intersticial.

Simpson (1975b) se refirió a una secuencia sísmica desencadenada por una disminución de la carga cortical. El sismo principal de magnitud 3.3 ocurrió el 7 de junio de 1974, por lo cual se instaló en el área un conjunto portátil registrador de microtemblores que inscribieron más de 100 réplicas en los días siguientes. Las posiciones de 42 eventos bien registrados mostraron que sus hipocentros estuvieron directamente debajo de una gran cantera, a una profundidad variable entre 0.5 a 1.0 km. En los 25 años anteriores se había extraído un volumen estimado en 7×10^{10} kg de roca, lo que redujo el esfuerzo vertical en 7 bares. Una solución compuesta de planos de falla mostró fallamiento inverso. En tales campos de esfuerzo, el esfuerzo principal mínimo es vertical, por lo que Simpson sugirió que la reducción de éste por descarga, podía provocar sismos. En función de la teoría de Mohr de ruptura, el círculo se desplaza a la izquierda y aumenta su radio en $\Delta\sigma_3/3$.

La extracción de salmueras por minería hidráulica, con inyección de agua a una presión de 120 bares, determinó un súbito aumento de sismicidad en la falla Clarendon-Linden, al oeste del estado de Nueva York. Fletcher y otros (1975) observaron que la hidrofracturación e inyección a 120 bares no produjeron sismicidad en otros tres pozos. La extracción de salmuera en el pozo más cercano a la falla

—50 metros— provocó los signos. Fletcher y otros (1975) infirieron que la actividad de la falla Clarendon-Linden se debió al aumento de la presión del fluido e indicaron un mecanismo superficial de falla inversa. La actividad cesó prácticamente al cabo de 48 horas de haber finalizado la inyección.

Bufe (1975) dio a conocer un posible caso de asismicidad inducida por los embalses. Existe un vacío sísmico, persistente en unos 10 km de longitud en la distribución continua de los epicentros a lo largo de la falla de Calaveras (California); este vacío está próximo al embalse Leroy-Anderson, que no es muy grande. En 1973 ocurrió en ese vacío un sismo de $m = 4.7$, pero sin las réplicas características que son comunes en cualquier otra parte de la California central. El puente situado a un extremo del embalse quedó muy deformado, aparentemente por una reptación en la falla de Calaveras. Bufo indicó que el aumento de la presión intersticial, cerca del embalse, motivó un deslizamiento estable en el vacío de sismicidad.

4.6 Control de los sismos y medidas de precaución

Se debería vigilar la actividad sísmica local, en los emplazamientos de los grandes embalses, un año antes de ser cargados de agua, mientras se cargan y durante varios años después de alcanzado su nivel de explotación. Un año de vigilancia sísmica del llenado, fue insuficiente en los casos de Konya, Hsinfengkiang y Oroville. Un sistema de vigilancia muy conveniente consiste en instalar un sismógrafo de periodo corto, de componente vertical y muy sensible a una distancia comprendida entre 20 y 50km del lugar de la presa y tener por lo menos 6 emplazamientos más preparados, para la instalación inmediata de equipos, en caso de que se presente un aumento inusitado de sismicidad. Lo importante es instalar cuanto antes una red portátil de sismógrafos para que registren el primer evento, que puede ser la sacudida principal y las réplicas, con el fin de determinar la región epicentral y los mecanismos de falla. Muirhead y otros (1973), han presentado las características que debe tener una red sismográfica para la vigilancia de embalses. También se deben tomar medidas semejantes de vigilancia sísmica en cualquier campo petrolífero donde se proyecte emplear la técnica de inyección de fluidos. En este caso, es conveniente utilizar un solo sismógrafo sensible que debe ser instalado algunos meses antes de que comiencen las operaciones de inyección. En caso de que aumente la actividad sísmica habría que instalar una red adecuada de sismógrafos portátiles que deben mantenerse en funcionamiento durante el programa de inyecciones, y uno o dos años más, ya que en el ejemplo de Denver, los mayores sismos tardaron dos años, una vez terminadas las operaciones de inyección. Las sugerencias de Muirhead y otros (1976), relativas a las características de la instrumentación, se aplican a los campos petrolíferos y a otros lugares donde es necesaria la inyección de fluidos.

Aun cuando la vigilancia sísmica en los grandes embalses y en los pozos de inyección es necesaria, no es aún suficiente. En nuestro estado actual de conocimiento, el esfuerzo inicial y el sistema de fracturación que desarrolla tiene una importancia vital para explicar el fenómeno de la sismicidad inducida. Es por esto que el esfuerzo inicial se debe medir en varios puntos, distribuidos en la parte más profunda de los futuros embalses y en los emplazamientos para la inyección de

fluidos. Para este fin puede ser útil la técnica de fracturación hidráulica, tal como se empleó en el experimento de los campos petrolíferos de Rangely (Raleigh y otros, 1972); se podría utilizar el método de la roseta de deformación en el lugar del emplazamiento de la presa y en otros afloramientos rocosos, en las proximidades de las excavaciones mineras o en las canteras. Es evidente que cuando comienza una secuencia sísmica ya es tarde para tomar precauciones y también tarde para volver a diseñar una represa con mayor tolerancia a los sismos fuertes. Los grandes embalses no pueden desaguarse tan rápidamente como para que se pueda detener la actividad sísmica, y los sismos destructores pueden continuar por mucho tiempo después de terminada la inyección tal como ocurriera en Denver. La medición de los esfuerzos principales no es un ejercicio académico sino que tiene gran importancia práctica para la toma de decisiones. Si en el emplazamiento de un embalse, se encontrara que el campo inicial de esfuerzo tiene componentes horizontales comparables a, o mayores que el esfuerzo vertical de la carga, se tendría que preferir un diseño más resistente a los sismos de la presa. En los campos petrolíferos, los campos de esfuerzo muy diferentes a los litostáticos deben inducir a tomar decisiones para limitar las presiones y la rapidez de las inyecciones. Se presupone que la vigilancia de la presión del fluido en el embalse es de naturaleza rutinaria. Como se señaló en el estudio de Rangely (Raleigh y otros 1972, 1976), se debería comparar la presión de inyección con las presiones originales del fluido. Como práctica normal se deben cartografiar las principales fallas que pasan por la represa de agua y por los emplazamientos de los pozos de inyección.

Los estudios de los sismos inducidos, a partir del modelo de Rangely, prometen ser un instrumento muy útil para la solución del problema general de controlar los sismos naturales (Raleigh y otros, 1976). Por consiguiente, la medición de esfuerzos en los lugares de inyección tiene aplicaciones mucho más amplias que la mera seguridad del área de inyección y, como tal, merece la atención de los gobiernos, cuando las poblaciones estén situadas en zonas de alto riesgo sísmico.

Reconocimientos

El autor desea expresar su agradecimiento a los Dres. D.W. Simpson y N.G.W. Cook por permitirle usar extensamente el material de sus trabajos de análisis presentados en el Primer Simposio Internacional sobre Sismicidad Inducida, antes de ser publicados en las transacciones del ISIS. en *Engineering Geology*. También está muy reconocido a la Sra. W.I. Gough y al Dr. Simpson por sus sugerencias y críticas constructivas.

4.7 Referencias

- BERG, E. 1968. Relation between earthquake foreshocks, stress and mainshocks. *Nature*, vol. 219, p. 1141-1143.
- BUFE, C. G. 1975. The Anderson Reservoir seismic gap—induced aseismicity?, Abstract, presented at International Symposium on Induced Seismicity, Banff, Alberta, Canada.
- COMMINKIS, P.; DRAKOPOULOS, J.; MOUMOULIDIS, G.; PAPAACHOS, B. 1968. Foreshock sequences

- of the Kremasta earthquake and their relation to the water loading of the Kremasta artificial lake. *Ann. Geofis. (Roma)*, vol. 21, p. 39–71.
- COOK, N. G. W. 1963. The seismic location of rockbursts. *Proc. 5th Rock Mechanics Symposium*, Oxford, Pergamon Press, p. 493–516.
- . 1967. The design of underground excavations. *Proc. 8th Symposium on Rock Mechanics*, University of Minnesota, in: *Failure and Breakage of Rocks*, C. Fairhurst (ed.) p. 167–193.
- . 1976. Seismicity associated with mining, *Engineering Geology*, vol. 10, p. 99–122.
- DE BEER, J. H.; GOUGH, D. I.; VAN ZIJL, J. S. V. 1975. An electrical conductivity anomaly and rifting in southern Africa. *Nature*, vol. 225, p. 678–680.
- EVANS, D. 1966. *Mountain Geologist*, vol. 3, p. 23.
- FAIRHEAD, J. D.; GIRDLER, R. W. 1971. The Seismicity of Africa. *Geophys. Jl. Roy. Astron. Soc.*, vol. 24, p. 271–301.
- FLETCHER, J. B.; SYKES, L. R.; SBAR, M. L. 1975. Seismic activity associated with the Clarendon–Linden fault system and hydraulic mining in western New York State. Abstract, presented
- GOUGH, D. I.; GOUGH, W. I. 1970a. Stress and deflection in the lithosphere near Lake Kariba—I. *Geophys. Jl. Roy. Astron. Soc.*, vol. 21, p. 65–78.
- ; —. 1970b. Load-induced earthquakes at Lake Kariba—II. *Geophys. Jl. Roy. Astron. Soc.*, vol. 21, p. 79–101.
- ; —. 1976. Time dependence and trigger mechanisms for the Kariba earthquakes. *Engineering Geology*, vol. 10, p. 211–218.
- GUPTA, H. K.; RASTOGI, B. K.; NARAIN, H. 1972a. Common features of the reservoir-associated seismic activities. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 62, p. 481–492.
- ; —; —. 1972b. Some discriminatory characteristics of earthquakes near the Kariba, Kremasta and Koyna artificial lakes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 62, p. 493–507.
- ; —. 1976. *Dams and Earthquakes*, 229 pp., Amsterdam, Elsevier.
- HEALY, J. H.; RUBEY, W. W.; GRIGGS, D. T.; RALEIGH, C. B. 1968. The Denver earthquakes. *Science*, vol. 161, p. 1301–1310.
- HODGSON, K.; COOK, N. G. W. 1971. The mechanism, energy content and radiation efficiency of seismic waves generated by rockbursts in deep-level mining. In: D. A. Howells *et al.* (eds.), *Dynamic Waves in Civil Engineering*, p. 121–135. New York, Wiley-Interscience.
- ; JOUGHIN, N. C. 1967. The relationship between energy release rate, damage and seismicity in deep mines. *Proc. 8th Symposium on Rock Mechanics*, University of Minnesota, 1966. In: C. Fairhurst (ed.), *Failure and Breakage of Rock*, p. 167–193.
- HOWELLS, D. A. 1974. The time for a significant change of pore pressure. *Engineering Geology*, vol. 8, p. 135–138.
- HUBBERT, M. K.; RUBEY, W. W. 1959. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, vol. 70; p. 115–166.
- JAEGER, J. C.; COOK, N. G. W. 1969. *Fundamentals of Rock Mechanics*, London, Methuen 515 pp.
- JOUGHIN, N. C. 1965. The measurement and analysis of earth motion resulting from underground rock failure. Ph. D. thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg.
- LEE, K. L. 1975. A mechanism for subsidence earthquakes at the Wilmington, California, oil field. Abstract presented at International Symposium on Induced Seismicity, Banff, Alberta, Canada.
- MCGARR, A.; GREEN, R. W. E. 1975. Measurement of tilt in a deep-level gold mine and its relationship to mining and seismicity. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, vol. 43, p. 327–345.
- ; SPOTTISWOODE, S. M.; GAY, N. C. 1975. Relationship of mine tremors to induced stresses and to rock properties in the focal region. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 65, p. 981–993.
- MOGI, K. 1967. Effect of the intermediate principal stress on rock failure. *J. Geophys. Res.*, vol. 72, p. 5117–5131.
- MORGENSTERN, N. 1962. A relation between hydraulic fracture pressures and tectonic stresses. *Geophysica Pura e Applicata*, vol. 52, p. 104–114.
- MUIRHEAD, K. J.; GOUGH, D. I.; ADAMS, R. D. 1973. Seismic surveillance of artificial reservoirs. Annex I to document SC-73/CONF.625/1, Unesco, Paris.
- NARAIN, H.; GUPTA, H. K. 1968. Koyna earthquake. *Nature*, vol. 217, p. 1138–1139.
- NASON, R. 1975. Fault and earthquake activity related to removal of underground fluids. Abstract, presented at International Symposium on Induced Seismicity, Banff, Alberta, Canada.

- OBERT, L.; DUVALL, W. I. 1967. *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*, New York, J. Wiley.
- OSTERWALD, F. W. 1970. Comments on rockbursts, outbursts and earthquake prediction, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 60, p. 2083-2088.
- POMEROY, P. W.; SIMPSON, D. W.; SBAR, M. L. 1976. Earthquakes triggered by surface quarrying —Wappingers Falls, New York sequence of June, 1974. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 66.
- RALEIGH, C. B.; HEALY, J. H.; BREDEHOEFT, J. D. 1972. Faulting and crustal stress at Rangely, Colorado. In: H. C. Heard, I. Y. Borg, N. L. Carter and C. B. Raleigh (eds.), *Flow and Fracture of Rocks*, p. 275-284. Washington, Amer. Geophys. Union (Geophysical monograph 16).
- ; —; —. 1976. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado. *Science*, vol. 191, p. 1230-1237.
- ROTHÉ, J. P. 1970. Séismes artificiels. *Tectonophysics*, vol. 9, p. 215-238.
- . 1973. Summary: geophysical report. *Man-made Lakes: Their Problems and Environmental Effects*, p. 441-454. Washington, Amer. Geophys. Union (Geophysical monograph 17).
- SCHOLZ, C. H. 1968. The frequency-magnitude relation in microfracturing in rocks and its relation to earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 58, p. 399-415.
- ; KOCZYNSKI, T. A.; HUTCHINS, D. G. 1976. Evidence for incipient rifting in southern Africa. *Geophys. Jl. Roy. Astron. Soc.*, vol. 44, p. 135-144.
- SIMPSON, D. W. 1975a. Seismicity associated with reservoir impounding. Preprinted review, International Symposium on Induced Seismicity, Banff, Alberta, Canada.
- . 1975b. Earthquake sequence in southern New York State triggered by crustal unloading. Abstract, presented at International Symposium on Induced Seismicity, Banff, Alberta, Canada.
- . 1976. Seismicity changes associated with reservoir loading. *Engineering Geology*, vol. 10, p. 123-150.
- SNOW, D. T. 1972. Geodynamics of seismic reservoirs, *Proc. Symposium on Flow through Fractured Rock*. Stuttgart, German Society for Soil and Rock Mechanics. (T2-J 1-19).
- SOBOLEVA, O. V.; MAMADALIEV, U. A. 1976. The influence of the Nurek Reservoir on local earthquake activity. *Engineering Geology*, vol. 10, p. 293-305.
- SPOTTISWOODE, S. M. 1975. Fault gouge and seismic efficiency of mine tremors. Abstract, presented at International Symposium on Induced Seismicity, Banff, Alberta, Canada.
- ; MCGARR, A. 1975. Source parameters of tremors in a deep-level gold mine. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 65, p. 93-112.
- WANG, Y. 1965. Thesis, Colorado School of Mines.
- WANG MIAO-YUEH; YANG MAO-YUAN; HU YU-LIANG; LI TZU-CHIANG; CHEN YUN-TAI; CHIN YEN; FENG JUI. 1975. Mechanism of the reservoir impounding earthquakes at Hsinfengkiang and a preliminary endeavour to discuss their cause. Preprinted for International Symposium on Induced Seismicity, Banff, Alberta, Canada.
- ; —; —; —; —; —; —. 1976. Mechanism of the reservoir impounding earthquakes at Hsinfengkiang and a preliminary endeavour to discuss their cause. *Engineering Geology*, vol. 10, p. 331-351.
- WITHERS, R. W.; NYLAND, E. 1976. Theory for the rapid solution of ground subsidence near reservoirs on media layered and porous. *Engineering Geology*, vol. 10, p. 169-185.
- YERKES, R. F.; CASTLE, R. O. 1975. Seismicity and faulting associated with fluid extraction. Abstract, presented at International Symposium on Induced Seismicity, Banff, Alberta, Canada.

5 Tsunamis

Por S.L. SOLOVIEV

5.1 Origen de los tsunamis

Cuando la fuente de un sismo está situada total o parcialmente bajo el océano, el mar u otra gran extensión de agua, existe el peligro de que se produzcan ondas gravitacionales de periodo largo, destructoras en la costa y que se conocen generalmente por el nombre japonés de «tsunamis».

El proceso de generación de tsunamis, al tener lugar, como es el caso, en los fondos marinos, en puntos alejados de las costas y con poca frecuencia, no ha sido observado nunca directamente, ni registrado por instrumentos. Del estudio de los efectos que producen los tsunamis en las costas, del concepto actual de los procesos que tienen lugar en las fuentes sísmicas y de las investigaciones teóricas y de laboratorio sobre las ondas de gravedad de largo periodo, se llega a la conclusión de que el mecanismo principal de generación de tsunamis es un movimiento «tipo pistón» de los fondos marinos.

En el curso de terremotos intensos es posible que se produzcan desplazamientos rápidos ascendentes o descendentes, de extensas zonas de fondo del mar provocadores de los correspondientes desplazamientos de la columna de agua que reposa sobre estas zonas, debido a su escasa compresibilidad. Bajo la influencia de la gravedad, la superficie oceánica, situada por encima de la fuente sísmica, vuelve a su estado de equilibrio después de una y dos oscilaciones, y desde la fuente irradian ondas en direcciones diversas. En estas ondas, las partículas de agua se desplazan a lo largo de elipses muy alargadas en dirección horizontal. En otras palabras, desde la fuente del tsunami se propagan corrientes de vaivén, de un periodo 0,1 — 1 horas, que afectan a todas las capas del agua, desde la superficie hasta el fondo. Cuando un tsunami se aproxima a la costa y va disminuyendo el espesor de la capa de agua, aumenta la altura de las olas y la amplitud del movimiento (y, a la vez, la velocidad de la corriente, alcanzando el máximo cerca de la costa).

La velocidad (v) de la propagación del tsunami en agua profunda viene expresada por la fórmula de Lagrange (fig. 5.1).

$$v = \sqrt{gH}$$

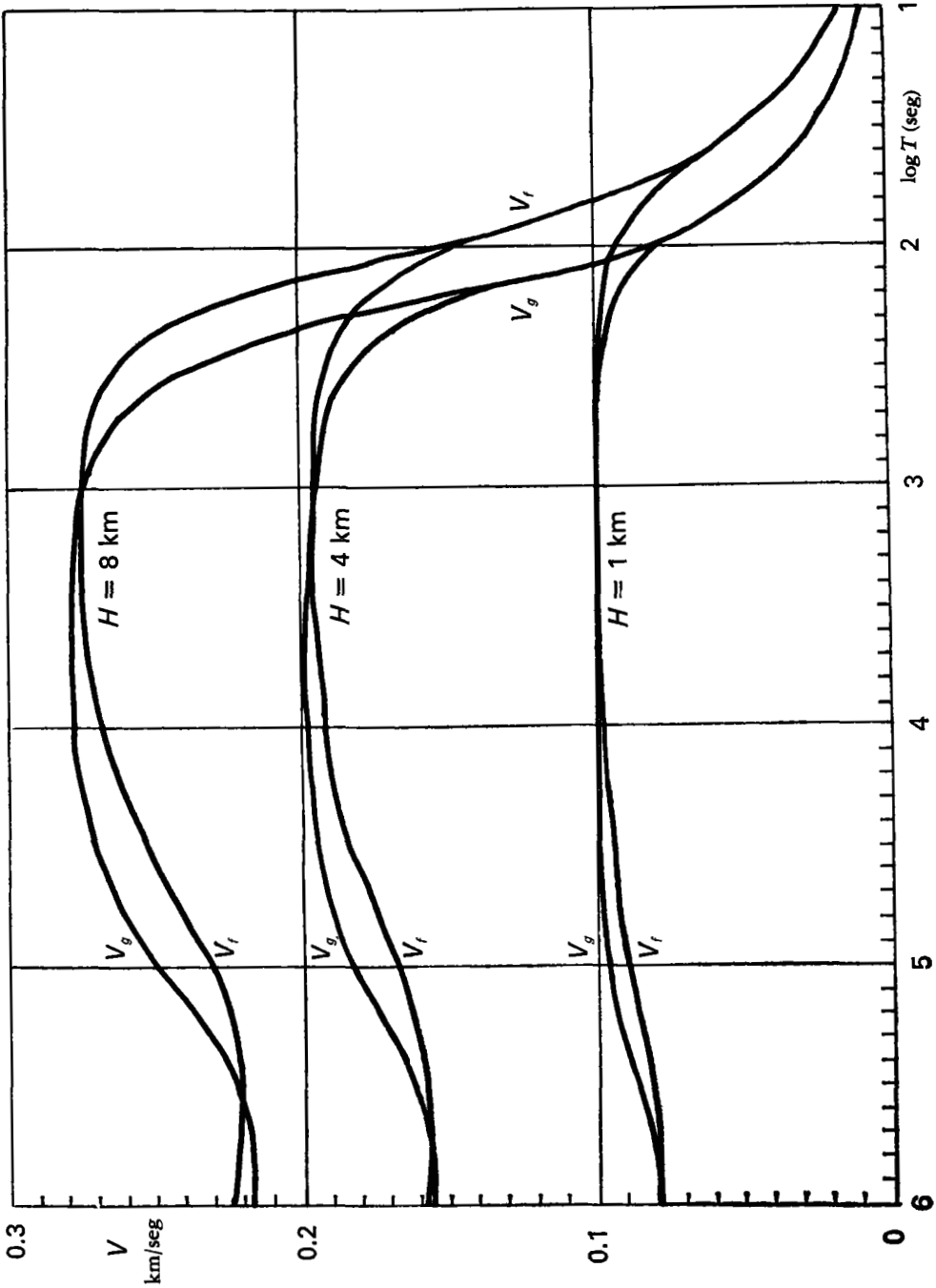


Figura 5.1. Curvas de dispersión de la velocidad de fase (V_f) y de grupo (V_g) de tsunamis según Gussyakov, 1972.

en donde g es la aceleración de la gravedad y H la profundidad de la masa de agua. Esta velocidad es elevada: 280 m/seg cuando $H = 4$ km; 100 m/seg cuando $H = 1$ km, y 45 m/seg cuando $H = 200$ m. El largo periodo (más exactamente casi-periodo) de las ondas quiere decir que son de gran longitud, 200-700 km en alta mar y 50-150 km en la plataforma continental. Es prácticamente imposible detectar o «sentir» los tsunamis en alta mar, debido a su pequeña amplitud (0.1 a 1 m) en comparación con su longitud. Sólo se manifiestan al aproximarse a la costa.

Por lo regular, las instalaciones portuarias se encuentran asentadas en lugares abrigados y convenientes del litoral, sobre todo en bahías, lo que explicaría el término japonés «tsunami» que quiere decir olas en una bahía.

Los principios más importantes de la teoría del «pistón» de la generación de los tsunamis fueron desarrollados principalmente en Japón, por Takahashi (1942, 1945, 1947, 1963 a, b) y por sus colegas Aida (1969, 1970, 1972), Aida y otros (1964), Kajiura (1963, 1970), Kajiura y otros (1968a), Momoi (1964a, b; 1965) y también por otros investigadores: Gazarian (1955); Ichtiye (1958), Kranzer y Keller (1959), Keller (1963). De acuerdo con la teoría, los meros desplazamientos en extensas zonas del fondo oceánico generan olas solitarias que se propagan al exterior de la fuente del tsunami. Los datos disponibles sobre los dos tsunamis más recientes y mejor estudiados (el tsunami de Alaska, el 28 de marzo de 1964, y el de Niigata, el 16 de junio de 1964) confirman la idea de que los citados movimientos de tipo pistón constituyen el principal mecanismo generador de los tsunamis. En ambos casos se habían hecho levantamientos batimétricos de precisión, antes y después del terremoto, lo que permitió apreciar que se habían producido sólo levantamientos de extensas zonas del fondo marino de 3-10 m y de 2-5 m respectivamente.

Sobre la base de ecuaciones no lineales (dejando a un lado el efecto de la dispersión) y por métodos numéricos, se han calculado de manera teórica las alturas de las olas de los tsunamis, las cuales muestran concordancia con los valores observados (Aida, 1969; Hwang y Divoky, 1970; Nekrassov y otros, 1972; Makarov y otros, 1972).

Al mismo tiempo, los mecanismos de generación de los tsunamis son más complicados y variables que los simples desplazamientos sismo-tectónicos de los fondos marinos en sentido vertical. Por ejemplo, la generación de un pequeño tsunami, el 15 de junio de 1911, como resultado de un sismo cuyo hipocentro se hallaba a una profundidad de 160 km, en las islas Ryukyu (Soloviev y Go, 1974), nos induce a pensar que las ondas de los tsunamis también pueden ser generadas por grandes desplazamientos elásticos u oscilaciones de los fondos marinos.

En los últimos años, la teoría de la generación «elástica» de los tsunamis para fuentes puntuales ha sido desarrollada con éxito por los científicos soviéticos Po-dyapolsky (1968, 1970) y Alexeev y Gussyakov (1973).

Cuando se aplican las ecuaciones lineales de la teoría de la elasticidad dinámica a un modelo que consiste en una capa elástica, la cual reposa en un semiespacio elástico (la corteza de la tierra y manto) tomando en cuenta la gravedad, se llega a la conclusión de que los tsunamis son ondas de resonancia en una capa líquida y corresponden a las raíces de la gravedad específica de las ecuaciones de dispersión. Puesto que los casi-periodos del tsunami son del orden de 10^3 seg y sus espectros de frecuencia son de carácter resonante, los detalles de los procesos sísmicos [excepto los que caen en el margen de frecuencia (10^{-4} — 10^{-2} c/s)] no tienen influencia significativa en el tsunami. En las frecuencias sísmicas comunes (10^{-1} c/s), la amplitud máxima de los

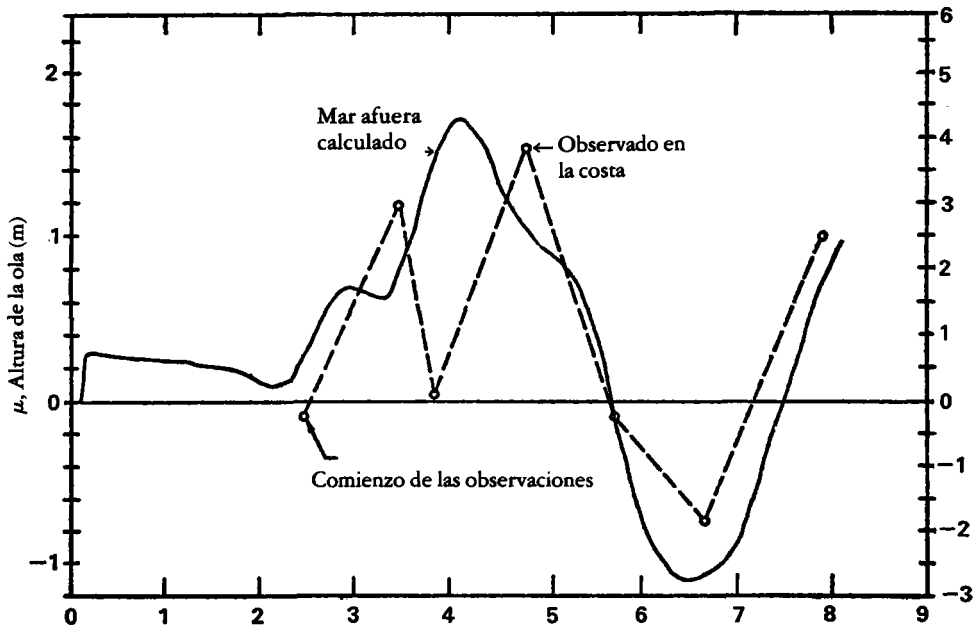
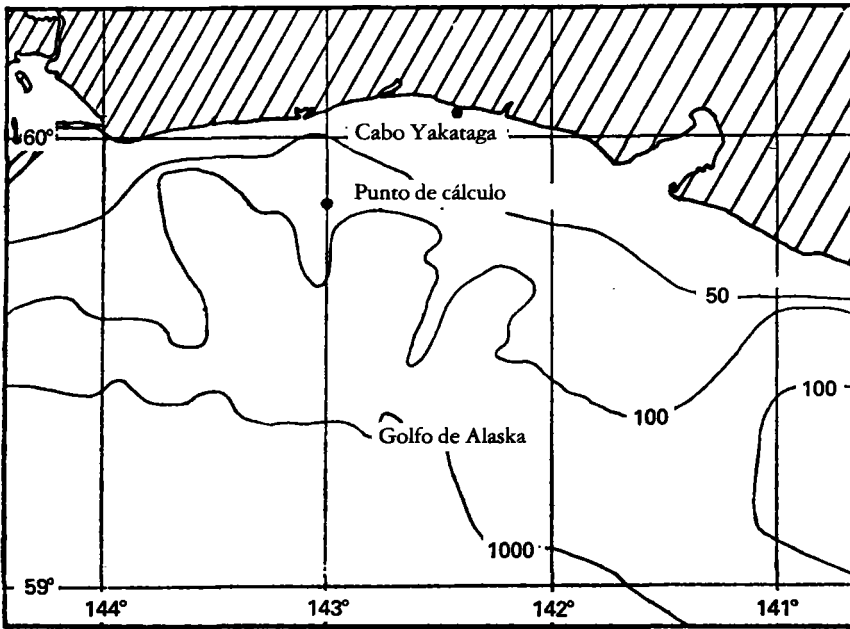


Figura 5.2. Una comparación de las alturas de ola calculadas cerca del cabo Yakataga con observaciones del tsunami de Alaska del 28 de marzo de 1964. Los valores observados son amplificados por efectos locales y la inundación. (Hwang y Divoky, 1970.)

tsunamis generados por los movimientos «elásticos» ocurre en periodos cercanos a los 5 minutos.

Dentro de los límites de esta teoría, será fácil calcular los perfiles de ondas asintóticas para distancias y tiempo grandes. Si la fuente sísmica es superficial, se forma una secuencia de oscilaciones que decrecen gradualmente en periodo y amplitud.

En algunos casos, las observaciones parecen indicar que los tsunamis pueden producirse como consecuencia de un desplazamiento horizontal brusco de taludes submarinos escarpados y extensos o de un fuerte impulso sísmico horizontal transmitido a través de una pared vertical o inclinada. Algunos tsunamis de la costa de América del Sur fueron probablemente generados de esta manera; por ejemplo, el tsunami del 11 de noviembre de 1922 en Chile estuvo asociado con un terremoto cuyo epicentro aparentemente se situó en el continente.

La solución teórica de Podyapolsky ha sido ampliada por Ben-Menahem y Rosenman (1972) y por Yamashita y Sato (1974) para el caso de fuentes sísmicas de gran volumen que incluyen las fuentes que alcanzan el fondo oceánico. En este caso tanto los desplazamientos del fondo marino como los movimientos elásticos y de carácter impulsivo que siguen, han contribuido al conocimiento de la generación de los tsunamis. Por ejemplo, se ha encontrado que la transición de un movimiento de cabalgamiento (ángulo de incidencia de 10°) a una falla inversa verticalizada (80°) dobla la altura de la ola del tsunami. Cuando aumenta la longitud de la fuente, aumenta de manera brusca la directividad de la radiación ortogonal a la fuente. La onda formada en la dirección del movimiento es mayor que la orientada en otras direcciones (Kajiura, 1970).

En la generación de los tsunamis suelen actuar simultáneamente varios mecanismos, ya que los desplazamientos sismo-tectónicos rara vez están orientados precisamente en una dirección vertical u horizontal, y los desplazamientos del fondo oceánico son seguidos siempre por fuertes movimientos y oscilaciones elásticas. Por lo tanto, las características de los tsunamis no están sólo influidas por el mecanismo generador sino también en gran medida por la razón entre el diámetro medio de la fuente (D) y la profundidad del agua.

Estudios teóricos y de laboratorio del caso más sencillo de un embalse ideal de profundidad constante han demostrado que los tsunamis originados por áreas fuente de gran extensión conservan bastante su forma original a distancias muy alejadas del epicentro. La forma de los tsunamis procedentes de fuentes cuyas dimensiones son menores que la profundidad del embalse está casi enteramente determinada por los parámetros de las capas de agua a través de las cuales se propaga la onda. A partir de los cálculos teóricos y del modelo hidráulico (Prins, 1958), se han identificado los siguientes tipos de tsunamis:

- a. Oscilaciones de gran capacidad de dispersión con modulación suave, como es el caso de una fuente puntual.
- b. Oscilaciones de tipo pendular, cuando la longitud de la fuente es comparable a la profundidad del agua; la transmisión de la frecuencia está determinada por el medio de propagación y la frecuencia de modulación depende del tamaño de la fuente (cuanto menor es la fuente, mayor es el periodo de modulación).
- c. Ondas solitarias, complicadas por oscilaciones de periodo corto, especialmente en su cola en el caso de una fuente de gran extensión.

La intensidad de los tsunamis excitada por movimientos impulsivos disminuye más

rápida-mente con la distancia que la intensidad de las ondas excitadas por deformaciones del fondo oceánico.

Finalmente, se debe mencionar un mecanismo especial de generación de tsunamis. Según B. Gutenberg los tsunamis se pueden generar por un desprendimiento submarino o por corrientes de turbidez. El transporte cuesta abajo de grandes masas de sedimentos del fondo por los taludes continentales y cañones submarinos puede ser iniciado por alteraciones de sus características tixotrópicas, causadas por el paso de las ondas sísmicas a través de estos sedimentos. Tal mecanismo que es esencialmente no lineal, puede transmitir eficazmente la energía de las ondas sísmicas de alta frecuencia a través de la gama de baja frecuencia de los movimientos de onda en los fluidos. La energía de las corrientes de turbidez y la de los tsunamis es de una magnitud comparable, de acuerdo con ciertas estimaciones. Sin embargo, no se puede considerar este mecanismo como el generador de los tsunamis, ya que se sabe que todos los tsunamis importantes han estado precedidos por sismos o erupciones volcánicas.

También los modelos experimentales demuestran que sólo el 1-2 % de la energía de un cuerpo en movimiento bajo una cierta pendiente, puede transformarse en una energía ondular de gravedad. En cuanto a los tsunamis poco intensos, que solamente son registrados por vía instrumental, deben ser, tal vez, excitados o por corrientes de turbidez o por desprendimientos del talud continental.

5.2 Propagación de los tsunamis

En la formación de un tsunami cabe distinguir tres etapas:

1. Generación (los procesos que ocurren en la fuente y cerca de ella).
2. Propagación en aguas profundas.
3. Propagación en aguas superficiales y sobre la playa.

Las características del tsunami, en cada etapa, dependen de diferentes factores que por lo común se describen en forma teórica. Al tratar del problema de la propagación de los tsunamis, se puede desprestigiar el efecto que introduce la elasticidad del fondo oceánico y del agua y se considera la propagación como un movimiento potencial de un fluido denso incompresible (Podyapolsky, 1968).

El problema conduce a la solución de la ecuación de Laplace:

$$\Delta\phi = 0$$

donde ϕ es el potencial de velocidad de las partículas, sujeto a condiciones iniciales definidas en unos modelos de generación de los tsunamis y, lo que es más importante, bajo condiciones límite no lineales.

En su forma más general, las condiciones sobre la superficie libre del agua pueden ser expresadas como sigue (Stoker, 1957):

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} \cdot \frac{\partial\zeta}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} \cdot \frac{\partial\zeta}{\partial y} - \frac{\partial\phi}{\partial z} \cdot \frac{\partial\zeta}{\partial t} = 0 \quad (5.1)$$

$$g\zeta + \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\rho}{\zeta} = 0 \quad (5.2)$$

donde ζ es la elevación del agua (la desviación de la superficie libre del estado de equilibrio), z es el eje vertical dirigido hacia arriba, p la presión de superficie, ρ la densidad del fluido, y g la aceleración de la gravedad.

No se conoce en la actualidad ningún método general que permita encontrar las funciones armónicas que satisfagan esas condiciones. Con el fin de tener una solución aproximada se debe simplificar el problema volviéndolo lineal, al suponer que la amplitud de onda es despreciable cuando se la compara con su longitud y con la profundidad del agua (más exacto, el parámetro de Ursell, $\zeta \lambda^2 / H^3 \leq 1$) o que la profundidad de la cuenca sea menor que la longitud de onda. Para el cálculo numérico de la propagación bidimensional del tsunami en cuencas de relieve complicado se ha empleado el siguiente sistema de ecuaciones que representan la propagación de las ondas de pequeña amplitud en aguas someras (Hwang y Divoky, 1970; Aida, 1969, 1970; Bernard, 1975; Soloviev y otros, 1976):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x}; \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y}; \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial(uH)}{\partial x} + \frac{\partial(vH)}{\partial y} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}$$

Donde u y v son las velocidades del agua a lo largo de los ejes x e y . Cuando tratamos de ondas planas o de ondas que se propagan como ondas guiadas, el sistema de ecuaciones, que es más complicado, se puede resolver por el método de las diferencias finitas (fig. 5.3) que parcialmente toma en cuenta los efectos no lineales.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x}; \quad \frac{\partial [u(\zeta + H)]}{\partial x} = -\frac{\partial \zeta}{\partial t}. \quad (5.4)$$

Estudios especiales (Voyt y Sebekin, 1972, 1973), Hammack (1973), Cherkosov (1973) muestran que los tsunamis se pueden representar por los sistemas (5.3) y (5.4), con un error que no sobrepasa el 1 %, siempre que las ondas estén dentro de unos 10^3 km de la fuente y que la profundidad del agua no sea menor de 50 m. A distancias mayores, será necesario tomar en consideración la esfericidad de la tierra y la fuerza de Coriolis. Algunos efectos no lineales, que se acumulan gradualmente en tiempo y en distancia, también pueden percibirse. En aguas someras, la fricción entre el agua en movimiento y el fondo, así como la importancia de la altura de la ola en relación con la profundidad del agua, dan lugar a efectos devastadores.

Es evidente que la elaboración de una teoría general de la propagación de los tsunamis sobre una tierra esférica en rotación es mucho más difícil que en el caso de una cuenca plana sin rotación. Hasta ahora sólo se han analizado algunos aspectos de la fuerza de Coriolis (Voyt y Sebekin, 1973). Se pueden formar en el fondo oceánico y a intervalos algunas ondas fronterizas del tipo Kelvin y Poincaré, que pueden ser en algunos casos las precursoras del tsunami.

Consideremos ahora algunas características generales de la propagación de los tsunamis dejando de lado la correspondiente discusión matemática. Como la velocidad de los tsunamis depende esencialmente de la profundidad del agua, los frentes de onda viran siempre hacia el agua somera. Las dorsales sumergidas de forma isométrica tienden a actuar como lentes amplificadoras, lo que intensifica notable-

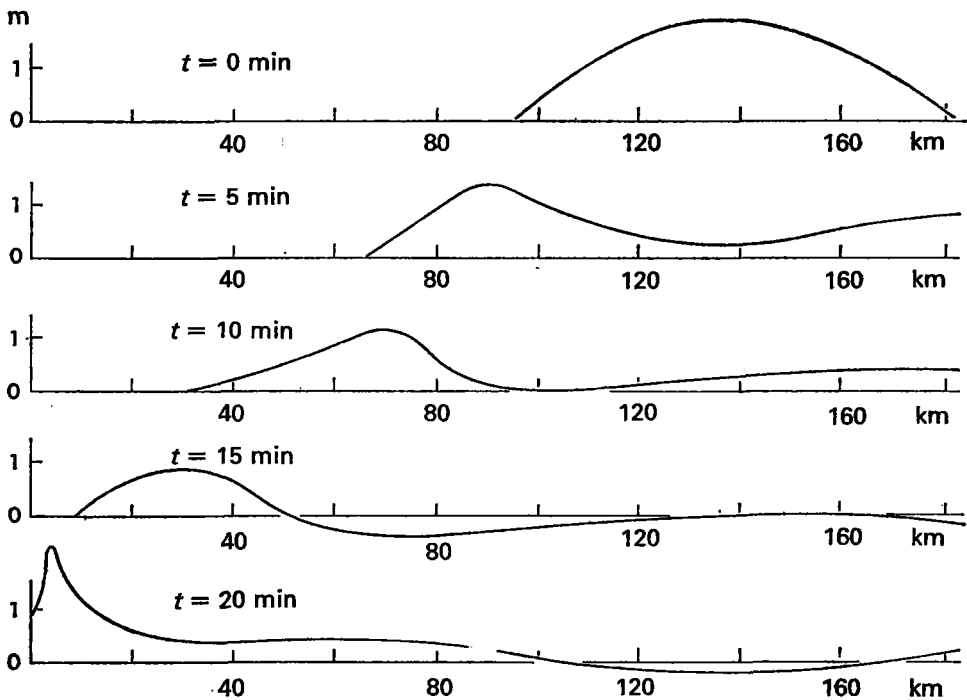


Figura 5.3. Perfiles calculados de propagación de onda simple desde una fosa profunda hasta la isla Urup dentro del tubo del rayo adoptado (Soloviev y otros, 1974).

mente el efecto de los tsunamis (por ejemplo, cerca de Crescent City durante el tsunami de Alaska de 1964 y en la Costa de Corea durante el tsunami de Niigata). En alta mar los torbellinos del tsunami rodean las islas pequeñas sin que se produzca una zona de sombra. En la costa de una isla de forma regular, la distribución de la elevación del agua sigue una curva sinusoidal, con un máximo, tanto en el frente como en la parte de atrás de la isla, y con un mínimo en sus lados. Los tsunamis son reflejados parcialmente por las irregularidades de los fondos oceánicos y principalmente por el talud continental. En este caso se produce una pérdida de energía cercana al 25 %. La energía de los tsunamis es reflejada casi totalmente en las costas escarpadas.

Cuando los tsunamis llegan a la plataforma continental experimentan una refracción considerable; el frente de onda se hace casi paralelo a las isóbatas y, en consecuencia, a la línea de costa. El embate de los tsunamis contra la plataforma continental provoca oscilaciones libres (seiches) del agua sobre la plataforma, alteran considerablemente la forma de los tsunamis, especialmente de sus colas, lo cual aumenta la duración de las oscilaciones. La plataforma continental absorbe y conserva gran cantidad de la energía de los tsunamis. Cuando la fuente de un tsunami se halla situada en la plataforma continental o cuando sus olas proceden de una fuente lejana y no presentan un frente de onda aplanado o cuando se aproximan al borde de la plataforma de un modo no ortogonal (lo cual ocurre la mayoría de las veces), se

generan ondas marginales de carácter interferencial en la plataforma que transportan la principal cantidad de energía a la costa.

Las prominencias submarinas actúan como guías de onda, tanto en alta mar como en la plataforma continental. La energía de los tsunamis, se concentra por encima de ellas. Como es sabido, la intersección de las prominencias con la costa está por lo general representada por cabos o penínsulas rocosas. En las proximidades de estos cabos se observa una mayor elevación del agua. Un ejemplo típico es la costa sur de Japón. Los mareógrafos instalados en los cabos (de Kusimoto, Omae y otros lugares) son más sensibles a los pequeños tsunamis que llegan del sur que los instalados en otros puntos de la costa.

La radiación de la energía del tsunami a partir de la fuente muestra pronunciados efectos acimutales. La mayor parte de fuentes de tsunamis están cerca de las costas del Pacífico. Por lo regular, el máximo de radiación está dirigido hacia la costa o directamente hacia afuera de ella. En este último caso la directividad de la radiación suele ser claramente detectable hacia alta mar.

Muchas veces, la oscilación máxima del nivel del agua que se observa no es la primera sino una de las oscilaciones que siguen. El que la oscilación máxima sea una u otra depende de muchas circunstancias, pero, en general, cuanto mayores son las dimensiones de la fuente del tsunami y la distancia de la fuente al punto de observación, tanto más tardía es en el conjunto de ondas de la serie.

Cuando se presentan algunos obstáculos para la propagación de los tsunamis, por ejemplo, irregularidades de la línea de costa, aumenta la altura de las olas. Además, los tsunamis son ondas de largo periodo y pasan fácilmente a través de tales obstáculos y entran en los golfos o bahías e incluso en otras de forma intrincada.

El comportamiento de los tsunamis en las bahías es variable. Por lo general, en las bahías triangulares o cónicas que se van estrechando, se observa un gran aumento en la amplitud de onda desde la entrada hasta el fondo de la bahía, debido al efecto de embudo por la disminución de su sección transversal, en tanto que en las bahías cerradas que tienen una entrada estrecha disminuye esta amplitud. Sin embargo, esta regla tiene algunas excepciones. Así, en el caso de tsunamis de onda larga y poca intensidad, el ascenso del nivel del agua en bahías triangulares cortas será igual en todas partes. Por el contrario, durante tsunamis de larga duración en bahías cerradas, la resonancia entre los seiches de la bahía y los tsunamis puede provocar oscilaciones sumamente pronunciadas del nivel de las aguas. Se observa una estructura especialmente complicada cuando un tsunami llega a una bahía de forma compleja con un gran número de ramificaciones (Murty y Henry, 1973).

5.3 Daños causados por los tsunamis

Las características de los tsunamis en la zona costera reflejan no sólo la evolución forzada no lineal de las ondas, sino también la disipación de la energía de su movimiento por fricción mecánica con el fondo del mar y la consiguiente turbulencia de ese movimiento.

Los cálculos de los parámetros de los tsunamis en los que se tienen en cuenta estos factores se basan, o bien en un modelo de un campo bidimensional de ondas

sometido a una reflexión total de éstas en la costa o bien en un modelo unidimensional de una corriente hidráulica normal a la línea de costa, comprendida la fase de su movimiento en tierra.

Para un observador que estuviera situado en la costa, el tsunami se le aparecería no como una secuencia visible de ondas sino como una rápida sucesión de crecientes y menguantes (es decir, aumentos y caídas del nivel oceánico como un todo) debido a la gran longitud de onda.

Cerca de la costa, las manifestaciones del tsunami son variadas y dependen de la energía de la onda y de las peculiaridades del relieve costero y pueden variar desde una subida y bajada tranquila y uniforme del nivel del agua hasta la aparición de una inmensa muralla de agua de varios metros o incluso docenas de metros de altura. En este último caso, el tsunami tiene un gran poder destructor y barre cuanto se opone a su paso, y no deja huellas de las construcciones, ni de las instalaciones portuarias preexistentes.

Los efectos destructivos de los tsunamis en tierra firme se deben a los siguientes factores:

1. Efectos hidrostáticos, que provocan el levantamiento y arrastre de algunas estructuras ligeras (tejados, edificios y puentes de madera, etc.).
2. Efectos hidrodinámicos del agua, que causan la destrucción y el desplazamiento de edificios, el arrastre de la tierra vegetal, etc.
3. Los efectos del impacto de los objetos contenidos en las aguas, tanto los que flotan como los que son arrastrados por el fondo.

La amplitud de la zona de inundación (desde la línea de playa hacia el interior) y la relación entre los efectos hidrostáticos e hidrodinámicos dependen de muchas circunstancias: la energía del tsunami, el periodo de las ondas, la distancia desde la fuente del tsunami, la forma de la línea costera, la pendiente del fondo y la pendiente de la costa. No se ha estudiado todavía el problema en conjunto y no se ha propuesto una relación entre los efectos hidrodinámicos e hidrostáticos.

La extensión hacia tierra de la zona inundada depende también de otros factores. La inspección de los daños causados por un tsunami indica que en el momento de la máxima inundación, el nivel de agua puede aumentar o disminuir a partir de la línea de costa y hacia el interior. Es evidente que la anchura de la franja de tierra inundada depende no sólo del relieve cercano de la playa, sino también de los parámetros del tsunami. La tabla 5.1 da varios ejemplos de las relaciones entre la profundidad de la zona de inundación y la anchura de la zona inundada en tsunamis de periodo corto, generados en fuentes puntuales poco extensas.

Tabla 5.1. La anchura de la zona inundada (km) como función geométrica de la pendiente de la playa (γ) y de la profundidad inicial de la ola (b_c) (Ponikarov y Chumakov, 1964).

γ (miles)	b_c (metros)					
	1	5	10	15	20	25
1	1.6	3.8	7.0	12.8	18.2	21.8
5	0.5	1.0	1.6	3.0	4.0	5.0
10	0.3	0.5	0.9	1.5	2.0	2.5
15	0.2	0.4	0.6	1.0	1.4	1.7

El aumento del nivel del agua cuando un tsunami llega a la línea costera está influido en cierto modo por la presencia o ausencia de material inconsolidado del fondo del océano. Según ensayos hechos a pequeña escala, se demuestra que la extensión de la zona inundada puede disminuir de un 20 a un 30 % cuando hay transporte de material no consolidado.

Los flujos de agua ejercen sobre los obstáculos que se les oponen una fuerza que es proporcional al producto de la profundidad del agua y el cuadrado de su velocidad. La presión máxima ejercida sobre un obstáculo está dada por la fórmula (Wiegel, 1970):

$$P_{\text{máx}} = \frac{1}{2} C_D \rho V_c^2 N_F^2$$

donde C_D es un factor que incluye la forma del cuerpo y otros factores, ρ es la densidad del agua, $V_c = 2\sqrt{gb_c}$, donde b_c es la profundidad de la zona de inundación, y $N_F = V_c/\sqrt{gb_c}$ el número de Froude.

Por término medio, los edificios sufren en Japón daños parciales cuando el nivel del agua sube 1 m. Con un nivel de agua de entre 1 y 2 metros, los edificios de madera que no están firmemente anclados a sus cimientos comienzan a flotar. Con nivel de 2 metros o más, la planta baja es arrastrada por el agua y se derrumba el piso superior (Hatori, 1974).

En vista de los daños que han causado los grandes tsunamis en las pasadas décadas, para las zonas expuestas a ese fenómeno, se han dado una serie de recomendaciones relativas a la construcción de viviendas, edificios públicos e instalaciones industriales. Se aconseja que la parte alargada de los edificios se oriente en una dirección perpendicular a la playa, mejor dicho a lo largo de las posibles trayectorias de la onda. Es preferible la construcción de porticados sólidos de cemento armado, bien trabados a los cimientos. Se recomienda construir sobre pilotes, dejando al nivel del terreno espacios abiertos, zonas de estacionamiento de coches, ya que el tsunami anegaría esos espacios sin afectar el armazón del edificio y los pisos superiores.

Es prácticamente imposible proteger completamente la costa de los efectos destructivos de los tsunamis. Sin embargo, los rompeolas, los diques costeros, las plantaciones de árboles y los edificios construidos sobre la costa (por ejemplo, depósitos) debilitan la fuerza de los tsunamis al reducir su altura y la anchura de la zona de inundación. En Japón se presta gran atención a este tipo de construcciones protectoras. Además de los diques costeros, construidos desde hace ya algún tiempo en las entradas de las bahías, se han construido grandes rompeolas, y otros están en fabricación. Por ejemplo en la bahía de Ofunato, Chile, se construyó un rompeolas especial después del gran tsunami del 22 de mayo de 1960. Los especialistas japoneses, teniendo en cuenta la posible generación de grandes seiches en las bahías, han propuesto construir un sistema de rompeolas uno a la entrada de la bahía y el otro en la línea nodal de los seiches. Antes de que se construya un dique costero hay que tener en cuenta dos realidades; en primer lugar, las corrientes de reflujo son por lo general, en las costas, más intensas y peligrosas que las corrientes de flujo (debido a la gravedad). Es por esto, que los diques de protección de las costas deben ser reforzados en el lado de tierra (y quizá más que en el lado del mar). En segundo lugar, los efectos destructores de un tsunami pueden acrecentarse considerablemente por los objetos que transportan las corrientes; por lo tanto, una playa atestada agrava los daños del tsunami.

Para la eficaz aplicación de medidas de ingeniería costosas hay que obtener una información digna de confianza sobre la probabilidad de que ocurran inundaciones de diferentes alturas en cada lugar. Recientemente, ha aumentado el interés por la evaluación de los riesgos que suponen los tsunamis, y tanto en la URSS como en los EE.UU. se ha iniciado la zonificación de las costas expuestas a la acción de los tsunamis siguiendo distintas técnicas (Adams, 1975; Soloviev y otros, 1976).

5.4 Zonas tsunamigénicas, frecuencia de los tsunamis y daños que ocasionan

Las zonas tsunamigénicas coinciden con las zonas sísmicas submarinas o costeras. El 80 % de los tsunamis se generan en la faja sísmica circumpacífica (tabla 5.2). Los tsunamis de intensidad máxima $I = 4$ (tabla 5.2) se producen por lo común cerca de las costas de Alaska, islas Aleutianas, Kuriles, o al sur y centro de la península de Kamchatka, Japón, Chile y Perú. Los tsunamis de intensidad menor ($I = 3$) se han observado en las costas situadas al norte de la península de Kamchatka, en el mar del Japón, en las islas Ryukyu, en el nordeste de Indonesia (las islas Banda y Amboina, etc.), en las islas Salomón, en las Nuevas Hébridas, Tonga, las islas Kermadec, México y en las islas Hawai. Los tsunamis de intensidad ligera ($I = 2$) se presentan en los archipiélagos de las Filipinas, las islas Marianas y las de los mares interiores de Indonesia, Nueva Guinea, Nueva Bretaña, Nueva Zelanda y la parte suroriental de la península de Alaska. Los tsunamis débiles ($I = 1$) han ocurrido en la costa de California (EE.UU).

En el océano Índico, las zonas tsunamigénicas principales se extienden a lo largo de Sumatra ($I_{\text{máx}} = 3$) y de las demás islas del archipiélago Indonecio ($I = 1$) empalmando con la zona circumpacífica. En la bahía de Bengala y el mar Arábigo se producen ocasionalmente tsunamis de poca intensidad. En el océano Atlántico la zona tsunamigénica más activa está localizada en el mar Caribe, a lo largo de Cuba y de las Antillas y desde el punto de vista de su génesis está más relacionada con el Pacífico que con el Atlántico. La otra zona tsunamigénica comprende el Mediterráneo y el mar Negro y se extiende hacia el oeste hasta llegar casi a la dorsal mesoatlántica. Los tsunamis más conocidos en esta zona ocurrieron en Lisboa el 1 de noviembre de 1775 y en Mesina el 28 de diciembre de 1908. El más antiguo tsunami de esta área del que se tienen datos ocurrió en la costa de Siria en el siglo II antes de Cristo, cuyo relato se encuentra escrito en tablilla de arcilla y fue encontrado por los arqueólogos en Ras Shamra.

Se sabe que en otras áreas del Atlántico se han producido ocasionalmente tsunamis. Por ejemplo, el sismo del 18 de noviembre de 1929, con epicentro cerca de Terranova, originó un tsunami que alcanzó en la playa una altura de onda de unos 17 m aproximadamente.

No hay datos de tsunamis ocurridos en el Ártico. Los sismos localizados en los dorsales mesoocéánicos del Atlántico, Pacífico e Índico pueden generar tsunamis muy pequeños, pero no se han encontrado pruebas.

La gama dinámica de los tsunamis es muy amplia. El más débil que ha sido registrado por un mareógrafo tuvo una amplitud de más o menos un centímetro. En contraste, el tsunami de las islas Aleutianas ocurrido en 1946, uno de los más

Tabla 5.2. Características de las principales zonas tsunamigénicas del océano Pacífico (Soloviev, 1972).

Zona	Tipo de Zona	L (km)	$\log n(0)$	$\delta \log n(0)$	$\alpha = \partial n / \partial L$	I_{\max}	T	$\log T$	$\delta \log T$	D (km)
Alaska e isl. Aleutianas	a.i.	3200	1.10	± 0.40	4.0	4	0.56	-0.25	± 0.45	80
Kamchatka e isl. Kuriles	a.i.	2800	1.20	0.15	5.7	4	0.66	-0.18	0.20	100
Honshu, costa este	a.i.	830	0.65	0.10	5.4	4	0.32	-0.49	0.15	100
Sur del Japón	interm.	1000	0.60	0.20	4.0	4	0.80	-0.10	0.35	50
Mar del Japón	t.bl.	1800	0.75	0.20	3.1	3	2.24	+0.35	0.40	30
Isl. Ryukyu	a.i.	1200	0.40	0.40	2.1	3	0.55	-0.26	0.55	100
Isl. de Formosa	a.i.	620	0.15	—	2.3	2	0.20	-0.70	—	40
Nampo—Isl. Marianas	a.i.	4000	0.80	—	1.6	2	0.95	-0.02	—	100
Filipinas, norte	interm.	900	0.45	0.25	3.1	3	1.10	+0.04	0.45	60
Filipinas, sudoeste	t.bl.	1100	0.70	0.25	4.5	3	1.58	+0.20	0.50	20
Filipinas, este	a.i.	1200	0.65	0.40	3.7	1	0.63	-0.20	0.60	50
Talauud e isl. Sangihe, y estrecho de Moluca	interm.	1000	0.69	0.25	4.8	3	0.83	-0.08	0.45	150
Mar de Banda	interm.	800	0.44	0.20	3.4	3	2.04	+0.31	0.40	60
Sulawesi e isl. Kalimantan	t.bl.	2200	0.95	0.30	4.1	2	3.30	+0.52	0.45	0
Java e isl. Sonda Menor	a.i.	3000	0.25	0.40	0.6	1	0.89	-0.05	0.60	120
Sumatra	interm.	2000	0.88	0.20	3.8	3	1.18	+0.07	0.40	50
Irian occid.	interm.	1500	0.55	0.40	2.4	2	0.85	-0.07	0.55	10
Nueva Bretaña	a.i.	1300	0.85	0.25	5.4	2	0.59	-0.23	0.35	50
Isls. Salomón	a.i.	1000	0.75	0.40	5.6	3	0.95	-0.02	0.50	60
Sta. Cruz e isl. N. Hébridias	a.i.	2000	0.95	0.40	4.5	3	0.74	-0.13	0.50	80
Samoa, Tonga, isl. Kermadec	a.i.	3000	0.71	0.40	1.7	3	0.54	-0.27	0.60	100
Nueva Zelanda	interm.	1000	0.55	0.40	3.5	3	0.79	-0.10	0.60	0
Chile, Perú	—	5500	1.35	0.10	4.1	4	1.26	+1.10	0.20	0
América Central y México	—	3000	0.85	0.15	2.4	3	0.47	-0.33	0.35	-10
EE.UU.	interm.	2000	0.45	0.25	1.4	1	0.85	-0.07	0.45	20
Canadá	interm.	2300	0.50	0.40	1.4	2	1.00	0.00	0.65	200

Notaciones: L = longitud de la zona; $n(0)$ = número de tsunamis de $I \geq 0$ en la zona, para un periodo de 100 años; α = número de tsunamis con $T = 0$, reducido a $L = 1000$ km; I_{\max} = intensidad máxima conocida de los tsunamis en la zona; T = parámetro de «tsunamicidad»; D = distancia media a la costa de las fuentes de tsunamis; a.i. = arco de islas; interm = zonas de tipo intermedio; t. bl. = zonas de plataforma de tectónica de bloques.

grandes de este siglo, causó un levantamiento del agua, que en la isla de Unimak superó los 30 metros. Durante el tsunami de Kamchatka de 1737 (aunque los datos no son enteramente fiables) el agua subió unos 60 m en el estrecho situado entre Shumshu y las islas Paramusher, y en el tsunami de 1788 alcanzó en la isla Unga una altura de 100 (?) m. De acuerdo con estimaciones aproximadas, la energía de los tsunamis varía entre 10^{19} y 10^{23} ergios.

Hablando en términos generales, los tsunamis no son frecuentes. Como es natural los de mayor intensidad son los más raros. En el transcurso de toda la historia escrita de la humanidad, sólo ha quedado constancia de unos 1000 tsunamis (Heck, 1947; Ponyavin, 1965; Iida, Cox y Pararas-Carayannis, 1967; Soloviev y Go, 1974, 1975).

Para poder clasificar los tsunamis de acuerdo a su magnitud o energía, se necesitarían registros instrumentales regulares de las ondas en las proximidades de la fuente, lo que no se ha logrado todavía. Es por esto que la clasificación se basa primariamente en sus manifestaciones cerca de las costas, especialmente en el grado de inundación.

Según la escala de Imamura-Iida, la magnitud m del tsunami es aproximadamente igual al logaritmo de base 2 de la altura máxima o media de la inundación en la costa ($h_{\text{máx}}$) en metros: $m = \log_2 h_{\text{máx}}$.

Se usa esta fórmula en la URSS pero con una modificación propuesta por Soloviev. La intensidad del tsunami (i) es el valor (Soloviev, 1975):

$$i = \log_2 h_{\text{mar}}^{\text{vis}} = \log_2 h_{\text{av}} + \frac{1}{2} = \log_2 h_{\text{máx}}^{\text{mar}} + \frac{1}{2} = \log_2 h_{\text{av}}^{\text{mar}} + 1$$

Donde h^{vis} , h^{mar} , son las elevaciones de la ola en la costa en metros, determinadas por observaciones visuales y por registros de mareógrafos respectivamente; h_{av} y $h_{\text{máx}}$ son las elevaciones promedio y las elevaciones máximas del agua a través de una sección de la costa. La intensidad generalizada (I) es un valor de i corregido para la directividad de la radiación del tsunami a partir de la fuente.

Generalmente los valores numéricos m (magnitud) e I (intensidad) coinciden entre sí y su diferencia depende de la terminología empleada. Las características cualitativas de las diferentes intensidades de un tsunami se muestran en la tabla 5.3 (Ambraseys, 1965).

Después de recopilar los datos disponibles de los tsunamis del océano Pacífico y de generalizarlos, Soloviev y Go (1974, 1975) han estimado los periodos de frecuencia de los tsunamis en diferentes zonas, véase tabla 5.2 (Soloviev, 1972).

En todo el océano Pacífico, los tsunamis de intensidad máxima ($I = 4$) se repiten por término medio una vez cada diez años; los de intensidad $I \geq 3$, una vez cada tres años; los de intensidad $I \geq 2$, una vez cada año; los de intensidad $I \geq 1$, una vez cada 8 meses; y los de una intensidad $I \geq 0$, una vez cada cuatro meses. En el océano Pacífico se producen aproximadamente tres veces por mes tsunamis de una altura de 10 cm o más.

Estas estimaciones promedias son correctas sólo para largos periodos de tiempo (100 años). Para periodos más cortos, la frecuencia de tsunamis (especialmente los grandes) se puede desviar de la simple ley de Poisson que describe la frecuencia de eventos raros. En particular, durante los últimos 50 años en la región noroeste del Pacífico ha habido una marcada tendencia a la agrupación de los grandes tsunamis ($I \geq 0$) en grupos de periodos de cinco o seis años de promedio (Ivashchenko, 1972).

Tabla 5.3. Escala de intensidad I del tsunami con b expresado en metros (Soloviev, 1972).

I	b_{av}^{mar}	$b_{m\acute{a}x}^{mar}$	b_{av}^{vis}	$b_{m\acute{a}x}^{vis}$	Descripción del tsunami
4	(8)	11.3	16		Desastroso. Destrucción parcial o total de las edificaciones hasta una cierta distancia de la playa. Las costas son inundadas por olas de gran altura. Los barcos grandes sufren graves daños. Los árboles son arrancados de raíz o rotos por las olas. Muchas víctimas.
3	4	5.7	8		Muy grande. Inundación general de la costa por olas que alcanzan cierta altura. Daños en los muelles y en importantes estructuras situadas cerca de la playa. Destrucción de las estructuras débiles. Grave erosión de las tierras de cultivo, dispersión de objetos flotantes, peces y otros animales marinos en la costa. Con la excepción de las grandes naves, todos los buques son llevados tierra adentro o mar afuera. Gran oleaje en los estuarios. Daños en las obras portuarias. Se ahogan personas, las olas son acompañadas de fuertes ruidos.
2	2	2.8	4		Grande. Inundación de la playa por olas de cierta altura. Ligera erosión en los terrenos de relleno. Daños en los diques y malecones. Daños en las estructuras débiles situadas cerca de la costa. Ligeros daños en las estructuras sólidas de la costa. Los barcos de vela de gran tamaño son arrastrados tierra adentro o mar afuera. Las costas quedan sembradas de residuos flotantes.
1	1	1.4	2		Bastante grande. Lo nota todo el mundo. Inundación de costas suavemente inclinadas. Pequeños buques de vela son llevados a la playa. Daños ligeros en estructuras livianas situadas en las cercanías de la costa. En los estuarios hay inversión de la corriente de agua hasta cierta distancia río arriba.
0	0.5	0.7	1		Ligero. Las olas son advertidas por aquellas personas que viven cerca de la playa y están familiarizadas con el mar. Generalmente advertido en playas muy planas.
-1	0.25	0.35	0.5		Muy ligero. La ola es tan débil que sólo es perceptible en los registros de los mareógrafos.

Espacialmente, las fuentes de los grandes tsunamis (en la misma región del noroeste del Pacífico) casi nunca se han superpuesto, al menos en un periodo de unos 140 años (Fedotov, 1968; Mogi, 1969; Kelleher, 1970). Si se confirman esas tendencias a través de estudios más detallados y exhaustivos se tendría la base para estimar los riesgos de los tsunamis a largo plazo con mayor precisión que hasta ahora.

A partir de los datos publicados sobre las pérdidas ocasionadas por los tsunamis más intensos y de las estadísticas relativas a su frecuencia, puede estimarse que por término medio los tsunamis provocan pérdidas que ascienden aproximadamente a 8 millones de dólares y 300 vidas por año. Estas cifras pueden no parecer impresionantes, y dar la idea de que en realidad el peligro de los tsunamis no es tan grave. Sin embargo, los tsunamis resultan aterradores en razón de su inevitabilidad. Una

persona a quien un tsunami sorprende desprevenida no tiene posibilidad de salvarse. Además, con el aumento de la población y de los asentamientos costeros estos daños irán en aumento, si no se adoptan medidas para perfeccionar el sistema de alerta contra los tsunamis u otras medidas de protección.

5.5 Bases metodológicas de los sistemas de alerta contra tsunamis

A partir de 1950 se establecieron sistemas de alerta contra los tsunamis en Japón, EE.UU. y la URSS. Los sistemas japoneses y soviéticos se crearon especialmente para predecir los tsunamis generados muy cerca de sus costas. El sistema norteamericano tenía por objeto poner sobre alerta a la población de Hawai respecto a tsunamis generados en cualquier punto del Pacífico. Esta última circunstancia fue la que determinó el carácter internacional del sistema norteamericano. Poco a poco, algunos servicios hidrográficos, sismológicos y otros de carácter especializado de quince países pasaron a colaborar con este último sistema, el cual tiene su centro en Honolulu y comprende actualmente 31 estaciones sismológicas y 51 mareográficas. Las alertas contra los tsunamis procedentes de Honolulu se transmiten a 15 países. También se establecieron servicios de alerta en la zona de las Aleutianas y de Alaska y las islas de Hawai (Murphy y Eppley, 1970).

Los sistemas actuales de alerta contra los tsunamis se basan en el criterio de la magnitud sísmica. Esto es particularmente cierto por lo que se refiere a los sistemas locales de la zona de Alaska, islas Aleutianas, Hawai (EE.UU.), Kamchatka e islas Kuriles (URSS) y Japón. Se supone, convencionalmente, que los sismos sólo pueden generar tsunamis destructivos cuando su magnitud excede de un cierto valor umbral. Sin embargo, este criterio de la magnitud no es muy eficaz. Si el valor umbral es muy alto, hay un peligro real de no detectar un tsunami potencialmente peligroso; si es muy bajo, hay el riesgo de dar muchas falsas alarmas que ocasionan perjuicios económicos y merman la confianza del público.

Soloviev (1972) ha estimado la probabilidad de generación de tsunamis por un terremoto de magnitud M que ocurre en una zona que tiene un factor T de «tsunamicidad», donde T es la razón de la frecuencia de tsunamis n a la frecuencia de terremotos N .

El factor T es menor que 1 en las zonas de los arcos insulares (Aleutianas—Alaska, Kuriles—Kamchatka, Japón, etc.), es mayor que uno para la zona de plataforma (mar del Japón, el archipiélago de las Filipinas, Sulawesi, Kalimantan, etc.) y es de cerca de 1 para las otras zonas. En otras palabras, cuanto más superficial es la fuente sísmica y cuanto más cercana está de la playa, mayor es la probabilidad de generación de tsunamis.

Se ha establecido una fórmula empírica para estimar la probabilidad de generación de un tsunami detectable, es decir, cuando se puede detectar una amplitud de un cm o más, cerca de la playa:

$$P_1(M, T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{2.5(M - 7.63 + 1.23 \log T)} e^{-\frac{1}{2}V^2} dV$$

La probabilidad de que se genere un tsunami de intensidad I puede ser descrita por una segunda fórmula empírica:

$$P_2(I, M, T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma}} \cdot e^{-1/2\sigma^2 \cdot (I - \bar{I})^2}$$

donde $\sigma = 4.44 - \log T - 0.4M$ y $\bar{I} = -11.0 T^{-1.03} + 1.66 T^{-0.83} M$.

Usando estas expresiones se ha intentado calcular la eficiencia del método de magnitud para la predicción. Los ejemplos de los cálculos para zonas de dos tipos (arcos insulares y plataforma) se presentan en la tabla 5.4.

Ciertamente, tales cálculos son algo condicionados, pero dan una idea general de las posibilidades limitadas que tiene el método de magnitud.

¿Es posible aumentar la eficacia del método sismológico? A partir de una serie de investigaciones teóricas y experimentales (Balakina, 1970, 1972; Iida, 1970; Watanabe, 1970; Gussyakov, 1972, 1974; Ivashchenko y Go, 1973) se llegó a la conclusión de que la eficacia de la predicción de los tsunamis sobre la base de datos sísmicos sería mayor si en cada caso se pudiera determinar rápidamente la profundidad y el mecanismo de fuente de los sismos. Sin embargo, la elaboración de méto-

Tabla 5.4. Estimación de la eficiencia del método de magnitud para predecir el peligro de los tsunamis (Soloviev, 1972).

Kuriles-Kamchatka (T:F:U)			Mar del Japón (T:F:U)		
M_{tr}	I	II	M_{tr}	I	II
8.9	1:0:40	—	8.3	1:0:50	—
8.8	140:1:2400	—	8.2	1:0:20	—
8.7	80:1:800	—	8.1	1:0:12	—
8.6	50:1:350	—	8.0	1:0:8	—
8.5	40:1:180	17:1:250	7.9	50:1:250	13:1:130
8.4	25:1:80	10:1:65	7.8	30:1:120	12:1:65
8.3	15:1:40	7:1:25	7.7	20:1:60	8:1:30
8.2	10:1:20	5:1:12	7.6	12:1:30	6:1:15
8.1	7:1:9	3.5:1:6	7.5	8:1:15	4:1:8
8.0	5:1:5	3:1:3	7.4	6:1:8	3:1:4
7.9	3:1:3	4:2:3	7.3	4:1:4	2:1:2
7.8	2.5:1:1.5	2:1.5:1	7.2	3:1:2	2:2:2
7.7	2.5:1.5:1	2.5:2.5:1	7.1	2:1:1	2:2:1
7.6	4:3:1	4:5:1	7.0	3:2:1	3:3:1
7.5	5:5:1	6:10:1	6.9	4:3:1	4:6:1
7.4	8:10:1	11:22:1	6.8	5:6:1	6:12:1
7.3	12:24:1	20:52:1	6.7	8:12:1	10:24:1
7.2	24:54:1	40:140:1	6.6	12:24:1	17:53:1
7.1	50:140:1	130:570:1	6.5	20:50:1	30:110:1
7.0	150:550:1	—	6.4	40:120:1	65:330:1
			6.3	75:300:1	160:1000:1
			6.2	200:1000:1	—

T = Alarmas de tsunami (alarmas verdaderas)
F = Alarmas sin tsunami (alarmas falsas)
U = Tsunamis sin alarma (tsunamis no previstos)
 M_{tr} = El valor umbral de magnitud

En el tsunami de la versión I, se ha supuesto que $I \geq 0$; en la versión II se asumió que $I \geq 1$

dos suficientes y viables, precisos y eficaces para determinar la profundidad local y el mecanismo fuente de los sismos sobre la base de observaciones registradas en una o más estaciones sigue siendo problemática (Pisarenko y Poplavski, 1971; Gussyakov, 1973).

Los intentos para detectar ciertos signos fenomenológicos de las propiedades tsunamigénicas de los terremotos a través de los sismogramas corrientes (instrumentos con periodo de 10^{-1} a 10^2 seg) no condujeron a resultados significativos. Se emplearon métodos estadísticos y gráficos, pero fue evidente que los análisis fenomenológicos no pueden competir todavía con el criterio de la magnitud.

Existe una posibilidad de que ciertos índices de «tsunamicidad» de los terremotos puedan encontrarse en los registros de instrumentos de periodo muy largo (paso de banda $10^3 - 10^4$ seg) pero esas investigaciones se encuentran aún en una etapa experimental y no se las emplea todavía en los trabajos rutinarios de las alertas de tsunamis. Puesto que el método sísmico de pronóstico de los tsunamis parece estar condenado a continuar siendo de carácter estadístico, se deben investigar otros métodos de predicción.

Cabe depositar alguna esperanza en el registro de fenómenos que acompañan a las ondas de los tsunamis o a los sismos submarinos intensos, como son las ondas de gravedad atmosféricas, perturbaciones ionosféricas, ondas sonoras submarinas, ondas electromagnéticas inducidas por las corrientes de agua, etc.

El desplazamiento «tipo pistón» del fondo marino se transmite a la superficie lo que a su vez causa un cierto tipo de ondas en la atmósfera. Esta capa, debido a su gran extensión, parece que es más rígida que la hidrosfera, tan delgada, a pesar de la gran diferencia de densidad que existe entre esas dos envolventes de la tierra. Como la velocidad de propagación de las ondas de gravedad en la atmósfera es dos veces mayor que en la hidrosfera, los precursores atmosféricos llegarán al punto de observación antes que las ondas del tsunami. Esos precursores se han registrado en microbarógrafos después de varios terremotos tsunamigénicos (Koike, 1959; Ecollan y Roccard, 1960; Bolt, 1964; Bowman y Shrestha, 1965; Row, 1966; Mikumo, 1968). Se espera que se puedan registrar estos precursores durante los grandes tsunamis del futuro, pero no se han esclarecido aún las condiciones (intensidad del tsunami, la lejanía de la fuente, etc.) en que se los pueda diferenciar del ruido de fondo. Con todo, el aumento de la red de microbarógrafos y el uso de sus registros servirán para mejorar los sistemas de alerta de los tsunamis.

Tanto las ondas de gravedad atmosféricas como las ondas de superficie de los grandes sismos causan oscilaciones en las capas conductoras de la ionosfera y, debido a eso, se pueden detectar esta clase de precursores en los sondeos ionosféricos (Row, 1966; Furumoto, 1970).

Los fuertes terremotos submarinos engendran ondas acústicas de gran intensidad y parte de esa energía queda atrapada en el canal sonoro submarino y las frecuencias más bajas (2 c/s) se dispersan a través de grandes distancias por el océano Pacífico. Se les registra no sólo en los hidrófonos sino también en los sismógrafos de corto periodo. A estas ondas que aparecen en los sismogramas se las denomina fase *T* (en otras palabras, fase tercera). Existen lugares con condiciones óptimas para que la energía acústica se transforme en energía sísmica, sobre todo en las islas aisladas con fuerte talud submarino y situadas en medio del océano. En la Polinesia francesa, donde existe una red de estaciones sísmicas equipadas con sismógrafos de periodo corto, se ha elaborado un método cualitativo para el pronós-

tico de los tsunamis que se basa en la intensidad de la fase T (Talandier, 1971). Sin embargo, la correlación entre la intensidad de la fase T y el tsunami no es tan clara como debería esperarse. Así, el sismógrafo de periodo corto instalado en la isla Shikotan registra muy bien la fase T de los sismos originados en las islas Bonin y Marianas, con profundidades focales desde cero a 500 km, aunque los terremotos de foco profundo no generan tsunamis (Soloviev y Zhuk, 1972). Por lo tanto, será necesario que se haga un estudio más amplio de la fase T como precursor de los tsunamis.

Tanto la teoría como la observación indican que las corrientes marinas inducen campos electromagnéticos que pueden ser más intensos que el ruido de fondo (Larsen, 1968), pero la posibilidad de detectar los tsunamis a base de tales efectos electromagnéticos no ha sido todavía confirmada experimentalmente.

Aun cuando se hace imprescindible la investigación de todos los precursores de los tsunamis, hay la necesidad urgente de contar con un método fiable para la predicción eficaz de los tsunamis. En principio este método existe. Consiste en registrar ondas de tsunami cerca de su fuente por medio de instrumentos registradores especiales que se pueden colocar, por ejemplo, en los bordes de la plataforma continental (en arcos insulares) y en transmitir los datos por cable o por otro conducto telemétrico.

Los primeros instrumentos registradores de tsunamis en los fondos submarinos fueron ideados y construidos en el Instituto Geofísico de Hawai (Vitousek, 1963, 1965; Vitousek y Miller, 1967, 1970); como sensores se usaron los vibrotones, que posteriormente se sustituyeron por sensores de presión transistorizados, debido a que los vibrotones eran muy sensibles a los cambios de temperatura. Simultáneamente, con los registradores conectados a tierra por medio de cables que se instalaron en las islas Hawai, se construyeron otros tipos de registradores que acumulaban la información en cinta magnética y la transmitían a la superficie a través del canal acústico, obteniéndose así varios registros de pequeños tsunamis.

En las proximidades de la isla de Shikotan (URSS) se han utilizado con buenos resultados instrumentos registradores con cables sobre los fondos marinos (Zhak y Soloviev, 1971; Zhak y otros, 1972). Se registraron algunas docenas de microperturbaciones del nivel del mar, con alturas de unos pocos centímetros, conjeturándose que eran pequeños tsunamis generados por los sismos locales o también por otros procesos. Un defecto de la instalación fue la poca consistencia del cable que no se mantenía fijo y que se rompió en primavera por un témpano de hielo flotante. Las mejoras en los instrumentos registradores que se instalan en los fondos marinos, en la estabilidad permanente de las líneas de cables, en los nuevos diseños de instalaciones de instrumentos para el registro de tsunamis distantes y en la transmisión de la información por radio, constituyen las líneas de trabajo más importantes para que los sistemas de alerta puedan ser más eficientes y más dignos de confianza.

5.6 Conclusiones

Se deberían tomar las siguientes medidas con el fin de reducir las pérdidas provocadas por los tsunamis:

- 1) Perfeccionar y aplicar los medios para el registro de los tsunamis en alta mar, para lo cual es necesario diseñar sensores estables y precisos de la presión hidrostática y de las corrientes de agua, tender y fijar convenientemente líneas de cables submarinos desde los instrumentos instalados en el fondo hasta los principales centros de población ubicados en zonas de posibles inundaciones, e instalar instrumentos registradores de tsunamis en el fondo marino, conectados con boyas en la superficie para transmitir por radiotelemetría datos sobre el nivel de las aguas y la velocidad de las corrientes.
- 2) Diseñar e instalar sismógrafos de periodo largo y de pequeña amplificación con un paso de banda de $10 - 10^3$ seg, en las estaciones sismológicas; continuar y perfeccionar el tratamiento automático de los datos sísmicos e integrar los métodos hidrofísicos y sismológicos de alerta eficaz de los tsunamis.
- 3) Mejorar los canales de comunicación utilizados en los sistemas de alerta contra los tsunamis, comprendido el empleo de satélites artificiales.
- 4) Ampliar considerablemente la red de microbarógrafos.
- 5) Continuar los trabajos sobre la teoría de la generación de los tsunamis.
- 6) Recopilar modelos estocásticos de los desplazamientos sismotectónicos de los fondos marinos en las principales zonas tsunamigénicas.
- 7) Continuar y refinar los cálculos de la propagación de los tsunamis, a partir de fuentes puntuales conocidas, por la tierra esférica en rotación, sobre la base de ecuaciones no lineales.
- 8) Realizar esquemas de zonificación de tsunamis y estimar el riesgo de los tsunamis en las costas del Pacífico expuestas a inundaciones.
- 9) Adoptar medidas razonables de ingeniería para lograr una protección en las zonas pobladas expuestas a inundaciones de tsunamis.
- 10) Mejorar la información facilitada al público sobre la amenaza de los tsunamis.
- 11) Ampliar las actividades del grupo de Coordinación Internacional COI-UNESCO para el sistema de alerta contra los tsunamis en el océano Pacífico, las del Centro Internacional de Información de Tsunamis en Honolulu y las del Comité de Tsunamis UIGG y ampliar o crear sistemas de alerta contra los tsunamis en los países vulnerables a su acción.

5.7 Referencias

- ADAMS, W. 1975. Conditional expected tsunami inundation at arbitrary coastal locations in Hawaii. *Symposium on Tsunamis, IUGG XV General Assembly, Grenoble, 1975.*
- AIDA, I. 1969. Numerical experiments for the tsunami propagation—the Niigata tsunami 1964 and the Tokachi-oki tsunami 1968. *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 47, no. 4.
- . 1970. A numerical experiment for the tsunami accompanying the Kanto earthquake of 1923. *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 48, no. 1.
- . 1972. Numerical estimation of a tsunami source. *Zisin*, Ser. 2, vol. 25, no. 4.
- ; KAJIURA, K.; HATORI, T.; MOMOI, T. 1964. A tsunami accompanying the Niigata earthquake of June 16, 1964. *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 42, no. 4.
- ALEXEEV, A. S.; GUSYAKOV, V. K. 1973. Numerical simulation of the generation process of tsunami waves and seismoacoustical waves during suboceanic earthquake. *Diffraction and wave propagation theory*, vol. 2, Moscow-Erevan (in Russian).
- AMBRASEYS, N. N. 1965. Data for the investigation of seismic sea-waves in Europe. ESC meeting, Budapest, 1964. *UGGI, Monographie* no. 29, Paris.
- BALAKINA, L. M. 1970. Relationship of tsunami generation and earthquake mechanism in the North-Western part of the Pacific. *Tsunamis in the Pacific*. Honolulu.

- . 1972. Tsunamis and focal mechanism of earthquakes in the North-Western part of the Pacific. *Tsunami waves, Proc. of Sakhalin Compl. Sci. Res. Inst.*, no. 29. Yuzhno-Sakhalinsk (in Russian).
- BEN-MENACHEM, A.; ROSENMAN, M. 1972. Amplitude patterns of tsunami waves from submarine earthquakes. *Jl. Geophys. Res.*, vol. 77, no. 17.
- BERNARD, E. N. 1975. Tsunami response of the Hawaiian Islands. *Symposium on Tsunamis, IUGG XV General Assembly, Grenoble*.
- BOLT, B. A. 1964. Seismic air waves from the great 1964 Alaskan earthquake. *Nature*, vol. 202, p. 4937.
- BOWMAN, G. G.; SHRESTHA, K. L. 1965. Atmospheric pressure waves from the Japanese earthquake of June 16, 1964. *Quart. Jl. Roy. Meteorol. Soc.*, vol. 91, no. 388.
- CHAMBER, L. G. 1970. The general problem of long waves on a rotating Earth. *Quart. appl. Math.*, vol. 28, no. 2.
- CHERKESOV, L. V. 1973. *Surface and internal waves* (in Russian). Naukova dumka, Kiev.
- ECOLLAN, J.; ROCARD, Y. 1960. Signaux microbarographiques en rapport avec les grands séismes du Chili. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 251, no. 4.
- FEDOTOV, S. A. 1968. Long-term seismic prediction for Kuril-Kamchatka zone (in Russian). *Tsunami problem*. Moscow, Nauka.
- FURUMOTO, A. S. 1970. Ionospheric recordings of Rayleigh waves for estimating source mechanisms. *The Pacific Ocean Tsunamis*. Honolulu.
- GAZARYAN, Yu. L. 1955. On surface waves in ocean induced by underwater earthquakes (in Russian). *Acoust. Jl.*, vol. 1, no. 3.
- GUSYAKOV, V. K. 1972. The excitation of tsunami and oceanic Rayleigh waves by underwater earthquake (in Russian). *Mathematical problems in geophysics*, no. 3, Novosibirsk.
- . 1973. On some properties of oceanic Rayleigh waves excited by an underwater earthquake (in Russian). *Tsunami waves, Proc. of Sakhalin Compl. Sci. Res. Inst.*, no. 32, Yuzhno-Sakhalinsk.
- . 1974. On the relationship between tsunami waves and underwater earthquake source parameters (in Russian). *Mathematical problems in geophysics*, no. 5, part 1, Novosibirsk.
- HAMMACK, J. L. 1973. A note on tsunamis: their generation and propagation in an ocean of uniform depth. *Jl. Fluid Mech.*, vol. 60, part 4.
- HATORI, T. 1964. A study of the damage of houses due to a tsunami. *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 42, no. 1.
- HECK, N. H. 1947. List of seismic sea waves. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 37, no. 4.
- HWANG, LI-SAN; DIVOKY, D. 1970. Tsunami generation. *Jl. Geophys. Res.*, vol. 75, no. 33.
- ICHTIYE, T. 1958. A theory of generation of tsunamis by an impulse at the sea bottom. *Jl. Ocean. Soc. Japan*, vol. 14, no. 2.
- IDA, K. 1970. The generation of tsunamis and the focal mechanism of earthquakes. *Tsunamis in the Pacific Ocean*. Honolulu.
- ; COX, D. C.; PARARAS-CARAYANNIS, G. 1967. *Preliminary catalog of tsunamis occurring in the Pacific Ocean*. Hawaii Inst. Geophys. Univ. Hawaii. (Data rep, no. 5).
- IVASHCHENKO, A. I. 1972. On the recurrence of strong tsunamis in the North-West part of the Pacific for the recent 50 years (in Russian), *Tsunami waves, Proc. of Sakhalin Compl. Sci. Res. Inst.*, no. 29. Yuzhno-Sakhalinsk.
- IVASHCHENKO, A. I.; GO, Ch. N. 1973. Tsunamigenicity and earthquake source depth (in Russian) *Tsunami waves, Proc. of Sakhalin Compl. Sci. Res. Inst.*, no. 32. Yuzhno-Sakhalinsk.
- KAJURA, K. 1963. The leading wave of a tsunami. *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 41, no. 3.
- . 1970. Tsunami source, energy and the directivity of wave radiation. *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 48, no. 5.
- ; AIDA, I.; HATORI, T. 1968a. An investigation of the tsunami which accompanied the Hiuganada earthquake of April 1, 1968. *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 46, no. 6.
- KELLEHER, J. A. 1970. Space-time seismicity of the Alaska-Aleutian seismic zone. *Jl. Geophys. Res.*, vol. 75, no. 29.
- KELLER, J. 1963. Tsunamis—water waves produced by earthquakes. *Proc. Tsunami Meet. Assoc. Tenth Pacific Sci. Congr., Paris*.
- KOIKE, K. 1959. Microbarographic observations during the Iturup earthquake of November 7,

- 1958 and large shot in Asama of November 10, 1958 (in Japanese). *Quart. Jl. Seismol.*, vol. 24, no. 2.
- KRANZER, H. C.; KELLER, J. B. 1959. Water waves produced by explosions. *Jl. Appl. Phys.*, vol. 30, no. 3.
- LARSEN, J. C. 1968. Electric and magnetic fields induced by deep sea tides. *Jl. Geophys.*, vol. 16, no. 1.
- MAKAROV, V. A.; BUCHTEEV, V. G.; USANKINA, G. E. 1972. Tsunami waves from initial disturbances of different form (investigations on an electrical model) (in Russian). *Tsunami waves, Proc. Sakhalin Compl. Sci. Res. Inst.*, no. 29, Yuzhno-Sakhalinsk.
- MIKUMO, T. 1968. Atmospheric pressure waves and tectonic deformation associated with the Alaskan earthquake of March 28, 1964. *Jl. Geophys. Res.*, vol. 73, no. 6.
- MOGI, K. 1969. Relationship between the occurrence of great earthquakes and tectonic structures. *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 47, no. 3.
- MOMOI, T. 1964a. Tsunami in the vicinity of a wave origin. *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 42, no. 1.
- . 1964b. Tsunami in the vicinity of a wave origin (II). *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 42, no. 2.
- . 1965. Tsunami in the vicinity of a wave origin (III). *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 43, no. 1.
- MURPHY, L. M.; EPPLEY, R. A. 1970. Recent developments and future plans for the Pacific tsunami warning system. *Tsunamis in the Pacific*. Honolulu.
- MURTY, T. S.; HENRY, R. F. 1973. Some tsunami studies for the west coast of Canada (in Russian). *Tsunami waves, Proc. Sakhalin Compl. Sci. Res. Inst.*, no. 32, Yuzhno-Sakhalinsk.
- NEKRASSOV, A. V.; PYASKOVSKY, R. V.; BUCHTEEV, V. G. 1972. Investigation of propagation and transformation of tsunami waves by calculation method (in Russian). *Tsunami waves, Proc. Sakhalin Compl. Sci. Res. Inst.*, no. 29, Yuzhno-Sakhalinsk.
- PISARENKO, V. F.; POPLAVSKIJ, A. A. 1971. Statistical method for earthquake source depth recognition by using a single station record (in Russian). *Computational seismology*, no. 5, Moscow, Nauka.
- PODYAPOLSKIJ, G. S. 1968. The excitation of long gravity wave in ocean by seismic source in the crust (in Russian). *Bull. Acad. Sci. U.S.S.R.*, ser. Physics of the Earth, no. 1. 1968.
- . 1970. The exciting of tsunami wave by the earthquake. *Tsunamis in the Pacific*. Honolulu.
- PONIKAROV, N.; CHUMAKOV, V. 1964. Tsunami and nuclear shot (in Russian). *Military knowledge*, no. 10. Moscow.
- PONYAVIN, I. D. 1965. *Tsunami waves* (in Russian). Leningrad, Hydromet. Publishing House.
- PRINS, J. E. 1958. Water waves due to a local disturbance. *Proc. 6th Conf. Coastal Engng.*, p. 1, Berkeley, California.
- ROW, R. V. 1966. Evidence of long-period acoustic-gravity waves launched into the F region by the Alaskan earthquake of March 28, 1964. *Jl. Geophys. Res.*, vol. 71, no. 1.
- SOLOVIEV, S. L. 1972. On earthquake and tsunami recurrence in the Pacific ocean (in Russian). *Tsunami waves, Proc. Sakhalin Compl. Sci. Res. Inst.*, no. 29, Yuzhno-Sakhalinsk.
- . 1975. An improved tsunami intensity scale. *Rept. Symposium on tsunamis, IUGG XV General Assembly, Grenoble, 1975*.
- ; GO, CH. N. 1974. *Catalogue of tsunamis on the west coast of the Pacific* (in Russian). Moscow, Nauka.
- ; ———. 1975. *Catalogue of tsunamis on the east coast of the Pacific* (in Russian). Moscow, Nauka.
- ; ZHUK, F. D. 1972. Possibility of recording of hydroacoustical waves of Pacific earthquakes at seismic stations of the U.S.S.R. (in Russian). *Tsunami waves, Proc. Sakhalin Compl. Sci. Res. Inst.*, no. 29, Yuzhno-Sakhalinsk.
- ; NEKRASOV, A. V.; BUCHTEEV, V. G.; PYASHOVSKIY, R. V. 1976. Materials for preliminary tsunami zoning of Kuril-Kamchatka coast based on hydrodynamical calculations. *Tsunami Research Symposium, Wellington, Paris*.
- STOKER, D. D. 1957. *Water waves. The mathematical theory and applications*. New York, Interscience publishers.
- TAKAHASHI, R. 1942. On seismic sea waves caused by deformation of the sea bottom (in Japanese). *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 20, no. 4.

- . 1945. On seismic sea waves caused by deformation of the sea bottom, 2nd Rept. (in Japanese). *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 23, nos. 1-4.
- . 1947. On seismic sea waves caused by deformation of the sea bottom, 3rd Rept. The one-dimensional source. *Bull. Earthqu. Res. Inst., Tokyo Univ.*, vol. 25, nos. 1-4.
- . 1963a. On the spectra and the mechanism of generation of tsunamis. *Proc. Tsunami Meet. Assoc. Tenth Pacif. Sci. Congr., Paris*.
- . 1963b. On some model experiments on tsunami generation. *Proc. Tsunami Meet. Assoc. Tenth Pacif. Sci. Congr., Paris*.
- TALANDIER, J. 1971. *Etude et prévision des tsunamis en Polynésie Française*. Laboratoire de physique de l'Ecole normale supérieure, Université de Paris.
- VITOUSEK, M. J. 1963. Proposed mid-ocean tsunami gage and oceanography instrument system. *Proc. Tsunami Meet. Assoc. Tenth Pacif. Sci. Congr., Paris*.
- . 1965. *An evaluation of the vibrotron pressure transducer as a mid-ocean tsunami gage*. Honolulu, Hawaii Institute of Geophysics (Report no. 13).
- ; MILLER, G. 1967. *Low-frequency wave study in the meso-deep ocean*. Honolulu, Hawaii Institute of Geophysics (Report no. 11).
- ; — . 1970. An instrumentation system for the measurement of tsunami in the deep ocean. *Tsunamis in the Pacific*, Honolulu.
- VOYT, S. S.; SEBEKIN, B. I. 1972. Some problems of tsunami wave propagation theory (in Russian). *Tsunami waves, Proc. Sakhalin Compl. Sci. Res. Inst.*, no. 29, Yuzhno-Sakhalinsk.
- ; — . 1973. On different excitation mechanisms of unsettled long waves in ocean (in Russian). *Tsunami waves, Proc. Sakhalin Compl. Sci. Res. Inst.*, no. 32, Yuzhno-Sakhalinsk.
- WATANABE, H. 1970. Statistical studies of tsunami sources and tsunamigenic earthquakes occurring in and near Japan-tsunami source, aftershocks and earthquake mechanism. *Tsunami in the Pacific*, Honolulu.
- WIEGEL, R. L. 1970. Tsunamis. In: *Earthquake engineering*. Englewood Cliffs (N.J.), Prentice-Hall.
- YAMASHITA, T.; SATO, R. 1974. Generation of tsunami by a fault model. *Jl. Physics of the Earth, Tokyo*, vol. 22, no. 4, p. 415-440.
- ZHAK, V. M.; SOLOVIEV, S. L. 1971. Telemetric recording of small tsunami type waves on the Kuril Islands shelf (in Russian). *Rep. Acad. Sci. U.S.S.R.*, vol. 198, no. 4.
- .; VELIKANOV, A. M.; SAPOZHNIKOV, I. N. 1972. Distant recorder of sea level (in Russian). *Tsunami waves, Proc. Sakhalin Compl. Sci. Res. Inst.*, no. 29, Yuzhno-Sakhalinsk.

6 Estudio de los terremotos en el terreno

Por N.N. AMBRASEYS

6.1 Introducción

Desde la primera reunión intergubernamental sobre Sismología e Ingeniería Sísmica que se celebró en 1964, se pone en evidencia cada vez más que el lugar en que se produce un terremoto que provoca daños o destrucciones constituye un laboratorio de tamaño natural, en el que un observador atento —sismólogo, geólogo, ingeniero, sociólogo o economista— puede hacer importantes descubrimientos. A medida que aumenta nuestro conocimiento acerca de la complejidad de los terremotos, adquirimos cada vez más conciencia de los límites que la naturaleza impone a nuestras posibilidades de prever, a partir de bases puramente teóricas, cuál será el comportamiento de las obras de ingeniería, del propio terreno o de una comunidad.

Todo progreso de nuestro saber acerca de la evaluación y disminución de los riesgos sísmicos ha de fundarse en el crecimiento de la masa de datos de observación fiables; es la única manera de aproximarnos a la situación ideal, en la que nos será posible utilizar de una manera plenamente provechosa nuestros conocimientos teóricos sin correr el riesgo de que nos induzcan a error ocasionalmente. Y eso puede lograrse estudiando los terremotos sobre el terreno.

El estudio de un terremoto sobre el terreno ofrece una oportunidad singular de comprender a fondo la situación verdadera creada por un desastre sísmico y, sobre todo, de comprender cuáles son los problemas reales que exigen una solución inmediata. Ese saber no se puede adquirir ni asistiendo a conferencias ni leyendo informes. Las misiones sobre el terreno permiten el intercambio de ideas entre los miembros de aquéllas, representantes de diferentes disciplinas, y comprobar las teorías *in situ*. Estas misiones proporcionan a las autoridades interesadas una evaluación imparcial de primera mano de la situación creada por el desastre, así como un valioso asesoramiento sobre las medidas inmediatas o a largo plazo que se han de tomar para normalizar la situación en la región afectada.

Tanto desde el punto de vista científico, como técnico y económico, el envío, lo más rápido posible, de una misión de especialistas al lugar en que se haya producido un terremoto está perfectamente justificado por el valor de la información de que se

podrá disponer así para atenuar futuros desastres. La evaluación de los riesgos sísmicos, muy necesaria en la mayor parte del mundo, no puede realizarse fundándose únicamente en los datos sismográficos de carácter local o mundial. En la mayoría de los países, las contadas estaciones sismológicas que funcionan son incapaces de localizar con exactitud los terremotos locales menores, que pueden causar daños tan intensos como las sacudidas más fuertes. Los estudios sobre el terreno de estos movimientos sísmicos menores, no sólo aportan nueva información, sino que resultan de un valor inapreciable, combinados con los datos medidos con los instrumentos, para reducir las desviaciones al determinar los parámetros focales. Sólo por medio de estudios sobre el terreno, realizados de una manera adecuada, pueden descubrirse y analizarse las deformaciones y las fallas del terreno debidas a un terremoto, y evaluarse cómo influyen sobre los riesgos locales. Sólo después de un terremoto puede verificarse lo fundado de los códigos y reglamentos de construcción en vigor, así como la eficacia de su observancia y aplicación. Gracias a estudios sobre el terreno, bien concebidos y eficientes, pueden determinarse las repercusiones económicas y sociales de un desastre sísmico, de forma que los futuros terremotos no tengan las consecuencias que se desean evitar.

Son igualmente importantes los estudios sobre el terreno de los grandes terremotos ocurridos mucho antes de que existiera la sismología moderna. Han sido centenares los terremotos que han producido daños o destrucciones, sobre los cuales no se posee documentación alguna y cuyos efectos se conocen mal o se desconocen totalmente. Siendo así el caso, nada tiene de sorprendente que muchas estimaciones de la sismicidad sean incompatibles, a escala inferior a la global, con la tectónica local y sean de poca utilidad para evaluar los riesgos sísmicos locales. Los «terremotos sorpresa», como los de Agadir, Barce, Skopje, Toro y, más recientemente, Lice (Turquía), demuestran lo poco que sabemos de los riesgos latentes en zonas que son hoy día sísmicamente inactivas. Un estudio minucioso de los antecedentes relativos a un largo periodo de la historia podría ser útil para orientar los estudios sobre el terreno de zonas afectadas por antiguos terremotos devastadores y de fallas representativas de una actividad tectónica geológicamente reciente.

Muchos de los terremotos históricos de Irán, los más conocidos se encuentran relatados en prosa y en verso, tales como los de Tabriz, Shiraz Nishapur, Kashan, Lar y Bandar 'Abbas. No necesariamente fueron eventos de gran magnitud. Aunque devastaron áreas de gran densidad de población próximas a sus epicentros, no hay evidencias históricas de que la destrucción fuera generalizada. Los terremotos del 25 de junio de 1824 y del 4 de mayo de 1853, que causaron tantos daños en Shiraz, fueron posiblemente eventos de baja o moderada magnitud; se sintieron en Bushire, donde causaron alarma pero a unos 300 km, en Ahwaz e Ispahán pasaron inadvertidos. Estos sismos son indudablemente muy importantes para la evaluación del riesgo sísmico local y deberían estudiarse con mayor detalle.

No obstante, desde el punto de vista sismológico estos sismos destructivos y muy locales son de poco interés para el conocimiento de la tectónica regional o global. Se debe esperar que ocurra un sismo de magnitud 6 de promedio cada semana en algún punto de la corteza terrestre. Cuando ocurren cerca de centros poblados pueden cobrar muchas víctimas. El terremoto del 29 de febrero de 1960 en la ciudad de Agadir ocasionó más de 10 000 muertos y apenas fue sentido a unos 30 km de distancia, aunque su magnitud fue algo mayor de 5.5. El terremoto de Skopje en 1963, de magnitud cercana a 6, causó 1000 muertos y daños materiales

ascendentes a unos 500 millones de dólares. El epicentro de este sismo estuvo localizado en el centro de la ciudad, pero apenas se sintió a unos 40 km de distancia. El terremoto que arruinó Managua en 1972, tenía sólo una magnitud de 5.7, causó la muerte de unas 5 000 personas, y se estimaron los daños materiales en unos 500 millones de dólares.

Los terremotos de esta magnitud pueden pasar a veces inadvertidos en regiones donde las poblaciones son muy dispersas. Incluso los eventos de mayor magnitud pueden pasar desapercibidos si se originan en áreas desérticas o muy alejadas de la costa, si es que los estudios para su identificación no son exhaustivos y completos. Un ejemplo típico fue el terremoto del 27 de noviembre de 1945, de magnitud 8.0 que ocurrió frente a la costa de Makran, a unos 285 km al este de Chah Bahar. Con excepción del catastrófico tsunami que inundó la costa unos 15 a 30 minutos después del terremoto, no dejó ni la menor huella.

6.2 Las misiones de exploración sísmológica de la UNESCO (1962-1974)

Durante el periodo transcurrido desde la primera misión de exploración sísmológica de la UNESCO, desarrollada en el Irán en 1962, se han producido lamentablemente diecinueve desastres sísmicos que, a juicio de la UNESCO, justificaban el envío de misiones (tabla 6.1).

Estos terremotos han producido la muerte de unas 94 000 personas y daños a los bienes por valor de 1800 millones de dólares. Con el visto bueno de los gobiernos interesados, la UNESCO envió 19 misiones, cuya duración total se elevó a 1200 días-hombre aproximadamente. También participaron en los trabajos de esas misiones de exploración, con una proporción algo mayor de días-hombre que las misiones propiamente dichas, sísmólogos, geólogos e ingenieros de los países a los que se enviaron las misiones. La composición de estas misiones, dictada por las exigencias de las propias catástrofes y por las disponibilidades de expertos, ha sido la siguiente: 22 % eran sísmólogos, 28 % geólogos y 50 % ingenieros; estos expertos procedían de Colombia, Checoslovaquia, Chile, Estados Unidos, Francia, Grecia, Irán, Italia, Japón, Kenia, México, Nueva Zelanda, Reino Unido, Rumania, URSS, Venezuela y Yugoslavia.

A continuación se presentan algunos resúmenes de los informes de las misiones de reconocimiento de la UNESCO. Contienen observaciones que han promovido considerablemente las investigaciones, a la vez que han esclarecido algunos efectos poco conocidos de los terremotos.

6.2.1 *El terremoto de Toro*

El terremoto de Toro se produjo el 20 de marzo de 1966 en el extremo norte de Ruwenzori, Uganda, y causó más de 150 muertos, 1300 heridos y seria destrucción en más de 6000 viviendas. Las cifras de los daños materiales fueron del orden del millón de libras esterlinas. Este movimiento fue el más desastroso de toda la historia de Uganda, en lo que respecta al número de víctimas y al de los daños ocasionados.

La magnitud fue 6.7 – 7.0 y la intensidad máxima alcanzó el grado VIII de la

Tabla 6.1. Misiones de exploración sísmica de la UNESCO (1962-1975)

Fecha	Localidad	País	Magnitud del sismo	Nº de víctimas	Daños (millones) de \$ USA	Composición, duración en días-hombre e intervalo transcurrido hasta la llegada de la misión en días	Fecha y número de serie de la publicación respectiva de la UNESCO
1 sept. 1962	Buyin-Zara	Irán	7.2 ¹	12,225	30.0	56E 25	Dic. 1962 Internal Report
21 feb. 1963	Barce	Libia	5.6	290	5.0	59E 57	Ago. 1965 WS.0865.76-AVS
26 jul. 1963	Skopje	Yugoslavia	6.0	1,070	500.0	28S + 29G + 44E 12	Dic. 1963 WS.1063.76-AVS
17 may. 1966	Toro	Uganda	6.4 ¹	200	1.0	15G 16	Jul. 1966 WS.0766.127-AVS
19 ago. 1966	Varto	Turquía	6.8 ¹	2,520	28.0	16S + 21E 20	Feb. 1967 WS.0267.81-AVS
17 oct. 1966	Lima	Perú	7.6	105	38.0	12S + 18E 21	May. 1967 49.BMS.RD-AVS
22 jul. 1967	Mudurnu	Turquía	7.1 ¹	86	30.0	24S + 28E 15	Jun. 1968 622.BMS.RD-AVS
29 jul. 1967	Caracas	Venezuela	6.5	225	88.0	29S 8	May. 1968 571.BMS.AD-AVS
10 dic. 1967	Koyna	India	6.5	108	24.0	59S + 81G + 109E 39	Sep. 1969 1519.BMS.RD-AVS
1 ago. 1968	Luzón	Filipinas	7.5	216	60.0	28S + 38E 11	Ene. 1969 977.BMS.RD-SCE.NR
31 ago. 1968	Dashr-e Bayaz	Irán	7.1 ¹	12,000	26.0	60S ² + 34G + 44E 7	May. 1969 1214.BMS.RD-SCE
26 oct. 1969	Banja Luka	Yugoslavia	6.3	12	—	28E 2	Jun. 1970 1919.BMS.RD-SCE
8 mar. 1970	Gediz	Turquía	7.1 ¹	1,100	97.0	32G + 48E 9	Dic. 1970 Internal Report
7 abr. 1970	Luzón	Filipinas	7.2	14	2.0	10E 48	Dic. 1970 2220.BMS.RD-SCE
31 may. 1970	Ancash-Chimbote	Perú	7.5	52,000	507.0	81G —	Dic. 1970 2208.BMS.RD-SCE
30 jul. 1970	Karnaveh	Irán	6.7	220	8.0	14G + 14E 10	Abr. 1971 2380.RMO.RD-SCE
10 abr. 1972	Ghir	Irán	6.2	5,400	5.0	20G + 20E ³ 13	Oct. 1972 2789.RMO.RD-SCE
23 dic. 1972	Managua	Nicaragua	5.6 ¹	5,000	500.0	5S + 5E 27	Feb. 1973 Internal Report
28 dic. 1974	Pattan	Paquistán	6.4	1,000	2.0	18G + 30E ³ 28	Oct. 1975 FMK/SC/GEO/75/134

1. Sismos asociados con la aparición de fallas.

2. Red radiotelefónica en funcionamiento en la zona epicéntrica.

3. Red de acelerógrafos de fuertes intensidades instalada por la misión.

4. S: sismólogos; G: geólogos; I: ingenieros.

escala Modificada de Mercalli (MM). El movimiento principal estuvo antecedido de premonitorios y seguido de numerosas réplicas, algunas de gran intensidad.

Este sismo, que estuvo asociado con un movimiento de falla, se sintió en todo el territorio de Uganda y con gran violencia en su frontera occidental. El área de mayor destrucción estuvo centrada en las pequeñas localidades de Bubukwanga, Busaru y Bubandi, del distrito de Bwamba en la jurisdicción de Toro y en la parte colindante con la República Democrática de Congo (hoy Zaire). Otros daños se observaron en el límite nordeste de Ruwenzori.

El terremoto ocurrió en la zona marcadamente sísmica de la fosa tectónica occidental, donde ya se habían registrado numerosos sismos y donde se esperan otros de gran magnitud. Los epicentros de las numerosas réplicas estuvieron localizados a ambos lados de Ruwenzori, en Bwamba y Fort Portal, en la zona de gran sismicidad. El distrito de Bwamba es particularmente vulnerable a la acción de los sismos, por estar situado sobre una zona de sedimentos no consolidados, y se deberían tomar precauciones para el caso de futuros desastres.

6.2.2 *El terremoto de Varto*

El terremoto de Varto-Ustükran, ocurrido el 19 de agosto de 1966 en la parte oriental de Turquía, fue precedido y seguido de fuertes movimientos que ocasionaron severos daños en un área aproximada de 4000 km². La región había estado en calma por espacio de 20 años y era bien conocida por su sismicidad.

Una vez más, se encontró que la construcción local no era adecuada para resistir a las fuertes sacudidas del terreno, y bastó una intensidad cercana al grado VII (MM) para que causara una destrucción casi total. Los fuertes movimientos premonitorios y los daños ocasionados hicieron casi imposible evaluar la distribución de intensidad del sismo principal del 19 de agosto en el área epicentral.

Las estructuras de hormigón armado, algunas de diseño antisísmico, cedieron debido a la fabricación defectuosa y a la pobre calidad de los materiales empleados, mientras que las casas de construcción local enclavadas en los mismos emplazamientos sólo sufrieron daños leves, lo que señala la necesidad de mejorar los materiales, los métodos de construcción y los de diseño. Sobre todo, es el comportamiento de las estructuras lo que instruye a los constructores locales sobre el uso apropiado de los nuevos materiales de construcción, más que los códigos perfeccionados y los reglamentos.

En una de las conclusiones de la misión de reconocimiento, se señaló que la intensidad de los pasados terremotos en los países en desarrollo había sido sobreestimada sistemáticamente, en parte porque las construcciones de adobe no daban una pauta para evaluar las intensidades mayores que un grado VII (MM) y también porque tampoco eran indicadores de una alta intensidad los efectos del sismo en el terreno, tales como deslizamientos y desplomes de rellenos saturados, fenómenos que ocurren en condiciones normales.

6.2.3 *Terremoto de Mudurnu*

El terremoto acaecido en 1967 en el valle de Mudurnu se produjo en la parte

centro-occidental de la zona de falla de Anatolia y estuvo asociado cuando se produjo a un fallamiento de superficie. Unos 25 km de la parte más oriental de la falla están situados en una zona que se dislocó unos diez años antes, y fue evidente que las nuevas fracturas no seguían el patrón de alineamiento observado durante el terremoto de 1957. Los siguientes 20 km de falla se encuentran en una zona en la cual las evidencias geológicas sugieren movimientos tectónicos muy recientes, pero tampoco en este tramo las orientaciones de las nuevas fracturas coincidieron con las fallas cartografiadas. El resto de la fractura, que se extendía hacia el oeste otros 40 kilómetros, ocupaba una región en la que antes de este terremoto no se tenían indicios de fallamiento muy reciente; y aunque se podría haber sospechado que la falla continuaba hacia el oeste, no se encontró ninguna evidencia al respecto. Las rupturas de superficie no fueron ni continuas a lo largo de toda la falla, ni siguieron el rumbo de las fallas cartografiadas. Parecía que seguían más bien un camino de resistencia mínima dentro de una zona comparativamente amplia de cizallamiento, de unos 3 km de ancho y 50 km de longitud, con desplazamientos laterales de la zona a través de un plano de debilidad de cizallamiento. En este lugar se observó una distribución *en echelon*, a gran escala, bien desarrollada. A lo largo de una longitud de 35 km los planos de cizallamiento *en echelon* mostraban notables rasgos tensionales que se habían formado en ángulo agudo al eje del movimiento, y escalonándose a la izquierda, señalaban con sus ápices la dirección de desplazamiento relativo, distribución concordante con un movimiento de desgarre lateral derecho de la zona de falla. Relacionados con las cizallas *en echelon* hubo rasgos tectónicos de tensión y fosas tectónicas y en las fracturas de desplazamiento se detectó por lo menos un caso de accidentes de compresión. El eje del desplazamiento relativo fue arqueado y el ángulo que formaba con los cizallamientos *en echelon* no excedía unos 15 grados. Los mapas hechos a una escala menor de 1:25 000, tendían a ocultar los detalles del patrón del cizallamiento, apareciendo las trazas como continuas y suavizadas. El sentido del movimiento a lo largo de la línea de ruptura fue lateral derecho, con hundimiento del lado norte. La magnitud de los desplazamientos relativos en sentido lateral derecho variaba desde unos cuantos cm hasta unos 190 cm y el hundimiento llegó a ser de 120 cm. Estas mediciones se hicieron en grietas simples o a través de zonas de fractura estrechas. Por desgracia no hubo tiempo para repetir las mediciones, ni facilidades para triangular y hacer un nuevo levantamiento topográfico de la zona de falla. No obstante, se encontró alguna evidencia de que los movimientos acumulados de desgarre a través de la zona de falla fueron mucho mayores que los que se midieron en sus inmediaciones.

Gran parte de los rasgos distintivos del fallamiento se observaron en el aluvión, en los detritus o en el manto delgado de suelo que cubría la roca. Estos rasgos reflejaban las deformaciones permanentes del substrato rocoso subyacente, modificadas por las presencia y la respuesta dinámica de la cobertera a los súbitos reajustes de la roca. Los desplazamientos horizontales relativos en la roca, donde se observaron, fueron mucho menores que en el aluvión e indicaban no sólo que los desplazamientos del aluvión contenían un cierto factor dinámico, sino también que las roturas observadas podían ser resultado de las sacudidas y de la sujeción impuesta por el relieve del substrato rocoso. Las grietas de tensión, las más fáciles de detectar, fueron quizás los primeros rasgos en formarse, mientras que los rasgos de compresión, más difíciles de distinguirse, sólo se hacían patentes en desplazamientos relativamente grandes.

En las inmediaciones de la zona de falla se encontró que los daños causados por el movimiento eran iguales o menores a los producidos a unos 20 km de distancia y las estimaciones de intensidad en la zona de falla fueron tan variables que fue casi imposible delinear las isosistas, en particular, cerca de la falla. Las únicas isosistas que pudo apreciar la Misión de Reconocimiento, fueron las correspondientes al grado VII (MM), no encontrándose razón para estimar una intensidad más alta en las proximidades de la falla. En algunos casos, los daños ocurridos en esas inmediaciones fueron iguales e incluso menores que los producidos a cierta distancia; la estabilidad de los cimientos y el tipo de construcción fueron los factores determinantes, más que la proximidad de la falla.

6.2.4 *Terremoto de Caracas*

La destrucción del 29 de julio de 1967 fue causada por un sismo de magnitud moderada que estuvo localizado frente a la costa de Venezuela, al norte de Caracas, a una profundidad de unos 100 km. La enorme cantidad de edificios grandes, la calidad satisfactoria de los materiales y de la ejecución y los pocos daños directamente atribuibles a detalles defectuosos, hicieron que este terremoto brindara una magnífica oportunidad para sacar conclusiones sobre el comportamiento general de las estructuras a partir del estudio de sus efectos.

La influencia negativa de plantas bajas libres en edificios de varios pisos (la rigidez y resistencia de los pisos altos son mucho mayores que las de planta baja) ya había sido observada en temblores previos. De los cuatro edificios que se desplomaron en Caracas se sabe que, cuando menos, uno tenía planta baja libre y once niveles superiores con una cantidad importante de muros de relleno. Es probable que buena parte de los edificios que quedaron en pie, aunque con daños serios en los muros, debiera su estabilidad a la absorción de energía por parte de los muros. Los estudios analíticos sobre el comportamiento de estructuras elastoplásticas ante temblores señalan que, con factores de ductilidad menores de 10, las deformaciones máximas de estructuras elastoplásticas coinciden con las que ocurren en estructuras rígidas de igual periodo natural y comportamiento lineal. En cambio, si se desarrollan factores de ductilidad mayores, las deformaciones de la estructura elastoplástica resultan en general superiores a las de la estructura elástica correspondiente. Si la carga de los materiales del diseño es muy baja y si la flexibilidad es excesiva, además del fenómeno mencionado ocurre que la estructura no se comporta siguiendo una ley elastoplástica, sino que presenta reducciones importantes de su capacidad al aumentar las deformaciones, como consecuencia de los efectos de esbeltez. Esto aumenta notablemente el grado de desplazamiento máximo a esperar y la probabilidad de colapso. Por ello es conveniente imponer una cota inferior al valor del coeficiente sísmico que se adopte en edificios de periodos largos, construidos en zona de sismicidad moderada o baja. Toda medida de resistencia lateral deberá ir complementada por otra relativa o desplazamientos máximos admisibles. Esto cumple dos funciones: limitar daños en elementos no estructurales y reservar las curvas esfuerzo-deformación a deformaciones comprendidas dentro de unos límites aceptables de la región elastoplástica.

La conocida controversia entre ductibilidad y fragilidad se ilustró durante el temblor con ejemplos de características especiales no vistas antes y que se refieren a

problemas usualmente ignorados en el diseño, pero que un análisis más cuidadoso hubiera podido prever. El caso del hotel de Caraballeda, cuyas columnas de 1.20 m de diámetro se fallaron espectacularmente en fracturas de tensión diagonal, es el ejemplo más obvio de la necesidad de impedir las posibles fracturas frágiles, diseñando contra ellas con factores de seguridad más elevados que ante fallas alternativas de tipo dúctil.

6.2.5 *El terremoto de Dasht-e Bayaz*

El terremoto de Dasht-e Bayaz ocurrió el 31 de agosto de 1968 en la parte centro-oriental del Irán, en la provincia de Khorasan, no lejos de la zona donde tuvieron lugar probablemente los sismos destructores del siglo nueve. Este terremoto, que tuvo una magnitud de 7.5, se sintió en un área aproximada de 900 000 km² y fue seguido de numerosas réplicas. Ocurrió en una zona poco habitada, situada en la antigua ruta comercial que va desde el oeste a Beluchistán y a Bandar 'Abbas, en el golfo Pérsico. La sacudida principal y sus réplicas afectaron un área cercana a los 10 000 km² con densidad de población de 9 personas por km². No se conoció el número exacto de muertos, que osciló probablemente entre 7000 y 12 000.

Fueron afectados unos 180 pueblos, quedando destruidas o sin posibilidad de ser reparadas unas 12 000 viviendas, lo que ocasionó que unas 70 000 personas se encontraran sin hogar.

El terremoto estuvo asociado a un agrietamiento a lo largo de 80 km con numerosas ramificaciones. El movimiento de falla tuvo un rumbo lateral izquierdo, con hundimiento del lado norte. Los desplazamientos relativos máximos que se midieron fueron de 450 cm en sentido lateral y de 250 cm en sentido vertical. La traza de falla seguía, en toda su longitud, los rumbos de las fallas antiguas, que mostraban numerosos indicios de actividad durante el cuaternario y en época reciente; la traza quedó evidenciada por arqueamientos de las laderas, desplazamientos de los lechos de río y de las galerías (qanats) de abastecimiento de agua, por escarpes en los aluviones y por *hog backs* erosionados. En terreno rocoso pasó a través de las zonas de milonita y brechas de falla. Las rupturas secundarias que se ramificaban de la principal, seguían el rumbo de antiguas fallas, observándose desplazamientos desde una fracción hasta decenas de centímetros. Casi todas las fallas geológicas situadas en las inmediaciones de la falla principal mostraban desplazamientos pequeños y discontinuos pero perceptibles. La superficie principal de fallamiento, que se muestra en la figura 6.1, no fue continua en toda su extensión, y en todas partes los desplazamientos fueron diferentes. En los depósitos aluviales y coluviales, aparecía una distribución de fracturas *en echelon* desarrolladas a gran escala. Las fosas tectónicas y otros rasgos característicos de esfuerzos de tensión, las lomas alargadas de compresión y las trazas de falla en el aluvión que se asemejaban a pisadas de un topo gigantesco (moletacks) se correspondían bien con un fallamiento lateral izquierdo. Las roturas en la roca mostraban desplazamientos aparentemente mucho menores. En la parte expuesta de la falla se podían apreciar estriaciones y espejos muy pulidos.

Al sur de la falla principal, en el valle de Numbluk, se observaron extensas deformaciones del terreno, y aunque no se pudo probar que tuvieran un origen tectónico, fueron de interés por la uniformidad de su distribución. Esas deformacio-

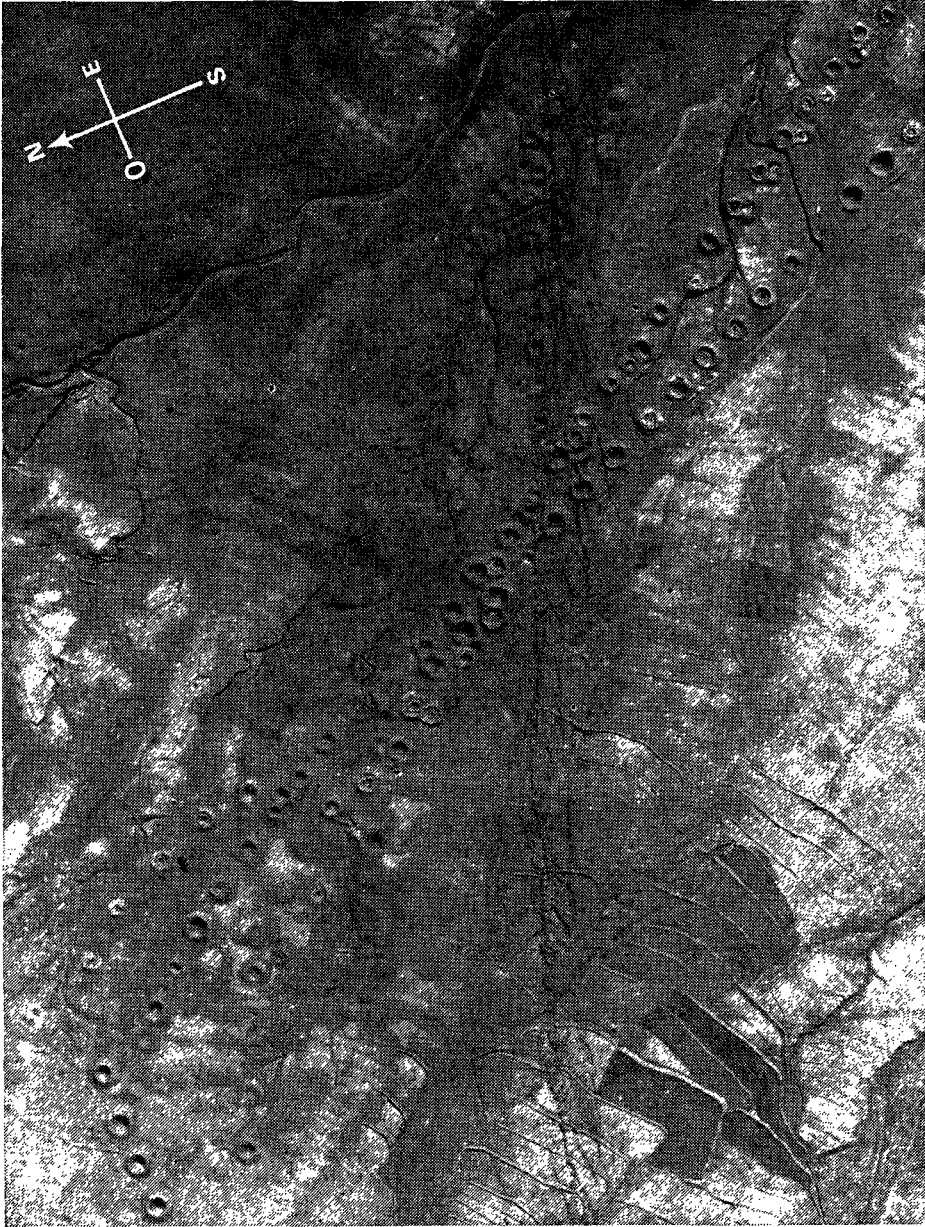


Figura 6.1. Traza superficial de la falla del terremoto de Dasht-e Bayaz (Irán) del 31 de agosto de 1968. Esta fotografía aérea cubre un área de aproximadamente 1200 por 900 metros.

nes se produjeron en una amplia zona, dentro de la cual quedaron inclinadas y escalonadas, con escaso movimiento horizontal, grandes lajas aplanadas de terreno desértico, muchas con un espesor de decenas de metros. En varios lugares abunda-

ban los cráteres de barro, y de las grietas hubo emanación de limos y arenas que cubrieron grandes extensiones de esos llanos.

La misión de UNESCO demostró el valor que tienen los trabajos detallados de campo y el estudio de los microtemblores que se registraron en cinta magnética en un sismógrafo de tres componentes, siempre que se conozca o bien la velocidad de propagación en las capas de la corteza (o sea, la estructura), o de qué manera se distribuyen las estaciones para obtener una óptima información de esa velocidad. Este estudio fue uno de los primeros ensayos para encontrar los parámetros de las microrréplicas originadas en la región sísmica alpídica y un medio para poder clasificar las microrréplicas de esa región, procedimiento que fue adoptado con éxito por la Universidad de Mashad.

6.2.6 *Terremoto de Manila*

Un intenso terremoto centrado cerca de la ciudad de Manila ocurrió el 7 de abril de 1970, unos veinte meses después de que otro sismo comparable sacudiera esa ciudad. Tuvo una magnitud de 7.2 y el epicentro estuvo localizado a unos 180 km al nordeste de Manila.

Se desplomó el edificio de una escuela de tres pisos, por fortuna sin que hubieran pérdidas de vidas. Muchos edificios de la ciudad sufrieron daños estructurales y no estructurales de consideración y otros quedaron tan maltratados que era inminente su caída.

En el transcurso de los veinte meses anteriores al movimiento de abril de 1970, fueron objeto de diversas reparaciones los edificios que habían sufrido graves averías con el terremoto de 1968. Dos de ellos se habían demolido y otro esperaba demolición. Algunos de los edificios se habían reforzado con muros resistentes a los esfuerzos de cizalla y en otros se habían comenzado o estaban a punto de empezarse las reparaciones y los refuerzos. El terremoto de 1970 proporcionó una valiosa información sobre el empleo de los muros o arriostras resistentes a los esfuerzos de cizalla para aumentar la resistencia a las fuerzas sísmicas. Por lo general, los resultados fueron satisfactorios a pesar de que surgieron problemas inevitables, debido a que los edificios no estaban preparados para incorporar esas arriostras. Cuando en el diseño de edificio porticados se incluyeron arriostras cortas, se dijo que se había logrado una contribución efectiva a la resistencia a los sismos.

La observación de los daños causados en los edificios dejó entrever que los dos terremotos tuvieron características diferentes. Las aceleraciones en el terremoto de 1970 fueron probablemente de periodo más corto que las de 1968 y las aceleraciones más intensas del último terremoto fueron probablemente las orientadas en una dirección noroeste a sureste, es decir, en una dirección perpendicular a la de la mayor sacudida del sismo de 1968.

6.2.7 *Terremoto de Karnaveh*

El terremoto de Karnaveh se produjo el 30 de julio de 1970 en la parte nororiental de Irán, en lo que se llama el Shra-i-Turkman Oriental, una zona aislada y poco poblada situada al sur del río Atrek. El movimiento sísmico se percibió en un área

aproximada de 100 000 km², y al mismo le siguieron unas cuantas réplicas de ligera magnitud, que apenas incrementaron los daños ya causados.

La sacudida principal afectó a un área de unos 7000 km², con densidad de población de 2 por km², y aunque no se llegó a conocer de manera exacta el número de muertos, se estimó que fueron entre 180 a 250 personas. Hubo más de 450 heridos y quedaron destruidas o dañadas unas 2000 viviendas de 40 pueblos y colonias.

El terremoto ocurrió muy de mañana, cuando la mayor parte de los hombres se habían congregado en los patios descubiertos para las oraciones matutinas y esa fue la razón de que sólo muriesen mujeres y niños.

Con muy contadas excepciones, todas las casas de la región afectada son construcciones de ladrillos de adobe o de adobe continuo, con techos planos hechos con vigas de madera y cubiertos con una mezcla de paja y barro. Ninguna otra edificación a excepción de unas cuantas casas bien construidas, pudo servir para evaluar la intensidad. Así, sólo con el comportamiento de las casas de la región durante el sismo, la misión no pudo determinar intensidades mayores que VII (MM).

6.2.8 *Observaciones generales*

En general, los dispositivos previstos por la Secretaría de la UNESCO para organizar y enviar las misiones han funcionado satisfactoriamente en esas ocasiones. Ahora bien, en la tabla 6.1, puede observarse que el objetivo establecido por la anterior conferencia intergubernamental, que fijaba la llegada de la misión al lugar del sismo en 72 horas, después de que éste se registrase, no se ha alcanzado en ningún caso. Con muy pocas excepciones, la demora real, debida principalmente a la necesidad de conseguir que el gobierno del país interesado autorizara el envío de la misión, ha sido de unas tres semanas.

Menos satisfactorias han resultado las gestiones realizadas por los representantes locales de las Naciones Unidas y la UNESCO, para entrar en relación con los servicios gubernamentales y las instituciones científicas y técnicas competentes, y para conseguir materiales tales como mapas y fotografías aéreas, así como las autorizaciones necesarias para que las misiones pudiesen realizar su labor. Una de las tareas más difíciles del Representante Residente del PNUD ha consistido en lograr el despacho de aduanas de los equipos (deformímetros, equipo sismológico e instrumentos de medición de movimientos sísmicos de gran intensidad). Sólo en el caso de una misión se pudo transportar por vía aérea y desplegar en la zona epicéntrica del sismo una red completa de instrumentos sismológicos conectados por radio, para estudiar las réplicas que se registraran después del terremoto; recientemente dos misiones pudieron realizar un trabajo efectivo porque los especialistas transportaron, como equipaje personal, un juego de instrumentos para la medición de grandes intensidades sísmicas para instalarlos temporalmente en las zonas afectadas.

Aunque el plazo medio necesario para imprimir y distribuir los informes de las misiones es de 6 a 8 meses después de producirse los acontecimientos, la UNESCO ha publicado más de 20 informes de exploración sismológica sobre el terreno de considerable interés y valor. Estos informes son detallados y objetivos y abarcan una amplia gama de puntos de interés. En la mayor parte de los informes se han tratado de la manera más completa posible los aspectos sismológicos, geológicos y de

ingeniería y, con menor extensión, los aspectos sociales y económicos de los sismos.

Es verdad que pocos de estos informes son bien conocidos. El sistema actual de distribución parece ser inadecuado, puesto que no todos los informes llegan a todos aquellos para los cuales serían interesantes y valorados.

Sea como fuere, cabe dar por sentado que las misiones de exploración sismológica de la UNESCO han estimulado, en los lugares a donde se han enviado, el interés por el estudio de los terremotos y por la atenuación de los desastres que traen consigo. En muchos casos han contribuido a crear el ambiente necesario para que se emprendieran investigaciones en el país, no sólo en materia de ingeniería sísmica, sino también de sismología y tectónica. En ciertos casos, a las misiones de exploración sismológica siguieron seminarios y series de conferencias, patrocinados por la UNESCO, que hicieron comprender, sobre todo a los encargados de tomar decisiones políticas al respecto, la necesidad de realizar estudios para prevenir los desastres. Además, las conclusiones de la mayor parte de las misiones enviadas por la UNESCO han aportado una contribución importante, no sólo al conocimiento de los terremotos y de sus efectos, sino también en lo que respecta a las maneras y los medios de atenuar los desastres utilizando los materiales y los métodos de construcción locales. Los especialistas que han participado en las misiones de la UNESCO han contribuido de una manera significativa a demostrar la importancia de la tectónica y de la formación de fallas para evaluar los riesgos sísmicos y han cooperado activamente a la cartografía de los rasgos tectónicos más sobresalientes, así como a recoger una valiosa información sobre los terremotos del pasado.

6.3 Enseñanzas deducidas de las misiones recientes

De la experiencia adquirida por las misiones de exploración sismológica que se citan en la tabla 6.1 se desprenden las siguientes sugerencias:

1. Durante la primera semana o los primeros diez días de su presencia sobre el terreno, la misión debería estar compuesta por cuatro personas como máximo, una de las cuales sería designada jefe por la UNESCO.
2. Se debería proporcionar a la misión el material necesario, así como los medios de transporte y suministros adecuados, de modo que no necesite recibir ningún tipo de ayuda al desplazarse por la zona dañada, al menos durante diez días. La misión no debería depender, en ningún caso, de las posibilidades locales en cuanto a manutención, transporte y alojamiento.
3. Ha de quedar bien sentado que, si el material necesario, como son: buenos mapas topográficos (1:100 000 o más detallados), mapas geológicos y fotografías aéreas, no se pone a disposición de la misión a su llegada y sin demora, se desperdiciará gran parte de su labor. También se han de facilitar a la misión los planos de las ciudades, los códigos y los reglamentos de construcción y las estadísticas demográficas.
4. Deberían adscribirse a la misión, en función del número de sus componentes, expertos locales e intérpretes en número suficiente.
5. Es prácticamente imposible que las misiones preparen mapas realistas de la distribución de las intensidades de toda la región afectada por el sismo. Aparte de que, si tratara de prepararlos, interferiría en la labor del organismo sismológico

central del país, la misión no dispone ni del tiempo ni de los medios necesarios para visitar todos los lugares afectados, o para entrevistarse con los observadores posibles, mediante un intérprete, con la sola finalidad de evaluar las intensidades. En lugar de ello, la misión debería encargarse de evaluar las intensidades según la escala de Mercalli Modificada, únicamente por lo que respecta a los lugares sobre los cuales dispone de información suficiente.

6. La instalación y el funcionamiento adecuado de una red portátil de estaciones sismológicas es muy conveniente. Ahora bien, los problemas de orden logístico, administrativo y financiero que plantea una operación de este tipo superan por ahora las posibilidades de la UNESCO. Se podría proporcionar a los centros sismológicos regionales el equipo necesario, que esos centros se encargarían de mantener en buen estado y dispuestos para ser enviados inmediatamente al lugar que proceda. Se trata de una empresa de envergadura, pero perfectamente posible. Lo que no se puede prever es si el país interesado podrá dar la autorización para utilizar esos instrumentos dentro de un plazo lo suficientemente breve para que se puedan registrar las réplicas, especialmente si, como debería ser, se trata de instrumentos enlazados por radio.
7. Sería, pues, preferible que las misiones llevaran consigo acelerógrafos, que de ser posible, registraran un tiempo real, y que utilizaran esos instrumentos de una manera más sistemática que lo han hecho hasta ahora.
8. Cada misión tiene que ejecutar tareas diferentes y no hay ninguna regla general en virtud de la cual pueda decirse por adelantado cuál habrá de ser su composición; la única válida es la que se deduce de las necesidades reales. La composición de una misión puede diferir de un terremoto a otro, según que la zona dañada sea una aglomeración urbana y reducida (Barce, Skopje, Lima, etc.), una zona rural y extensa (Buyin, Varto, Ghir, etc.), o de difícil acceso (Toro, Pattan, etc.). La UNESCO debería cerciorarse de que la composición inicial de una misión corresponde perfectamente a la situación local; si tal no fuere el caso, su composición debería modificarse lo más rápidamente posible. Por ejemplo, en el caso de una zona urbana bien delimitada, la labor del ingeniero de la misión superaría las posibilidades de un solo hombre. En este caso, los aspectos relacionados con la ingeniería deberían ser estudiados por un grupo compuesto por dos o tres personas, traído inmediatamente después de la llegada de la misión, y que trabajase de una manera bastante independiente de los geólogos. En el caso de una región rural poco poblada, en la cual se descubra que el terremoto va acompañado de la formación de fallas o de desprendimientos importantes de tierras, predominan los aspectos geológicos del sismo, que deberían ser estudiados por un grupo ampliado de geólogos, traídos especialmente para este fin. Debería tratarse de evitar situaciones como la que se dio recientemente con motivo de una misión compuesta por dos expertos en ingeniería de las estructuras, especializados en la construcción de rascacielos y un sismólogo teórico (sin un solo instrumento en un radio de 1000 kilómetros), encargados de estudiar los daños sufridos por casas de adobe y de representar muchos kilómetros de fallas en un mapa de carreteras, con ayuda de un experto del país que no hablaba el dialecto local. Se amplió la misión y se modificó su composición con la celeridad suficiente para que su informe fuese finalmente uno de los mejores informes de misión.

6.4 Objetivos y alcance de las misiones

Las misiones de exploración sismológica deberían organizarse de manera que constituyeran un medio rápido y eficaz para estudiar lo más completamente posible los aspectos geológicos, sismológicos, de ingeniería, sociales y económicos de un terremoto reciente o antiguo.

El objetivo perseguido con el estudio de los sismos sobre el terreno, consiste fundamentalmente en investigar las causas y los efectos de esos fenómenos con el propósito de ampliar el acervo de conocimientos científicos y técnicos, necesarios para mitigar sus desastrosas consecuencias.

Es esencial que la UNESCO trate de conseguir por adelantado un acuerdo de principio de los gobiernos de países sujetos a riesgos sísmicos, en el sentido de que estuvieran interesados en recibir misiones de la UNESCO si se produjeran terremotos en sus países respectivos.

Para organizar adecuadamente los estudios sismológicos sobre el terreno, sería necesario que se creara un servicio especial, en la sede de la UNESCO, que se encargaría de decidir si un terremoto es o no lo bastante importante como para justificar el envío de una misión y, en caso afirmativo, de seleccionar a los miembros de la misión y de organizar su envío al lugar del siniestro.

La decisión de la Secretaría de la UNESCO de ofrecer o no, al gobierno del que se trate, el envío de una misión al lugar del sismo, se fundará en las informaciones recibidas de los representantes locales de la UNESCO y de las Naciones Unidas, de los centros sismológicos nacionales e internacionales, de las agencias de prensa y de otras fuentes de información. Ello no excluye, claro está, la posibilidad de que el propio gobierno tome la iniciativa de pedir a la UNESCO el envío de una misión.

Aunque la UNESCO podrá pedir a determinados expertos que se mantengan prestos para intervenir tan pronto como se reciba la noticia de que se ha producido un terremoto importante, no enviará misión alguna sobre el terreno, si el gobierno del país afectado no se lo pide o conviene en ello oficialmente.

Ahora bien, habida cuenta de la necesidad de intervenir con urgencia en caso de terremoto, y del tiempo que normalmente se ha tardado (de 2 a 4 semanas) en desplegar las misiones sobre el terreno, la UNESCO debería:

- a. Ofrecer al país afectado el envío de una misión de exploración, y
- b. Enviar inmediatamente a un *consultor especial*, que debería presentarse en el país en el que se haya producido el terremoto, en el plazo de 72 horas.

Convendría que el *consultor especial* fuera un científico que tuviera experiencia en trabajos de exploración sismológica sobre el terreno y, preferentemente, conector del país. La finalidad de su visita sería proceder a una evaluación inicial de la situación creada por el terremoto y, en consulta con las autoridades locales, determinar qué aspectos del terremoto merecen ser estudiados por una misión de exploración sismológica de la UNESCO. El consultor podrá visitar o no el lugar del desastre; pero si el gobierno interesado decidiera pedir el envío de una misión, la tarea del consultor debería consistir en preparar la llegada de la misión, entrando en contacto, a través de los representantes locales de las Naciones Unidas y de la UNESCO, con los servicios gubernamentales competentes, haciendo gestiones para disponer de medios locales de transporte y pidiendo la autorización para penetrar en la zona siniestrada, y el despacho de aduanas para introducir el equipo

necesario en el país. En resumen, debería tratar de acelerar la decisión de las autoridades locales sobre si es o no conveniente el envío de una misión, especificar la labor de ésta y servir de guía a la misma, para facilitar así su rápida llegada al lugar del siniestro.

Si el gobierno estuviera interesado en que se enviara una misión de reconocimiento para estudiar algunos o todos los aspectos del siniestro, el consultor especial, junto con la unidad responsable de la sede de la UNESCO, definiría el tamaño, la composición y las tareas específicas de la misión, y ésta sería enviada inmediatamente.

Si en el país afectado se contara con medios técnicos suficientes para estudiar el sismo y, por consiguiente, no se necesitara que la UNESCO enviara una misión, el consultor podría considerar si es posible enviar a uno o a dos especialistas jóvenes, que ya tengan cierta experiencia en exploraciones sobre el terreno, a fin de agregarlos a uno de los grupos que estén estudiando el terremoto. Su labor consistiría en prestar ayuda al grupo local y en registrar todo aquello que pueda ser de interés para el avance de la ciencia. Su participación en los trabajos sobre el terreno no sólo contribuiría a ampliar su propia experiencia, sino también a estimular los intercambios de información tan necesarios, en el plano de la interpretación de las observaciones y de la evaluación directa de los datos relativos a los daños. A su llegada, se podría confiar a estos especialistas jóvenes, en función de los objetivos de la misión y de su propia competencia, la ejecución de tareas específicas, tales como estudiar con detalle los daños sufridos por una clase determinada de estructuras, proceder a la representación cartográfica de ciertos tipos de deformación del terreno, encargarse del funcionamiento de instrumentos sismológicos o del estudio de los problemas especiales planteados por los alojamientos provisionales.

Las *misiones de exploración sismológica* deberían constar de un cierto número de especialistas con experiencia en trabajos sismológicos sobre el terreno. Lo ideal sería que la misión fuese reducida y que su número de miembros y su composición reales se ajustaran en cada caso a la índole y al volumen de la catástrofe, a la necesidad de asistencia y asesoramiento de parte de la UNESCO, y a los medios y capacidad de que se disponga a nivel local para realizar un estudio del sismo sobre el terreno. Debería darse a la misión la posibilidad de aumentar o reducir el número de sus miembros, según lo requiera la situación que encuentre sobre el terreno, así como de incluir como mínimo a un especialista joven y de sumar al grupo especialistas del país afectado. Siempre que sea posible, la misión debería comprender un sismólogo y dos técnicos como mínimo, equipados con tres o cuatro sismógrafos portátiles. Ahora bien, a causa de los retrasos debidos al despacho de los instrumentos en las aduanas y al despliegue de la red, el sismólogo debería trabajar con bastante independencia respecto del resto de la misión, para que no fuera obstaculizada su movilidad.

La misión debería transportar consigo dos acelerógrafos de movimientos fuertes portátiles, como mínimo, para comenzar a registrar las réplicas lo más rápidamente posible.

La misión debería estudiar los aspectos del sismo que se enumeran a continuación e informar sobre los mismos:

- a. Geología y tectónica regionales.
- b. Sismicidad regional, otros fenómenos sísmicos importantes registrados con anterioridad en la región.

- c. Sacudida precursora, sacudida principal, réplica, y movimientos fuertes del terreno.
- d. Fallas y deformaciones del terreno, corrimientos de tierras, otros efectos geológicos.
- e. Aspectos de ingeniería del siniestro, distribución de los daños.
- f. Daños causados a los tipos de construcción locales.
- g. Idoneidad de los códigos y reglamentos de construcción.
- h. Recomendaciones generales relativas a la restauración de las viviendas en la zona afectada por el sismo.
- i. Repercusiones sociales y económicas del sismo.
- j. Otros aspectos de interés especial.

La misión de exploración sismológica debería redactar inmediatamente un informe, basado en las comprobaciones efectuadas durante los estudios y, presentarlo a las autoridades nacionales por los conductos adecuados antes de su regreso. Deberían figurar en ese informe todas las respuestas que sea posible dar a los problemas planteados por el sismo, así como todas las recomendaciones que se estimen oportunas para futuras investigaciones de este tipo.

Dos meses después de su regreso, a más tardar, los miembros de la misión deberían entregar al jefe de la misma un informe completo sobre sus estudios, junto con los mapas, los diagramas y los clisés correspondientes. Un mes más tarde, el jefe de la misión debería entregar a la Secretaría de la UNESCO el texto revisado del informe, para que la Organización lo presente al gobierno del país interesado y lo publique posteriormente, después de someterlo a la aprobación de dicho gobierno.

La UNESCO debería adoptar las disposiciones oportunas para publicar esos informes a la mayor brevedad posible, en número suficiente para su distribución o venta a todos los interesados.

En muchos casos, una misión de exploración sismológica no tiene tiempo de terminar en forma detallada sus trabajos sobre el terreno, los cuales a menudo requieren una labor de más de seis semanas y a veces entrañan el estudio de nuevos problemas surgidos en el curso de los mismos. En tales casos, podría solicitarse una *misión de estudio sismológico*.

Los objetivos de una misión de este tipo consistirían en proseguir y ampliar los trabajos de la misión de exploración y emprender los nuevos estudios detallados que esta última recomendará, de común acuerdo con las autoridades locales, o los estudios que se juzgaran convenientes por otras razones.

Desde 1964, año en que se recomendó este tipo de misión, no se ha pedido a la UNESCO ninguna misión de estudio. Ello obedece principalmente a que, después del desastre provocado por un terremoto, el interés de las autoridades empieza a declinar con el tiempo, sobre todo porque los problemas que plantean los trabajos de rehabilitación se van haciendo cada vez más complicados, menos interesantes y mucho más costosos.

Existe, sin embargo, un tipo de misión de estudio que podría constituir la secuela normal de una misión de exploración sismológica. Su objetivo sería realizar un estudio sobre el terreno, de antiguos terremotos de los que no exista documentación dentro de la zona sismotectónica inmediatamente contigua a aquella en que haya tenido lugar el sismo estudiado por la misión de exploración. Esto entrañaría el establecimiento de un pequeño grupo de trabajo de científicos locales, los cuales, en unión de uno o dos consultores de la UNESCO, recogerían, analizarían y estu-

diarían todos los vestigios de antiguos sismos en la zona escogida y efectuarían visitas a los lugares en que se hayan producido los sismos más importantes, para efectuar estudios sobre el terreno. Existen considerables pruebas de sismos ocurridos en otros tiempos y de las fallas asociadas a los mismos en la mayoría de los lugares que se indican en la tabla 6.1, pruebas que no se han recogido ni publicado nunca, y que, por lo tanto, constituyen una valiosa fuente de información digna de ser aprovechada.

Parte II

Medidas de ingeniería para la reducción de pérdidas

7 Edificaciones: códigos, materiales, diseño

Por S. SACHANSKI

7.1 Introducción

El rápido aumento de la población del mundo con su progreso industrial y técnico ha estimulado un acelerado desarrollo de la edificación de todo tipo; mientras que en el pasado los edificios eran principalmente de albañilería y madera, en la actualidad se emplean nuevos sistemas estructurales, nuevos materiales y técnicas, incluidos la construcción prefabricada, el hormigón armado, las estructuras metálicas, los materiales sintéticos, etc.

La mayor población urbana y el uso de nuevos sistemas de construcción cuya resistencia a los terremotos no ha sido lo suficientemente estudiada, ha llevado a un incremento del peligro sísmico y esto requiere de una mejora en los métodos para el diseño de estructuras sismo-resistentes.

La protección contra la acción destructiva de los terremotos se encuentra en los códigos y reglamentos para el diseño y la construcción en regiones sísmicas. Aun cuando hay una considerable aportación de pruebas y análisis en laboratorio, estos códigos de construcción para el diseño sismo-resistentes están basados principalmente en métodos empíricos y en la experiencia de siglos de ciertos tipos particulares de estructuras. Sin embargo, a pesar de los considerables logros de la investigación teórica y experimental sobre: el origen y la naturaleza de los sismos, la dinámica de los suelos, la respuesta de las estructuras, la interacción suelo-estructura, etc., los resultados todavía no están por lo general reflejados en los códigos y reglamentos de construcción existentes.

7.2 Materiales locales y sistemas estructurales

Los materiales estructurales básicos utilizados en distintos países, de los cuales dependen considerablemente los métodos de construcción y la resistencia a terremotos de las estructuras son: piedras de canto rodado, chancadas y prismáticas, adobe, ladrillos, bloques de hormigón, morteros de barro-cal y cemento, madera, hormigón y acero.

El uso creciente del hormigón y del acero determina el desarrollo de sistemas estructurales y facilita la construcción de edificios sismo-resistentes. Conjuntamente con las edificaciones tradicionales, otros tipos de edificios han sido desarrollados debido a diversas razones arquitectónicas, funcionales y estructurales. Todos pueden ser clasificados en los siguientes grupos básicos:

7.2.1 *Estructuras de albañilería*

Este tipo de edificación tradicional puede ser construido rápidamente, con poco costo y frecuentemente sin ningún plan o competencia técnica especial. Los materiales utilizados —desde barro y piedras hasta vigas de acero— son heterogéneos y de una gran variedad de resistencias. Las uniones y conexiones entre los diferentes materiales y elementos de las estructuras son generalmente débiles y nada efectivas.

Las principales características de las edificaciones de albañilería son: alta rigidez, poca resistencia a la tracción y a la fuerza de corte, poca ductilidad, baja capacidad para soportar inversión de cargas y redistribución de esfuerzos. Éstas son las principales razones para el frecuente colapso de edificaciones de albañilería durante terremotos —casi siempre responsables de una considerable cantidad de víctimas.

La resistencia de este tipo de estructuras a los sismos puede mejorarse mediante soluciones estructurales más racionales utilizando los materiales locales para la construcción —sin mayor uso de cemento y acero para incrementar la resistencia a la tensión, corte, y para reforzar los puntos débiles. Los esfuerzos que se han hecho para el estudio y el mejoramiento de las estructuras de albañilería son muy limitados ya que hay la tendencia a considerarlos como algo del pasado, aun cuando todavía se construyen en gran número. Poco se conoce aún, por ejemplo, acerca de las propiedades de los materiales para las construcciones de albañilería, la adherencia entre los ladrillos y el cemento, las juntas de acero-mortero-albañilería, la variación de resistencia compresional de corte y de tracción de los distintos tipos de albañilería. Los códigos de construcción existentes contienen más soluciones para los tipos modernos de edificación que para los de albañilería. También una mayor información acerca de la capacidad de soporte de edificios de albañilería y el análisis cuidadoso de estas edificaciones dañadas por terremotos permitiría a los especialistas encontrar información sobre la naturaleza de los terremotos en diferentes regiones.

7.2.2 *Estructuras porticadas*

Éstas se componen de vigas y columnas eslabonadas por uniones que resisten momentos. Tales estructuras son flexibles y capaces de resistir grandes deformaciones, acción espacial y redistribución de esfuerzos. Los puntos débiles de estas estructuras son las juntas y las conexiones entre los miembros —especialmente entre columnas y vigas. Otros puntos débiles están situados en las uniones de los sistemas estructurales reticulados prefabricados, incluyendo aquellos con elementos pretensados. Las concentraciones de esfuerzos en las uniones son de gran importancia para determinar el comportamiento bajo cargas oscilatorias o repetitivas, iguales a las que pueden ocurrir durante un terremoto. Las inestabilidades pueden originarse por pandeo de las columnas y, en edificios altos, por la deformación lateral, causando una

excentricidad de la carga vertical, y por ende, produciendo momentos adicionales de flexión.

La relación entre resistencia y ductilidad es de gran importancia para las diversas estructuras. En muchos casos el espacio entre los pórticos se llena con paredes que son capaces de soportar cargas horizontales. La alta rigidez de estas paredes de relleno cambian completamente la respuesta de las estructuras porticadas. En este caso, la respuesta puede semejarse a la de una estructura de placa de corte, más que a la de una estructura en pórticos. Aunque los elementos de este tipo de estructuras se han estudiado bien, su diseño, tomando en consideración las deformaciones no elásticas, aún no está simplificado y por lo general no se usa.

7.2.3 *Estructuras porticadas con placas de corte o tirantes*

Este tipo de estructura se aplica generalmente en la construcción moderna porque tiene varias ventajas arquitectónicas, estructurales y tecnológicas. Las principales fuerzas laterales son soportadas por la resistencia a corte y flexión de las vigas peraltadas o las placas de corte que se extienden a la altura de todo el edificio. Como placas de corte, no solamente se utilizan placas de cajas de escalera sino también hormigón armado vertical adicional y diafragmas porticados de albañilería. Las conexiones rígidas entre placas de corte adyacentes son casi siempre poco recomendables debido al problema que tales miembros pueden causar si dan lugar a deformaciones de las placas de corte. Estas estructuras presentan algunos problemas aún no solucionados, similares a aquellos de las estructuras porticadas, pero diferentes en el detalle. La interacción e interconexión entre placas de corte y elementos porticados, y la redistribución de esfuerzos en deformaciones no elásticas son de especial interés debido a la diferencia en la deformación de estos elementos. La deformabilidad y ductilidad de los pórticos y las placas de corte para niveles dados de carga no son las mismas, es decir, las placas de corte alcanzan una resistencia máxima con deformaciones relativamente pequeñas, mientras que los pórticos soportan muy poca carga. Mientras la resistencia lateral de las placas de corte comienza a disminuir, la resistencia de los pórticos aumenta con la deformación y luego permanece aproximadamente constante hasta el colapso. Cuando tiene lugar el colapso de las placas de corte la rigidez de la estructura disminuye rápidamente, aumenta el periodo natural, se modifica la respuesta y es absorbida la mayor cantidad de energía. Este mecanismo de respuesta en la etapa no elástica hace que dicho tipo de estructura sea resistente a terremotos si es que están bien diseñadas las interconexiones entre las placas de corte y los pórticos.

Es esencial tener información acerca de la resistencia de las placas de corte, más allá de su capacidad máxima, para determinar la resistencia combinada y la ductilidad de la combinación placa de corte-pórtico. Las aberturas en las placas de corte requerirán el refuerzo adicional de las zonas anexas.

En edificaciones con placas de corte vertical la flexibilidad de los diafragmas del piso en un plano horizontal es frecuentemente similar a aquella de las placas de corte en el plano vertical. La flexibilidad de los diafragmas del piso es de significativa importancia para edificios grandes. Las estructuras con tirantes (generalmente reticulados de acero con tirantes diagonales) se comportan de manera bastante similar a las estructuras de placas de corte. Los momentos grandes en la base de una

placa de corte o en placas de caja de escalera requieren atención especial cuando se diseña la estructura de cimentación, y se ha de tener en cuenta el efecto de volteo.

El método de elementos finitos es utilizado por lo general en la investigación de las placas de corte de tipo no elástico, pero su uso en la práctica resulta demasiado complejo. Un método más sencillo, similar al método D de Muto está por elaborar. Cuando se emplean elementos estructurales prefabricados se debe prestar especial atención a las uniones. En este tipo de estructuras la torsión puede darse al no coincidir el centro de rigidez con el centro de masas.

7.2.4 *Estructuras tipo cajón*

Estas estructuras están formadas por placas de corte en ambos ejes del edificio y normalmente construidas con hormigón armado monolítico (formas de túnel, de avance, etc.) o premoldeados (grandes bloques y paneles, elementos especiales, etc.). Existen muchas variedades de estructuras tipo cajón, cada cual con sus propias peculiaridades determinadas por las juntas estructurales y las técnicas empleadas durante la construcción. Sus principales características son: la alta rigidez, la resistencia a la deformación de corte y la propensión a producir torsión cuando el edificio es muy largo.

Mientras que las edificaciones de tipo cajón no crean ningún problema especial desde el punto de vista de la ingeniería sismo-resistente, las estructuras prefabricadas requieren estudios más detallados. Los principales problemas con estas últimas son: la capacidad de soporte de las juntas de los paneles bajo cargas horizontales invertidas, las deformaciones admisibles de los distintos elementos estructurales, etc. A pesar de la considerable investigación teórica realmente se ha acumulado poca experiencia sobre el comportamiento de estos edificios durante terremotos, y esta experiencia ciertamente es insuficiente para formular cualquier hipótesis definitiva.

7.2.5 *Otros tipos de estructuras*

Además de los mencionados anteriormente, existen otros muchos tipos de estructuras aunque menos comunes; edificios suspendidos, edificios con discontinuidades mayores, edificios con un primer piso flexible, para citar unos cuantos. En los edificios suspendidos, un núcleo —usualmente una torre de hormigón armado, monolítica, con alta resistencia— lleva la totalidad de las cargas verticales y horizontales.

Las edificaciones con discontinuidades mayores se caracterizan por un cambio de rigidez a cierta altura, tal como los edificios que tienen grandes resaltos en placas o placas resistentes de cortes en algunos pisos únicamente. La concentración de esfuerzos entre las partes con diferentes rigideces es de interés especial en este tipo de construcción.

Los edificios con los primeros pisos flexibles son empleados en un intento de aislar el armazón estructural del movimiento del suelo. Las fuerzas inferiores son así inducidas en las estructuras flexibles, pero las grandes esperanzas que se cifraron en

una ocasión sobre la resistencia antisísmica de este tipo de estructura no se han materializado.

La resistencia de las estructuras a terremotos está influida frecuentemente por su planeamiento y diseño arquitectónico. Cuando la configuración de una estructura está fijada por determinados requerimientos arquitectónicos o funcionales, el diseñador tiene un campo limitado para escoger en lo que se refiere a desarrollar la fuerza y la ductilidad necesaria para asegurar una adecuada protección contra terremotos. Es difícil afirmar positivamente que algunos diseños sean mejores que otros en la resistencia dinámica, aunque es posible enunciar los principios generales que gobiernan el diseño arquitectónico y el planeamiento de las estructuras sismo-resistentes; por ejemplo, evitar discontinuidades estructurales, preservar la simetría de la estructura en el plano y la consideración sobre las desventajas de peso excedente en los pisos superiores.

Es necesario desarrollar métodos de análisis y de diseño que sean generalmente aplicables y que no estén limitados a sólo los tipos normales de pórticos o de diseño arquitectónico: el diseño sismo-resistente de todas las estructuras está considerablemente influido por los materiales de construcción disponibles. Algunos materiales, por su naturaleza y variabilidad (albañilería por ejemplo) pueden requerir un factor de seguridad mayor que otros (por ejemplo el acero).

Para mejorar la resistencia a los terremotos de cualquier tipo de edificios, puede ser aconsejable introducir amortiguamiento artificial o absorción de energía, usando elementos especiales de esta naturaleza o amortiguadores. El objeto de dichos elementos es el de atraer las deformaciones de gran amplitud a partes específicas de la estructura donde pueden ser acomodadas sin daños importantes, limitando de esta forma efectiva las fuerzas y las deformaciones desarrolladas en el resto del edificio.

Ya que la resistencia a terremotos depende de la resistencia y la ductilidad, la tarea del diseñador es seleccionar la combinación óptima de estas dos variables. Bajo ciertas circunstancias la resistencia con un mínimo de ductilidad es lo adecuado, mientras que en otras, un mínimo de resistencia con una gran cantidad de ductilidad puede ser lo indicado. Obviamente es necesario conocer bajo qué condiciones la ductilidad o la resistencia pueden resultar insuficientes. Por ejemplo, si una estructura es flexible (con un periodo natural largo) la ductilidad es de una importancia secundaria. Si la estructura está en un rango intermedio de rigidez (con un periodo natural medio) su capacidad para absorber energía, resistencia y ductilidad son todas de importancia.

Para decidir el balance entre resistencia y ductilidad tenemos que tener en cuenta cuidadosamente la resistencia y la ductilidad de cada elemento o componente. Ciertos métodos de conectar o unir los elementos pueden hacer que la ductilidad de la estructura, como un todo, sea incompatible con aquella de los elementos individuales. Esto es de gran importancia, especialmente en edificios con elementos prefabricados (que han resultado muy comunes en años recientes).

Así pues, el diseñador, tiene que considerar el conjunto de elementos en un edificio como un sistema integrado que se comporta como tal y al mismo tiempo debe tener presente la manera cómo los elementos del edificio están conectados y la manera cómo la falla de cualquier parte individual puede influir en el comportamiento de la estructura como un todo.

La masa, rigidez, amortiguamiento y absorción de energía de un edificio pueden

estar influidos por su interacción con los componentes no estructurales; es por lo tanto necesario tener buena información acerca del comportamiento de los componentes no estructurales y su interacción con la estructura. Algunos componentes quebradizos no estructurales pueden ser aislados de la respuesta de la estructura principal.

Con nuestro conocimiento actual es difícil dar valores al amortiguamiento, fuerza estructural y otras características de una estructura completa en términos cuantitativos determinados, para los componentes y elementos individuales. Es por lo tanto de gran importancia, para un mejor entendimiento del comportamiento de estructuras bajo fuerzas sísmicas, recopilar información acerca del comportamiento de estructuras reales, además de los estudios que se realicen en el laboratorio o el análisis de componentes individuales. Al recopilar datos acerca del comportamiento de edificios durante los terremotos reales, tenemos la esperanza de poder determinar plenamente las características que son importantes en el diseño de las estructuras sísmo-resistentes.

La influencia de las condiciones del suelo sobre la respuesta estructural tiene que tomarse en consideración ya que los movimientos del terremoto son transmitidos a través del suelo a los cimientos de la estructura y luego a la misma estructura; la interacción entre la cimentación y el suelo, es pues, de gran importancia. En el curso de esta interacción la absorción de energía puede producirse, pero bajo ciertas condiciones también puede ocurrir la amplificación del movimiento. En algunos casos hay más incertidumbre acerca del comportamiento de los materiales de la cimentación debajo y alrededor de la estructura que acerca del comportamiento de la estructura misma.

Dada la amplia gama de tipos de edificaciones y de materiales, y el número de problemas que aún no han sido solucionados satisfactoriamente, es evidente que una completa protección contra los terremotos sólo se logrará a costa de un amplio programa de investigación teórica y experimental dirigido a mejorar el diseño sísmo-resistente.

7.3 Diseño de edificios resistentes a terremotos

El diseño de las estructuras sísmo-resistentes es una tarea excepcionalmente difícil debido al carácter probabilístico de los terremotos, la complicada respuesta espacial dinámica de las estructuras (particularmente en la etapa no elástica), la gran variedad de materiales, elementos y sistemas estructurales, etc.

Los resultados complejos de la investigación teórica y experimental deben ser simplificados para corresponder con las propiedades específicas de las estructuras. Luego deben ser expresados en forma de métodos sencillos, pero efectivos, de cálculos y de reglamentaciones para ser incorporados en los códigos de construcción.

Hay dos líneas principales de investigación teórica sobre la respuesta estructural a terremotos: determinística y no determinística.

La línea determinística requiere el conocimiento de la historia-tiempo del movimiento del suelo, de la historia-tiempo de los esfuerzos y de las deformaciones o desplazamientos inducidos en una estructura determinada.

Se han supuesto varios movimientos de tierra para simular efectos sísmicos que

van desde excitaciones sencillas, hasta pulsos y excitaciones sinusoidales para simular movimientos sísmicos y movimientos del suelo registrados durante sismos reales.

Lamentablemente, el estudio de la respuesta de una estructura a un sismo (aunque simulado) no necesariamente es aplicable a otro. Si tenemos en cuenta que las propiedades de los materiales y el criterio asumido para falla de una estructura dada también son indeterminados, es evidente que el método determinístico no es de fiar.

El método no determinístico (probabilístico) requiere de una definición del movimiento del suelo en términos de probabilidades de que distintos niveles de intensidad serán excedidos. La respuesta estructural es igualmente expresada en términos de probabilidades de que una determinada fuerza o amplitud de desplazamiento será excedida o que las condiciones prescritas de daños serán alcanzadas. Ya que los datos estadísticos sobre sismicidad y movimiento del suelo durante un terremoto son todavía muy pobres para un análisis probabilístico, es necesario combinar ambos métodos de análisis estructural.

El análisis del comportamiento de una estructura sujeta a movimientos sísmicos incluye las cuatro siguientes etapas principales:

Modelar la estructura.

Modelar el sismo.

Investigar la respuesta del modelo.

Comparar los resultados con la estructural real.

7.3.1 *Formulación de modelos estructurales matemáticos, físicos o eléctricos.*

La formulación de modelos matemáticos está basada en el supuesto de que la estructura consiste en un conjunto de miembros estructurales discretos, interconectados en un número finito de nudos. La masa, rigidez y características de amortiguamiento de los elementos pueden combinarse para representar la inercia, rigidez y características de amortiguamiento de la estructura ensamblada. El menor número de parámetros necesarios para definir la posición de la masa entera de la estructura idealizada determina el número de grados de libertad de la estructura y el número de ecuaciones diferenciales que aparecen en el modelo matemático del sistema.

La matriz de inercia para la estructura se obtiene combinando la matriz de inercia de los miembros individuales. Cada término de la matriz de inercia de la estructura se obtiene de la suma de los coeficientes de inercia para los componentes individuales conectados a un nudo particular.

La matriz de rigidez para la estructura puede ser ensamblada de una manera comparable a la de la matriz de inercia. Para miembros linealmente elásticos las propiedades de rigidez pueden ser determinadas por métodos analíticos pero se requiere de investigación para establecer la relación de rigidez para ciertos elementos complejos (pórticos con relleno de albañilería, por ejemplo). La matriz de rigidez para la estructura en la etapa no lineal es muy complicada y requiere de investigación especial. Las no linealidades pueden ser geométricas (inducidas a medida que se deforma la estructura) o materiales (cuando los esfuerzos desarrollados en la estructura exceden el rango lineal de esfuerzo-deformación).

Finalmente, el ensamblar las matrices de amortiguamiento de los miembros individuales, para obtener la matriz de amortiguamiento de la estructura en su totalidad, es completamente impracticable. El procedimiento más efectivo para determinar la

matriz de amortiguamiento de una estructura es observar el amortiguamiento de vibraciones libres o forzadas de estructuras reales.

El uso del modelo físico se ve obstaculizado por la dificultad de encontrar materiales para modelar que tengan las propiedades adecuadas, de mantener similitud dinámica y geométrica y de modelar las fuerzas sísmicas. Para estructuras muy sencillas, el modelo físico es útil para establecer el espectro de la respuesta sísmica, incluso para la etapa no-elástica.

En los modelos eléctricos los componentes estructurales son representados por componentes equivalentes de circuitos eléctricos. Los modelos eléctricos han resultado útiles para extender el análisis espectral de la respuesta más allá que el desarrollo inicial logrado con los modelos físicos.

7.3.2 *Formulación de modelos matemáticos, mecánicos o eléctricos del movimiento de los sismos*

La oscilación de un punto sobre la superficie terrestre durante un terremoto es extremadamente irregular tanto en la dirección horizontal como en la vertical y puede continuar desde unos segundos hasta varios minutos. Los acelerogramas de terremotos fuertes revelan una gran cantidad de ondas de diferentes frecuencias y amplitudes, con ciertas ondas particularmente prominentes.

Desde el punto de vista de la ingeniería sísmica, las características más significativas del movimiento son: los valores de la aceleración, velocidad y desplazamiento máximos, la duración del movimiento y el periodo de los pulsos dominantes. Estas características de los movimientos del suelo son influidas, para un lugar dado, por el mecanismo del sismo y la magnitud, la distancia del lugar hasta el epicentro, las dimensiones y propiedades físicas de los diversos estratos a través de los cuales se han propagado las ondas sísmicas, las condiciones del suelo en el lugar, y el ambiente geológico de la región.

La formulación de un modelo para un sismo fuerte, a efectos de la ingeniería, ha resultado ser una tarea excepcionalmente difícil, debido a la influencia de muchos factores que dependen del lugar dado. El pequeño número de acelerogramas que se han obtenido en zonas epicentrales de terremotos y la no relevancia de estos acelerogramas a otras regiones hacen necesario que se desarrollen modelos matemáticos aproximados de terremotos —basados en los estudios estadísticos de los registros de acelerógrafos de anteriores movimientos sísmicos. Se han llevado a cabo muchos intentos para desarrollar tales modelos, que serían incalculables, para adelantar la ingeniería sismo-resistente en general, pero aún se requieren más estudios.

Se necesita gran cantidad de investigaciones para estudiar los registros ya obtenidos con el fin de establecer las características esenciales del movimiento sísmico en función de magnitud, distancia, geología local y propiedades del suelo. Una vez que la probabilidad de ocurrencia ha sido evaluada para cada región sísmica, podría definirse una intensidad adecuada para el diseño, dependiendo de la importancia y la vida que podría tener una determinada estructura.

Para los propósitos de la ingeniería, la respuesta máxima de un sistema durante un terremoto es de mayor interés que la historia detallada del movimiento. Las respuestas espectrales de sistemas no amortiguados y viscosamente amortiguados han sido desarrollados para varios tipos de movimientos de los suelos, desde la excitación

simple (tipo pulso), hasta movimientos reales o simulados de un terremoto. Las respuestas espectrales son relativamente insensibles a la historia detallada de la excitación y están principalmente influenciadas por algunas características particulares del desplazamiento, velocidad o aceleración. Estos hechos hay que tenerlos en cuenta en la formulación de modelos matemáticos del movimiento sísmico.

7.3.3 *Evaluación de la respuesta de estructuras a la excitación sísmica*

La respuesta dinámica de una estructura puede expresarse por una serie de ecuaciones diferenciales acopladas que representan el equilibrio dinámico de las fuerzas actuantes sobre la estructura. Estas ecuaciones son acopladas por las características elásticas de la estructura (masa y amortiguamiento). Cuando la estructura está en la etapa lineal, el procedimiento de superposición de modos puede ser empleado para analizar la respuesta dinámica. Si las ecuaciones diferenciales son transformadas en coordenadas modales serán desacopladas y podrán ser solucionadas independientemente. La transformación modal conduce a ecuaciones de movimiento en variables complejas. Si el sistema no está subamortiguado o si se asume el amortiguamiento, las ecuaciones de movimiento en coordenadas modales son desacopladas en variables reales —cada una equivalente a la ecuación de movimiento de un oscilador lineal amortiguado. Entonces se puede determinar la respuesta máxima para cada modo de vibración del sistema utilizando el espectro de respuesta de un oscilador lineal. El espectro de respuesta define sólo la respuesta máxima de cada modo y no el tiempo en el cual ocurre. Un límite superior a la respuesta del sistema total puede ser obtenido sumando los valores absolutos de la respuesta en los modos separados; o la probable respuesta máxima puede ser determinada como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los distintos máximos modales (se pueden tomar sólo los primeros tres modos). Se requiere mayor investigación para poder establecer la mejor manera de estimar la respuesta máxima de los sistemas multimasa, partiendo de los datos del espectro de respuesta.

El estudio de las respuestas espectrales de sistemas con un solo grado de libertad en los rangos elásticos y no elásticos, para entradas que van desde simples pulsos hasta registros completos de terremotos reales o simulados, ha contribuido enormemente al análisis del comportamiento de estructuras sencillas. Se han desarrollado reglas simples y adecuadas para obtener el espectro de respuesta de sistemas no elásticos y del espectro de sistemas elásticos— aunque esto sólo puede ser una aproximación en los sistemas de multigrados de libertad.

La descripción de las fuerzas sísmicas por las respuestas espectrales es muy adecuada para todo fin práctico y ya ha sido incorporada a algunos reglamentos de construcción.

En la etapa no lineal una estructura no tiene modos normales de vibración y el problema no puede ser solucionado con procedimientos de superposición. En este caso se deben aplicar métodos más empíricos, incluyendo la integración numérica, paso a paso, de ecuaciones simultáneas de movimiento. La respuesta de la estructura se supone que será lineal durante cada corto intervalo de tiempo y que sus propiedades irán cambiando al término de cada intervalo para estar conformes con la nueva configuración y estado de la tensión.

Uno de los más importantes problemas en el análisis de la respuesta dinámica

estructural a los movimientos sísmicos es el desarrollo de un procedimiento del espectro de respuesta para pronosticar la respuesta máxima de un sistema no lineal, con multigrado de libertad al movimiento de un terremoto.

La determinación probabilística de la respuesta no lineal a entradas aleatorias dinámicas es extremadamente difícil. Las propiedades dinámicas pertinentes de la mayoría de los sistemas estructurales no pueden ser definidas con suficiente precisión para permitir pronósticos razonables del comportamiento estructural más allá del límite elástico. Se necesitan datos acerca de las propiedades dinámicas de materiales estructurales típicos, elementos y sistemas, determinados bajo condiciones similares a las de un terremoto. Estas propiedades dinámicas no lineales y la presentación de probables futuros terremotos por procesos aleatorios podría proveer la base para el desarrollo de métodos probabilísticos para evaluar la respuesta de estructuras reales a posibles terremotos.

Se necesita evidentemente expandir la investigación hacia las siguientes direcciones: representación del movimiento del suelo durante un futuro temblor, esperado por medio de procesos aleatorios; determinación de las propiedades dinámicas no lineales de estructuras reales; desarrollo de métodos probabilísticos para estimar la respuesta de estructuras reales a posibles movimientos sísmicos.

La determinación de la interacción suelo-estructura durante un terremoto, y las leyes que gobiernan la propagación y modificación de ondas sísmicas a medida que se propagan a través del suelo, y de las capas del subsuelo hacia la superficie (los cimientos del edificio) representan otro importante problema. Sin embargo, debe tenerse en claro que en una interacción real, suelo-estructura, el movimiento del suelo y la respuesta estructural están fuertemente acoplados. El movimiento del suelo puede ser severamente modificado por el movimiento de la estructura misma. Este efecto puede investigarse en el modelo matemático con una representación aproximada de la continuidad del suelo, en una forma compatible con la idealización típica del sistema estructural. Debe reconocerse sin embargo, que el esfuerzo necesario para computar tal análisis es tremendo, particularmente si se tienen presentes las verdaderas propiedades no lineales del suelo y la estructura. La investigación de este tipo todavía se encuentra en mantillas.

7.3.4 *Comparación de los resultados de la investigación teórica y experimental con el comportamiento de estructuras reales*

La investigación teórica y experimental por un lado, la experiencia práctica por el otro, tienen una estrecha interrelación; se complementan y se corrigen una a la otra. Las investigaciones experimentales proporcionan datos acerca de diversas propiedades (resistencia, relación esfuerzo-deformación, rigidez, ductilidad, absorción de energía, etc.) de los materiales estructurales básicos, elementos y ensambladuras estructurales, y estructuras reales. De particular valor son los datos proporcionados por los estudios de estructuras reales en la etapa no elástica y por la instrumentación y el análisis del comportamiento de edificios durante sismos fuertes. Aunque existe una considerable cantidad de datos experimentales acerca del comportamiento no elástico de elementos y de edificios enteros, su aplicación al diseño es todavía insuficiente. Todavía faltan análisis de los daños a los edificios en sismos anteriores.

Aún tienen que ponerse en práctica, en forma de métodos de diseño simples, los estudios teóricos y experimentales recientes.

7.4 Reglamentos de construcción y regulaciones

Ya que los reglamentos de construcción influyen en gran medida en la resistencia de las estructuras a terremotos al incorporar en su diseño los resultados de las investigaciones y experiencias, su papel de controlar el riesgo sísmico es muy importante. No sólo la actividad sísmica, las condiciones geológicas y del suelo, los métodos de diseño y construcción, las condiciones climáticas y materiales de construcción difieren de un país a otro sino también las tradiciones o costumbres y el potencial económico y técnico varía enormemente. Estas diferencias conducen a una gran variedad de normas de edificación, patrones y prácticas de construcción, y podemos por lo tanto, tratar sólo algunas características principales de los códigos para construcción sismo-resistente.

Debe tenerse presente que las normas para el diseño de estructuras bajo carga normal están basadas en tres diferentes métodos: esfuerzos permisibles, etapa de ruptura y diseño límite. El uso de uno u otro método influye en la verdadera resistencia de las estructuras a los terremotos.

Tomando como base el examen y la comparación de los códigos existentes para las construcciones sismo-resistentes se puede llegar a las siguientes conclusiones:

Ninguna otra norma en el ámbito de la construcción difiere tanto, no sólo en su forma y contenido, sino también en las distintas maneras de tratar o abordar problemas individuales, como aquella que se refiere a la construcción antisísmica. En general, las normas aplicadas en 1973, aunque muy distintas de las que estaban vigentes 10 años antes, ofrecen significativamente mejores perspectivas para su estandarización. Casi todas están basadas en el método dinámico; algunos países aplican los principios básicos de las normas de la Unión Soviética, otros los de los Estados Unidos, mientras que un tercer grupo de países adoptan combinaciones de ambas normas, las de la Unión Soviética y las de los Estados Unidos, con algunas modificaciones. En las normas de algunos países las zonas sísmicas se indican con números tales como 0, 1, 2, 3 ó letras como a, b, c, sin ninguna indicación acerca de magnitudes o intensidades. En las normas de la mayoría de los países el coeficiente sísmico se duplica de una zona a la siguiente; en otros países este factor es sólo de 1.2 hasta 1.5. Las fuerzas sísmicas correspondientes a una intensidad sísmica dada, como se define en las normas, varía considerablemente de un país a otro.

Cuando se definen fuerzas sísmicas, la mayoría de las normas tienen en cuenta la influencia de varios factores con diferentes coeficientes. Así pues mientras algunas normas no tienen en cuenta la influencia de las condiciones del suelo sobre las fuerzas sísmicas en las estructuras, otras permiten cambios de 25 % hasta 50 % entre dos categorías adyacentes del suelo. Sólo algunas consideran el tipo de cimentación. Hay normas que incluyen un coeficiente para fuerzas sísmicas de diseño según la importancia de los edificios. Este coeficiente tiene un rango muy amplio, desde el 20 % hasta el 100 %, pero contiene la idea del riesgo sísmico como función del periodo de retorno. También hay diferencias para definir la parte de la sobrecarga en el cálculo de las fuerzas sísmicas. Ciertas normas toman en considera-

ción toda la sobrecarga, algunas sólo parte de ella, y otras no la consideran en absoluto.

Mientras que los métodos inmersos en definir la fuerza sísmica general para el diseño de un edificio dado son extremadamente variados y complicados, los procedimientos utilizados para determinar el coeficiente de respuesta y el coeficiente de distribución son, a pesar de algunas diferencias, relativamente uniformes. Esta uniformidad es una consecuencia de la aplicación de criterios similares basados en la respuesta de las estructuras.

Algunas normas usan coeficientes de amortiguamiento determinados por la flexibilidad de las estructuras. El detallar estos coeficientes, que frecuentemente incluyen algunos otros factores, requiere una comprobación adicional.

La determinación de los periodos naturales de los edificios es de enorme importancia para seguir unos criterios razonables en el diseño; la mayoría de normas recomiendan fórmulas empíricas para determinar los periodos naturales de diferentes clases de edificios, tanto en tipo elástico como en el no elástico. La superposición de las deformaciones por cargas sísmicas sobre las deformaciones por otras cargas (muerta, sobrecarga, nieve, viento) así como la superposición modal, requiere de más discusión y definición para resolver las diferencias existentes. También quedan diferencias sustanciales con respecto a las fuerzas sísmicas verticales que se usarán en el cálculo de los diferentes elementos estructurales.

El problema de asegurar una resistencia suficiente de los elementos subsidiarios (balcones, consolas, chimeneas, parapetos, ornamentos, paredes independientes) es tratado en muy pocas normas, aunque es un aspecto importante del diseño sismo-resistente. Sólo algunas normas tratan el cálculo de edificios para torsión, limitación de carga, distancia a edificios adyacentes, etc. Estos problemas pueden ser de importancia decisiva para la resistencia de algunos edificios. No todas las normas dan prescripciones estructurales para edificios tradicionales. Los límites de deformaciones admisibles en diferentes materiales (suelo, albañilería, hormigón, acero) durante terremotos, depende estrechamente de los métodos de diseño aceptados para cargas básicas, pero son determinados por la resistencia real de la estructura a sismos y por el riesgo sísmico.

A pesar de las diferencias sustanciales entre las normas de los diversos países, la estandarización de los principios básicos es posible. Los resultados del trabajo que lleva a cabo la Comisión Europa sobre Ingeniería Sismo-resistente en la unificación de normas es una prueba de esto. Los requerimientos del código de la construcción pretenden proteger de daños en el caso de un movimiento moderado de suelo, y de lesiones y pérdidas de vidas en el caso de un sismo fuerte. El costo de un sismo incluye no solamente el costo directo de reparar el daño físico, sino también el costo indirecto que resulta al interrumpir la actividad productiva normal y la paralización de la expansión económica. El objetivo de la ingeniería sismo-resistente es reducir el costo total durante un periodo dado. Aunque las provisiones de los reglamentos de construcción deben estar basadas en un análisis de costo-beneficio, la ingeniería sismo-resistente no se ha desarrollado aún hasta el punto de poderse realizar estudios de costo-beneficio completamente satisfactorios. Como un resultado de esta situación, las inversiones a muy largo plazo se están llevando a cabo en edificaciones y otras estructuras sin ningún conocimiento de la verdadera razón costo-beneficio. Cada país debe analizar su propia situación en este sentido y decidir a qué nivel de prevención de daños debe dirigir su propio código de construcción y sus reglamen-

tos. Un problema adicional que requiere especial atención es el de desarrollar métodos de inspección y control para asegurarse de que las estructuras poseen la resistencia y ductilidad adecuadas.

7.5 Problemas que requieren una futura investigación

El análisis anterior de los materiales de construcción, sistemas estructurales, métodos de análisis y de diseño, y de reglamentos de construcción, indica que se necesita una mayor investigación en las siguientes direcciones: características del movimiento del suelo, propiedades de los materiales, elementos y sistemas estructurales, métodos analíticos, comportamiento de las estructuras durante un sismo y reglamentos de construcción.

7.5.1 *Características del movimiento del suelo*

La determinación de las características del movimiento del suelo en el diseño de ingeniería fue discutida brevemente en el párrafo anterior y ya que se volverá a tratar con más detalle en el capítulo sobre microzonificación no será discutida más aquí. En cualquier caso la relación entre movimiento de suelo en un campo libre y en la base de una estructura, así como su correlación espacial, requiere más estudio.

7.5.2 *Propiedades físicas de materiales estructurales, elementos y sistemas*

Son necesarios los programas integrados para prueba de materiales, elementos, y sistemas completos:

- a. Los principales materiales estructurales (albañilería, madera, hormigón, acero, plásticos, etc.), elementos estructurales (vigas, columnas, paredes, etc.), juntas y conexiones (ladrillos-cemento-hormigón armado, albañilería-madera, acero-hormigón, elementos prefabricados, etc.), y ensambles (viga-columna-placas de corte, dos o más paneles, etc.) deben probarse para conocer su resistencia, rigidez, amortiguamiento, mecanismos de falla y pérdida acumulativa de energía por histeresis en los tipos elásticos y no elásticos. Todas estas propiedades se definirán bajo condiciones dinámicas de carga simulando la historia de deformación que podría ser impuesta por un fuerte sismo.
- b. La función de los sistemas completos estructurales puede ser estudiada por pruebas de modelos estáticos y dinámicos, pero siempre serán necesarios estudios dinámicos a escala real. Podrá continuarse trabajando sobre excitaciones de baja amplitud, pero debe prestarse especial atención a la respuesta post-ruptura de estructuras a los movimientos fuertes, producidos por poderosos generadores de vibración de masas rotatorias, por grandes masas vibratorias y por explosiones subterráneas.

La siguiente información se necesita en varios tipos de edificaciones en los tipos elásticos y no elásticos: periodos naturales de vibración a diversos niveles de intensidad de deformaciones y con varios grados de daños; características y grados de

amortiguamiento en los modos fundamentales y más altos, y a diversos niveles de deformación o grados de daño; interacción suelo-estructura; interacción estructura y componentes no estructurales; redistribución de deformaciones.

7.5.3 *Métodos analíticos*

Los métodos analíticos se deben desarrollar en dos direcciones:

- a. Para mejorar el entendimiento del comportamiento de distintos tipos de edificios.
 - b. Para encontrar métodos prácticos de uso para los diseñadores:
- a. Estudios teóricos sobre el comportamiento de edificios bajo cargas sísmicas que deben ser seguidas por métodos determinísticos y no determinísticos, tomando en consideración las propiedades no elásticas y probabilísticas de materiales y elementos estructurales. La formulación matemática y la representación de una investigación experimental requiere refinamiento. Se necesitan modelos matemáticos que describan el comportamiento no elástico de elementos estructurales. En los estudios de la respuesta dinámica todos los parámetros significativos de movimiento de suelo y estructurales deben ser variados para proporcionar una base de reglamentos y conceptos efectivos para el diseño sísmico.
 - b. Los procedimientos analíticos simplificados, que den resultados precisos, deben ser desarrollados para calcular los movimientos dinámicos laterales, verticales, torsionales y de volteo. Tales métodos pueden estar basados en simplificaciones de los análisis precisos, o en aproximaciones completamente nuevas. Mayor trabajo se requiere para poder formular criterios de optimización sobre los diseños sísmo-resistentes y para optimizar la asignación de recursos para la investigación y desarrollo.

7.5.4 *El estudio del comportamiento de edificios expuestos a terremotos fuertes*

Esto es de gran importancia para verificar y mejorar los criterios aceptados y los métodos de diseño y de construcción generalizados. El análisis cuidadoso de los edificios dañados o destruidos por terremotos fuertes debe continuarse en el futuro. La determinación de la resistencia real a terremotos de edificios existentes es de gran importancia. Los métodos experimentales y analíticos para este fin deben ser mejorados.

7.5.5 *Mejora y normalización de los códigos de construcción*

Las diferencias observadas en los principios básicos que gobiernan a los diferentes códigos de construcción señalan la necesidad de que sean mejorados y normalizados, teniendo presentes los resultados de la investigación pasada y futura y la experiencia práctica en el diseño y la construcción.

Es necesario desarrollar los métodos para mejorar la seguridad de las estructuras que no han sido calculadas por ingenieros, y para mejorar el cumplimiento de los requerimientos del código por aquellas estructuras que sí han sido calculadas por

ingenieros. A pesar de las grandes diferencias entre los códigos individuales, la formulación de conceptos generales para códigos de construcción es posible y cada país puede, por supuesto, definir sus propias normas de acuerdo con sus propias condiciones específicas —esto ha sido demostrado por los resultados del trabajo en la unificación de normas en la Unión Soviética. La normalización de códigos sin embargo promoverá una mejor cooperación internacional en la investigación, diseño y práctica.

8 Propiedades sismo-resistentes y diseño de servicios públicos

Por KEIZABURO KUBO y TSUNEO KATAYAMA

8.1 Introducción

Un número de terremotos en el pasado fueron causas de muchas muertes humanas y enormes pérdidas materiales. En 1908 un terremoto cerca del estrecho de Messina ocasionaba la pérdida de unas 110 000 vidas, casi el 60 % de la población de las ciudades de Messina y Reggio juntas. El terremoto ocurrido en febrero de 1976 en Guatemala es uno de los más recientes ejemplos. Se dice que en ambos casos el mayor número de víctimas fue causado por el colapso de construcciones de albañilería. En muchas partes de Medio Oriente y de Centro y Sud América, las casas de adobe construidas con ladrillos secados por el sol son muy comunes. El adobe se hace de materiales locales y tiene la ventaja de ser un buen aislante térmico, pero su resistencia sísmica es muy baja. Por lo tanto, cuando un terremoto tiene lugar en estas áreas, el colapso de los edificios es por lo general el principal causante de la pérdida de vidas. Un ejemplo de otro tipo de desastre sísmico es el terremoto de Kanto en 1923 que mató a más de 140 000 personas, en este caso debido principalmente a los incendios que siguieron al terremoto.

Por el contrario, los daños sísmicos a los servicios públicos generalmente están limitados a las fallas de estructuras e instalaciones, y raramente han sido la causa directa de pérdidas de vidas o de propiedades. Durante el terremoto de San Fernando de 1971, murieron dos personas cuando su camión fue aplastado por el colapso de una autopista que pasaba por encima y otra murió como resultado de la caída desde una autopista. Sin duda, la pérdida de vidas habría sido mucho mayor si el terremoto hubiese ocurrido en un momento en que estas autopistas y pasos a desnivel hubiesen estado cargadas de tráfico. Durante el terremoto de Kanto de 1923 un tren fue arrastrado al mar por un deslizamiento de tierra de grandes proporciones y por la avalancha de roca y barro correspondiente, perdiéndose 111 vidas. Aunque, en general, la probabilidad de que los trenes choquen contra puentes caídos o derrumbes sea menor que para los vehículos en carreteras, el número de víctimas en esos accidentes es inevitablemente mayor.

El efecto de los daños causados por un sismo en las tuberías para conducir combustibles líquidos o las líneas de transmisión de energía eléctrica subterráneas es difícil de predecir, debido a que tales estructuras hasta ahora no han estado expuestas a terremotos verdaderamente fuertes. Sin embargo, la ruptura de tuberías y cables seguramente no ocasionaría muertes a no ser que hubiesen explosiones o incendios debido a ellas. Durante el terremoto de San Fernando el gas que escapaba de las tuberías produjo cráteres en la calzada, y en dos o tres lugares el gas ardió. Sin embargo, se informó que el daño a edificios por los incendios fue comparativamente menor. En contraste, trece explosiones donde hubo rupturas de tuberías de gas fueron detectadas en Tokio durante el terremoto de Kanto. Parece que ocurrieron el día después del terremoto y se cree que fueron causadas por incendios en las áreas de los alrededores.

Aunque el daño producido por los terremotos a los servicios públicos está menos relacionado directamente con las pérdidas de vidas y de propiedades que en el caso de otras estructuras, dado que las ciudades modernas normalmente dependen de ellos considerablemente y cada día más, su disloque (servicios de transporte, suministro de energía eléctrica, comunicaciones, suministro de agua potable, etc.), inevitablemente conlleva un desorden extremo en una ciudad. Esto a su vez puede aumentar el potencial para que se produzcan varios desastres secundarios y obstaculizar seriamente la reconstrucción y rehabilitación.

Otra diferencia general pero significativa entre los servicios públicos y las estructuras de edificios es que los servicios son redes que contienen las fuentes, líneas de transmisión, lugares de almacenamiento y sistemas de distribución en sí mismos, mientras que las estructuras de edificios son, en principio, estructuras independientes e individuales. Por lo tanto, aunque algunos de los edificios más débiles colapsaran durante un terremoto, el daño sería comparativamente menor. Por el contrario, en sistemas que son redes en las cuales fluyen incesantemente la electricidad, el gas, combustibles líquidos, agua, desagüe, tráfico e información, el daño en cualquier lugar de la red afectaría a grandes porciones del sistema; por ejemplo, los trenes podrían estar obligados a efectuar servicios locales entre las secciones afectadas, o los vehículos motorizados, en carretera, se verían obligados a transitar por desvíos para evitar zonas dañadas. En cualquier caso la eficiencia de la red sufre un impacto negativo.

Algunos ejemplos típicos de los daños producidos por terremotos a servicios públicos son los daños a las carreteras y líneas férreas debido a derrumbes, rotura de tuberías subterráneas por fallamiento y excesivo desplazamiento relativo del terreno, falla de los taludes de las carreteras y ferrocarriles, y colapso de puentes al ceder el terreno de soporte. La magnitud de los daños estará íntimamente relacionada con el comportamiento sísmico del suelo natural y del suelo hecho por el hombre. El análisis de las propiedades sísmo-resistentes de los servicios públicos debe, por lo tanto, tener presente las características dinámicas de los suelos y la interacción suelo-estructura. Las condiciones geológicas, las condiciones generales del terreno, las propiedades del suelo, el desplazamiento relativo del terreno y la resultante distribución de deformaciones, tanto en la dirección vertical como horizontal, son algunos de los factores más importantes para el diseño antisísmico de servicios públicos en relación con los que se deben tener presentes para otras estructuras.

En resumen, puede decirse que:

1. Los daños sísmicos a los servicios públicos raramente son una causa directa para la pérdida de vidas y de propiedades.
2. Un sistema de servicios públicos es una red, de tal manera que las fallas en ciertos lugares afectarán el funcionamiento general del sistema.
3. Las propiedades sismo-resistentes de los servicios públicos frecuentemente están influidas con mayor fuerza por las condiciones geológicas y del suelo, y por las características del movimiento del terreno durante el terremoto, que las de otras estructuras.
4. La importancia de estudios antisísmicos de los sistemas para servicios públicos aumentan en proporción al nivel de civilización, porque cuanto más moderna es una ciudad, con mayor grado depende de esos servicios públicos para su normal patrón de existencia.

8.2 Características de daños sísmicos en servicios públicos

Para poder formular unos métodos de diseño sismo-resistente racionales, para sistemas de servicios públicos, es importante conocer qué tipos de daños sísmicos han sufrido los sistemas de servicios públicos durante anteriores terremotos y por lo tanto, cuáles son los puntos vulnerables de estos sistemas. Algunas de las observaciones acerca de las características de los daños sísmicos en estructuras de ferrocarriles y de carreteras, tuberías enterradas, sistemas de comunicaciones y otros servicios públicos las analizaremos brevemente.

8.2.1 *Estructuras de ferrocarriles y carreteras*

Las estructuras que se considerarán aquí son túneles, puentes y taludes. Dos tipos de daños sísmicos se observaron en el caso de túneles en roca o en suelo compactado en las montañas: daño en los portales y daño en el revestimiento interior de los túneles. Lo primero —que es la forma más común de daño observado— está generalmente asociado con derrumbes o fallamiento de terreno en declive, exceptuando el resquebrajamiento de menor importancia y ruptura del hormigón de revestimiento, los daños al interior de un túnel son raros a no ser que haya sido construido defectuosamente, ubicado en una área propensa a derrumbes o sujeta al desplazamiento directo de una falla.

La figura 8.1 muestra la relación entre magnitud del sismo y el radio de daño para taludes de ferrocarriles y puentes. Puede observarse que un incremento de una unidad en la magnitud corresponde aproximadamente a un incremento de cuatro veces en el radio de los daños incurridos, y que el daño a los taludes de ferrocarriles ha sido observado en lugares hasta 250 km o más desde los epicentros de terremotos importantes con magnitudes mayores de 7.5. También demuestra que el radio de daños para los taludes es dos veces mayor que para los puentes.

La experiencia anterior sugiere que los principales daños sísmicos a puentes bajos fueron causados por fallas de subestructuras resultantes de una gran deformación del terreno o de licuefacción. La falla o asentamiento de suelo de relleno también es un tipo común de daño. Esto frecuentemente ejerce grandes fuerzas

sobre los soportes, causando daños severos a la subestructura. El daño sísmico a superestructuras, debido a efectos puramente vibratoriales, es raro. Sin embargo, ocasionado por las fallas de subestructuras, el daño frecuentemente es observado en los soportes portantes y articulaciones. Este daño combinado con excesivo movimiento (ladeamiento, asentamiento, volteos, etc.) de la subestructura originan colapsos de las superestructuras. Las juntas de construcción y uniones entre los pilares y la cimentación pueden ser vulnerables en las estructuras de hormigón si es que no se da adecuada consideración a este aspecto durante el diseño y la construcción. También han ocurrido casos en los cuales la ausencia de amarres horizontales parece haber intensificado el daño a columnas de hormigón. Los daños a estructuras en vías expresas durante el terremoto de San Fernando indicaron que los efectos vibratoriales pueden causar fallas catastróficas a puentes altos que poseen relativamente poca rigidez general. La causa inicial del colapso parecen ser los desplazamientos por lo general grandes en las juntas de expansión.

Dado que el diseño de un puente tiene en consideración las condiciones geológicas, topográficas y de suelo del lugar, y las condiciones de carga que difieren de acuerdo al tipo y la importancia del puente, cada puente debe tener sus propias características. Esto hace difícil comparar los grados de daños sufridos por diferentes puentes. La figura 8.2 compara el daño a casas de madera y puentes de ferrocarriles causados por el terremoto de Fukui en 1948. Aunque la razón del daño de las casas de madera (el número de casas colapsadas/el número total de casas) disminuye linealmente a medida que aumenta la distancia del epicentro, el daño en puentes (el número de puentes dañado/número total de puentes entre estaciones adyacentes) no mostró tal característica, dando a entender que el daño está relacionado a otros factores, tales como la altura de los pilares o soportes, así como a la intensidad sísmica.

El análisis estadístico de 30 puentes dañados en Japón indica sin embargo las siguientes tendencias. Los puentes sobre terreno blando —particularmente cuando éste es licuable— sufren el mayor daño. Los puentes del tipo arco son los más fuertes, mientras que el puente sencillo o del tipo de viga en cantiléver es el más vulnerable a efectos sísmicos. Cuanto mayor es la altura de las subestructuras y el número de tramos, es mayor la probabilidad de que el puente colapse. Los puentes de pilares frecuentemente muestran una baja resistencia sísmica.

Las estructuras de tierra generalmente son las más débiles al estar sujetas a movimientos sísmicos. En general los taludes cortados son mucho más estables que los rellenos. Comúnmente pueden encontrarse 3 tipos de daños: daño en contacto corte-relleno, en los tramos junto a los puentes y en los terraplenes.

Las grietas transversales y desplazamientos verticales en un pavimento se observan con frecuencia como resultado del movimiento diferencial en contactos abruptos corte-relleno. Si tal contacto está en dirección longitudinal (como es el caso de carreteras o ferrocarriles en regiones montañosas con una porción de corte sobre la ladera y la porción de relleno en el lado que da al valle) la parte rellena de la carretera casi siempre se desliza extensivamente, debido a la debilidad inherente y a la respuesta diferencial entre relleno y terreno natural.

Como se ha discutido previamente, las grietas por asentamiento de los tramos de entrada al puente es uno de los tipos más comunes de daños sísmicos. Esto por lo general es el resultado de la densificación del material estructural de relleno. Sin embargo, el daño a los tramos de entrada al puente generalmente están asociados no

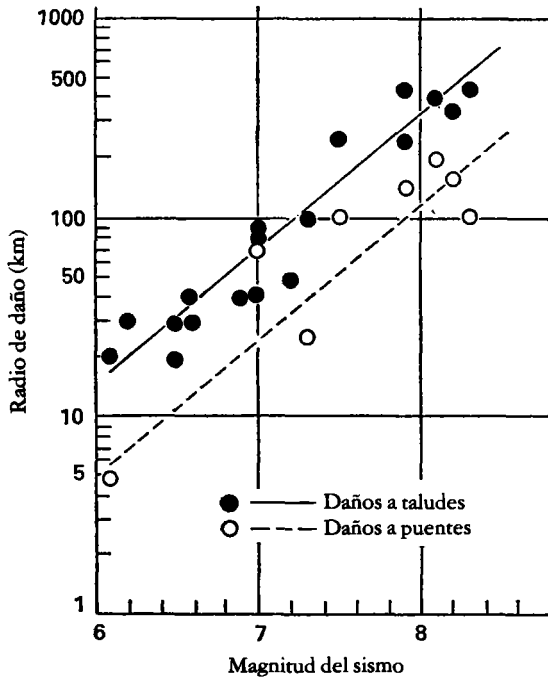


Figura 8.1. Relación entre el radio de daños y magnitud para estructuras de ferrocarriles. ● — significa daños en taludes, definidos como falla del talud y un desplazamiento lateral de la vía mayor de 50 mm. ○ — significa daños en puentes, resumidos en: desplazamiento lateral, daños en el estribo y en los pilares, y caída de vigas.

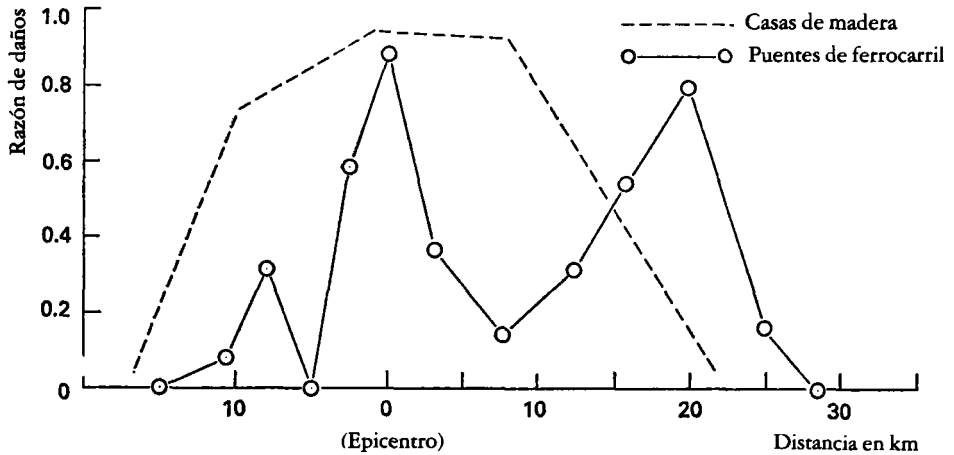


Figura 8.2. Razones de daños entre casas de madera y puentes de ferrocarril, véase distancia epicentral (terremoto de Fukui de 1948).

sólo con el material de relleno sino también con daños a los soportes y cimentación, así como a los terraplenes y su cimentación. En muchos casos, el consiguiente cambio abrupto en el perfil es lo suficientemente grande como para evitar que el tráfico pueda utilizar el tramo de entrada al puente, aun cuando el puente en sí mismo no haya sufrido daños.

Como se observa en la figura 8.1, los terraplenes casi siempre tienen poca resistencia a los efectos sísmicos. El daño se observa frecuentemente con movimientos de terreno de intensidad 8 en la Escala Modificada de Mercalli o con aceleraciones de poco menos de 100 gal. Las fallas de los terraplenes pueden ser clasificadas en los siguientes cuatro tipos: (1) deslizamiento de la superficie inclinada; (2) falla del talud que involucra el terraplén y el terreno natural (la superficie que se desliza es más profunda que en (1)), (3) agrietamiento vertical en la dirección longitudinal cerca de la parte superior del plano inclinado; y (4) asentamiento general. El daño más importante es generalmente el sufrido por los tipos (2) ó (3) y es muy común en terraplenes sobre subsuelos blandos y húmedos. Estas fallas se encuentran fuertemente relacionadas con el aumento de la presión de agua en los poros de la zona donde está el terreno de los cimientos, es decir, se deben a la disminución de la fuerza friccional de los suelos en condiciones de semilicuefacción. El achatamiento del talud y la selección de un buen material para los terraplenes es importante para minimizar los daños sísmicos. Las inclinaciones de 1 a 1.5 son generalmente utilizadas en Japón, pero inclinaciones de 1 a 2 han sido utilizadas en áreas de alto riesgo sísmico en la Unión Soviética. Es deseable usar material de buena calidad o material con una razonable fuerza cohesiva.

8.2.2 *Tuberías subterráneas*

Se ha establecido en base a experimentos en el campo, así como a pruebas de modelos en laboratorio, que las deformaciones producidas en tuberías subterráneas están causadas principalmente por el desplazamiento relativo del terreno durante los terremotos. Esto difiere sustancialmente de los efectos sísmicos en las estructuras sobre la superficie, en las cuales las fuerzas de inercia, cuyo origen son los componentes de aceleración de los movimientos del terreno, tienen un rol dominante en el daño sísmico. Varios patrones típicos de daños han sido observados durante anteriores sismos. El fallamiento causa excesivo desplazamiento axial y/o transversal de las tuberías subterráneas. La licuefacción produce grandes fuerzas boyantes sobre las tuberías (o desplazamiento relativo), debido al asentamiento de edificios adyacentes o al flotamiento de buzones. Las diferentes respuestas sísmicas del terreno circundante producen grandes deformaciones en las tuberías que pasan a través de una región de límite entre ellas. También hay casos en los cuales las ondas sísmicas que se propagan parecen haber sido la causa de los daños a las tuberías. En muchos casos sin embargo, es difícil correlacionar con precisión el daño a tuberías subterráneas con una causa simple y definida.

Con respecto a las propiedades físicas inherentes a una tubería es bien conocido que dos de los más importantes factores son la ductilidad del material del que está hecha y la flexibilidad de sus juntas o empalmes. Hablando en términos generales, las tuberías de acero soldadas tienen mejores características de resistencia que las tuberías de hierro fundido con los empalmes típicos de campana y caño. Las tuberías

de cemento amiantado también tienen poca resistencia sísmica. Para los empalmes de la tubería misma (tenacidad, resistencia y ductilidad, y suficiente flexibilidad) son características muy deseadas. Los daños anteriores parecen indicar que la soldadura de acero de estas juntas es superior a las soldaduras con gas.

Aunque la experiencia anterior nos da poca información sobre los daños sísmicos a oleoductos o cables subterráneos de comunicación, ha habido varios ejemplos en los que las tuberías subterráneas de agua y gas fueron completamente dañadas por terremotos. Un ejemplo reciente es el perjuicio causado por el terremoto de San Fernando en 1971 en la parte norte de la ciudad de Los Ángeles. La figura 8.3 muestra las razones de fallamiento (número de fallas/longitud de la tubería) para los distribuidores principales de gas y agua en función de distancia al epicentro. Estas figuras se obtuvieron dividiendo la región afectada en franjas con un ancho norte-sur de aproximadamente 480 metros y evaluando el número de fallas y las longitudes de las tuberías de distribución dentro de estas franjas. Dado que el terremoto tuvo una magnitud de 6.6, con su epicentro a sólo unos 10 km al norte del extremo norte de la región afectada, los datos de la figura 8.3 son adecuados para analizar la relación entre daños y severidad del sacudimiento del terreno. Es importante que se observen los altos valores de razón de daño en la franja 7, que corresponde a una región donde un número de trazos de fallas superficiales fueron reportadas. A juzgar por varios informes la aceleración máxima horizontal en el límite norte de la ciudad (distancia epicentral Δ 10 km) fue alrededor de 500 gal y la aceleración en la parte extremo sur de la zona afectada (Δ 20 km) alrededor de 250 gal. La figura 8.4 muestra la relación obtenida entre daño a tubería subterránea de agua y máxima aceleración del terreno. Se observa que el daño resulta casi despreciable o insignificante cuando la aceleración máxima es menor que 250 gal. Esto se encontró que era cierto también para tuberías de arcilla vitrificada, utilizadas en los sistemas de desagües. El daño parece aumentar bruscamente cuando la aceleración máxima sobrepasa este umbral. También se observan en la figura 8.4 las razones de fallamiento promedios de las tuberías de hierro fundido en Tokio durante el terremoto de Kanto en 1923, en Fukui durante el terremoto de 1948 y en Managua durante el terremoto de 1972. Aunque la máxima aceleración del terreno ciertamente no es la mejor pauta para la severidad del sacudimiento del suelo en cuanto a su efecto sobre tuberías subterráneas, los resultados de la figura 8.4 parecen ser consistentes para distintos terremotos.

Las características generales mencionadas aquí no son siempre válidas cuando las tuberías están sujetas a fallas, deslizamiento o licuefacción. Las fuerzas de compresión sobre una tubería, generadas por fallamiento, producen doblamiento y pueden deformar la tubería hasta dejarla en forma de campana; cualquier fuerza tensil puede simplemente agrietarla y hasta romperla. Durante el terremoto de Niigata en 1964 las tuberías en áreas expuestas a licuefacción estaban en algunos casos completamente torcidas. Existe la duda en la actualidad de si la tubería puede ser económicamente diseñada para resistir movimientos del terreno tan violentos.

8.2.3 *Sistemas de comunicación, facilidades y equipamiento en servicios públicos*

El daño más común producido por un sismo en los sistemas de comunicación es la ruptura de alambres de los servicios aéreos y el total o parcial desplazamiento del

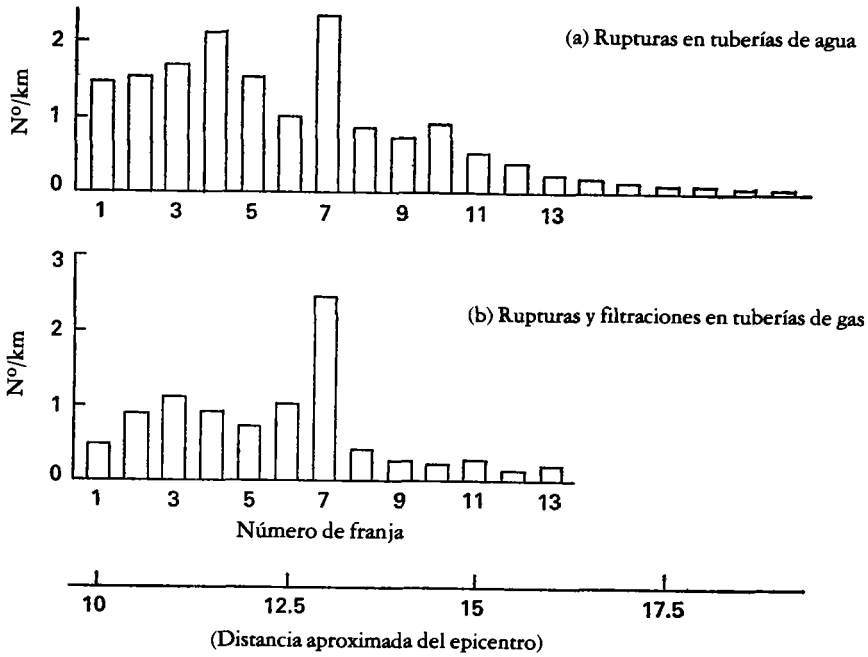


Figura 8.3. Daño a tuberías de distribución de agua y gas causado por el terremoto de San Fernando de 1971.

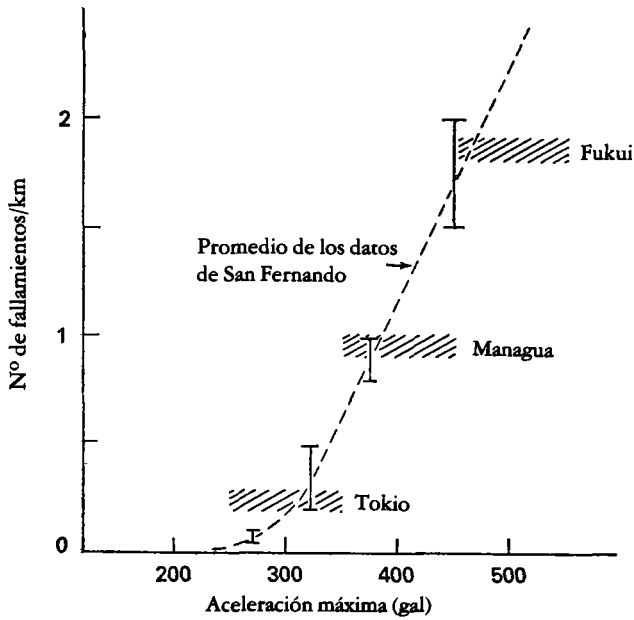


Figura 8.4. Razón de fallamiento de tuberías de agua en función de la aceleración máxima.

lugar de las estructuras que los sostienen. Durante el terremoto de Tokachi-Oki de 1968 por ejemplo, una antena de microondas fue desplazada de una de las estaciones repetidoras, y la comunicación entre dos importantes islas quedó interrumpida durante casi todo un día. Durante el terremoto de San Fernando una unidad de conmutación automática sirviendo a 9500 usuarios se cayó en la zona de Sylmar que fue altamente sacudida. Aunque el edificio de la central telefónica donde estaba instalada esa unidad sufrió algún daño estructural, la principal causa de la caída de los soportes del equipo fue la poca resistencia tanto de los amarres que conectaban los soportes al piso de hormigón como de los miembros de apoyo cercanos a la parte superior de los soportes.

Distintos daños sísmicos han sido reportados a los sistemas de transmisión de energía eléctrica a raíz de terremotos. Torres de acero reticuladas que soportan líneas de transmisión son afectadas frecuentemente por el movimiento del terreno y por agrietamiento, pero en general estas torres han demostrado tener una resistencia inherente a los terremotos. Esto es parcialmente porque las fuerzas de viento y otras que se toman en consideración en el diseño de estas torres exceden la carga sísmica. El daño más común a sistemas aéreos de distribución eléctrica viene dado por conductores y transformadores rotos o quemados. Se informa que después del terremoto de San Fernando, aproximadamente 285 transformadores del sistema de distribución aéreo fueron suficientemente dañados como para necesitar ser reemplazados.

Sin embargo, el daño más importante y costoso al sistema de energía eléctrica es el que sufren las subestaciones de transmisión, como las que se necesitan para conmutación, conversión y recepción. En muchos casos el anclaje y el montaje deficientes son las causas del fallo de equipos. A veces han tenido lugar graves daños ocasionados por equipos que dependían de porcelana para su resistencia estructural o que se mantenían por componentes de porcelana. Evidentemente, lo quebradizo de la porcelana los hace extremadamente vulnerables a las fuerzas sísmicas.

Los sistemas de agua potable han sufrido también diversos tipos de daños. Los acueductos, canales y tuberías en plantas hidroeléctricas están dañados debido a desplazamientos excesivos, relativos o asociados por ruptura del terreno. El doblamiento de la cobertura de tanque se informa haber sido causado por el asentamiento diferencial de las cimentaciones o por el movimiento de balanceo inducido por el oleaje del agua contenida. El daño a los embalses subterráneos también deben ser notados tal como se vio en los daños a la planta de filtración de Joseph Jensen, causados por el terremoto de San Fernando. La estabilidad de los suelos debajo y alrededor de tales estructuras es un factor tan importante como la presión dinámica del suelo producida por los rellenos.

8.3 El estado actual de los métodos de diseño sismo-resistente para servicios públicos

El estado del arte del diseño sismo-resistente de servicios públicos se puede observar mejor en «Earthquake-Resistant Regulations, A World List, 1973» compilado por la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica. Esta lista contiene los regla-

mentos sismo-resistentes de 28 países, de los cuales 8 (Bulgaria, India, Japón, Nueva Zelanda, Turquía, Estados Unidos, Unión Soviética y Yugoslavia) poseen códigos sismo-resistentes para estructuras generales de ingeniería civil, además de edificios. Sin embargo, la mayoría de estos reglamentos no son tan detallados como los de las estructuras de edificaciones. Dado que los servicios públicos cubren un amplio capítulo en los distintos tipos de estructuras y equipamientos, reglamentos generales por sí solos, usualmente no son suficientes para un diseño práctico anti-sísmico.

8.3.1 *Estructuras de puentes*

El diseño sismo-resistente de puentes está por lo general calculado siguiendo el método del coeficiente sísmico (fuerza, estática equivalente) o por el método del coeficiente sísmico modificado (espectro simplificado de respuesta). En este último el coeficiente de diseño sísmico está determinado en general por los cinco factores siguientes:

1. Zona sísmica.
2. Condiciones del suelo.
3. Periodo natural del puente.
4. Amortiguamiento del puente.
5. La importancia del puente.

Los puntos 3 y 4 no son considerados en el método del coeficiente sísmico, mientras que el método del coeficiente sísmico «modificado» toma en consideración las propiedades dinámicas del puente, conjuntamente con las características del verdadero movimiento del suelo durante el terremoto, tal como se representan los espectros de diseño.

La zonificación sísmica está normalmente basada en datos históricos de la ocurrencia de terremotos y en la sismo tectónica. El resultado de la zonificación usualmente se muestra como un mapa de aceleraciones máximas esperadas, o de intensidades sísmicas en determinado periodo de tiempo, probablemente 100 años. Estas aceleraciones máximas, sin embargo, no son usadas directamente para evaluación de fuerzas sísmicas. La experiencia anterior demuestra que el daño sísmico a las estructuras es considerablemente menor que el indicado por la aceleración de pico del movimiento del terreno. El criterio desde el punto de vista de la ingeniería se ejerce luego para obtener el mapa de zonación útil para el diseño, en el cual 3 ó 4 clases de zonas sísmicas son especificadas con diferentes valores del coeficiente sísmico de diseño.

Dado que el daño sísmico observado en puentes muestra que las malas condiciones del subsuelo aumentan la severidad del daño, es común utilizar coeficientes sísmicos más altos para condiciones inferiores del subsuelo. El factor de la condición del terreno actualmente adoptado para el diseño de puentes en las carreteras en Japón varía desde 0.9 para rocas terciarias buenas hasta 1.2 para estratos gruesos aluviales blandos. Iguales provisiones están contenidas en los criterios del Departamento de Transporte de California, que incluye el efecto del suelo que está encima, sobre la amplificación del movimiento sísmico, en función de la profundidad del aluvial hasta el basamento de roca.

Mientras que el efecto del periodo natural y del amortiguamiento son incluidos,

el coeficiente sísmico «modificado» es determinado por los espectros de respuesta de diseño. Estos espectros representan la manera de amplificarse las aceleraciones sísmicas dentro de la estructura. Espectros comúnmente utilizados tienen una alta porción plana hasta cierto valor del periodo natural (T_1), luego una porción que disminuye con el periodo, seguido por una porción baja plana para estructuras que tienen periodos naturales mayores $T_2 (> T_1)$. Dado que es difícil estimar valores razonables de amortiguamiento para diferentes diseños de puentes el efecto del amortiguamiento está, por lo general, implícitamente incluido en los espectros de diseño al asumir un factor de amortiguamiento de aproximadamente 5 %.

Los factores de importancia con frecuencia son incorporados a los códigos, por ejemplo, en Nueva Zelanda (Ministerio de Obras, 1972), el factor de importancia varía desde 1.0 para puentes por los cuales transitan más de 2500 vehículos por día (y para todos los puentes que están debajo o sobre carreteras y ferrocarriles), hasta 0.7 para puentes sobre los cuales transitan menos de 250 vehículos por día. Los valores adoptados en Japón son 1.0 para autopistas y carreteras nacionales y 0.8 para otros caminos.

Aunque los 5 factores descritos arriba pueden ser considerados como los fundamentales, actualmente hay casos en los cuales se incluyen otros factores adicionales. Por ejemplo, el factor de reticulado expresa las diferencias en sistemas estructurales (California, 1973) y el factor de ductilidad mínima (Nueva Zelanda, 1972) está dirigido a obtener una estructura lo más dúctil posible.

Una estructura de un puente está diseñada por lo general de acuerdo con la carga sísmica que actúa en las direcciones longitudinal y transversal. Las tensiones producidas por fuerzas en estas dos direcciones pueden ser combinadas, pero en la mayoría de los casos la estabilidad en cada dirección es examinada independientemente. La carga sísmica vertical puede ser combinada con la fuerza horizontal pero con mayor frecuencia se ignora para lograr una mayor simplicidad en los cálculos de diseño. En este caso, sin embargo, la fuerza horizontal de diseño es aumentada algo para poder incorporar posibles efectos del componente vertical de los movimientos sísmicos. Por supuesto, las fuerzas verticales son esenciales en el diseño de los soportes de apoyo o de las conexiones entre superestructura y subestructura. Las presiones de tierra y las presiones hidrodinámicas durante los terremotos deben ser consideradas en aquellas porciones relevantes de un sistema de puentes.

En el caso de puentes construidos sobre subsuelos inferiores, la ruptura del terreno o la disminución de su capacidad de apoyo durante sismos influye mucho en la estabilidad de la subestructura. En el diseño de los puentes de carreteras en Japón, las capas arenosas del suelo vulnerables a licuefacción y las capas del suelo cohesivas con resistencia compresiva menor de 0.2 kg/cm^2 , se ignoran al evaluar la resistencia sísmica de las subestructuras. Las capas arenosas del suelo se juzga que tienen un alto potencial para la licuefacción si es que están saturadas hasta unos 10 metros de la superficie y tienen una penetración normal del valor N menor que 10, un valor de D_{20} en la curva de acumulación del tamaño del grano entre 0.04 mm y 0.5 mm y un coeficiente de uniformidad menor a 6.

Obviamente es importante que los puentes en las principales rutas de tráfico no sufran derrumbe en el caso de un evento sísmico. La anterior experiencia demuestra sin ninguna duda que los detalles de diseño son altamente importantes para mantener la integridad estructural de un sistema de puentes. Los pasadores, seguros o dispositivos especiales para evitar que algunos tramos salgan de sus soportes son

efectivos, y los asientos para soportes cortantes deben tener un ancho suficiente. El uso del número suficiente de amarres o de refuerzos laterales también es de importancia primaria en el diseño de columnas de hormigón, con el fin de evitar el doblamiento de los refuerzos verticales y las catastróficas fallas que pueden resultar.

8.3.2 *Tuberías subterráneas*

Ya que las observaciones de campo y las pruebas de modelos en laboratorio han demostrado claramente que las deformaciones de tuberías subterráneas durante terremotos son casi las mismas que aquellas que sufren las capas superficiales del terreno, el diseño sismo-resistente de tuberías subterráneas debe estar basado no en las fuerzas sísmicas de inercias (como en el caso de edificios o de estructuras de puentes) sino en el comportamiento sísmico del terreno, y particularmente en las características del desplazamiento relativo de las capas superficiales. Aunque la norma para diseño antisísmico de Japón en servicios de suministro de agua proporciona una filosofía básica para el diseño de tuberías subterráneas, en el presente no existe casi ninguna regulación que especifique métodos de diseño prácticos sismo-resistentes basados en este concepto.

Han existido varios casos en los cuales la resistencia a sismos de estructuras subterráneas ha sido estudiada desde el punto de vista de la deformación del terreno. El túnel submarino del sistema de tránsito rápido en el área de la bahía de San Francisco fue analizado sometiendo el tubo a un patrón de desplazamiento sinusoidal, igual al que se produce por la deformación del terreno durante un sismo. Aunque este proyecto ciertamente proporcionó mucha información valiosa para el planeamiento y el diseño de estructuras similares, se requiere más investigación acerca del potencial de licuefacción del suelo y los desplazamientos relativos producidos entre terrenos adyacentes con diferentes características de respuesta dinámica. Un procedimiento similar se encuentra en las normas para tuberías, publicadas por el gobierno de Japón en 1972. Sin embargo, los métodos usados para determinar la longitud de onda y las correspondientes amplitudes de desplazamiento parecen requerir examen adicional.

En cualquier caso será difícil establecer un método de diseño racional, sismo-resistente, hasta que no se disponga de una mayor información fiable acerca de la magnitud de desplazamiento relativo del terreno y la distancia sobre la cual ocurre este desplazamiento.

8.3.3 *Análisis de la respuesta dinámica*

Debido a los recientes adelantos en las computadoras digitales y sus aplicaciones, el análisis de la respuesta dinámica está resultando cada vez más general para estructuras como puentes, presas, tanques, y para estructuras subterráneas y de tierra y que están sujetas a movimientos sísmicos. Sin embargo, las técnicas de análisis dinámico todavía no han sido incorporadas a los procedimientos normales de diseño de sistemas de servicios públicos, y son por lo general utilizadas para un examen detallado de diseños, propuestos para instalaciones importantes o especiales.

Ya que estructuras como puentes de gran luz, puentes sobre columnas altas y

túneles tipo tubo subterráneo, no han sido o raramente han estado sujetas a sismos verdaderamente fuertes, el análisis dinámico puede ser utilizado para investigar cómo dichas estructuras responderán a las fuerzas sísmicas tanto cuantitativa como cualitativamente. Las técnicas para el análisis de la respuesta dinámica también son usadas en la interpretación del daño real que ocasionan los terremotos.

En el supuesto de que un modelo matemático razonable pueda ser formulado, la respuesta lineal dinámica puede ser evaluada para una historia-tiempo determinada de movimientos sísmicos con un nivel dado de aceleración. Sin embargo, para que este método más sofisticado de diseño pueda ser incorporado a los procedimientos prácticos de diseño, se necesita trabajar más sobre el método de idealización de la estructura, sobre la selección y aplicación de los movimientos de entrada, y sobre el concepto del estado final de una estructura (esfuerzos, desplazamientos e inestabilidad general).

8.4 Actividades de investigación y contramedidas

La investigación de los problemas de los sismos en los sistemas de servicios públicos puede ser clasificada en pruebas de campo, pruebas de laboratorio, observación de las respuestas a sismos de las estructuras actuales, y estudios analíticos que incluyen el análisis de la respuesta dinámica utilizando modelos matemáticos. La investigación de acuerdo con estas líneas, se lleva a cabo sobre varios tipos de estructuras en los sistemas de servicios públicos, pero la acumulación de datos es inherentemente más lenta que para los edificios, debido a la gran variedad de estructuras afectadas.

Las pruebas dinámicas en el campo de prototipos de estructuras han sido llevadas a cabo extensivamente en Japón, especialmente con puentes y presas. Las pruebas de vibración forzada —usando una máquina vibratoria— se realizan con frecuencia durante las diversas etapas de la construcción de un puente, para verificar las características dinámicas de las diferentes partes del sistema del puente, como los cimientos y las subestructuras y superestructuras. Las pruebas de carga estática también se llevan a cabo para determinar las propiedades de rigidez de las estructuras. Los resultados de estas pruebas de campo, así como las realizadas en el laboratorio con mesas vibratorias, se utilizan para examinar la validez de los valores de los parámetros adoptados en el cálculo de diseño y la formulación de modelos. Los valores de amortiguamiento obtenidos en pruebas de campo son particularmente útiles porque en la actualidad no existe un método analítico para estimar dicho amortiguamiento en los distintos tipos de estructuras.

Los modelos de masa concentrados son utilizados con profusión en el análisis dinámico de puentes. Los resultados generalmente se obtienen para respuestas elásticas debido a la dificultad de determinar con precisión las características de rigidez de varios componentes en la etapa inelástica. Existen dificultades especiales en la evaluación de la rigidez de los sistemas de cimentación debido a la complejidad de fenómenos de interacción suelo-cimiento y a las propiedades de respuesta inelástica de las capas del terreno contiguo. La información obtenida del análisis dinámico de puentes dañados en anteriores sismos se emplea para revisar los requerimientos del código. Como ya se ha mencionado, la importancia de los detalles de diseño ha sido bien reconocida en los últimos años y, en algunos países, para evitar que se

caigan algunos tramos de sus soportes se están instalando ciertos dispositivos incluso en los puentes existentes. El examen estadístico detallado de anteriores daños es también importante porque los resultados de tales exámenes pueden servir para evaluar las propiedades sismo-resistentes de los puentes existentes y así mitigar los peligros de futuros sismos fuertes.

Los experimentos en el campo en base a modelos a gran escala de conductos subterráneos se han llevado a cabo utilizando explosivos enterrados, y se efectúan mediciones de las tensiones dinámicas dentro de túneles existentes, de tipo tubo enterrado, en Japón. Las pruebas con modelos en el laboratorio son recomendadas en la guía propuesta para el diseño sismo-resistente de túneles debajo del agua en Japón, con el fin de obtener una respuesta tridimensional total de las características del sistema de interacción túnel-terreno. Los modelos a pequeña escala representando un túnel, de tipo tubo-enterrado, dentro de los estratos del terreno, están sujetos a movimientos aleatorios, como los que produce un sismo, usando una mesa vibratoria. Se debe tener cuidado especial cuando se utilizan modelos, ya que el modelo debe realmente representar un sistema estructural con una dimensión lineal de varios cientos de metros o más. Los materiales con bajos módulos de elasticidad, tales como la gelatina, se utilizan con frecuencia para representar el material del terreno, y el caucho de silicio para los túneles. El análisis dinámico también se lleva a cabo mediante modelos matemáticos y se han obtenido resultados para la distribución de deformaciones y la relación entre deformaciones y propiedades del terreno para un túnel que penetra terrenos de condiciones variables.

Se han hecho estudios estadísticos de los daños sísmicos a tuberías subterráneas de servicios públicos, y se han obtenido algunos resultados acerca de la relación entre daños y condiciones del terreno y también entre la razón de fallamiento y la severidad de la sacudida del suelo. Estos datos son esenciales para poder pronosticar el daño sísmico a sistemas de servicios públicos, posible en futuros terremotos.

Pruebas a escala real y el análisis de la respuesta dinámica de equipos para generación de energía eléctrica han revelado que las consideraciones dinámicas son frecuentemente esenciales para el diseño sismo-resistente de equipos, tales como interruptores automáticos de circuitos eléctricos, de tipo aire. Como se ha discutido previamente, los componentes de porcelana en los sistemas de servicios eléctricos son vulnerables a las fuerzas sísmicas. Se han desarrollado tubos de porcelana con mayor resistencia y se han intentado reforzar los aisladores de sostenimiento. También pueden utilizarse montajes con amortiguadores para absorber los impactos y reducir el efecto vibratorio y la respuesta del equipo. La ventaja de poder desacoplar equipos que se encuentran interconectados, mediante el uso de juntas flexibles ha resultado evidente, analizando los resultados de varios estudios hechos con motivo del terremoto de San Fernando. Tales conexiones flexibles evitan cargas de impacto y otros efectos adversos, al permitir desplazamientos relativos durante el terremoto de los equipos interconectados. En algunos casos, el uso de conectores que puedan romperse es una medida efectiva para aislar equipos cuya desconexión temporal no ha de interrumpir la capacidad del sistema para suministrar energía.

La transmisión de información correcta después de la ocurrencia de un desastre sísmico es de vital importancia para la evacuación efectiva, rescate y reconstrucción. Para este efecto, los edificios de telecomunicaciones deben estar dotados de mayor resistencia y ductilidad que los edificios ordinarios, a fin de que sus instalaciones y equipamiento puedan continuar funcionando por lo menos en algún grado, aun

después de un fuerte sismo. La *Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation* (NTTPC) ha estado dedicada a la investigación de diseño sismo-resistente de edificios de telecomunicaciones. Cuando se diseña tal edificio, se realiza un análisis de la respuesta elástica dinámica y se examina la resistencia final mediante el análisis elastoplástico, utilizando una aceleración máxima de 0.4 g a 0.5 g. Además de las propiedades de una resistencia adecuada, también se especifica el desplazamiento máximo de los pisos.

Dado que un sistema de servicios públicos es una red, es importante asegurarse de que las interrupciones dentro de la red no afectarán el funcionamiento integral del sistema. La redundancia en el sistema es una característica muy deseable y la red debe ser planeada en circuitos cerrados, de tal manera que pueda continuar manteniendo sus funciones esenciales aislándose las secciones dañadas. La actual política del NTTPC es de proveer rutas múltiples de telecomunicaciones, de 50 a 100 km una de otra, de tal manera que las rutas principales y de desvío no sean afectadas por un solo sismo.

Las pruebas en mesas vibratorias de modelos a gran escala de terraplenes se han llevado a cabo extensivamente en Japón. Éstas han demostrado que el terreno blando y húmedo debe ser fortalecido de alguna manera como por ejemplo, con pilones de arena y grava antes de construir dichos terraplenes. Dado que el incremento de la presión de poros es la causa principal de la falla de terraplenes sobre terreno no resistente, un drenaje adecuado aumenta frecuentemente la resistencia a sismos. El uso de tubería para drenaje y/o la inserción de capas de grava debajo del terraplén han resultado efectivos en este caso.

8.5 Propuestas para investigaciones futuras

Está claro, que en la actualidad el diseño sismo-resistente de sistemas de servicios públicos está subdesarrollado, en comparación con lo que se conoce para el caso de los edificios. En particular, el diseño sismo-resistente de tales estructuras, como tuberías para combustibles líquidos y grandes tanques de almacenamiento, es un problema nuevo en la ingeniería antisísmica. Para poder construir sistemas fiables de servicios públicos que funcionen satisfactoriamente durante y después de un sismo, es importante que los científicos y los ingenieros en todos los países involucrados cooperen en elevar el nivel general de la tecnología en este campo, lo más pronto posible.

Los siguientes, son algunos de los principales problemas técnicos a los que se les debe prestar la máxima atención en las futuras investigaciones:

1. Una estimación fiable del desplazamiento relativo del terreno sobre un plano horizontal, y el diseño sismo-resistente de estructuras, especialmente de tuberías subterráneas, en base a este concepto.
 2. El análisis del comportamiento dinámico no lineal de los puentes, y los métodos de diseño sismo-resistente que incorporen este conocimiento.
 3. Los mecanismos de deslizamientos, fallas de taludes y terreno inclinado durante un sismo.
 4. Posibles medidas para mitigar el daño a tuberías o conductos debido a fallas.
- Además de los puntos señalados arriba, que pueden ser considerados como proble-

mas de la ingeniería antisísmica tradicional, deben iniciarse urgentemente los estudios en los siguientes campos:

1. El examen detallado y cuantitativo de los daños causados con anterioridad por sismos a servicios públicos y los efectos sobre la comunidad.
2. El desarrollo de la posibilidad de pronosticar cuantitativamente el daño sísmico en los sistemas de servicios públicos.
3. El establecimiento de una metodología que incorpore equilibradores u otro concepto de instalaciones, capaces de disminuir los efectos que sobre las actividades de las personas ocasionan los daños sísmicos a los servicios públicos.
4. La evaluación de riesgos permisibles a sistemas de servicios públicos debido a sismos fuertes.

También se ha de tomar nota de que la investigación en estos campos debe estar siempre coordinada con el planeamiento administrativo anterior al desastre, sin lo cual la mitigación del peligro nunca podrá ser lograda. Las medidas administrativas podrán incluir:

1. Una provisión de instalaciones de reemplazo, facilidades de almacenamiento y rutas alternas.
2. Preparaciones para una rápida reconstrucción.
3. La provisión de interconexiones con otros servicios públicos.
4. La revisión de estructuras antiguas.
5. Planeamiento de emergencia con otros servicios públicos y agencias.

El requerimiento más importante en el planeamiento, diseño, construcción, operación y mantenimiento de cualquier sistema de servicios públicos es estar preparado para encarar el riesgo sísmico en todo momento.

9 Tendencia actual del diseño sismo-resistente de grandes presas

Por SHUNZO OKAMOTO

9.1 Introducción

Debido a que existen muchas maneras de que los terremotos puedan causar daños y graves peligros a la operación de seguridad de presas en zonas sísmicas, la práctica en lo que concierne a hacerlas resistentes a terremotos ha dependido en gran medida de la aplicación de buen criterio por parte de los ingenieros de diseño o los comités técnicos responsables de tales proyectos. Algunos países han instituido sus propias normas de diseño para presas, pero éstas son sencillas y sólo indican los principios básicos. (Véase nota 1 al final de este capítulo).

Actualmente, el procedimiento general para el diseño sismo-resistente de una presa es el siguiente:

- a. Determinación de las fuerzas sísmicas que probablemente sean aplicadas a la presa.
- b. Examen de la seguridad de la cimentación de la presa durante los terremotos.
- c. Examen de la seguridad del cuerpo de la presa durante el terremoto.

9.2 Determinación de las fuerzas sísmicas aplicadas a las presas

De acuerdo con los métodos usuales de análisis, se supone que las presas están sujetas a ciertas fuerzas durante los terremotos. Estas fuerzas consisten en una fuerza de inercia sobre los cuerpos de la presa y la presión del agua embalsada resistiendo la vibración de estas presas. Dichas fuerzas combinadas se conocen como carga sísmica.

Las presas son diseñadas para ser seguras, tanto bajo una carga normal como bajo la carga de diseño sísmico. Generalmente se supone que la carga de diseño sísmico se reduce en un 50 % cuando los embalses contienen poca agua o se encuentran vacíos, y que un terremoto fuerte y una extraordinaria inundación no ocurren simultáneamente.

Para cerciorarse sobre la seguridad de la presa contra sismos existen dos métodos de análisis: El *método pseudo-estático* y el *método dinámico*.

En el *método pseudo-estático*, la fuerza de inercia y la presión sísmica del agua sobre la presa son consideradas como fuerzas estáticas. La magnitud de la fuerza de inercia viene determinada por la masa de la presa multiplicada por un coeficiente llamado coeficiente sísmico. (Véase nota 2).

En el método convencional, el coeficiente sísmico se considera que es uniforme a través de toda la altura de la presa y se determina de acuerdo con el tipo de presa y sismicidad del lugar donde está enclavada, tal como se indica en un mapa de zonificación sísmica. En la práctica, el coeficiente sísmico varía entre 0.05 y 0.25 en la dirección horizontal, y entre 0 y 0.5 del coeficiente sísmico horizontal en la dirección vertical. La presión sísmica del agua también se supone que es una fuerza estática. (Véase nota 3).

El *método del coeficiente sísmico modificado* es una variante del método pseudo-estático. En este método, un valor adecuado del coeficiente sísmico, basado en los resultados de los análisis experimental y matemático del comportamiento dinámico, se da para cada nivel de la presa. Este método tiene el mérito de la simplicidad del método estático, al mismo tiempo que elimina parte de la inconsistencia de este último con las observaciones de campo.

La simplicidad del procedimiento analítico hace que el método del coeficiente sísmico modificado sea muy conveniente para uso práctico y es utilizado en muchos casos. El estándar de diseño japonés para presas de arco especifica un coeficiente sísmico para el cuerpo de la presa dos veces mayor que para las cimentaciones, mientras que el estándar de la Unión Soviética especifica un coeficiente sísmico que aumenta linealmente desde la parte inferior hasta la parte superior de la presa.

En el método dinámico, primero se especifica el movimiento del terreno durante el sismo, luego se calculan las vibraciones de la presa y del agua en el embalse, en respuesta al movimiento del terreno. Finalmente, se determinan las fuerzas de inercia y la presión dinámica del agua aplicada a la presa.

La aceleración máxima del diseño antisísmico es especificado mediante uno de estos tres procedimientos: (1) utilizar el valor requerido por la especificación; (2) estimar la aceleración máxima en el lugar de la presa a partir de la magnitud y distancia focal de anteriores sismos y (3) estimar la aceleración máxima de la magnitud y la distancia focal de un terremoto que podría ocurrir en fallas activas conocidas. (Véase nota 4).

La forma de onda también puede ser seleccionada por uno de estos tres métodos: (1) utilizando el espectro de respuesta; (2) utilizando un modelo de onda sísmica construida por métodos estadísticos y (3) utilizando los registros de anteriores terremotos fuertes, incluyendo, si fuera posible, los registros obtenidos en el lugar de la presa.

Para presas de hormigón, la vibración se calcula por la teoría elástica tomando en consideración la interacción entre el agua del embalse y la presa, de la cual la fuerza de inercia y la presión sísmica del agua pueden ser derivadas. La teoría elástica no puede utilizarse para la determinación de las cargas sísmicas sobre presas de talud, porque es peligroso suponer que el comportamiento de tales presas durante terremotos fuertes es elástico. En este caso, la fuerza sísmica de inercia puede ir determinada por la técnica de elementos finitos, tomando en consideración las propiedades del suelo y de la grava.

9.3 Comprobación de la seguridad de la cimentación de presas durante sismos

La ubicación de un embalse se decide después de una completa investigación y estudio de la geología del lugar. Si hay deslizamientos de fallas o movimientos de corteza por terremotos cerca del lugar, la presa puede ser peligrosa. Teniendo en cuenta la geología local y particularmente, si la cimentación es de roca pura o blanda, el tipo de presa puede ser seleccionado y se puede proceder a un diseño sísmo-resistente, prestando atención a las características de vibración de la presa y sus cimentaciones. En los lugares en que la cimentación contiene capas arenosas se requiere una precaución especial, ya que han ocurrido casos de licuefacción durante terremotos con la inestabilidad consiguiente y muy seria de las estructuras. Generalmente un tratamiento apropiado de la cimentación para consolidar el terreno y aumentar su capacidad de soporte, y para evitar la filtración de agua, resulta ser una necesidad básica de toda construcción de presas. (Véase nota 5).

Para la seguridad de las presas de gravedad, de hormigón, es necesario investigar la posibilidad de deslizamiento en la dirección aguas abajo. El factor de seguridad en el deslizamiento está representado por la relación de la resistencia horizontal de la cimentación con las cargas horizontales aplicadas a la presa. Un aumento en la carga horizontal debido a sismos puede ser considerado, pero generalmente no se tiene en cuenta, por el cambio de resistencia en la cimentación, que puede ser causado por un cambio en la presión de agua sobre los poros en la cimentación de roca. (Véase nota 6.).

En el caso de presas de arco, el empuje por la presión del agua del embalse se aplica a las masas de rocas que forman los estribos del arco. Durante terremotos, el empuje del arco aumentará debido a la carga sísmica; aún más, una fuerza sísmica de inercia es aplicada al estribo de la masa de la roca. Por lo general, la forma de una sección horizontal de la presa de arco es circular y el ángulo del arco es grande para reducir la fuerza causada por la presión del agua. Sin embargo, en este caso, el empuje del arco actúa sobre el estribo haciendo un ángulo con la normal del estribo. Por lo tanto, en un lugar donde las condiciones geológicas son relativamente pobres, un arco parabólico debe ser usado en vez de uno circular, dado que el arco parabólico tiene la ventaja de que la dirección del empuje del arco es hacia la parte central de la masa de estribo de roca. Sin embargo, desde el punto de vista de rigideces durante la vibración, un arco parabólico es generalmente inferior a uno circular. Por lo tanto, en zonas sísmicamente activas, elegir entre un arco circular y uno parabólico puede hacerse sólo después de una cuidadosa consideración de las condiciones geológicas del lugar.

La estabilidad de la masa de roca sometida a estas cargas puede ser examinada por el método del arco de deslizamiento o por un análisis de presiones. En el método del arco de deslizamiento la masa de roca de los estribos está dividida en secciones horizontales y la estabilidad de cada sección es examinada por los métodos de la mecánica de suelos. En el análisis de esfuerzos se utiliza el método de elementos finitos. Para esta última técnica, las propiedades mecánicas de la roca deben ser conocidas con precisión, y consecuentemente las pruebas de roca se necesitarán tanto *in situ* como bajo condiciones de laboratorio.

En algunos casos, los estribos de las presas de arco están reforzados y su

estabilidad asegurada, tarrajando con cemento o pretensando la roca con pernos de acero, o reemplazando con hormigón la roca debilitada por efectos del tiempo. La resistencia de tal refuerzo debe de estar a prueba de envejecimiento y de vibraciones sísmicas.

9.4 Comprobación de la seguridad de las partes principales de las presas durante sismos

Existen dos causas principales de daños en presas: los esfuerzos y deformaciones en el cuerpo de la presa y el desbordamiento del agua. Las presas de terraplén están sujetas en particular a daños, por la erosión que produce el desbordamiento. Las olas altas causadas por el viento o por los sismos en los embalses pueden hacer que el agua fluya sobre la presa, aunque generalmente se dispone de suficiente margen en la cresta para proteger a las presas de tales efectos. Los esfuerzos y deformaciones debidos a sismos pueden investigarse por análisis experimental o matemático para poder evitar las fallas.

En el análisis matemático, el hormigón generalmente se supone que se comporta elásticamente y los esfuerzos en las presas de hormigón se analizan por la teoría elástica. El análisis de presas de terraplén, por otro lado, se realiza con cálculos no lineales, tomando en consideración las propiedades plásticas del suelo y de la grava. Los métodos utilizados con mayor frecuencia para el cálculo son: el método de los elementos finitos y el método de diferencias finitas. En estos métodos, se han de tener en cuenta las condiciones en las superficies de contacto entre las presas y sus cimentaciones, así como las propiedades mecánicas de los materiales que constituyen la presa.

En el caso del hormigón en presas de gravedad, de altura moderada, el método convencional pseudo-estático de análisis puede ser aplicable debido a la gran rigidez de dichas presas, rigidez que a su vez es debida a la forma y a los materiales usados en su construcción. Sin embargo, cuando tales presas son altas, el efecto combinado de las vibraciones de corte y flexión resulta apreciable y requiere un análisis dinámico. (Véase nota 7).

Cuando el sismo es fuerte, los esfuerzos de tracción tienen lugar cerca de la base, aguas arriba. Como los esfuerzos de tracción pueden producir grietas, los esfuerzos en esta parte de la estructura deben ser cuidadosamente examinados y se tiene que tener una suficiente área de la sección controlada para evitar agrietamientos. Prácticamente, en zonas sísmicamente activas, la cara aguas arriba de la presa está diseñada para una inclinación del 5 al 10 % reduciendo así los esfuerzos en la vecindad de la base aguas arriba y haciéndola sismo-resistente.

La distribución de esfuerzos en las presas de arco y el empuje aplicado a los estribos son extremadamente interesantes y pueden obtenerse por el análisis de esfuerzos. El método de cargas de tanteo y el método de los elementos finitos son los que se emplean comúnmente en el análisis de presas de arco. En el método de cargas de tanteo, por fines de simplicidad, a veces se supone que la carga sísmica es una fuerza estática cuyo componente aguas abajo es soportado por elementos cantiléver. Con esta suposición, el análisis de los esfuerzos sísmicos resulta ser muy simple.

Sin embargo, en el caso de la presa de arco cuyas superficies curvas y condiciones de soporte a lo largo de su periferia no son simples, es difícil obtener estimaciones fiables del comportamiento y de los esfuerzos sísmicos por medio de este procedimiento simplificado. En este caso, se deben efectuar cálculos precisos por el método de cargas de tanteo o por el análisis dinámico. (Véase nota 8).

Para mayor seguridad, los experimentos se deben llevar siempre a cabo, para clarificar el comportamiento de las presas, con la mayor precisión posible, haciendo vibrar un modelo de presa y midiendo las deformaciones unitarias y las deflexiones. Hay dos métodos para hacer vibrar un modelo. El primero es el de colocar el modelo sobre una mesa y luego hacer vibrar la mesa mecánicamente; el segundo es colocar el modelo sobre un piso fijo y aplicar una fuerza vibratoria electromagnética al modelo. Para decidir cuál de los dos métodos se debe emplear hay que considerar el objetivo de la prueba y el tipo de modelo.

En la presa, durante un fuerte sismo, se producen esfuerzos de tracción. En el lado aguas arriba —en la base de la parte central— estos esfuerzos actúan en una dirección vertical, mientras que a una altura media en la periferia, actúan en dirección normal a ella. En la cara aguas abajo, a una altura media en la periferia, los esfuerzos actúan tangencialmente a la periferia, mientras que a una altura media en el centro, actúan en dirección horizontal. Los esfuerzos de tracción no deberán exceder ciertos límites para que la presa no sufra daños, aunque no hay una regla general en cuanto a la magnitud de los esfuerzos de tracción permisibles.

Debe notarse que estos esfuerzos de tracción permisibles pueden diferir de acuerdo con el método de análisis utilizado para el cálculo de esfuerzos. En la práctica, siempre que el esfuerzo producido en la presa de arco sea calculado por el método de ajuste radial en el análisis por cargas de tanteo, los esfuerzos de tracción son permitidos en los siguientes rangos: en la cara aguas abajo, a media altura en el centro, y sobre la periferia, hasta 20 kg/cm^2 ; en la cara aguas arriba, a una altura media sobre la periferia hasta 30 kg/cm^2 . El esfuerzo de tracción que teóricamente el análisis matemático indica que tiene lugar en la parte inferior central de la cara aguas arriba es ínfimo, ya que los experimentos precisos confirman que en ese lugar no ocurre ningún esfuerzo de tracción.

Para reducir el esfuerzo de tracción que se produce en una presa de arco, la presa, a veces, es diseñada para que se incline ligeramente hacia el lado aguas abajo. Cuando la presa es curvada así, no solamente están balanceados los esfuerzos sísmicos del elemento cantiléver por los esfuerzos del peso muerto, sino que al resistir el elemento de arco, las fuerzas sísmicas y los esfuerzos sobre el elemento cantiléver disminuirán.

Las presas de terraplén generalmente han sido diseñadas por un análisis convencional pseudo-estático, utilizando el método del círculo de deslizamiento de la mecánica de suelos. En este método la seguridad final de la pendiente del terraplén se calcula utilizando tanto la distribución supuesta de fuerzas sísmicas y la presión de agua en los poros en el terraplén como también las propiedades mecánicas del material tal como se obtienen por pruebas. La inclinación del terraplén se diseña para una seguridad permisible del 10 al 20 % mayor que la seguridad final. (Véase nota 9).

El análisis matemático de esfuerzos y deformaciones sísmicas en las presas de terraplén se lleva a cabo por el método de elementos finitos. En este cálculo, movimientos sísmicos de cierta intensidad y forma de onda se asignan al terreno.

Para ese movimiento del terreno se calculan los esfuerzos y deformaciones en la presa en función del tiempo. Así pues, no solamente las propiedades estáticas sino también las dinámicas de los materiales que forman la presa (incluyendo efectos del tiempo) tienen que ser probadas. Ya que han habido varios casos de presas de terraplén que han sufrido daños locales en el núcleo, el esfuerzo producido en el núcleo debe ser analizado por métodos matemáticos precisos tomando en consideración las propiedades de los materiales.

Cuando la estabilidad de la presa durante terremotos es examinada a través de su condición de esfuerzos, los esfuerzos causados por cargas ordinarias y cargas sísmicas deben ser combinados. Las cargas ordinarias consisten en la presión del agua del embalse, el peso del suelo y la presión del agua en los poros. La distribución de estas cargas está considerablemente influida por las propiedades del terreno, el contenido de agua, el método de ejecución de la presa y la vibración sísmica. Aún más, el comportamiento del terreno es inelástico y la superposición de los esfuerzos por carga muerta y acción sísmica no es posible. El cálculo correcto de esfuerzos en presas de terraplén durante sismos es por lo tanto muy complejo.

Aún más, es necesario conocer la condición de fallamiento de los materiales del terraplén en relación con los esfuerzos. Las pruebas precisas de falla y licuefacción de los materiales pueden llevarse a cabo con este fin.

De acuerdo con la experiencia, el asentamiento no uniforme de los terraplenes es uno de los principales factores de daños a presas durante terremotos. La teoría de la resistencia final no puede proporcionar información alguna acerca del asentamiento de terraplenes. Recientemente, por lo tanto, se han hecho esfuerzos para determinar la deformación por cálculo numérico. El asentamiento no uniforme ocurre por dos causas, la deformación debida a los esfuerzos y la deformación debida a deslizamiento, y estas deformaciones pueden ser matemáticamente calculadas con ciertas suposiciones básicas. (Véase nota 10).

Para la construcción de terraplenes, con el propósito de reducir los asentamientos ocasionados por los efectos estáticos y dinámicos, se han utilizado unos materiales escogidos y prensados por rodillos vibratorios, lo más pesados posible. Para la construcción del núcleo se han comprimido unos materiales plásticos bien graduados a la máxima densidad y con un óptimo contenido de humedad.

En el método de análisis dinámico, el comportamiento de las presas durante sismos se estudia desde el punto de vista de los fenómenos dinámicos y todas las deformaciones se tienen en cuenta. Así, el método de análisis dinámico es más avanzado que el método tradicional estático. Sin embargo, quedan problemas no solucionados acerca de la precisión del cálculo numérico y de las propiedades dinámicas de los materiales, y el diseño sismo-resistente no puede ser ejecutado completa y rigurosamente tan sólo por técnicas matemáticas. En la práctica, por tanto, las presas son diseñadas primero por el método tradicional estático, respaldado por un número de experimentos, y su estabilidad sísmica es luego confirmada por análisis matemático y experimental, tomando en consideración los efectos dinámicos de los sismos y el comportamiento dinámico de los materiales.

Además de la estabilidad de la presa como un todo, el asentamiento y el agrietamiento a lo largo de la periferia del revestimiento durante un sismo se ponen en cuestión cuando el revestimiento aguas arriba de una presa de talud es terrajeada con hormigón o asfalto. Para reducir los esfuerzos a lo largo de la periferia del revestimiento, la sección de la presa debe ser cuidadosamente diseñada, y el asenta-

miento del revestimiento se evita con la compresión del terraplén. Ya que no es técnicamente fácil diseñar el revestimiento para que sea completamente sismo-resistente, se requieren nuevas ideas y una construcción muy cuidadosa para el revestimiento de las presas que están ubicadas en zonas sísmicamente activas.

9.5 Problemas claves que requieren mayor investigación

En conclusión se exponen unos cuantos comentarios acerca de las investigaciones más relevantes que se requieren en el futuro. En 1975, el Comité sobre Terremotos de la Comisión Internacional de Grandes Presas propuso lo siguiente en su «Guía y Recomendación para el Diseño Sismo-Resistente de Presas»:

1. *Consideración de la estabilidad sísmica.* Los terremotos de apreciable intensidad ocurren incluso en áreas de poca sismicidad. Por lo tanto, todas las presas deben ser diseñadas con la debida consideración para las cargas sísmicas.
2. *Uso del análisis dinámico.* Se considera que las presas bajas en áreas remotas pueden ser diseñadas por el método convencional para cualquier tipo de presa. Sin embargo, aunque las presas altas de gravedad o de arco, o presas de terraplén, cuyas fallas podrían causar pérdida de vidas o daños mayores, pueden, en primera instancia, ser diseñadas por el método convencional, sus propiedades deben ser estudiadas por análisis dinámico a fin de investigar cualquier deficiencia que pudiese existir en el diseño pseudo-estático de la presa.
3. *Mejoramiento del diseño sismo-resistente.* Los estudios y las mediciones deben ser dirigidos hacia el mejoramiento de los métodos convencionales y de análisis dinámico, en el sentido de desarrollar un mejor entendimiento de las características de los materiales usados para presas y sus cimentaciones, especialmente hacia el desarrollo de una mejor comprensión de las características de los movimientos del terreno y de las ondas sísmicas.

Los valores calculados de respuesta, usando métodos de análisis dinámico, deben ser comparados con los datos obtenidos de mediciones en el campo, en conceptos de diseño; los adelantos tecnológicos en los métodos de análisis tanto dinámico como estático pueden lograrse sólo a través de tales comparaciones.

4. *Estabilidad de los taludes en los lugares de la presa.* Los estudios acerca de la estabilidad de todos los taludes en el lugar donde está la presa y en el área del embalse deben hacerse especialmente en zonas de alta sismicidad, valles angostos y laderas tectónica o geotécnicamente inestables.
5. *La investigación de mecanismos de falla y de propagación de fallas.* Deben dirigirse estudios y pruebas hacia la determinación de cómo se inicia y propaga una falla local, con miras a desarrollar técnicas de diseño y de construcción que disminuyan la probabilidad de que las fallas locales puedan propagarse y producir un colapso total de una presa: Las fallas locales debido a efectos secundarios —tales como el asentamiento diferencial en presas de tierra y de roca— deben incluirse en estos estudios.

Además de los puntos anteriores, pueden sugerirse otras áreas para la investigación y desarrollo futuro:

Consolidación de la red de observaciones sísmicas. Una red para observación sísmica incluyendo sismos fuertes, debe consolidarse en todo país sísmico con el fin de

obtener su registro sísmico y poder hacer mapas de zonificación precisos del riesgo sísmico. Esto es el dato fundamental que se requiere para el diseño sismo-resistente de presas en cada país.

Un sistema internacional para el intercambio de datos sobre el comportamiento de presas durante sismos. Con el fin de promover el adelanto del diseño sismo-resistente y la construcción de presas, es necesario intercambiar datos técnicos acerca del comportamiento de las presas durante sismos, para lo cual tendría que organizarse un sistema internacional de intercambio de datos.

Revisión de las cargas sísmicas usadas para el diseño. Casi todas las presas en el mundo han sido hasta la fecha diseñadas por el método convencional pseudo-estático y la carga sísmica para el diseño ha sido decidida de acuerdo con este concepto. Sin embargo, el método de análisis dinámico ha experimentado recientemente considerables avances, y el interés social en la seguridad de las presas generalmente ha aumentado. Es, por lo tanto, necesario revisar la carga sísmica para el diseño de acuerdo a esta tendencia actual.

Investigación de la geología del lugar. Los movimientos de deslizamiento de falla o movimientos de corteza cercanos al área de un embalse pueden causar daños irreparables a una presa. Aún más, el embalse puede a veces ocasionar sismos. La geología de todo lugar donde vayan a ubicarse presas debe ser investigada con el mayor detalle posible, con atención especial a fallas y movimientos de corteza.

Propiedades dinámicas de materiales. Se han comprobado las propiedades estáticas de los materiales que están involucrados en las presas y sus cimentaciones, y con estas pruebas se han estimado sus propiedades dinámicas; pero las propiedades dinámicas no necesariamente son las mismas que las estáticas. Para el método avanzado del análisis de las cargas dinámicas se requiere un mayor conocimiento sobre las propiedades dinámicas de los materiales.

9.6 Notas

1. Las normas para el diseño de resistencias a sismos y las prácticas empleadas en la Unión Soviética, Japón y los Estados Unidos están descritas en el informe «A Review of Earthquake Resistant Design of Dams», publicado por la Comisión Internacional sobre Grandes Presas, Boletín 27, marzo de 1975; las utilizadas en la India están descritas en «Earthquake Resistant Regulations, A World List», 1973, recopilado por la Asociación Internacional de Ingeniería Sismo-Resistente.

2. Este coeficiente sísmico está basado en los supuestos de que la fuerza sísmica actúa como una carga estática sobre cada elemento de la estructura y que su magnitud es proporcional a la masa. La constante de proporcionalidad dividida por la aceleración gravitacional define el coeficiente sísmico. Por lo tanto:

$$f = k g m$$

donde f = fuerza sísmica; m = masa de cada elemento de la estructura; k = coeficiente sísmico; g = aceleración gravitacional.

Ya que mg es el peso del elemento, la fuerza sísmica se obtiene como un producto del peso y del coeficiente sísmico. Ejemplos de los coeficientes sísmicos utilizados en el diseño de las presas están expuestos en la tabla 9.1.

3. La fórmula aproximada para la presión dinámica del agua aplicada a la pared de una presa durante un terremoto, cuando el periodo predominante del movimiento del terreno durante el terremoto es alrededor de un segundo y cuando la pared es vertical, es:

$$p = \frac{7}{8} kw\sqrt{Hy}$$

donde p = presión hidrodinámica; k = coeficiente sísmico; w = peso de una unidad de volumen de agua; H = propiedad del embalse, e y = distancia de la sección desde la superficie del agua.

Cuando la pared es inclinada la presión dinámica del agua aplicada a la pared viene dada por:

$$p = C kwH$$

sin embargo:

$$C = \frac{C_m}{2} \left\{ \frac{y}{H} \left(2 - \frac{y}{H} \right) + \sqrt{\frac{y}{H} \left(2 - \frac{y}{H} \right)} \right\}$$

donde C_m es un coeficiente que depende del ángulo de inclinación de la pared y ha sido determinado experimentalmente.

4. Han sido propuestas varias fórmulas para la relación entre la intensidad del sismo, la magnitud y la distancia focal. Por ejemplo:

C. Tsuboi: $\log_{10} A = M - 1.73 \log R + 0.83;$

K. Kanai: $\log_{10} \bar{V}_0 = 0.61 M - \left(1.66 + \frac{3.60}{R} \right) \log R - \left(0.63 + \frac{1.83}{R} \right);$

y H.B. Seed: $\log_{10} a = 2.04 + 0.35 M - 1.6 R$

Donde A = desplazamiento máximo del movimiento del suelo durante un terremoto (μ); \bar{V}_0 = velocidad espectral del movimiento sísmico del suelo (kine); a = la aceleración máxima del movimiento sísmico del suelo (gal); M = la magnitud del sismo y R = la distancia focal del sismo (km).

La magnitud del sismo que puede ocurrir a través del movimiento de una falla es generalmente representada por la siguiente fórmula:

$$\log L = aM - b$$

donde L es la longitud de la falla en kilómetros (km), y a y b son constantes. Los valores de a y b difieren de una región a otra; para el interior del Japón son $a = 0.6$, $b = 2.9$.

5. Como un ejemplo, uno puede tomar el tratamiento de la cimentación de la presa de Nakawado en el Japón. La presa es del tipo de arco y tiene 155 metros de altura. La roca de cimentación está constituida por granito duro pero hay algunas juntas y fallas.

Tabla 9.1

Nombre	País	Tipo
Avie More	Nueva Zelanda	Gravedad
Bajina Basta	Yugoslavia	"
Stouden Kladenetz	Bulgaria	"
Studena	Bulgaria	"
Toktogul	URSS	"
Bhakra	India	"
Umiam	India	"
Tagokura	Japón	"
Maraetai	Nueva Zelanda	Arco
Alto Rabagao	Portugal	"
Ambiesta	Italia	"
Grancarevo	Yugoslavia	"
Mratinje	Yugoslavia	"
Inguri	URSS	"
Hendrik Verwoerd	África del Sur	"
J.C. Strijdom	África del Sur	"
P.K. Le Roux	África del Sur	"
Idikki	India	"
Nagawado	Japón	"
Yahagi	Japón	"
Daniel Johnson	Canadá	"
Morrow Point	EE.UU.	"
Cachi	Costa Rica	"
Avie More	Nueva Zelanda	Terraplén
Globocica	Yugoslavia	"
Karamanri	Turquía	"
Tercan	Turquía	"
Ramganga	India	"
Kisenyama	Japón	"
Misakubo	Japón	"
Bersimisnoi	Canadá	"
W.A.C. Bennet	Canadá	"
Mica	Canadá	"
New Don Pedro	EE.UU.	"
Oroville	EE.UU.	"
Netzahualcoyotl	México	"
Digua	Chile	"
Paloma	Chile	"
Yeso	Chile	"

189

Tomado de «A Review of Earthquake Resistant Design of Dams», ICOLD, Boletín 27 de marzo de 1975.

Revestimiento:

- a. Revestimiento para consolidación: huecos perforados con diámetro mayor de 38 mm; longitud 7 m y 12 m, intervalos de 3 m.
- b. Revestimiento de pantalla: huecos perforados de 46 mm y 38 mm; el revestimiento de pantalla se ejecuta en roca con permeabilidad mayor que un Luzión.

Sistema de drenaje:

- a. Sistema primario de drenaje: huecos de drenaje con diámetros de 76 mm, a intervalos de 20 m; intervalos entre huecos de drenaje y la pantalla de revestimiento 13 m al nivel de la cresta de la presa y 23 m al pie del valle.
- b. Sistema secundario de drenaje: perforación de hueco de diámetro de 66 mm, intervalos de 20 m.

Tratamiento de fallas:

Las zonas de fractura de fallas rellenas con hormigón.

Tratamiento de juntas:

Las juntas en la roca fueron reforzadas con barras de acero pretensado.

6. La estabilidad de una presa de gravedad está resuelta en la siguiente fórmula contra deslizamiento:

$$n = \frac{0.8 V + \tau l}{H}$$

donde n es un coeficiente que representa el factor de seguridad contra deslizamiento; H es la fuerza horizontal que actúa sobre la presa, incluyendo la carga sísmica; V es la suma de las fuerzas verticales; τ es la resistencia al corte de la roca de cimentación; y l es la longitud de la base de la presa.

El valor permisible de n adoptado en la práctica es 4 en Japón y 2.66 en Estados Unidos.

7. La ecuación del movimiento para una presa monolítica idealizada como un sistema bidimensional de elementos finitos, sujeta a los componentes transversales y verticales del movimiento sísmico del terreno incluyendo los efectos hidrodinámicos, es la siguiente:

$$M \ddot{r} + C \dot{r} + K r = -E_u a_u(t) - E_v a_v(t) + R(t)$$

donde M es la matriz de las masas; C es la matriz de amortiguación; K es la matriz de rigidez; r es el desplazamiento del punto nodal; E_u , E_v son las masas concentradas; a_u , a_v son los componentes horizontal y vertical de la aceleración sísmica del terreno, y R es la presión hidrodinámica.

De acuerdo con el método modal, r puede ser representada por la fórmula:

$$r(t) = \sum \phi_m Y_m(t)$$

donde ϕ_m es la forma del m avo modo de vibración de la presa e Y_m es el orden m avo de la coordenada normal. Así pues la ecuación de movimiento viene a ser:

$$M_m^* \ddot{Y}_m + C_m^* \dot{Y}_m + K_m^* Y_m = P_m^*(t)$$

donde M_m^* es la masa generalizada ($\phi_m^T M \phi_m$); C_m^* es el amortiguamiento generalizado ($\phi_m^T C \phi_m$); K_m^* es la rigidez generalizada ($\phi_m^T K \phi_m$); P_m^* es la carga generalizada. La ecuación del movimiento del agua en el embalse es:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

donde p es la presión hidrodinámica y C es la velocidad del sonido en el agua. Solucionando simultáneamente las ecuaciones de movimiento de la presa y del agua en el embalse, el movimiento de una presa sujeta a presión hidrodinámica puede ser determinado (de acuerdo con P. Chakrabarti y A.K. Chopra: en «Earthquake analysis of gravity dams including hydrodynamic interaction», en *Earthquake engineering and structural dynamics*, vol. 2, nº 2/10-12, 1973).

8. Las ecuaciones de equilibrio dinámico de las fuerzas producidas en una presa de arco son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - \frac{P_x}{\gamma_c} &= P + \frac{\gamma_c h}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\gamma_c h}{g} a_w ; \\ -\frac{\partial P_x}{\partial x} + \frac{Q_x}{\gamma_c} &= \frac{\gamma_c h}{g} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{\gamma_c h}{g} a_v ; \\ \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x &= -\frac{\gamma_c}{g} \frac{h^3}{12} \frac{\partial^3 w}{\partial t^2 \partial x} ; \\ \frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - Q_y &= -\frac{\gamma_c}{g} \frac{h^3}{12} \frac{\partial^3 w}{\partial t^2 \partial y} , \end{aligned}$$

donde t es tiempo; x y r son las coordenadas tangenciales, verticales y radiales respectivamente; v y w son los desplazamientos tangenciales y radiales respectivamente; Q_x y Q_y son las fuerzas cortantes en los elementos de arco y cantiléver de la presa respectivamente; p_x y p_y son las fuerzas normales en los elementos de arcos y cantiléver de la presa respectivamente; M_x y M_y son los momentos de flexión en los elementos de arco y cantiléver de la presa respectivamente; M_{xy} es el momento de torsión en los elementos de arco de la presa; p es la presión dinámica del agua aplicada a la presa; γ_c es el peso de una unidad de volumen de la presa; g es la aceleración gravitacional; h es el espesor de la presa; y a_w y a_v son las componentes radiales y tangenciales respectivamente de la aceleración sísmica del suelo.

Existen las siguientes relaciones entre esfuerzos y desplazamientos:

$$\begin{aligned} P_x^v &= Eh \left(-\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{w}{\gamma_c} \right) ; \\ M_x &= -\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} ; \\ M_y &= -\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} ; \\ M_{xy} &= -\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \left\{ (1-\mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{1}{2r} \frac{\partial v}{\partial y} \right\} , \end{aligned}$$

donde μ es el coeficiente de Poisson y E es el módulo elástico dinámico para el hormigón. Sustituyendo las ecuaciones anteriores con las ecuaciones para el equi-

brio dinámico de los esfuerzos, la ecuación del movimiento representa el desplazamiento de la presa.

La presión dinámica del agua se determina solucionando la siguiente ecuación del movimiento del agua en el embalse:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = C^2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right).$$

En esta ecuación f es el potencial de velocidad y C la velocidad del sonido en el agua. La presión dinámica del agua aplicada a la presa está determinada por la ecuación:

$$P = \frac{\gamma_w}{g} \frac{\partial f}{\partial t}$$

donde γ_w es el peso de una unidad de volumen de agua. Solucionando las ecuaciones del movimiento de la presa y del agua en el embalse simultáneamente, puede ser determinado el movimiento de una presa de arco sujeta a presión hidrodinámica (de «The Earthquake Response Analysis and Its Applications», recopilado por la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles, 1973).

9. La estabilidad del talud de una presa generalmente se comprueba usando el método del arco circular deslizándose en una falla de talud. Las fuerzas que causan que la masa de tierra se deslice son: la presión del agua en el embalse, el peso muerto de la masa de tierra, las fuerzas sísmicas, y la presión del agua en los poros actuando a lo largo del plano deslizando. Las fuerzas que resisten el deslizamiento son la cohesión y la fuerza de fricción que está trabajando sobre la superficie deslizando. Siempre que el momento de las primeras con respecto al centro del círculo de deslizamiento no exceda el momento de las últimas, se considera la presa como segura.

El efecto de la resistencia debido al peso del suelo es reducido por la presión del agua en los poros. La presión de agua en los poros depende de la filtración del agua, así como de la presión residual del agua causada por procedimientos de construcción. Cuando se consideran los efectos de un sismo, la presión del agua en los poros resulta ser más compleja y es difícil hacer un cálculo preciso de ella en las actuales circunstancias. El diseñador por lo tanto sólo puede ejercer criterios basados sobre su propia experiencia.

Para poder calcular la resistencia en la superficie de deslizamiento, es necesario conocer la distribución de esfuerzos sobre la superficie. Sin embargo, éste es un problema estáticamente indeterminado. Por lo tanto, la masa de tierra se divide en un gran número de columnas, y la distribución de esfuerzos sobre la superficie deslizando se obtiene determinando las fuerzas normales que actúan en la parte inferior de cada una de ellas.

10. El análisis dinámico de una presa de terraplén está hecho por lo general utilizando los métodos de elementos finitos. La estructura de tierra se representa mediante un conjunto de elementos finitos de formas triangular, rectangular, tetraédrica o prismática conectadas en los nodos. En el caso del análisis bidimensional, la ecuación del movimiento de los elementos viene dada por:

$$[M] \{\alpha \ddot{x}\} + [C] \{\alpha \dot{x}\} + [K] \{\alpha x\} = \{\alpha P\}$$

donde x es el desplazamiento de la estructura real; $[M]$ es la matriz de masa; $[C]$ es la matriz de amortiguación; $[K]$ es la matriz de rigidez tangencial; y $[p]$ es la fuerza aplicada al sistema por el medio ambiente.

La matriz de masas es una matriz constante. La matriz de rigidez incorpora relaciones no lineales de esfuerzos-deformaciones y amortiguamiento viscoso e hysterético. Solucionando la ecuación de movimiento vienen determinados los esfuerzos y la deformación de la presa. La estabilidad de la presa contra sismos es examinada observando detenidamente la condición de esfuerzos y los desplazamientos residuales (tomado de W.D.L. Finn y R.I.S. Miller; *Dynamic Analysis of Plane Non-linear Structures, Proceedings of 5-th World Conference of Earthquake Engineering*, 1973).

10 Diseño sismo-resistente de plantas de energía nuclear

Por NATHAN M. NEWMARK y WILLIAM J. HALL

10.1 La previsión del riesgo sísmico en el diseño

El procedimiento a seguir en el diseño sismo-resistente requiere la previsión de los riesgos sísmicos así como la estimación de la resistencia estructural, ya sea implícita o explícitamente, como parte integral del trabajo de diseño. A no ser que estas estimaciones estén hechas de forma consecuente, el diseño final puede resultar de dos maneras, o exageradamente antieconómico o peligrosamente inseguro. Ambos juegos de parámetros son probabilísticos en su naturaleza aunque, por conveniencia, muchos aspectos de la determinación de la resistencia estructural pueden, con razón, ser aproximados como determinísticos. Sin embargo, los movimientos sísmicos para los cuales el diseño se realiza, o incluso la ocurrencia de un sismo que afecte el lugar, deben ser considerados como asuntos probabilísticos (Newmark, 1975c; Newmark y Rosenblueth, 1971).

En el diseño de plantas para energía nuclear generalmente se considera deseable prever una resistencia contra dos sismos: (1) un «terremoto máximo creíble» —que sólo tiene una pequeña probabilidad de que ocurra durante la vida de la planta— para lo cual el diseño se hace a niveles de fluencia o condiciones límite, y (2) un terremoto que tiene una mayor probabilidad de que ocurra, posiblemente con un «periodo de retorno» del orden de los 100 a 200 años, y una intensidad que frecuentemente es tomada como la mitad de la del terremoto que ha sido definido en el punto anterior (1). Para la categoría (2) el diseño se hace a varios niveles con una menor permisibilidad de fuerzas y para combinaciones de condiciones algo diferentes. Actualmente la Comisión Reguladora Nuclear de los EE.UU. define estos terremotos como «terremoto de cese seguro» y «sismo de base operativa».

Se prestará una atención especial a las condiciones del mayor de estos dos terremotos en el siguiente texto.

10.2 Movimientos sísmicos del terreno

10.2.1 Movimientos regionales

En general, se dispone de dos procedimientos para definir el riesgo sísmico. Primero, donde hay una extensa historia de actividad sísmica y donde es posible la investigación geológica y tectónica, pueden hacerse estimaciones de la posible magnitud y ubicación de futuros sismos que vayan a afectar un determinado lugar. En muchos casos, tales sismos ocurrirán a lo largo de fallas bien definidas. Entonces las estimaciones de la intensidad del movimiento sísmico propagado al lugar pueden ser hechas, teniendo en consideración los datos experimentales y observacionales disponibles para este efecto, tal como se describe en detalle en Donovan (1974) y en Schnabel y Seed (1973).

Donovan (1974) registró, en función de la distancia, las aceleraciones de 678 sismos con magnitudes desde menos de 5 hasta más de 8. Encontró una gran dispersión, que pudo reducir en algo, normalizando los datos a una exponencial de la mitad de la magnitud. Él pudo demostrar también que la distribución de probabilidades para los datos es normal logarítmica. La mediana de la aceleración, a , medida en unidades de gravedad, g , está relacionada con el rango, R en km desde el foco sísmico hasta el punto en la superficie del terreno donde se tomó el registro por la siguiente ecuación:

$$a = 1.10 e^{0.5M} (R + 25)^{-1.32}, \quad (10.1)$$

donde M es la magnitud sísmica.

La desviación estándar geométrica, σ , definida como la proporción entre la mediana más un valor de desviación estándar con el valor de la mediana, fue aproximadamente 2.0.

Esto puede interpretarse como sigue: hay una probabilidad de 15.9 % (1.0σ) de que la aceleración en un rango hiperfocal particular para una magnitud particular de sismo excederá dos veces el valor mediano calculado con la ecuación (10.1); una probabilidad de 2.3 % (2.0σ) de que la aceleración excederá 4 veces el valor de la mediana, y del 0.13 (3.0σ) de que excederá 8 veces el valor de la mediana; en otras palabras, prácticamente todos los datos caerán entre $1/3$ y 3 veces el valor de la mediana. Es evidente que la dispersión de los datos es muy grande.

De los datos de 214 registrados en San Fernando, Donovan obtuvo una mayor atenuación y una menor dispersión en los datos correspondientes a la relación (usando una magnitud para este sismo de 6.4):

$$a = 21.5 g e^{6.4/2} (R + 25)^{-2.04} \quad (10.2)$$

donde la desviación estándar geométrica fue determinada en 1.6. Esta atenuación, más rápida, ha sido notada por otros y es consistente con los datos dados a conocer por Schnabel y Seed (1973).

El segundo procedimiento para definir el riesgo sísmico es empleado en las regiones donde la ocurrencia de sismos no está generalmente asociada con fallas en superficies, o para la cual hay insuficientes datos de registros y observaciones. Bajo

estas condiciones, se han desarrollado relaciones para correlacionar los movimientos del terreno, generalmente velocidad o aceleraciones máximas con una medida cualitativa de la intensidad del movimiento. En los Estados Unidos se mide la intensidad en la escala de intensidad «Mercalli Modificada» (MMI). Aunque tales relaciones no parecen estar tan sujetas a determinación matemática como aquéllas, para la propagación del evento sísmico hay suficientes observaciones para que se puedan obtener datos útiles probabilísticos. Tales datos están resumidos por Ambraseys (1974) y Trifunac y Brady (1975).

Estos datos demuestran por lo menos la misma dispersión que aquellos para aceleración en función de la distancia al foco. Están complicados por el hecho de que la MMI es principalmente una medida subjetiva, y que para mayores niveles de daño depende en gran grado del tipo de edificio, de las propiedades de los materiales de construcción de las condiciones del cimiento, y similares. Los datos de explosiones en canteras indican que el agrietamiento del estucado raramente comienza a velocidades máximas de terreno menores de 1.25 cm/seg y generalmente se hace muy notorio cuando las velocidades son mayores de 5 cm/seg. Finalmente, puede tomarse nota que en el sismo de El Centro de 1940, la velocidad máxima del terreno fue de 35 cm/seg, y la MMI fue dada como IX.

Estos y otros datos sugieren que el valor de la mediana para la velocidad máxima del terreno puede ser inferida de la MMI suponiendo que es aproximadamente 20 cm/seg para una MMI de VIII y cambia por un factor de 2 para cada cambio unitario en la escala. Se cree que esta relación se correlaciona bien con las observaciones de todas las fuentes dinámicas.

Sobre la base de la relación de aceleración-velocidad por medio de la cual una velocidad de 120 cm/seg, correspondiente a una aceleración máxima de 1 g, se obtiene el resultado de que para MMI de VIII la aceleración es 0.167 g y cambia por un factor de 2 con cada cambio unitario en la escala de MMI. Este factor sin embargo, disminuye algo a medida que la intensidad aumenta por encima de los VIII.

Se cree que la relación entre la velocidad máxima del terreno y la MMI es prácticamente independiente de las propiedades del terreno, pero que la relación entre velocidad y aceleración es ligeramente suelo-dependiente y que pueda haber alguna dependencia, con respecto a las propiedades del suelo, en función de la relación para la aceleración que se menciona arriba. Sin embargo, las observaciones de de MMI están influenciadas con mayor fuerza por el tipo de edificación que por las propiedades del suelo cuando la intensidad se basa en los daños de los edificios. En otras palabras, el tipo de suelo implícitamente ha sido ya tomado en cuenta al observar el daño, o en los datos observacionales que dan lugar a una determinada MMI.

Al usar estos datos se debe tomar nota de que la desviación geométrica estándar es por lo menos 2.0.

10.2.2 *Amplificación del lugar y modificación*

Los valores regionales del movimiento sísmico del terreno que puedan derivarse de los métodos descritos en líneas anteriores deben ser modificados para tomar en consideración las condiciones geológicas y estatigráficas que son pertinentes al lugar. Aunque se han hecho gran cantidad de estudios e investigaciones sobre este tema, todavía debe ser considerado como materia de controversia. Sin embargo,

está claro por las observaciones que el tipo de suelo o subsuelo tiene una influencia principal sobre los movimientos que son registrados. En general, para un mismo sismo, cuando la intensidad es baja (aceleración máxima menor que 0.2 g, donde g es la aceleración de gravedad), las aceleraciones medidas son generalmente más altas en terreno sedimentario que en roca. Sin embargo, cuando la aceleración es alta (más alta que 0.2 g) entonces las aceleraciones medidas sobre rocas parecen ser más altas que las del suelo. En la mayoría de los casos las velocidades medidas son casi las mismas. Los estudios de la naturaleza de los movimientos en lugares de diferente rigidez están resumidos por Seed y otros (1974) y Mohnaz (1975), en términos de la llamada «respuesta espectral» aplicable a los registros medidos en distintos lugares.

Aunque se ha intentado varias veces explicar tales fenómenos, la mayoría de los análisis tienden a considerar condiciones no representativas. El principal supuesto —de que los movimientos sísmicos consisten en ondas de corte horizontales propagadas verticalmente hacia arriba desde algún estrato de base donde se definen los movimientos— es contrario a las observaciones. Por ejemplo, ha sido demostrado por Hanks (1975) que para movimientos de periodos más largos, con periodos de un segundo o más, los movimientos son principalmente debidos a ondas superficiales, tales como las ondas Rayleigh y Love. Es muy probable, sin embargo, que a distancias epicentrales moderadas, más allá de las correspondientes a la profundidad del foco, las ondas superficiales tengan un efecto importante aún en el rango de frecuencias más altas, y los movimientos sean más complejos que si fuesen debidos sólo a las de corte horizontal propagadas verticalmente hacia arriba. Aún más, el hecho de que los movimientos verticales ocurran no puede ser explicado por el modelo simple de ondas de corte horizontales.

La variación en la intensidad del movimiento con la profundidad, debajo de la superficie, es muy compleja. Hay pocos datos que directamente relacionan movimientos de superficie con movimientos subterráneos. Dos o tres pequeños temblores registrados en Japón y otros datos muy limitados indican alguna reducción de intensidad con profundidad, pero para altas intensidades no fundamentan el supuesto de que uno pueda calcular la variación de intensidad con profundidad con toda precisión, utilizando métodos que incluyen sólo la propagación vertical de ondas horizontales de corte.

No es normal depender sólo en los cálculos teóricos de la modificación de movimientos sísmicos entre alguna capa profunda o roca de basamento y la superficie. Sería deseable basar las inferencias acerca de tal modificación sobre observaciones reales de movimiento de superficie así como sobre cálculos, hasta que llegue el tiempo de que las mediciones de los movimientos reales durante un sismo, a distintas profundidades debajo de la superficie, puedan realizarse para un número representativo de distintas condiciones de cimentación.

A la vista de tal incertidumbre, de todos modos, pueden asignarse valores a estos parámetros, basados sobre hipótesis razonables acerca de la naturaleza general de las diferencias en los movimientos.

10.3 Interacción suelo-estructura

Cuando una estructura está montada dentro o sobre la base del suelo y/o roca, interactúa con su cimentación. Las fuerzas transmitidas a la estructura y la realimen-

tación a la cimentación son complejas en su naturaleza, y modifican los movimientos de campo libre. Los métodos para tratar con esta interacción suelo-estructura han sido propuestos por un número de escritores. Estos métodos implican: unos procedimientos similares a los aplicables a un bloque rígido descansando sobre un medio-espacio elástico, y procedimientos con elementos finitos o diferencias finitas correspondientes a varias funciones forzantes, actuando sobre el complejo combinado estructura-suelo. Los resúmenes de algunos de estos factores e incertidumbres que afectan a dichos cálculos están dados por Idriss (1975), D'Applonia (1975) y Newmark y otros (1972). Véase también, por ejemplo, Newmark y Rosenblueth (1971), capítulo 3.

Según como se efectúe el cálculo, se determina una frecuencia fundamental y frecuencias más altas del sistema del suelo que interactúa con la estructura, y parámetros efectivos de amortiguamiento para el sistema del suelo, tomando en consideración el amortiguamiento de radiación y de materiales. Ambas, de estas cantidades, son necesarias para obtener resultados racionales. Los procedimientos que enfatizan uno pero no el otro, no pueden dar un cuadro real y completo de la interacción.

En general, se debe prestar atención a la influencia de las condiciones locales del suelo y geológicas sobre los movimientos del terreno en el lugar, tanto en términos de intensidad como de contenido de frecuencia. Las condiciones de un suelo blando por ejemplo, pueden prevenir el desarrollo de aceleraciones o velocidades altas dentro de los materiales de cimentación. También es de tener en cuenta el desarrollo de condiciones inestables, tales como licuefacción del suelo, inestabilidad del talud, o asentamientos excesivos. Aún más, debido a la naturaleza de los depósitos del suelo y su falta de uniformidad, han de considerarse los métodos de muestreo y prueba utilizados para determinar las propiedades *in situ*. Las variaciones en las propiedades y la dificultad de determinarlas con precisión hacen que deba tenerse en cuenta algún grado de variación en los parámetros básicos utilizados en los cálculos.

Finalmente, el método de cálculo utilizado debe evitar, en lo posible los resultados espúreos que pueden surgir de la técnica del cálculo. Por ejemplo, con frecuencia es necesario evitar contornos «reflectantes» o «duros» donde estos realmente no existen.

Este tema en su totalidad es el que requiere la más cuidadosa consideración, y son necesarios estudios e investigaciones adicionales antes de que se puedan formular recomendaciones definitivas sobre la interacción suelo-estructura.

10.4 Amortiguamiento y absorción de energía

10.4.1 Implicaciones de daño o colapso

Al considerar la respuesta de una estructura a los movimientos sísmicos, han de tenerse en cuenta las implicaciones de varios grados de daños a la estructura antes del colapso. Algunos elementos de las plantas de energía nuclear deben, a la fuerza, permanecer elásticos o casi elásticos para poder llevar a cabo las funciones de seguridad asignadas. Sin embargo, en muchos casos, un análisis puramente lineal elástico puede ser irracionalmente conservador cuando uno considera que, aún

cerca del punto de fluencia, existen no linealidades de suficiente magnitud como para reducir considerablemente los niveles requeridos de diseño. Esto se discute con más detalle posteriormente.

Una discusión de los requerimientos de diseño para varios elementos de las plantas de energía nuclear está dada en la tabulación de las clases de diseño en Newmark (1975a). Asimismo, Newmark (1975b) demuestra cómo las clases de diseño sísmico pueden ser usadas para definir la requerida resistencia al daño de los diversos elementos del oleoducto Trans-Alaska (Newmark, 1975b). Una aplicación de estos conceptos al diseño de un reactor nuclear se detalla a continuación.

10.4.2 Amortiguamiento

La absorción de energía en el rango lineal de la respuesta estructural a cargas dinámicas se debe principalmente al amortiguamiento. En realidad, los niveles de amortiguamiento que han sido determinados por mediciones y observaciones demuestran amplia dispersión pero, para la conveniencia del análisis, el amortiguamiento generalmente se supone que sea viscoso de naturaleza y así se hace la aproximación. Como medida conservadora los valores de amortiguamiento utilizados en el diseño son generalmente considerados menores que el promedio o que los valores estimados medios.

Tabla 10.1. Valores recomendados de diseño

Nivel de fuerza	Tipo y condiciones de estructura	Porcentaje de amortiguamiento crítico
Esfuerzo de trabajo, no más de la mitad del punto de fluencia, aproximadamente	a. Tuberías vitales	1 a 2
	b. Acero soldado, hormigón pretensado, hormigón armado (pequeñas fisuras)	2 a 3
	c. Hormigón armado con un considerable agrietamiento	3 a 5
	d. Acero remachado y/o empernado, estructuras de madera con juntas clavadas o empernadas	5 a 7
Justamente debajo o en el punto de fluencia	a. Tubería vital	2 a 3
	b. Acero soldado, hormigón pretensado (sin pérdida completa del pretensado)	5 a 7
	c. Hormigón pretensado al cual no le queda nada del pretensado	7 a 10
	d. Hormigón armado	7 a 10
	e. Acero remachado y/o empernado, estructuras de madera con juntas empernadas	10 a 15
	f. Estructuras de madera con juntas clavadas	15 a 20

El amortiguamiento por lo general está expresado como una proporción o porcentaje del valor crítico de amortiguamiento, que es definido como aquel amortiguamiento en un sistema, que evitaría la oscilación para un disturbio inicial que no continuase a través del movimiento. Los niveles de amortiguamiento resumidos de una variedad de fuentes, están dados por Newmark (1969) y Newmark y Hall (1969), y los valores más recientes en Newmark y Hall (1973) y Newmark y otros (1973). Por conveniencia, el amortiguamiento asociado con tipos específicos de estructuras y materiales, modificados algo por Newmark y Hall (1973), se representa en la tabla 10.1. Los niveles inferiores del par de valores dados para cada *item* se consideran cercanos a los límites inferiores, y por lo tanto son altamente conservadores; los niveles superiores están considerados como promedios o algo mayores que los valores promedio, y probablemente son los valores que deben ser utilizados en el diseño, cuando las estimaciones moderadamente conservadoras son tomadas de los otros parámetros que entran en los criterios de diseño.

10.4.3 Ductilidad

La absorción de energía en el rango inelástico generalmente se maneja a través del uso del llamado «factor de ductilidad». Los niveles de ductilidad para uso en el diseño están discutidos en detalle por Newmark (1975 a y b), entre otros.

El factor de ductilidad es la razón entre el desplazamiento máximo útil (α de diseño) de una estructura con el desplazamiento en el límite elástico efectivo, este último determinado no de la curva real de desplazamiento-resistencia sino de una función elasto-plástica equivalente. Esta equivalencia requiere que la energía absorbida en la estructura (o el área debajo de la curva resistencia-desplazamiento) en el límite elástico efectivo y en el desplazamiento máximo útil sea igual para la curva efectiva como para la relación real en estos dos desplazamientos. Para el sistema que se ve en la figura 10.1, la definición del factor de ductilidad, μ , se muestra en la figura 10.2.

Los niveles de ductilidad para uso en el diseño pueden variar desde valores tan bajos como 1.0 a 1.3, o casi elásticos, hasta más de 5, cuando una gran cantidad de energía puede ser absorbida en la deformación inelástica.

10.5 Espectro de respuesta

Los conceptos generales del espectro de respuesta y su uso en el análisis dinámico han sido tratados en varios trabajos recientes (Newmark y Rosenblueth, 1971; D'Appolonia, 1975; Newmark, 1969, 1975a y b; Newmark y otros, 1972; Newmark y Hall, 1969; Newmark, Blume y Kapur, 1973). El espectro de respuesta se define como la relación gráfica de la respuesta máxima de un sistema elástico de un solo grado de libertad, amortiguado con movimientos dinámicos (o fuerzas). Las mediciones más usuales de respuesta son el desplazamiento máximo, D , que es una medida de la deformación en el elemento de resorte del sistema, la velocidad máxima pseudo relativa, V , que es una medida de la absorción de energía en el resorte del sistema, y la máxima pseudo aceleración, A , que es una medida de la

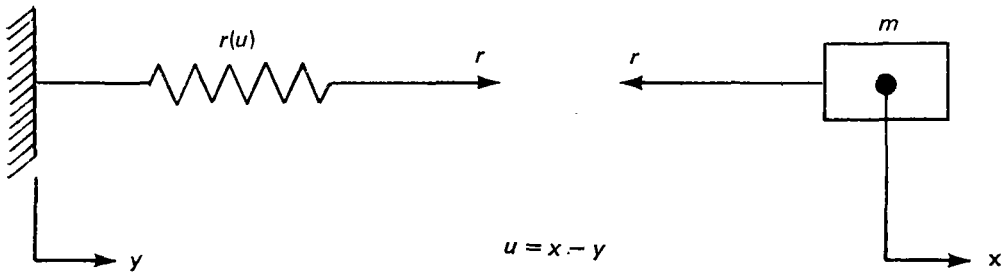


Figura 10.1. Sistema masa-resorte sencillo, no amortiguado.

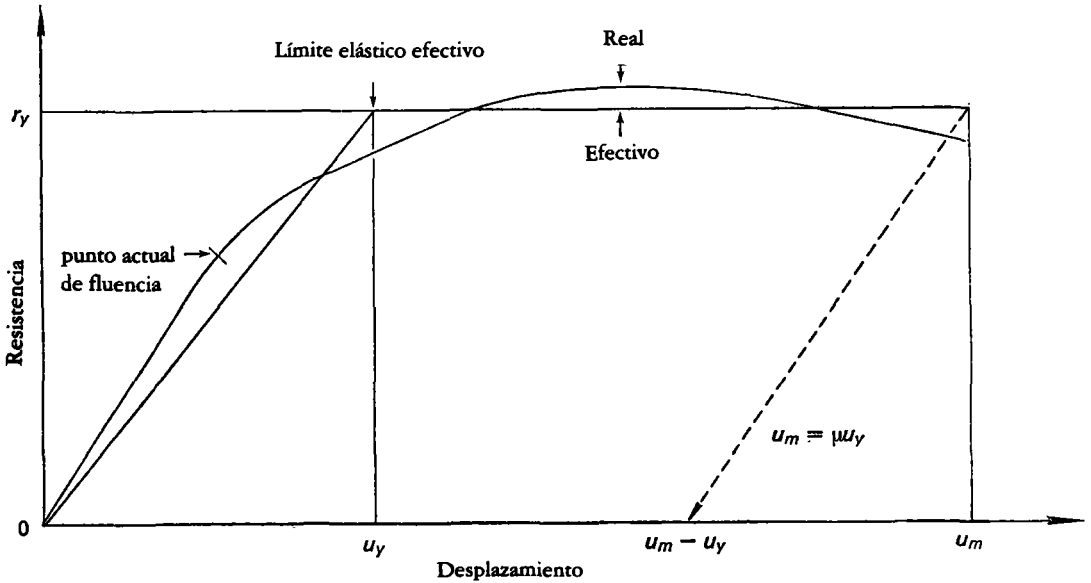


Figura 10.2. Relación resistencia-desplazamiento.

fuerza máxima en el resorte del sistema. Aunque los verdaderos espectros de respuesta para movimientos sísmicos son muy irregulares, tienen la forma general de un trapecoide o de una carpa; se muestra un espectro simplificado en la figura 10.3 ploteado sobre un gráfico logarítmico tripartito y modificado de tal manera que las distintas regiones del espectro se presentan como líneas rectas. En el mismo gráfico se muestran las componentes del máximo movimiento del terreno, y la figura, por lo tanto, indica las ampliaciones de los movimientos del terreno para las diversas partes del espectro.

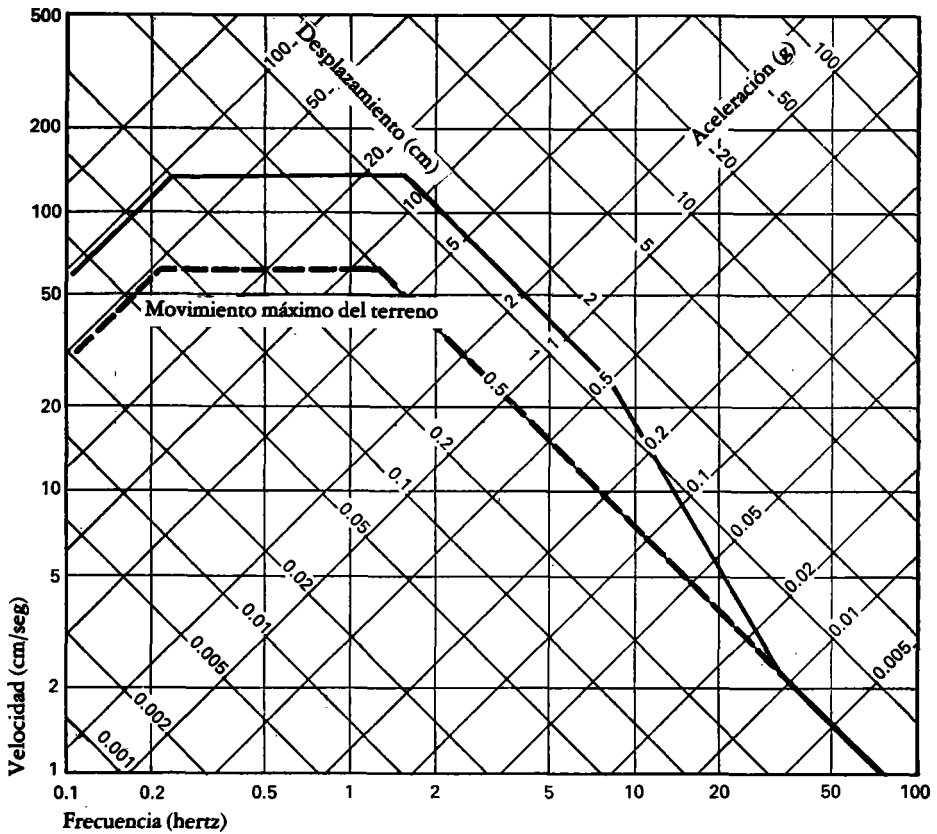


Figura 10.3. Espectro de diseño elástico, movimiento horizontal, 0.5 g aceleración máxima, 5 % de amortiguamiento, probabilidad acumulativa de una sigma.

En cualquier frecuencia, f , las relaciones entre los valores D_f , V_f y A_f están definidas como sigue:

$$V_f = \omega D_f \tag{10.3}$$

$$A_f = \omega V_f = \omega^2 D_f \tag{10.4}$$

donde ω es la frecuencia natural circular, $2\pi f$.

Consideremos ahora el caso en el cual el oscilador simple de la figura 10.1 se deforma inelásticamente como en la figura 10.2. Es conveniente utilizar una relación elasto-plástica del desplazamiento-resistencia porque se puede dibujar el espectro de respuesta para tal relación generalmente de la misma manera como se dibujan los espectros para las condiciones elásticas. En la figura 10.4 se muestran dos tipos de espectros correspondientes al espectro elástico de la figura 10.3. Aquí los símbolos D , V , A se refieren a los límites del espectro elástico, los símbolos D' , V' , A' a los límites del espectro elasto-plástico para aceleración, y los símbolos D , V ,

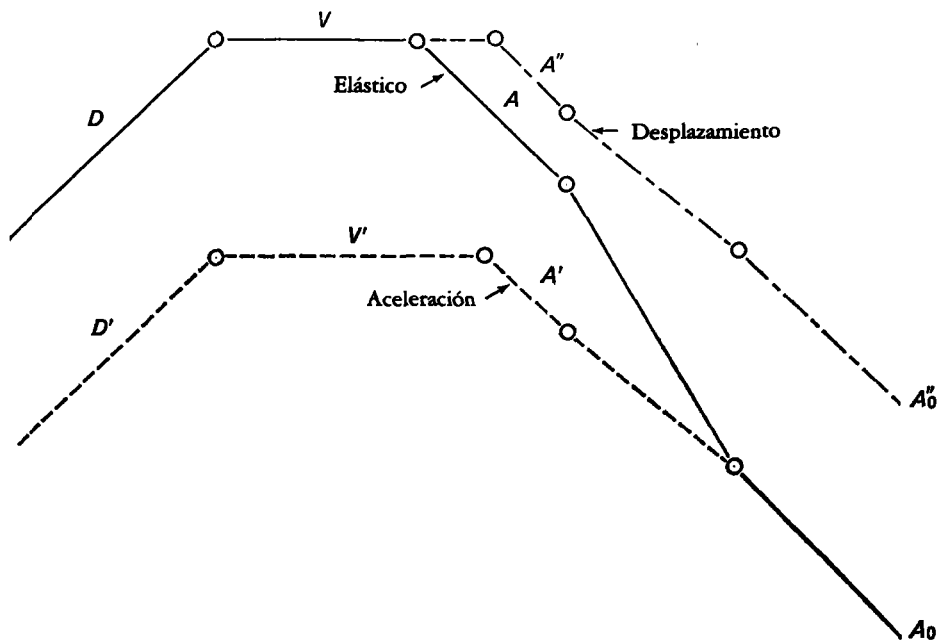


Figura 10.4. Espectros de diseño para terremotos.

A'' , A'_0 a los límites del espectro elasto-plástico para desplazamiento. El símbolo A_0 se refiere a la aceleración máxima del terreno. El método para construir el espectro inelástico será descrito más adelante.

En el desarrollo de las relaciones generales, se hace uso de los conceptos de energía y trabajo, se dan relaciones sencillas para el trabajo efectuado sobre la estructura y la energía almacenada en ella.

Se considerarán en primer lugar los sistemas con un grado de libertad, y luego esto será expandido heurísticamente a sistemas con múltiples grados de libertad, respondiendo en un número de modos a las fuerzas externas y desplazamientos de base. Se considerarán respuestas elásticas, así como respuestas inelásticas no-lineales. Sin embargo, se dará énfasis a los criterios de diseño más que en el cálculo de respuestas a contribuciones determinísticas de presión o de movimiento de base. Finalmente, se dan recomendaciones para los espectros de diseño y para los parámetros que gobiernan estos espectros para la resistencia sísmica.

10.6 Respuestas de sistemas simples

Consideremos primero el oscilador simple no amortiguado que se ve en la figura 10.1, con la anotación dada en la figura podemos escribir la ecuación de movimiento para la masa como:

$$m\ddot{x} + r(u) = 0 \quad (10.5)$$

donde
$$u = x - y \tag{10.6}$$

y
$$m\ddot{u} = r(u) = - m\ddot{y}. \tag{10.7}$$

puede verse de la ecuación (10.7) que la fuerza de inercia correspondiente al producto de la masa y de la aceleración del terreno se puede considerar como una carga externa o una presión aplicada al sistema con una base fija.

Consideremos ahora la aplicación de los conceptos de trabajo y energía, para inferir el desplazamiento relativo del sistema en la figura 10.1, ya sea para la energía inicial o para una fuerza súbitamente aplicada al sistema. Téngase en cuenta la relación resistencia-desplazamiento que se ve en la parte superior de la figura 10.5, y para cada desplazamiento determínese la energía, W , absorbida por el sistema. La cantidad W viene dada por la relación:

$$W = \int_0^u r \, du, \tag{10.8}$$

también hagamos que W_m sea la energía absorbida hasta el punto de deflexión u_m .

Si una energía cinética inicial W_i correspondiente a un impulso inicial i se aplica al sistema, el valor máximo de desplazamiento u_m es aquel del punto de intersección de la línea horizontal $W = W_i$ y la curva sólida de la parte inferior de la figura 10.5. De ésta el valor de la resistencia r_m correspondiente al desplazamiento u_m puede ser inmediatamente obtenido. Se puede también determinar el valor de la energía cinética inicial para un desplazamiento máximo dado, que puede ser soportado por el sistema.

Similarmente, si una fuerza q_0 es súbitamente aplicada al sistema y mantenida a un nivel constante, el trabajo W_q hecho por la fuerza q_0 resulta de la relación:

$$W_q = q_0 u. \tag{10.9}$$

La entrada de energía al sistema se muestra por la línea cortada en la parte inferior de la figura 10.5, que tiene una pendiente igual a la intensidad de la fuerza q_0 . Si ésta intercepta la curva de almacenamiento de energía en un punto donde $u = u_m$, el desplazamiento máximo del sistema será u_m y la resistencia máxima generada será r_m .

Para el caso especial de una curva elasto-plástica de resistencia, las relaciones que se muestran en la figura 10.5 son simplificadas y uno puede desarrollar ecuaciones simplificadas para diversas cantidades, tal como se demostrará más adelante.

Consideremos ahora las respuestas del sistema sencillo de la figura 10.1 a algunas condiciones simples, consistentes en pulsos simples de desplazamiento del terreno, velocidad del terreno y aceleración del terreno. En cada caso hay un tiempo de aumento abrupto para el desplazamiento, velocidad o aceleración, respectivamente, hasta su valor constante, que luego es mantenido. Del hecho de que un pulso de desplazamiento escalón corresponda a un cambio súbito de la base del sistema en la figura 10.1, o una translación de la masa a una posición desplazada, queda claro que el movimiento subsecuente es una oscilación libre, comenzando desde la posición desplazada; debido al amortiguamiento en el sistema, el valor máximo del desplazamiento del resorte o tensión es el desplazamiento máximo del

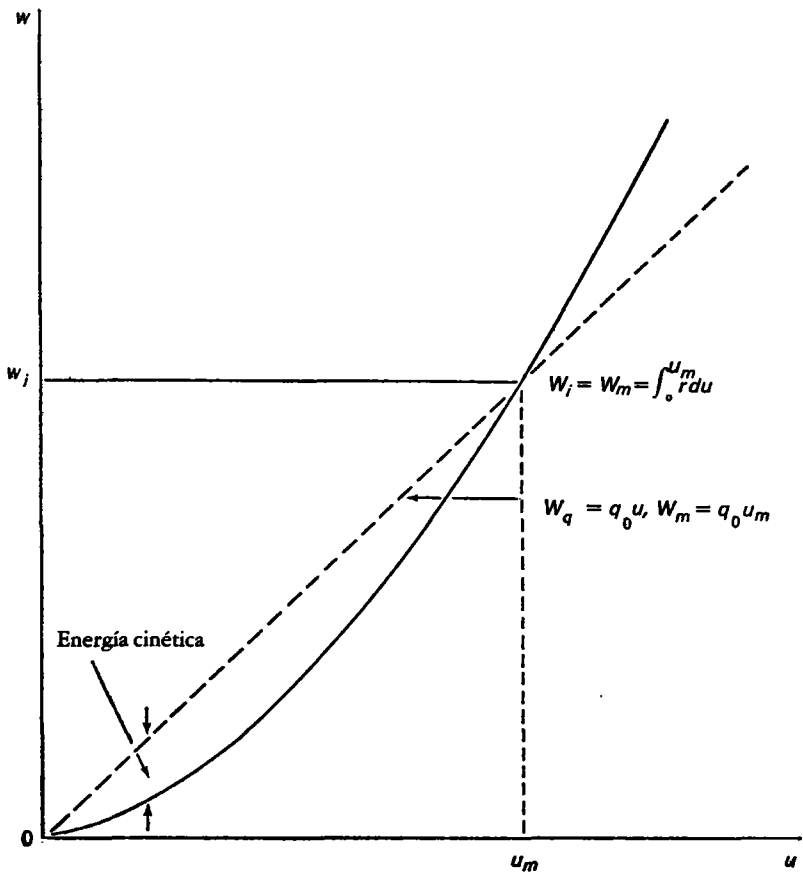
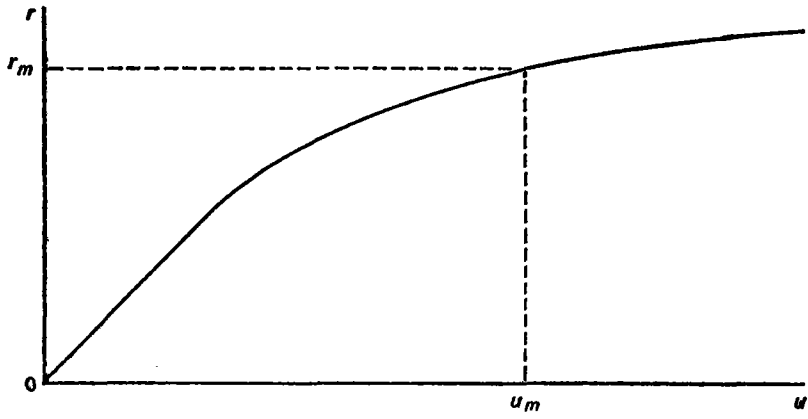


Figura 10.5. Deformación y absorción de energía para impulso y para fuerza constante.

terreno. Esto corresponde a un límite de desplazamiento del espectro de respuesta de valor constante $\bar{D} = d_0$.

Una velocidad escalón corresponde a una energía cinética inicial en el pulso, y con el uso de la relación en la figura 10.5 se puede derivar el valor máximo del desplazamiento. De esto uno puede determinar la velocidad de la respuesta espectral \bar{V} , como aquella velocidad que, cuando elevada al cuadrado y multiplicada por la mitad de la masa, da la energía máxima absorbida en el sistema.

Finalmente, un valor constante de máxima aceleración de terreno corresponde a una fuerza constante de magnitud, $m a_0$, y la respuesta es una respuesta de aceleración máxima constante, \bar{A} , donde $\bar{A} = 2 a_0$.

Se pueden observar algunas relaciones generales que resultan de la figura 10.5. Por ejemplo, si consideramos un pulso de desplazamiento constante o un desplazamiento escalón del terreno, el desplazamiento de respuesta máximo, \bar{D} , es igual al desplazamiento máximo del terreno, d_0 , sea si el sistema es elástico o inelástico. Sin embargo, cuando consideramos un pulso de velocidad escalón, la energía cinética inicial es:

$$W_i = \frac{1}{2} m v_0^2, \quad (10.10)$$

la velocidad máxima de respuesta o el valor espectral de respuesta \bar{V} es aquel valor que corresponde a la energía cinética inicial. Ya que este valor es el mismo para todas las frecuencias, si es que la masa M es la misma, la respuesta del sistema en términos de \bar{V} es constante, o:

$$\bar{V} = v_0, \quad (10.11)$$

nótese también que este valor es el mismo para sistemas elásticos o inelásticos que tienen la misma masa. Por lo tanto, para una carga impulsiva dada o cambio de velocidad escalón, el valor de respuesta espectral es uno de almacenamiento constante de energía para todas las frecuencias y todos los sistemas. Para sistemas que tienen diferentes relaciones resistencia-deformación, el desplazamiento es obtenido hallando aquel área, debajo de la curva resistencia-desplazamiento, que corresponde a la entrada de energía.

Por último, para una entrada de aceleración a paso, o para una carga inicialmente aplicada con el uso de la construcción, en la figura 10.2 uno encuentra que para sistemas elásticos el máximo valor de respuesta de aceleración viene dado por:

$$\bar{A} = 2 a_0, \quad (10.12)$$

para sistemas con relaciones resistencia-desplazamiento como en la figura 10.5, el valor de \bar{A} queda entre los límites dados por las ecuaciones (10.12) y (10.13).

$$\bar{A} = r_e/m, \quad (10.13)$$

para sistemas con relaciones resistencia-desplazamiento como en la figura 10.5, el valor de \bar{A} queda entre los límites dados por las ecuaciones (10.12) y (10.13).

10.7 El uso de espectros de respuesta para sistemas con varios grados de libertad

10.7.1 *Análisis modal*

El concepto del espectro de respuesta también puede ser aplicado a la mayoría de los sistemas con grado múltiple de libertad, aunque el uso del espectro de respuesta inelástico solamente es válido de forma aproximada como un procedimiento de diseño. Para un sistema con un número de masas en los nodos, en un armazón flexible, la ecuación (10.7) puede ser descrita en forma de matriz como sigue:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M(\ddot{y})\{1\} \quad (10.14)$$

en la que la cantidad entre corchetes representa un vector unitario. La matriz de masas, M es usualmente diagonal, pero en todos los casos tanto M como la matriz de rigideces K son simétricas. Cuando la matriz de amortiguamiento C satisface ciertas condiciones, la más simple de ellas cuando es una combinación lineal de M y K , entonces el sistema tiene modos normales de vibración, con vectores modales de desplazamiento u_n .

Cuando se obtienen los modos y las frecuencias del sistema, las respuestas son determinadas para cada modo, utilizando factores de «participación», c_n , definidos para cada modo como sigue:

$$c_n = \frac{u_n^T M \{1\}}{u_n^T M u_n} \quad (10.15)$$

Si la cantidad particular deseada —digamos, el esfuerzo en un determinado punto, el desplazamiento relativo entre dos puntos de referencia, o cualquier otra cantidad— está designada por α , entonces los valores modales de α_n son determinados para cada modo y combinados mediante el uso de las siguientes relaciones:

$$\alpha_{m\acute{a}x} \leq \sum_n |c_n \alpha_n D_n| \quad (10.16)$$

$$\alpha_{prob} = \sqrt{\sum_n (c_n \alpha_n D_n)^2} \quad (10.17)$$

Para la respuesta inelástica, las cantidades a usar son D'_n , V'_n o A'_n . La ecuación (10.16) nos da un límite superior para el valor de α y la ecuación (10.17) el valor más probable.

10.7.2 *Historia en tiempo*

Alternativamente se puede calcular la respuesta, considerando los movimientos que se van a aplicar, y calcular las respuestas, utilizando un análisis dinámico numérico paso-a-paso. Esto implica un método determinístico, dado que ésta lleva en sí una historia en tiempo determinística. Utilizando varias historias en tiempo inde-

pendientemente consideradas, se puede llegar, a costa de un considerable aumento de cálculos, a límites superiores promedio o conservadores de respuestas. En general, sin embargo, no hay ninguna ventaja real en utilizar una historia en tiempos en comparación con el espectro de respuesta para sistemas con varios grados de libertad, a no ser que se tenga que presentar un aporte real determinístico.

10.7.3 *Movimientos en varias direcciones*

En el mundo real, los movimientos sísmicos ocurren con movimientos aleatorios en tres dimensiones. En otras palabras, las estructuras están sujetas a componentes de movimiento en cada una de las dos direcciones horizontales, perpendiculares una a como tres componentes de movimiento rotacional, correspondientes a una torsión alrededor de un eje vertical y dos movimientos de balanceos alrededor de ejes horizontales. Estos movimientos del terreno tienen aparentemente independencia estadística. Por consiguiente, si se usan historias en tiempo del movimiento se deben de utilizar registros reales de terremotos o modificarlos de tal manera que puedan mantener el mismo grado de independencia estadística, como ocurre en los registros reales. Por consiguiente, para historias en tiempo que involucran comportamiento inelástico, es una sobre-simplificación considerar a cada uno de los componentes del movimiento independientemente, ya que en realidad ocurren de forma simultánea. Sin embargo, sólo hay una pequeña probabilidad de que las respuestas máximas ocurran simultáneamente y se han derivado métodos para solucionar problemas como éste.

10.8 Procedimientos de diseños recomendados

10.8.1 *Espectros de respuesta modificados*

Los espectros de respuesta modificada que representa condiciones medias (o condiciones con alguna probabilidad por encima del promedio) para los movimientos sísmicos, son tratados en varios trabajos, incluyendo Newmark (1969, 1970 y 1975a y b), Newmark y Hall (1969, 1973), Newmark y Rosenblueth (1971), Newmark y otros (1973), y Hall y otros (1975).

Generalmente se ha demostrado que un espectro de respuesta para un nivel de probabilidad acumulativo dado, puede derivarse del estudio estadístico de sismos reales, como una serie de factores de amplificación aplicados a las componentes máximas del movimiento del terreno, como queda implícito en la figura 10.3. La función de probabilidad que mejor describe el rango de valores es aquella que corresponde a una distribución logarítmica normal. Los factores de amplificación son funciones del amortiguamiento. La tabla 10.2 nos muestra ecuaciones para factores de amplificación, con una distribución normal logarítmica, para los niveles tanto de probabilidad acumulativa de la mediana como de una sigma. Los valores específicos numéricos para un rango de valores de amortiguamiento desde 0.5 % hasta 20 % del valor crítico, para estos dos niveles de probabilidad, están dados por

Tabla 10.2. Ecuaciones para factores de amplificación del espectro para movimiento horizontal.

Cantidad	Probabilidad acumulativa %	Ecuación
Aceleración	84.1 (Una sigma)	$4.38 - 1.04 \ln \beta$
Velocidad		$3.38 - 0.67 \ln \beta$
Desplazamiento		$2.73 - 0.45 \ln \beta$
Aceleración	50 (Mediana)	$3.21 - 0.68 \ln \beta$
Velocidad		$2.31 - 0.41 \ln \beta$
Desplazamiento		$1.82 - 0.27 \ln \beta$

Tabla 10.3. Los factores de amplificación del espectro para una respuesta elástica horizontal.

Amortiguamiento % del nivel crítico	Una sigma (84.1 %)			Mediana 50 %		
	A	V	D	A	V	D
0.5	5.10	3.84	3.04	3.68	2.59	2.01
1	4.38	3.38	2.73	3.21	2.31	1.82
2	3.66	2.92	2.42	2.74	2.03	1.63
3	3.24	2.64	2.24	2.46	1.86	1.52
5	2.71	2.30	2.01	2.12	1.65	1.39
7	2.36	2.08	1.85	1.89	1.51	1.29
10	1.99	1.84	1.69	1.64	1.37	1.20
20	1.26	1.37	1.38	1.17	1.08	1.01

separado en la tabla 10.3 para la aceleración, la velocidad, y las regiones del espectro de respuesta que son sensibles al desplazamiento (fig. 10.3). Con estos valores puede uno determinar para un sismo dado el espectro suavizado de la respuesta elástica, para un cierto valor de amortiguamiento y un nivel de probabilidad dado.

10.8.2 Efectos del tamaño y peso de la estructura

Hay una buena base para reconocer que una estructura grande y pesada responde a los movimientos en el suelo o en la roca de soporte de manera distinta que lo que sucede con un pequeño acelerómetro registrador de poco peso. Estudios analíticos aproximados sugieren que los movimientos de alta frecuencia no son transmitidos tan efectivamente a la cimentación de una estructura, y por lo tanto a la estructura misma, como aquellos movimientos de baja frecuencia; esto puede ser atribuido a varios factores, entre los cuales los más importantes probablemente son: el movimiento ondulatorio característico de los sismos, cuyas componentes de más altas frecuencias son más cortas que el largo o el ancho de la estructura afectada; y la pérdida de energía en el rango de alta frecuencia, que no se tiene en cuenta en el

análisis, y que proviene de posibles movimientos relativos entre la base y la cimentación. Estas observaciones están corroboradas por la respuesta en dos lugares en Los Ángeles —el Hollywood Parking Lot y el Hollywood Storage Building— que están adyacentes uno al otro: en el primero, el instrumento está montado en el llamado «campo libre»; y en el segundo, el instrumento se encuentra en el sótano de la estructura. Los espectros de respuesta y de Fourier son prácticamente idénticos para frecuencias inferiores a uno o dos hertzios pero difieren notablemente, hasta por un factor de 3, para frecuencias más altas de 4 hertzios.

Por estas razones, se considera que los movimientos sísmicos de alta intensidad, y especialmente aquellos que se deben a sismos cercanos, tienen mucha menor influencia sobre la respuesta estructural y sobre el daño producido por ella que en el caso de sismos que tienen su epicentro más distante, en los cuales los movimientos principales están en rangos de frecuencia a los que la estructura puede responder de forma efectiva. Esto es una justificación que se usa con frecuencia para no tener en cuenta las aceleraciones altas que son medidas o deducidas, en comparación con las utilizadas en el desarrollo de los espectros de diseño.

10.8.3 *Efectos de la acción inelástica*

Los efectos de la respuesta de una estructura que se deforma hasta el rango inelástico han sido descritos y/o resumidos por Newmark y Rosenblueth (1971), Newmark (1969, 1970, 1972, 1975a y b), Newmark y otros (1973), Newmark y Hall (1969, 1973), Hall y otros (1975), y Blume y otros (1961). En general, para pequeñas incursiones en el rango inelástico, cuando este último es aproximado a una curva de resistencia elasto-plástica, el espectro de respuesta generalmente es reducido por un factor recíproco del factor de ductilidad. Si el factor de ductilidad está definido por el símbolo griego μ , entonces las dos porciones a mano izquierda del espectro de respuesta elástico, que se ven en las figuras 10.3 y 10.4 (la frecuencia menor de unos 2 Hz) son reducidas por un factor $1/\mu$ para la aceleración, mientras que en la porción de aceleración constante a la derecha (aproximadamente entre las secuencias de 2 y 8 Hz), están reducidas por un factor de $1/\sqrt{2\mu - 1}$. No hay ninguna reducción más allá de unos 33 hertzios. Con este concepto, se puede llegar a espectros de diseño que tomen en consideración la acción inelástica aún en el pequeño rango de comportamiento inelástico.

10.8.4 *Clasificación del diseño sísmico*

Debido a la importante influencia que el factor de ductilidad tiene sobre el espectro de diseño, se requiere alguna guía referente a cómo escoger adecuadamente los factores de ductilidad que se han de utilizar aún para los elementos y componentes vitales en la instalación de un reactor nuclear.

Las observaciones del comportamiento de las estructuras durante sismos, la interpretación de las pruebas de laboratorio, incluyendo las efectuadas en simuladores de sismos y mesas de vibración, las observaciones de los daños a estructuras y modelos estructurales durante pruebas nucleares, incluyendo el daño debido tanto a la explosión aérea como al impacto en el terreno, son todos ellos factores pertinen-

tes en la selección del factor de ductilidad adecuado para ser utilizado en el diseño.

Como guía, se sugiere una clasificación del diseño sísmico en la tabla 10.4. Para cada clase se da un rango de factores de ductilidad. Se cree que aún el límite superior de cada rango es adecuadamente conservador para todos los valores en la clase correspondiente, pero se puede escoger, para ser aún más conservador, el utilizar un valor inferior. Las clases I-S, I y II pueden ser consideradas como aplicables a varios tipos de elementos componentes o facilidades de un reactor nuclear; la clase III por lo general, puede decirse que cae en el rango de estructuras ordinarias con posibilidad de ser diseñadas de acuerdo con las actuales especificaciones y códigos de diseño sísmico para edificios.

10.8.5 Espectros de diseño

Tabla 10.4. Clasificación propuesta para diseño sísmico

Clase	Descripción
I-S	El equipamiento, los instrumentos, o los componentes que tienen funciones vitales que deben permanecer operativas durante y después de los sismos; las estructuras que deben permanecer elásticas o casi elásticas; aquellas instalaciones que tienen una función vital en relación con la seguridad y que deben de continuar activas aún sin reparación. Factor de ductilidad = 1 a 1.3.
I	Aquellos componentes que deben continuar operativos después de un sismo pero que no necesitan estar funcionando durante el evento; las estructuras que pueden sufrir pequeña deformación en el rango inelástico; los servicios que son vitales pero cuyas funciones pueden ser interrumpidas mientras se hacen pequeñas reparaciones. Factor de ductilidad = 1.3 a 2.
II	Servicios, estructuras, equipamiento, instrumentos o componentes que puedan deformarse inelásticamente hasta un nivel moderado sin que pierdan de forma significativa sus funciones; las estructuras que contienen componentes de clase I ó I-S a los cuales no se les puede permitir que sufran daños por la excesiva deformación de la estructura. Factor de ductilidad = 2 a 3.
III	Todos aquellos artículos que están normalmente regidos por los códigos ordinarios de diseño sísmico; las estructuras que requieren resistencia sísmica de tal manera que puedan ser reparadas después de un sismo. El factor de ductilidad = 3 a 8, según el material, tipo de construcción, diseño de detalles y control de calidad.

Usando los conceptos descritos arriba, el espectro de diseño para los movimientos sísmicos puede ser dibujado como se ve en la figura 10.4. En esta figura, la línea $DVAA_0$ es el espectro de respuesta elástica obtenido de la figura 10.3, empleando los niveles de probabilidad, valores de amortiguamiento y factores de amplificación apropiados a la determinada excitación y componente estructural. De esto, usando las reducciones descritas arriba, se obtiene el espectro de diseño para aceleración o fuerza con la curva $DV'A'A_0$, y para el desplazamiento con la curva $DVA''A''_0$, esto último representando el desplazamiento total y no sólo la componente elástica de desplazamiento en el rango elasto-plástico.

10.8.6 *Efectos combinados de la excitación horizontal y vertical*

En el diseño se deben considerar los efectos combinados del movimiento en varias direcciones. Aunque esto puede hacerse de varias maneras, según el método de análisis utilizado, es razonable utilizar el método del espectro de respuesta, aún para los sistemas con varios grados de libertad, y estimar por separado las respuestas en cada dirección. Para combinar los efectos se puede tomar la raíz cuadrada de las sumas de los cuadrados de los efectos individuales, para esfuerzos o movimiento, en un punto en particular y en una dirección en particular, y para los diversos componentes de movimiento que se han considerado. Se estima como conservador y más sencillo considerar los efectos combinados como iguales al 100 por ciento del efecto en una dirección en particular y 40 por ciento de los efectos en dos direcciones a ángulos rectos al movimiento principal considerado. Esta combinación es recomendada para uso general, particularmente en el diseño de plantas generadoras nucleares.

10.9 Consideraciones especiales

10.9.1 *Movimientos de fallas*

En los grandes sismos pueden ocurrir movimientos significativos de fallas con un desplazamiento relativo entre ambos lados de la falla hasta de 6 a 8 metros. Tales movimientos son prácticamente imposibles de contrarrestar en el diseño. Sin embargo, pequeños movimientos de fallas, o movimientos a lo ancho de fallas subsidiarias, pueden ocasionar desplazamientos de unos pocos centímetros hasta un metro. Frente a estos es posible mantener una resistencia adecuada mediante el aislamiento de la estructura. Algunos de estos métodos han sido descritos por Newmark (1969).

10.9.2 *Movimientos relativos*

Los movimientos relativos entre diferentes partes de una instalación o entre diferentes elementos en una estructura tienen frecuentemente que ser considerados en el diseño. Debido al hecho de que elementos separados pueden responder de tal manera que, aun cuando tengan el mismo periodo de vibración y las mismas características generales de respuesta pueden desfasarse en sus movimientos, su movimiento relativo de diseño generalmente tiene que ser tomado como la suma de los valores absolutos de los movimientos máximos de las dos componentes involucradas. Más detalles sobre este tema están dados por Newmark (1972).

10.9.3 *Conductos y tuberías subterráneos*

Túneles subterráneos u otros conductos y tuberías, son componentes importantes de los reactores nucleares. En general, estos pueden llegar a deformarse de manera lógica con los desplazamientos o las deformaciones unitarias en el suelo o en la roca

misma. Los métodos para atender este problema también están descritos con detalle por Newmark (1972) y han sido utilizados como criterios de diseño para sistemas de tuberías subterráneas.

Suponiendo que para distancias cortas los movimientos sísmicos se propagan como ondas con una velocidad de transmisión c , puede demostrarse que la deformación unitaria longitudinal máxima, ϵ_m , en un conducto o tubería enterrada, excepto cuando está cerca de una falla o de una ruptura superficial, está descrita por las siguientes ecuaciones, para ondas compresionales en el terreno:

$$\epsilon_m = v_m/c_p, \quad (10.18)$$

y para ondas de corte:

$$\epsilon_m = v_m/2c_s, \quad (10.19)$$

donde v_m = máxima velocidad del terreno; c_p = velocidad de la onda de compresión en el medio; c_s = velocidad de la onda de corte en el medio.

Para c_p y c_s no se deben tomar valores muy pequeños apreciables cerca de la superficie en suelos blandos, debido a que la transmisión de la onda está afectada por los estratos profundos más rígidos.

Las deformaciones unitarias en una tubería debido a caminos de curvatura en el terreno son discutidas por Newmark (1972) y en general son lo suficientemente pequeños como para descartarlas.

10.9.4 Aditamentos y equipamiento

Muchas de las partes importantes de una planta nuclear están ligadas a las partes principales de la estructura, y responden de manera determinada por la respuesta estructural más que por el movimiento general del terreno al que la estructura está expuesta. Esto conlleva una considerable dificultad en el análisis, pero existen técnicas matemáticas apropiadas. Algunas de ellas están descritas por Newmark (1972), incluyendo una simplificación útil para diseño en la cual la respuesta del aditamento está relacionada con la respuesta modal de la estructura. Dicha respuesta se ve afectada por las masas relativas del aditamento y de la estructura. Cuando la masa relativa del aditamento es infinitesimal, la respuesta está afectada principalmente por el amortiguamiento de la estructura, pero a medida que llega a ser finita, aun cuando sea pequeña, implica un amortiguamiento relativo y efectivo, y está relacionado con la raíz cuadrada de la razón aditamento-masa de estructura.

Los estudios dados a conocer por Newmark (1972) y las investigaciones más recientes y aun inéditas indican que, en general, la respuesta máxima de un equipo ligado a la estructura, aunque esté sintonizado a la misma frecuencia que la estructura, no excederá el espectro de respuesta básica a la cual responde ésta, multiplicado por un factor de amplificación, AF , definido como sigue:

$$AF = \frac{1}{\beta_a + \beta_s + \sqrt{\gamma}} \quad (10.20)$$

donde β_e = la proporción de amortiguamiento crítico para el equipo; β_s = la proporción del amortiguamiento crítico para la estructura; γ = la razón de la masa generalizada del equipo con la masa generalizada de la estructura, donde el vector de desplazamiento modal es tomado de manera que tenga un factor de participación unitario tal como está definido por la ecuación (10.15).

La masa generalizada por el enésimo modo, \bar{M}_n , está definida sea para el equipo o la estructura como:

$$\bar{M}_n = u_n^T M u_n \quad (10.21)$$

en la cual M es la matriz de masas y u_n es el vector modal de desplazamiento (para el equipo o la estructura) normalizado a un factor de participación de unidad.

Por lo tanto, incluso una razón de equipo a masa de estructura de 0.0001 corresponde a un factor de amortiguamiento adicional equivalente a 0.01, ó 1 por ciento, y una razón de masa de 0.001 a un factor adicionado de aproximadamente 3.2 por ciento.

10.9.5 Control de calidad y detalles de construcción

Los puntos que no se prestan fácilmente a una consideración analítica pueden tener un efecto importante sobre la respuesta de las estructuras e instalaciones a los movimientos sísmicos y deben ser considerados en el diseño. Entre éstos están tales asuntos como los detalles y las propiedades de materiales de los elementos y componentes, y la inspección y el control de calidad durante el proceso de la construcción. Los detalles de las conexiones de la estructura con su soporte o cimentaciones, así como de los diversos elementos o asuntos dentro de la estructura o componente, son de una gran importancia. Las fallas frecuentemente ocurren en las uniones y juntas debido a que no son adecuadas para soportar las fuerzas a las cuales están sujetas bajo condiciones dinámicas. Una falta de adecuación en las propiedades de los materiales puede ser frecuentemente encontrada, lo cual conduce a la ruptura frágil cuando no pueda ser absorbida suficiente energía, aun cuando la absorción de energía puede haber sido tomada en consideración en el diseño y pueda existir bajo condiciones de cargas estáticas. Algunos de estos tópicos han sido considerados en detalle para el hormigón armado por Blume y otros (1961) y Newmark y Hall (1968). Se deben seguir conceptos similares, sin embargo, para otros materiales de construcción.

10.10 Referencias

- AMBRASEYS, N. N. 1974. Dynamics and response of foundation materials in epicentral regions of strong earthquakes. *Proc. Vth World Conf. Earthqu. Engng, Rome*, vol. 1. p. CXXVI-CXLVIII.
- BLUME, J. A.; NEWMARK, N. M.; CORNING, L. 1961. *Design of multi-story reinforced concrete buildings for earthquake motions*. Chicago, Portland Cement Association. 350 p.
- D'APPLONIA, E. Consulting Engineers, 1975. Soil Structure Interaction for Nuclear Power Plants, *Report DAP-TOP 1, May 1975*.
- DONOVAN, N. C. 1974. A statistical evaluation of strong motion data including the February 9, 1971 San Fernando earthquake. *Proc. Vth World Conf. Earthqu. Engng*, vol. 1, p. 1252-1261.
- HALL, W. J.; MOHRAZ, B.; NEWMARK, N. M. 1975. Statistical analyses of earthquake response

- spectra. *Trans. 3rd Intern. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology, London* (paper K1/6).
- HANKS, T. C. 1975. Strong ground motion of the San Fernando, California, earthquake: ground displacements. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 65, no. 1, p. 193-226.
- IDRISS, I. M. 1975. Analyses for soil-structure interaction effects for nuclear power plants. Report by Ad Hoc Group on Soil-Structure Interaction, Structural Division, American Society of Civil Engineers. (Draft).
- MOHRAZ, B. 1975. A study of earthquake response spectra for different geological conditions. Dallas, Institute of Technology, Southern Methodist University, 43 p.
- NEWMARK, N. M. 1969. Design criteria for nuclear reactors subjected to earthquake hazards. *Proc. IAEA Panel on Aseismic Design and Testing of Nuclear Facilities*, Tokyo, Japan Earthquake Engineering Promotion Society, p. 90-113.
- . 1970. Current trends in the seismic analysis and design of high rise structures. In: Robert L. Wiegel (ed.) *Earthquake Engineering*, Chapter 16, p. 403-424. Prentice-Hall; New Jersey, Englewood Cliffs.
- . 1972. Earthquake response analysis of reactor structures. *Nuclear Engineering and Design* (The Netherlands), vol. 20, no. 2, p. 303-322.
- . 1975a. A response spectrum approach for inelastic seismic design of nuclear reactor facilities. *Trans. 3rd Intern. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, London* (paper K5/1).
- . 1975b. Seismic design criteria for structures and facilities, Trans-Alaska pipeline system. *Proc. U. S. Nat. Conf. Earthqu. Engng*, p. 94-103. Ann Arbor, Michigan, Earthquake Engineering Research Institute.
- . 1975c. *Overview of seismic design margins*. New York, Atomic Industrial Forum, Inc., Workshop on Reactor Licensing and Safety. vol. 2, no. 1, p. 63-84.
- ; BLUME, J. A.; KAPUR, K. K. 1973. Seismic design spectra for nuclear power plants. *Jl Pwr Div., ASCE*, New York. Vol. 99, no. PO2, p. 287-303.
- ; HALL, W. J. 1968. Dynamic behavior of reinforced and prestressed concrete buildings under horizontal forces and the design of joints (including wind, earthquake, blast effects). *Preliminary publication, 8th Congress*. p. 585-613. New York, International Association Bridge and Structural Engineering (French translation p. 614-638, German translation p. 639-661).
- ; —. 1969. Seismic design criteria for nuclear reactor facilities. *Proc. IVth World Conf. Earthqu. Engng, Santiago, Chile*, vol. II, p. 34-37 (B4-50).
- ; —. 1973. Procedures and criteria for earthquake resistant design. *Building Practices for Disaster Mitigation*, vol. 1, p. 209-236, Washington, National Bureau of Standards (Building Science Series 46).
- ; —; MOHRAZ, B. 1973. A study of vertical and horizontal earthquake spectra. Directorate of Licensing, U. S. Atomic Energy Commission. (Rept. WASH-1255), 151 + ii pp.
- ; ROBINSON, A. R.; ANG, A. H.-S.; LOPEZ, L. A.; HALL, W. J. 1972. Methods for determining site characteristics. *Proc. Intern. Conf. Microzonation*, Seattle, vol. 1, p. 113-129. NSF-Unesco-University of Washington-ASCE-Acad. Mechs.
- ; ROSENBLUETH, E. 1971. *Fundamentals of earthquake engineering*. Prentice-Hall, New Jersey, Englewood Cliffs. 640 p.
- SCHNABEL, P. B.; SEED, H. B. 1973. Accelerations in rock for earthquakes in the western United States. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 63, no. 2, p. 501-516.
- SEED, H. B.; UGAS, C.; LYSMER, J. 1974. Site dependent spectra for earthquake-resistant design. *Earthquake Engineering Research Center*, Berkeley, California (Report no. EERC74-12), 17 p.
- TRIFUNAC, M. D.; BRADY, A. G. 1975. On the correlation of seismic intensity scales for the peaks of recorded strong ground motion. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 65, no. 1, 139-162.

11 Refuerzo de las estructuras dañadas por los sismos

Por T. WHITLEY MORAN

11.1 Introducción

El refuerzo de edificaciones dañadas después de un terremoto es un arte nuevo y hasta ahora no probado. Es una operación de desastres y, como tal, difiere en gran manera de lo que es la ingeniería sismo-resistente normal. Después de que ha ocurrido el evento sísmico, la ola de tragedia humana es incrementada por la confusión y el caos. Urge la acción y aquí tenemos una diferencia inmediata entre los países bien desarrollados y aquellos que lo están menos.

«Los países desarrollados generalmente pueden afrontar sus propios desastres naturales. Tienen los recursos financieros, el conocimiento y todo lo demás que es necesario para rehabilitar las estructuras y los servicios públicos y para poner en marcha nuevamente la economía. Los países menos desarrollados pueden carecer de estos recursos, y es en éstos donde el problema es más agudo. Aún más, las construcciones en estas regiones son hechas con todo tipo de materiales, adobe, albañilería, madera y combinaciones de estos materiales, así como hormigón armado. Aun en los Estados Unidos, Canadá y Japón, el porcentaje de personas que viven en casas de uno o dos pisos es muy alto, la cifra del 98 % ha sido dada para el Japón.»¹ En realidad la construcción de estructuras realmente antisísmicas es de muy reciente fecha y constituyen sólo una pequeña proporción del número total de edificios en las regiones sísmicas del mundo.

«El mapa del peligro para el ser humano muestra grandes concentraciones en la zona del Mediterráneo y del Medio Oriente y en partes de América Latina, donde se combinan una alta densidad de población y edificios de poca resistencia sísmica, con lo cual se aumentan las cifras de los daños estructurales y del número de personas afectadas.»² Es en estas regiones, en las que los recursos locales y los conocimientos son inadecuados, donde más se necesita la asistencia técnica.

1. Comunicación de J.D. Mortimer Lloyd, establecimiento para investigación de construcciones, Watford, U.K.

2. Tomado de una Conferencia del Dr. P.L. Willmore: La Sociedad para Dinámica de Terremotos y de Ingeniería Civil (SECED) Instituto de Ingenieros Civiles, Londres 1969.

Dado que esta presentación tiene sólo carácter introductorio acerca de un nuevo aspecto de la ingeniería sismo-resistente, es deseable examinar en detalle varios temas que pueden afectar a las decisiones finales.

11.2 Fuentes de información sobre refuerzo

Aunque el refuerzo de estructuras dañadas por sismos ha sido un área que ha tenido poca atención hasta hace sólo pocos años, existen importantes fuentes de información comparable disponibles para su uso.

11.2.1 *Desarrollos en tiempo de paz desde 1920*

Éstos cubren la reparación de daños estructurales que se encuentran en la práctica diaria de la ingeniería. Durante los últimos 50 años, ésta se ha convertido en una rama altamente especializada de la industria de la construcción en América y en Europa. Miles de estructuras de hormigón armado muy debilitadas han sido reforzadas al nivel de las más recientes normas, adicionándose refuerzo de acero dentro de hormigón sopleteado (Gunite, Torkret, Shotcrete), y métodos paralelos han sido usados para estructuras de acero. Se han empleado revestimientos a presión, varillas de amarre y pernos de anclaje en antiguos puentes de albañilería, pilones neumáticos para soporte, cimentación e inyecciones químicas para zonas débiles en la cimentación.

Obviamente bajo condiciones de no desastre, cada estructura puede ser inspeccionada y se puede evaluar individualmente, teniendo tiempo adecuado para comparar los méritos y los costos de opciones alternativas antes de tomar una decisión final.

Hay mucha literatura sobre este tema y hay muchos registros de estructuras que, habiendo sido condenadas como inseguras, fueron completamente restauradas y puestas nuevamente en uso (Moran, 1956) y ahora (1975) se encuentran en servicio incluso de 30 a 45 años después. En 1920 no habría habido ninguna alternativa sino la de demoler y reconstruir totalmente.

El hormigón sopleteado ha sido uno de los más versátiles procesos mencionados. Se añade nuevo refuerzo de acero para que puedan asimilarse las tracciones, y el hormigón sopleteado así cubre este acero y permite que actúe como si fuese una piel tensada. Primero, esto hace innecesario los encofrados costosos y complicados, y segundo, el material sopleteado logra una ligazón con la estructura primaria, cosa que no es posible hacer de ninguna otra manera. Además de su uso ya bastante común para trabajos normales de refuerzo, también se usa regularmente en Norteamérica y en otros lugares para reparar daños producidos por sismos, y para reforzar edificios existentes.

11.2.2 *El refuerzo pre-sismo de edificios existentes*

Ésta es la categoría más reciente para construcción antisísmica y los métodos empleados, que son una extensión de los ya descritos anteriormente, consisten en

añadir refuerzos para que asuman un nuevo tipo de carga. El método fue desarrollado después del terremoto de 1933 en Long Beach (California) que destruyó un gran número de edificios de albañilería no reforzada, incluyendo muchos colegios. Si el sismo hubiese ocurrido durante horas de colegio, la pérdida de vidas entre los escolares habría sido terrible. Los legisladores del estado utilizaron los poderes que les otorgaba el «Field Act» para controlar el diseño y la construcción de todo colegio nuevo (SEAOC, 1973), y en 1959 la ciudad de Long Beach obtuvo autorización para poder solicitar que todos los edificios en peligro existentes debían ser renovados hasta que cumplieran con las normas sismo-resistentes; y en los años siguientes los reglamentos para construcción en la ciudad fueron progresivamente revisados para cubrir estas necesidades. Uno de los métodos propuestos fue el de añadir una capa tensada de gunita (hormigón o soplete) reforzado a una o ambas caras de las paredes sustentadoras, junto con diafragmas horizontales en los niveles del piso y techo, dando así un sistema simple de cajón (O'Connor, 1975). Un método de procedimiento de diseño para el refuerzo de edificios porticados existentes de hormigón armado también ha sido descrito (Leften y Colville, 1975). Estos métodos son de gran interés, ya que juntan los procedimientos convencionales de diseño antisísmico y las prácticas bien conocidas de refuerzo. Si bien son para uso en edificios no dañados, también son de gran valor para restaurar estructuras dañadas.

11.2.3 *Reparaciones de daños causados por la guerra*

Es una experiencia totalmente diferente la que se deriva de la reparación de edificios dañados por el bombardeo aéreo durante la Segunda Guerra Mundial. Un gran número de ciudades en Europa y en el Lejano Oriente sufrieron daños comparables a los que ocasiona un terremoto fuerte. Amplios programas de reparación y de reconstrucción fueron la secuela. En el Reino Unido una valiosa serie de boletines acerca de la reparación de daños de guerra fueron publicados por la Building Research Station, y también existen informes profesionales. Aquí también un gran número de estructuras reforzadas continúan en uso; la efectividad de los métodos ha sido, por lo tanto, ampliamente justificada por la práctica y las lecciones aprendidas no deben de ser ignoradas.

11.2.4 *Refuerzo después de un terremoto de estructuras no porticadas ni reforzadas*

Con anterioridad a 1963, no ha habido ninguna publicación acerca de la restauración de edificios dañados por terremotos para que éstos lleguen a tener resistencia sísmica estándar. El terremoto de Skopje de 1963 dio lugar a que se considerase un problema nuevo y no estudiado; la de reforzar grandes estructuras en viviendas que no incorporaban ningún elemento antisísmico. Existían muchos de estos edificios en la ciudad; la mitad de ellos sufrieron colapso o daños imposibles de reparar; el resto, con daños menores, estaban en condiciones de dar cabida a más de 50 000 personas que quedaron sin vivienda, si hubiesen podido repararse a un nivel aceptable de seguridad contra futuros sismos.

Los métodos de reparación que se empleaban fueron diseñados para reparar el daño sin añadir ningún refuerzo antisísmico nuevo. Los edificios reparados, por lo tanto, continuaban siendo un serio peligro para sus ocupantes y era indispensable diseñar la manera de aumentar la seguridad de estas estructuras hasta un nivel aceptable (Moran y Long, 1964). Se fortalecieron grandes bloques de apartamentos en 1964 y se delinearon las prioridades, la logística y la planificación de un esquema importante para la ciudad (Moran, 1969).

Se requiere investigación urgente en edificios bajos con paredes de piedra, ladrillo y hormigón, y que no tienen ningún soporte estructural. Estos edificios constituyen la mayoría de las viviendas urbanas y rurales. Probablemente existen de 30 a 40 millones de estos edificios en zonas sísmicas actualmente y se continuará construyendo este tipo de vivienda durante muchos años más. Los métodos elásticos de diseño no son aplicables. Su rigidez y carencia de ductilidad los hacen altamente vulnerables a daños sísmicos, y de un peligro considerable para sus ocupantes.

Las reacciones y los mecanismos de falla de edificios rígidos no porticados ante un sismo son muy distintos a los de edificios porticados flexibles. Están fuertemente influidos por el número de pisos y su alineamiento. Debe darse prioridad a un estudio acerca de su comportamiento y a una nueva base para calcular el factor sísmico, que debe tomar en consideración la inherente característica quebradiza de sus estructuras. Deben estudiarse métodos para añadir a edificios existentes un sistema estructural dúctil que preferiblemente debería ser tridimensional y podría tratarse de superficies tensadas o construcción de cajón, o de pórticos que resistan ligeros momentos, tal como se describirá más adelante.

11.2.5 Refuerzo de estructuras porticadas después de un terremoto

Esta categoría fue mencionada brevemente por Moran y Long (1964) y Moran (1969) pero no resultó ser un problema importante en Skopje. Fue nuevamente referida en un Informe sobre San Salvador (1965) en el cual se puso énfasis en controles y prioridades (Moran, 1965). Ha recibido mucha atención en estos años en Estados Unidos (Spracklen, 1973; Strand, 1973) y ha aumentado el interés en el comportamiento de estructuras reforzadas en un subsecuente temblor (Wyllie y Dean, 1975).

En Estados Unidos se está preparando un nuevo código nacional sísmico, que incluirá una sección especial acerca del estudio, evaluación y reparación de estructuras dañadas. Cuando esté publicado, este código será una valiosa guía para otras regiones.¹

De tiempo en tiempo también ha habido un número de conferencias y artículos acerca de estructuras individuales que se han publicado en las revistas de ingeniería. Mientras que la lista de referencias es sin duda incompleta, sin embargo, indica lo poco que se ha escrito acerca de esta rama de la ingeniería sísmica en comparación con la gran masa de literatura sobre procedimientos de diseño para nuevas estructuras. Se requieren más estudios sobre temas tales como:

1. El autor se siente deudor de los Sres. David L. Messinger y Leslie B. Graham de la Estructural Engineers Association de California del Norte por la información que han tenido la amabilidad de proporcionar acerca de este proyecto.

1. Las descripciones del trabajo para refuerzo antisísmico que se han hecho en estructuras individuales, sea en el estado pre-sismo, no perturbado o en el post-sismo dañado.
2. Reseñas del comportamiento de edificios reforzados durante subsecuentes temblores.
3. Las descripciones de las reparaciones estructurales que se han llevado a cabo en una ciudad grande afectada, y del sistema de organización y control utilizado, dando la logística correspondiente.

11.3 Control central, organización y planeamiento

Las condiciones del desastre que siguen a los terremotos, inundaciones y huracanes (y también por cierto, a los ataques aéreos durante las guerras) tienen mucho en común. Los problemas administrativos, económicos y sociales son mucho más difíciles de solucionar que los puramente técnicos. Por esta razón, el núcleo de una organización de desastre debe existir en todas las áreas que están en peligro, listas para una inmediata aplicación.

11.3.1 Pasos iniciales

Los problemas prácticos de reconstrucción necesitan que quienes dirigen el gobierno municipal o estatal organicen lo necesario para un pleno control sobre la industria de la construcción, con poderes para promulgar normas, definir prioridades, autorizar trabajos o prohibirlos. Toda la industria de la construcción podría ser movilizada para trabajos de rescate y limpieza y para la instalación de campamentos provisionales.

Los ingenieros, arquitectos y evaluadores deben ser nombrados para que hagan un análisis rápido de toda el área afectada, indicando grados de intensidad, clasificación de edificios y de servicios. Este estudio debe ser resumido en hojas estadísticas para planear operaciones futuras y estimar costos. Podría hacerse un mapa que mostrara zonas de colapso y grados de daños, y además, un mapa separado indicando lugares en los que hubieron muertes.

11.3.2 Clasificación de los daños

Se requiere una escala local adaptable a los tipos locales de construcción (las clases 1 y 2 que se indican más abajo pueden ser subdivididas):

1. *Daño no estructural*: deben hacerse reparaciones inmediatas para que el edificio sea habitable. Posteriormente, se reforzará algo más.
2. *Daño estructural local*: los elementos sustentadores de carga se habrán de reparar o reconstruir antes de la reocupación. El refuerzo antisísmico posteriormente.
3. *Daño estructural moderado*: temporalmente inseguro. Reparación completa y refuerzo antisísmico antes de su ocupación.
4. *Daño estructural grave, distorsión o colapso parcial*: para demolición parcial o total.

Sería una ventaja si las clasificaciones de daño pudiesen estar basadas en una de las escalas reconocidas para la intensidad, es decir la escala Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK) o la Mercalli Modificada (MM).

11.3.3 *Planes para proveer de nuevas viviendas*

Estos pueden incluir la evacuación parcial de personas de edad, mujeres y niños, la habilitación de nuevos suburbios de casas prefabricadas, reparaciones primarias a casas sin daño estructural y posteriormente, cuando lo permitan los recursos, reparaciones estructurales y refuerzo de edificios con daños estructurales.

11.3.4 *Las prioridades para una inmediata restauración*

Los servicios públicos y otros, y las estructuras para actividades de transporte, comunicaciones e industriales deben ser tratados por las autoridades pertinentes haciendo uso de su propio cuerpo de ingenieros. Los hospitales, centros de control, edificios municipales y colegios recibirían alta prioridad y consultores nombrados para este fin. Los grandes edificios comerciales, iglesias, mezquitas, edificios históricos, etc., estarán limitados a reparaciones primarias en un primer momento.

Lo primordial y más urgente será la vivienda doméstica, incluyendo edificios de apartamentos de todo tamaño y tipo, y viviendas unifamiliares, bien sea en terrazas o en domicilios privados así como también en los centros comerciales. Los bloques más grandes deben ser tratados primero, ya que tendrán capacidad para que los reocupen un mayor número de familias en el menor tiempo. Aquí entramos de inmediato en lo que es el área de organización masiva, control central y programación. En la mayoría de las ciudades, gran número de casas y apartamentos en diferentes suburbios están construidos conforme a determinados diseños, lo que hace posible delinear un plano para el trabajo de refuerzo.

Los contratistas deben trabajar en un sistema en cadena, con una secuencia de las diferentes especialidades pasando por turno de un edificio a otro. Se requeriría una supervisión muy de cerca para tener la seguridad de que se están empleando métodos correctos de reparación y que la calidad del trabajo es alta, pues de otro modo habría un gran desperdicio de recursos humanos y materiales. Los distintos métodos de restauración deberán ser comparados entre sí en relación con su efectividad, costo y tiempo requerido.

11.3.5 *Centro de información*

En la confusión que sigue a un desastre, es muy importante abrir un centro de información lo más pronto posible. Éste debe estar ubicado en un local reforzado y debe de incluir:

- a. *Información pre-desastre* acerca de la población, vivienda, planeamiento de la ciudad, servicios locales gubernamentales y públicos, mapas de la ciudad, etc.
- b. *Datos del desastre* incluyendo número de víctimas, evaluación de daños y planes de reconstrucción.

- c. *Datos sísmicos* y copias de todos los informes técnicos a medida que se elaboren. Una fotocopidora debe estar disponible.

11.4 Consideraciones estructurales

11.4.1 *La diferencia entre reparación y refuerzo*

Antes de estudiar los edificios a restaurar, es necesario distinguir entre reparación y refuerzo y definir las categorías de cada cual. Las reparaciones generales incluyen tanto el trabajo superficial como las reparaciones de la estructura. Las *reparaciones superficiales* consisten en reponer el estucado dañado, pintar, reparar puertas y ventanas, servicios de agua y desagüe, y otros. Las *reparaciones estructurales* consisten en reconstruir paredes agrietadas y techos dañados, así como reparar pisos y soportes. Estas categorías de trabajo de reparación están dentro de las capacidades normales de construcción de los contratistas pero no devuelven a un edificio afectado su resistencia original.

El refuerzo también puede ser de dos tipos bastante distintos. El *refuerzo estructural normal* consiste en restaurar la resistencia vertical de una estructura dañada reconstruyendo paredes más gruesas, o encajonando columnas y vigas y prestando atención esencial a las cimentaciones si fuera necesario. Tal trabajo requiere de unos conocimientos especializados mayores que los trabajos de reparaciones generales. Frecuentemente uno no se da cuenta de que no proporciona resistencia lateral. El fortalecimiento antisísmico implica aumentar la resistencia para poder soportar cargas que son horizontales y dinámicas. En el caso de edificios sin estructuras, esto significa añadir algún tipo de estructura o pórtico —reforzado con acero— para resistir estas fuerzas. Cuando este concepto no sea familiar a la industria local, sería necesario entrenar arquitectos, ingenieros, capataces y operadores (extraído de Moran, 1969, págs. 2-3).

Es obvio que muchos edificios dañados requieren trabajos en todas estas cuatro categorías, y que se ahorraría mucho tiempo y dinero si tales operaciones fuesen combinadas. Sin embargo, en algunas situaciones, la urgencia para volver a situar y a proporcionar vivienda a las personas es tan grande que las dos categorías de reparación tienen que ser llevadas a cabo como operaciones de primera instancia para poder hacer que el edificio sea nuevamente usado, dejando el refuerzo para una fecha posterior. En tales casos, cualquier adicionamiento de estructura debe ser principalmente externa para causar un mínimo de problemas a los ocupantes.

Nuevamente debe insistirse en el hecho de que las reparaciones estructurales a las columnas, paredes, techos, etc., no devuelven a un edificio afectado su resistencia original. El edificio reparado está permanentemente debilitado y rara vez tendrá más de un 75 % de su resistencia original y posiblemente menos; por lo tanto está propenso doblemente a sufrir un colapso completo durante cualquier sismo posterior. De ahí la necesidad de un refuerzo positivo. Estos factores son sin embargo poco comprendidos. Aunque los constructores puedan considerar que el edificio reparado está más fuerte que cuando estuvo nuevo, y los ocupantes quieran volver a ocuparlo, debe existir una legislación y poderes correspondientes, para que se tenga la seguridad de que un edificio ha quedado completamente seguro antes de volverlo a ocupar.

11.4.2 Estructuras y sus reacciones

Los tipos de vivienda y edificios comerciales que se encuentran en distintos países varían tanto que se requiere de una clasificación local. Se pueden encontrar algunas o todas las clases siguientes:

1. *Edificios pequeños tradicionales* de adobe, ladrillo secado al sol o paredes de tierra y arcilla sobre una tarima de ramas o cañas entrelazadas, usualmente con una estructura liviana de madera y un techo pesado de barro. Estos edificios tienen poca resistencia, las paredes se colapsan, y los techos son propensos a hundirse.
2. *Casas tradicionales urbanas y rurales* con paredes maestras de piedra o ladrillo colocado con un mortero barroso, con techo pesado de maderas y tejas. Estas construcciones generalmente fallan y causan víctimas.

(En general pocas o ninguna de las casas en estas dos categorías tienen posibilidades de volver a ser habitadas.)

3. *Edificios modernos con paredes maestras* de piedra, ladrillo o bloques de hormigón, el mortero regular o bueno, techos con tejas, pero sin ningún pórtico estructural o refuerzo de paredes. Estas construcciones se encuentran de todo tamaño, desde las unifamiliares hasta bloques grandes de apartamentos de muchos pisos, hospitales, colegios, edificios municipales y comerciales de todo tipo.

Este modelo de estructura es rígido, no flexible, y quebradizo. Puede sufrir una gran distorsión y colapso súbito. Se entiende que en el sismo de Skopje de 1963, se perdieron 195 vidas en un edificio de este tipo, 125 en otro y 40 en cada uno de los otros dos edificios, 400 personas en cuatro edificios. En base a esta evidencia la estructura no reforzada y sin pórtico puede ser considerada como la más peligrosa de todas.

4. *Edificios modernos con pórticos estructurales que forman parte del mismo.* Éstos se encuentran de todo tipo y tamaño desde casas de dos pisos hasta rascacielos. Cuando son diseñados conforme a un código resistente a los sismos, tienen un comportamiento uniformemente bueno y, aun cuando lo son sólo para soportar fuerzas de viento, han reaccionado muy bien con unos daños relativamente pequeños. Esto es aplicable particularmente a estructuras que son simétricas en su plano y elevación y de modesta altura. La falta de simetría, las elevaciones tipo cantiléver y los puntos excéntricos de fijación propenden a producir efectos de torsión o periodos diferentes, que tienen como resultado unos daños múltiples y costos muy altos para poder restaurarlos.
5. *Edificios modernos de construcción compuesta,* parcialmente rígidos y parcialmente estructurados, de los cuales aquellos edificios que tienen un primer piso abierto para uso de tiendas es una característica común. El resultado normal siguiente a un terremoto es la distorsión lateral del primer piso (el efecto de rombo) más que un colapso. Si la distorsión es leve podrían hacerse inserciones reforzantes de hormigón armado o acero estructural para soportar la superestructura (frecuentemente poco dañada) junto con una superficie reforzada al nivel del segundo piso para acondicionarse al cambio de fijación. Si la distorsión es marcada, puede resultar cara su preservación.
6. *Casas modernas de madera con estructuras reforzadas,* un tipo muy común en algunos países, y que puede soportar una gran distorsión sin colapso.

11.4.3 *La estructura no porticada*

El problema se simplificará enormemente viendo estos edificios desde el punto de vista del ingeniero a quien se le solicita que las refuerce. Si un edificio contiene un pórtico estructural y está algo dañado, es relativamente fácil reforzar el pórtico, y luego prestar atención a elementos secundarios (Spracklen, 1973; Strand, 1973; Wyllie y Dean, 1975). Por otro lado, si el edificio no posee ningún pórtico, debe añadirse una estructura de acero de algún tipo; por lo tanto, en el campo de la ingeniería post-sismo, las estructuras pueden ser generalmente divididas en dos tipos fundamentales, las que ya tienen estructuras y las que no las tienen. En el uso actual, los edificios frecuentemente son clasificados por los materiales con los cuales fueron construidos, pero ésta es sólo una clasificación secundaria. La forma estructural es la clasificación primaria en cuanto a la reacción al sismo, la naturaleza del daño y el método de reparación. Las estructuras porticadas se adecuan a la teoría elástica y las que no lo son no se adecuan y hay que tener presente que las estructuras porticadas son una muy pequeña proporción del total, probablemente menos del 5 %. Es interesante tomar nota de que una casa de dos pisos, incluso de adobe, puede sobrevivir si tiene una buena estructura de madera con buenas uniones.

11.4.4 *Las reacciones de estructuras modernas sin pórtico*

El comportamiento de las estructuras porticadas ha sido exhaustivamente estudiado en el pasado pero se ha dedicado poca atención a las reacciones distintivas de los edificios sin pórticos. Existen en tales cantidades y se ha visto que son tan peligrosas que es deseable estudiar sus reacciones con bastante detalle, tal como se observó en Skopje en 1963 en la secuela de aquella tragedia humana.

El sismo de Skopje fue virtualmente un solo pulso de un décimo de segundo de duración. Las reacciones de las estructuras eran muy evidentes, fáciles para ser dibujadas, fotografiadas y diagnosticadas. En la nueva ciudad el 95 % de las construcciones fueron de ladrillo como elemento de soporte, sin pórticos y sin refuerzo, principalmente grandes bloques de apartamentos de 4 a 6 pisos. Había muchos tipos de modelos en uso; cada tipo pudo ser estudiado cuando fue sacudido en distintos alineamientos y con distintas intensidades, y se pudo recopilar una historia completa de las reacciones. Se planeó volver a dar vivienda a 50 000 personas en las casas reparadas, clasificadas en las dos categorías más bajas de daños (sección 11.3.2) y se pretendió instalar otras 50 000 personas en los edificios que habían sufrido sólo daño estructural, siempre que pudiesen ser reforzados para resistir otro sismo posterior.

11.4.5 *El suburbio de Karpoš*

En el suburbio de Karpoš, en Skopje, se hizo un estudio estructural de los edificios no porticados, que contenía 70 edificios de apartamentos con capacidad para 12 000 personas. Se habían empleado 10 tipos distintos de diseños, variando entre dos y seis pisos de altura. Las calles estaban principalmente alineadas paralelamente en dirección este-oeste y norte-sur, y por lo tanto la mitad de los edificios recibieron la

onda sísmica a lo largo de ellos y la otra mitad lo recibió perpendicularmente. Los resultados de la evaluación de daños variaban entre MM6 y MM9. Hubo cuatro colapsos importantes con muchas víctimas, tal como ya se indicó. El estudio proporcionó una gran cantidad de información vital —casi aportando más información de la que se hubiera podido obtener por otro conducto cualquiera.

El alineamiento de cada edificio con la dirección del sismo fue anotado; se encontró que esto era muy importante ya que se produjeron dos tipos muy distintos de daños. Una onda sísmica contra un extremo (paralela al eje más largo del edificio), fue de lejos lo más destructivo y causante del 85 % de las víctimas. La onda sísmica sobre un costado causó mucha menos distorsión y sólo un colapso fatal. El sismo en diagonal a los edificios causó daños confusos de torsión pero fue menos destructivo.

El punto donde se inició la fractura fue identificado en cada caso, y el mecanismo progresivo de falla fue analizado dibujando diagramas simples de fuerza, y se diagnosticaron las causas dominantes de ruptura. Resultó claro que estos edificios no se ajustaban a la teoría convencional elástica; eran demasiado rígidos. Aún más, los materiales de construcción, especialmente el mortero, tenían tendencias a desintegrarse en vez de ceder. (Es muy útil anotar la clasificación MSK de daño para cada edificio, escogiendo la parte más fracturada para este fin.)

A medida que proseguía el estudio se asignaba a cada edificio un valor para el grado de refuerzo que necesitaba y hubo indicaciones convincentes que, si esto hubiese sido aplicado antes del desastre, tanto los daños como el número de víctimas habría sido reducido.

Los edificios que casi no sufrieron daños, tampoco fueron omitidos de este estudio, ya que el no haberlos sufrido también pudo proporcionar importante información. Se hizo un plano del suburbio, donde se coloreraron los edificios individuales con rojo, amarillo y verde para mostrar el grado de daño. Todos los edificios rojos (colapsados o con daños que no permitían la reconstrucción), estaban a lo largo de una línea curva que pasó longitudinalmente a través del área, sugiriendo la presencia de un antiguo canal de riego que había sido rellenado y olvidado. Los edificios amarillos estaban a ambos lados y los edificios verdes más lejos del canal. Por lo tanto las variaciones más grandes que se encontraron en la clasificación de daños de edificios individuales fueron debidas parcialmente a las condiciones desiguales de cimentación.

11.4.6 *Mecanismos de colapso en edificios sin pórticos*

El estudio de Karpoš demostró que la acción básica es muy sencilla. El evento sísmico golpeó el edificio a nivel de tierra y empujó sus cimentaciones hacia adelante. La superestructura quedó atrás debido a su inercia, y frecuentemente quedó sobrecolgando de sus soportes. Si estos fallaron, el edificio sufrió colapso hacia atrás. Del mismo modo una excitación lateral empujó las cimentaciones hacia los costados, dejando la superestructura sobrecolgando del otro lado. Una simple demostración del mecanismo y sus efectos se podrá entender fácilmente por quienes no tienen ningún entrenamiento en ingeniería sísmica del siguiente modo: póngase un montón de cajas de fósforos sobre una mesa de jugar a cartas y golpee fuertemente con una mano en la dirección del eje más largo del montón. Repita esto

golpeando en dirección perpendicular al anterior. Entonces podremos ver las debilidades básicas:

1. Las paredes más críticas en un edificio rígido no porticado son las dos paredes de los extremos opuestos. El peligro de colapso aumenta si estas paredes soportan pisos (es decir, el ancho del piso en línea con el eje largo).
2. La fractura normalmente ocurre en la forma de grietas con ángulo de 45 grados en las paredes que son paneles, entre las ventanas del primer piso. Así pues el peligro de colapso es mayor si existen aberturas de paredes (sean puertas, ventanas, balcones recesados, ventanas salientes o paredes de cortina) en la pared de un extremo. El daño es mayor en el primer piso y disminuye sucesivamente en cada piso superior.
3. El corte en la base y el riesgo de colapso aumentan casi directamente con el número de pisos. Las fuerzas que dan lugar al colapso son dos veces más grandes en un edificio de 6 pisos que en uno de tres pisos.
4. Cuanto más largo es el edificio, más rígido es, y más grande será el peligro de que sufra colapso por el extremo. En este caso, puede ser que una tercera parte o una mitad del edificio sufra colapso hacia el lugar de origen del sismo. El agrietamiento, desmoronamiento y aplastamiento de las paredes y pisos (deformación plástica), puede absorber la mayor parte de la energía del sismo, dejando el otro extremo del edificio sólo ligeramente dañado.
5. Del mismo modo, con tres edificios en línea uno con otro y en línea con la dirección de propagación del sismo, el edificio del extremo probablemente será fuertemente dañado y los otros dos se salvarán. Éste es el principio de las tres bolas de billar.

Una gran cantidad de información acerca de edificios no porticados fue obtenida del estudio de Karpos, mucha de esta información era antes desconocida en la literatura sísmica. En particular confirmó que el adicionar un pórtico flexible tridimensional habría sido un método expeditivo y efectivo para fortalecer los grandes edificios bajos en este suburbio. Similarmente, si una parte de un edificio largo fue levemente dañada y la otra lo fue con fuerza, las dos podrían ser separadas por un espacio; la primera parte luego podría ser fortalecida y preservada, y la segunda parte demolida y reconstruida de acuerdo al código sísmico. Esto también es posible con un edificio en forma de L, formando un espacio para eliminar esfuerzos de torsión, y fortaleciendo ambas alas independientemente.

Se recomienda que los estudios locales de este tipo sean realizados en áreas críticas, tomando 5 ó 6 edificios de cada diseño, y utilizándolos como especímenes de laboratorio a escala real. Los edificios deben primero ser clasificados por su diseño estructural (sección 11:4.2), luego por su orientación al sismo, por el número de pisos y, finalmente, por la cantidad y la naturaleza de los daños sufridos. Quien realice los análisis debe hacer su propia evaluación de la clasificación del daño en los términos de la escala de intensidad en uso.

11.5 Fortalecimiento antisísmico

11.5.1 *Evaluación de daños*

Esto no es tan difícil como podría parecer a primera vista. Básicamente implica la evaluación de la cantidad de daños a miembros sustentantes de carga, es decir, los elementos del pórtico, si es que existe, y de las paredes estructurales, etc., si es que no hay pórtico. Tanto los miembros externos como internos deben ser evaluados tanto en el plano horizontal como en el vertical.

En general, si un edificio ha sido distorsionado y ya no está vertical, habrá fracturas grandes y el costo de repararlas y de restaurar la resistencia vertical de la estructura, probablemente no será económico. Algunos de los pisos pueden estar fuera de nivel. Como guía aproximada, si el factor de seguridad que queda contra cargas verticales no es satisfactorio, el edificio probablemente no vale la pena preservarlo. Es una materia simple distinguir entre daños estructurales y no-estructurales, y hacer un listado de los edificios en las categorías de daños mencionados en la sección 11.3.2 (es interesante tomar nota de que el estudio de los daños iniciales en Skopje, hecho apresuradamente, inmediatamente después del desastre, tenía una precisión del 95 % en comparación con el estudio más detallado que se hizo posteriormente).

En cualquier edificio que se seleccione para ser restaurado, todos los miembros portantes de carga fracturados deben ser reconstruidos y reforzados para que puedan soportar la carga vertical. Esta operación normalmente implica la inclusión de soportes fuertes y de tirantes como soportes temporales.

11.5.2 *Consideraciones generales*

Usualmente es más fácil reforzar una estructura no dañada que una que ya ha sufrido daños. También es más fácil proveer para una mayor carga vertical que para nuevas cargas horizontales. Sin embargo, los criterios de diseños son aplicables y hay una gran cantidad de metodologías para ambos casos. Nuevamente las estructuras porticadas son más fáciles de fortalecer que las que no tienen pórticos. La tarea más difícil de todas es reforzar un gran número de estructuras no porticadas que ya han sido sacudidas y dañadas. Los criterios de diseño elástico no son aplicables y la selección de lo que puede hacerse es muy limitada. Es por lo tanto «el arte de lo posible».

Muto, en su informe acerca de la Misión Japonesa a Skopje en 1963, propuso que los principios generales de reparación de edificios dañados deberían ser no sólo para dar a una estructura suficiente resistencia contra fuerzas sísmicas sino también una alta ductilidad o deformabilidad contra desplazamiento horizontal. Estos principios son fundamentales. Pueden considerarse dos grados de refuerzo: refuerzo para un periodo largo, principalmente de aquellos edificios porticados que no han sido severamente dañados, y el refuerzo para un periodo limitado, de estructuras sin pórticos o combinadas que han sufrido daños estructurales; es decir, porticar contra la distorsión y el colapso para proteger a los habitantes aun cuando el mismo edificio pueda resultar inservible en el caso de que sufra nuevos eventos sísmicos.

En ambos casos, el diseño debe ser simple, tanto por economía, como para su ejecución por obreros no cualificados. Debe ser fácil para incluir diferentes estructuras y varios niveles de daños. Para un tiempo limitado, el costo total de la restauración no debe exceder un tercio del costo de demolición y reconstrucción con un diseño mejor. Para efectos a largo plazo la mitad del costo de la demolición puede ser considerada como económicamente viable.

11.5.3 *Edificios porticados*

Cuando están dañadas las columnas y las vigas, deben ser reparadas añadiendo mangas o tablillas de gunita reforzada, dando atención particular a las juntas que resisten momentos, todo de acuerdo con los procedimientos aceptados para reparaciones. Las paredes de corte pueden construirse con gunita ligeramente reforzada, aplicada a las paredes existentes, internas y externas —después de haber quitado el acabado de la pared existente (por ejemplo: estucado o mayólica). Las grietas en las paredes pueden ser selladas con resina epoxy, pero esto requiere un manejo muy sofisticado y una supervisión de cerca, y en áreas donde no se dispone de estos materiales sería más práctico un acabado de gunita reforzada para la pared.

En cualquier edificio sacudido, las cajas de escaleras, ascensores y patios de luces generalmente habrán absorbido una gran parte de la energía y por lo tanto, estarían severamente dañadas. Es esencial reforzar tales cajas, no solamente para que actúen como núcleos estructurales, sino también para garantizar rutas de escape. En el caso más simple, estas cajas pueden ser reforzadas internamente con acero angular pesado, digamos de 20 cm. Los ángulos verticales pueden ser llevados a través de todos los pisos del edificio y los horizontales colocados bajo los pisos para dar soporte adicional. Ambos pueden ser empernados a las paredes existentes. Alternativamente, las paredes externas de estas cajas pueden ser porticadas con gunita reforzada dando continuidad a través de todas las paredes y pisos. Esto significa mucho más trabajo y los ocupantes tienen que evacuar el local para que se realice el trabajo.

Donde las entradas principales estén recesadas y el pórtico también esté hacia adentro, las vigas horizontales a nivel de cada piso son discontinuas a lo ancho de este receso, y es muy común encontrar que la estructura principal se ha fracturado a nivel del primer piso a ambos lados de la parte recesada, y probablemente también en pisos superiores. Es un asunto sencillo insertar una viga de bloque de hormigón armado, a lo ancho del espacio, y de tal manera hacer que la viga sea continua. También pueden insertarse barras de unión en cada extremo y, si se utiliza una forma de madera en L, la viga puede ser rápidamente construida con un revestimiento de gunita.

11.5.4 *Refuerzo de edificios sin pórticos*

Los edificios de este tipo han sido tan escasamente reforzados después de un terremoto que muy pocos ingenieros, arquitectos o constructores tienen experiencia alguna de cómo y por dónde comenzar. Un terremoto pone al descubierto las

debilidades de estas estructuras; estas debilidades, que generalmente se deben a una falta de resistencia horizontal, han sido identificadas y eliminadas una por una.

Se ha apelado a técnicas de refuerzo que implican la inclusión de paredes internas de corte o de columnas externas. Algunas de éstas son muy costosas pero es difícil ver cómo cualquiera de las dos podría evitar mayores daños y víctimas. La resistencia a la compresión de las paredes existentes, portadoras de cargas, es reducida por un sismo; su resistencia también será fuertemente reducida. Un método de refuerzo es utilizar un pórtico convencional de hormigón armado, pero esto tiene las desventajas previamente señaladas.

Otra alternativa es añadir algún tipo de construcción de superficie tensada. En su forma más sencilla, pueden ser colocadas mallas de acero para cubrir toda la superficie de las paredes externas, clavándolas a ella, con el acero más pesado en el piso a nivel del suelo y progresivamente reduciendo su peso en cada piso superior. Se puede luego hacer un revestimiento con gunita de un espesor de 50 a 75 mm. No hay ninguna duda de que esto influirá en el mejoramiento de la resistencia dúctil del edificio.

11.5.5 *El pórtico con «entablillados y vendas»*

11.5.5.1 Trabajo externo

Un desarrollo del sistema de superficie tensada fue inventado para los edificios de departamentos en Skopje. Aquí el acero fue diseñado para que formara pórticos rectangulares y resistentes a fuerzas, alrededor de los edificios, con anchas bandas horizontales y verticales de gunita reforzada. Varillas de amarre transversales de acero fueron insertadas a todo lo ancho. El refuerzo fue bien anclado al ladrillo, de tal modo que todo él constituía una estructura integrada con el acero, asumiendo los esfuerzos de tracción y de torsión, y las paredes existentes la compresión. Este arreglo fue diseñado para proporcionar la resistencia correcta en el lugar adecuado (figs. 11.1 y 11.2). La banda horizontal más inferior fue colocada al nivel del primer piso, pero sin llegar hasta el cimiento o las paredes del sótano. Bandas similares fueron colocadas a nivel de los primeros y segundos pisos.¹ Las bandas verticales fueron colocadas en las principales esquinas externas. Éstas tenían forma de L y servían como entablillados. De esta manera el refuerzo fue colocado como para resistir las fuerzas de corte en la base y para evitar el colapso hacia afuera en cada extremo del edificio.

Otros entablillados verticales fueron colocados en línea con las paredes de cruce, y esta combinación de bandas verticales y horizontales actuó como un pórtico alrededor de las aberturas para ventanas y balcones. En las puertas de la entrada principal se estructuraron pórticos adicionando entablillados verticales, en forma de L a cada lado para conectarse con la banda horizontal superior. Las varillas horizontales de amarre en parejas fueron colocadas a cada lado de las paredes de cruce, cerca y debajo de cada techo. El resultado fue que las paredes exteriores del edificio estaban encerradas en un pórtico relativamente dúctil, anclado a la fábrica existente,

1. En el caso normal, el pórtico terminaría en la banda horizontal a nivel del techo.

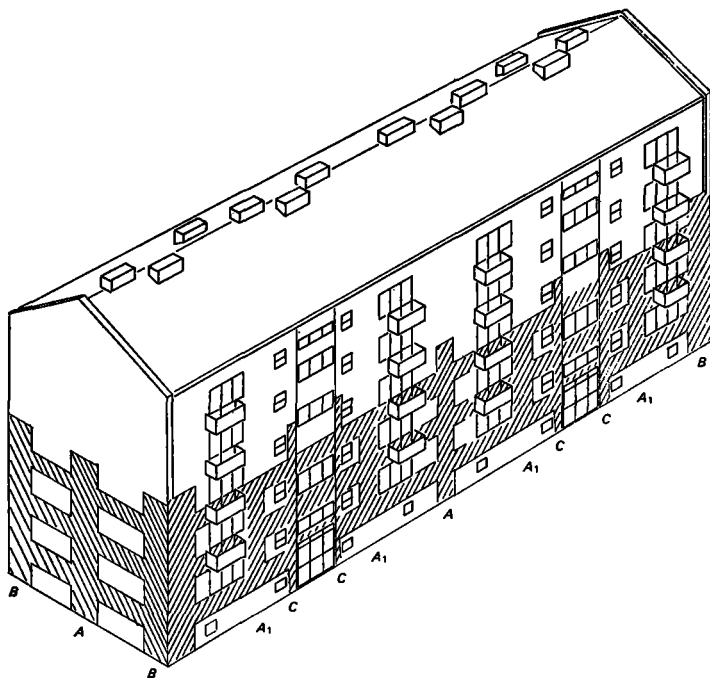


Figura 11.1. Refuerzo típico de edificios de varios pisos, no porticados, Karpoš, Skopje, Yugoslavia. Edificios tipo B2. Escala 1:333.

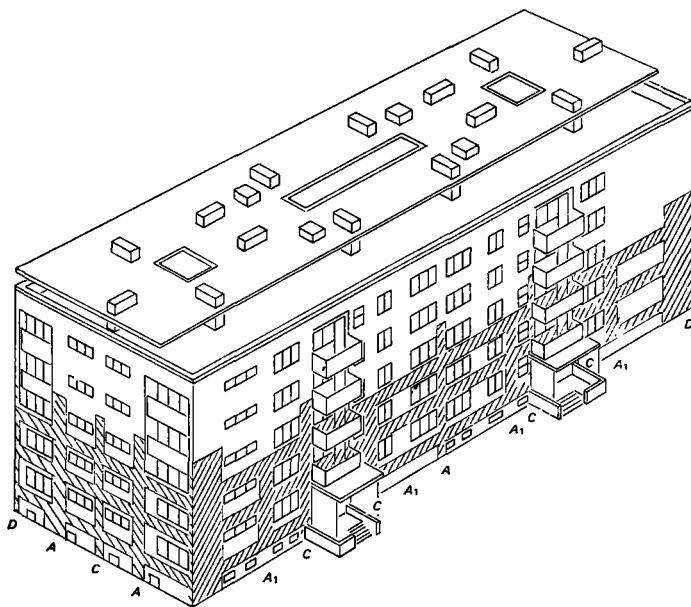


Figura 11.2. Refuerzo típico de edificios de varios pisos, no porticados, Karpoš, Skopje, Yugoslavia. Edificios tipo A. Escala 1:400.

y amarrados por las varillas transversales. Para detalles de trabajo y notas sobre los dibujos, véase el apéndice.

Las bandas verticales actúan como entablillados y las horizontales como vendas, de ahí viene el término de «vendas y entablillados» (Traka y Bandaza) que fue inmediatamente adoptado por arquitectos, constructores y habitantes, y constituyó un factor psicológico útil. La afinidad gunita/ladrillo es generalmente más fuerte que la resistencia a corte de la ladrillería, de ahí que primero se ponga en tensión la pared de ladrillo, luego la gunita, y la subsecuente fluencia plástica que esfuerza el pórtico del refuerzo anclado y prolonga el periodo de distorsión estructural antes de la falla.

11.5.5.2 Reparaciones internas

Las paredes fracturadas deben ser reconstruidas para actuar como muros de corte usando ladrillos o bloques de hormigón, reforzados con tiras de tejidos de acero a intervalos verticales de unos 50 cm. Alternativamente pueden ser engrosados con gunita levemente reforzada. Las paredes delgadas de cortina deben ser engrosadas de manera similar, prestándose particular atención a las paredes de cruce donde aparecen las varillas de amarre. Las cajas de las escaleras deben ser reforzadas con acero o pórticos de gunita reforzada y lo mismo debe hacerse con las cajas de patios de luces, posiblemente usando pórticos. En los dos edificios reforzados en el proyecto de entrenamiento de Skopje, las reparaciones internas fueron llevadas a cabo primero de tal modo que los ocupantes pudieron volver a ocupar la casa debido a la falta de viviendas, pero esto significó una división de responsabilidades en el trabajo terminado.

11.5.5.3 El proyecto de entrenamiento de Skopje, 1964

En este proyecto de entrenamiento, los contratistas locales rápidamente aprendieron nuevas técnicas de refuerzo y el trabajo se terminó dentro del tiempo y costo previstos. La apariencia arquitectónica del edificio prácticamente no fue alterada. Se entiende que ésta era la manera más rápida y menos costosa de todos los sistemas de refuerzo probados y la única mediante la cual los ocupantes del edificio no tenían que evacuarlos. Para un estudio detallado del esquema, con las variaciones correspondientes para adecuarse a estructuras compuestas con primeros pisos abiertos, y para delinear propuestas para bloques de torre plenamente porticados y viviendas particulares de poco riesgo, véanse Moran y Long (1964) y Moran (1969).

11.5.5.4 Refuerzo para una vida limitada

El sistema, tal como fuera descrito originalmente, es un mínimo específicamente diseñado para edificios sin pórticos, de varios pisos, con vida limitada; se trata de edificios que no pueden ser reforzados hasta alcanzar un nivel adecuado antisísmico, pero que sin embargo pueden serlo contra colapso. Con 175 000 personas sin vivienda, como en el caso de Skopje, cualquier esquema sencillo que permitiera

dar alojamiento a 50 000 personas era justificado como una medida provisional digamos para un periodo de veinte años.

11.5.5.5 Refuerzo para una larga vida

Los edificios seleccionados para este tratamiento deben ser construcciones de muy buena calidad y de buenas proporciones dinámicas, de tipo moderno y que probablemente queden en servicio durante los próximos 50 años. En este caso puede obtenerse un nivel más alto de protección ampliando el principio de una superficie tensada de tal modo que se logre una construcción de cajón.

El pórtico puede duplicarse aplicándolo a ambas caras de las paredes externas. Los techos pueden ser reforzados para formar diafragmas transversales horizontales —por el uso, con un mayor número de varillas de amarre o refuerzo de acero en los plafones— encajonados en gunita fundida. Las paredes internas existentes pueden ser reconstruidas o reforzadas para que actúen como paredes de corte, con pórticos livianos en las aberturas de las puertas. Las cajas de escalera y las de servicios también deben ser reforzadas y el techo asegurado.

La limitación principal es el costo; idealmente este no debe exceder la mitad del costo de la demolición y la reconstrucción. Para evaluar el costo total de la restauración, debe tenerse presente que el andamiaje, colocación de tirantes y reparaciones estructurales son una parte principal, a lo cual deben añadirse los costos del acabado y la nueva decoración. La operación de refuerzo en sí misma, si es simple y directa, es una porción menor del costo total, pero si se omite, la restauración habrá sido un despilfarro de materiales, tiempo y dinero.

11.5.5.6 Diseño empírico para un proyecto de vida limitada

Después del terremoto de Skopje, no era posible obtener información fiable acerca del evento sísmico mismo. No había tiempo para sutilezas y se tuvo que recurrir a aproximaciones. La clasificación de daños a los edificios seleccionados para ser reforzados era entre VIII y IX en la MM, y se supuso una aceleración máxima de 0.1 g; el esfuerzo de corte en la base fue calculado de acuerdo a estas premisas. Los edificios que habían sobrevivido fueron comparados detalladamente con aquellos que habían fallado y resultó que el margen de seguridad entre uno y otro parece haber sido muy pequeño, estimándose en un 10 %. El acero horizontal, a nivel del suelo fue diseñado, por lo tanto, para soportar un 10 % del corte en la base cuando fuese esforzado hasta el punto de fluencia. El acero vertical en el porticado fue seleccionado empíricamente.

11.6 Problemas claves para la acción

11.6.1 *Reforzando edificios no-porticados*

Tal como se ha dicho anteriormente se requiere urgentemente una investigación básica de este problema. Las reacciones de los edificios no-porticados pueden ser

simuladas por modelos sencillos, cuyo comportamiento corresponda de manera muy parecida al observado en los lugares afectados por los sismos. El resultado de añadir algo de refuerzo y de variar su disposición puede ser demostrado. Es deseable que se extiendan tales pruebas y constituyan un programa amplio.

Los problemas de diseño de edificios rígidos no-elásticos de este tipo, hechos de materiales frágiles, deben ser investigados. En la actualidad el ingeniero, bajo mucha tensión después de una catástrofe, y cuya responsabilidad es reforzar los edificios dañados, tiene que depender casi enteramente de su propio criterio. Frecuentemente el problema es con edificios con alta densidad de ocupación — con cientos de vidas que están en peligro en cada edificio, lo cual hace necesario que se le proporcionen algunas pautas que le puedan guiar.

11.6.2 *Problemas mundiales*

1. Parece existir el peligro de que la investigación se dirija hacia el comportamiento de edificios grandes, elásticos, con sistema de pórticos, sobre si éstos tienen o no buenas propiedades dinámicas. Quién sabe, quizá se estén realizando demasiadas investigaciones acerca de futuras grandes estructuras, dejando a un lado problemas mucho más serios del presente; es decir aquellos millones de edificios no reforzados en los cuales vive y trabaja la gente. De ser así, es necesario cambiar las prioridades. Se estima que la población mundial ha aumentado desde 1700 millones, en el año 1900, hasta 3900 millones en 1974, y que en el año 2000 llegará a los 6000 millones. Suponiendo que el 10 % de la población vive en zonas sísmicas activas y que el promedio en cada familia es de seis personas, vemos entonces que serían 65 millones el número de viviendas que estuvieron en peligro en el año 1974. Muchas de éstas son antiguas y menos del 5 % tienen protección antisísmica. Por lo tanto, nos encontramos ante un riesgo, siempre presente, de un alto índice de mortalidad y una creciente necesidad de que los edificios existentes sean seguros. En el año 2000, se requerirán 35 millones de viviendas adicionales, y quién sabe si esta cifra necesitará ser multiplicada por dos, considerando el proceso normal de reemplazar las casas más viejas.
2. Dada esta gran demanda, una manera radical de disminuir los riesgos sería concentrando toda la investigación, sin demora alguna, en el diseño de edificios pequeños y medianos, con buenas propiedades dinámicas y pórticos simples, posiblemente en base a la albañilería reforzada. Esto sería mejor realizarlo a escala nacional y que cada país considerase sus propias áreas sísmicas. Se tendría que tomar en cuenta la disponibilidad local de conocimientos y materiales y las condiciones sociales y climáticas del lugar. Debe demostrarse la importancia de techos livianos, impermeables y con buen aislamiento.
3. Es esencial familiarizar, a todos los niveles de la industria de la construcción, con las peculiaridades de la ingeniería sismo-resistente. Debe capacitarse en dinámica simple tanto a profesionales como a maestros de obra, preferiblemente utilizando sencillos modelos de mesa, de tal manera que ellos puedan entender los principios básicos de las técnicas modernas. Debe resaltarse la vital importancia de un buen trabajo y de materiales nobles. La diferencia en resistencia entre el colapso y la supervivencia de un edificio es frecuentemente muy pequeña, menos del 10 %. Además, los arquitectos y los contratistas deben conocer los principios

de diseño y su aplicación a tipos locales de estructuras, sin que sea necesario que ellos aprendan el análisis matemático detallado.

4. Los ingenieros estructurales, arquitectos y contratistas deben aprender cómo examinar un edificio que ha sufrido sacudimiento y diagnosticar los efectos de corte en la base y el mecanismo del daño resultante.
5. Las tradicionales casas pequeñas, construidas de barro, pueden tener cierta medida de protección pre-sismo utilizando malla de hierro galvanizado sobre las paredes y de alambre grueso galvanizado para amarrar los postes de las esquinas, en el techo.

Tal entrenamiento en estos principios básicos beneficiará a todos los niveles de la industria, tanto en función de los grandes programas de construcción del futuro como para la restauración de estructuras dañadas.

Reconocimientos

Además de las referencias en el texto, el autor desea agradecer al Dr. J.B.B. Owen, Profesor de Ingeniería Civil, Universidad de Liverpool, por su serie de pruebas en modelos, también a la Institution of Civil Engineers, en Londres, The Building Research Establishment, Watford, y al Sr. W.B. Long, por la información y ayuda dada.

11.7 Apéndice

Aspectos de la construcción con pórticos de «entablillados y vendas»

11.7.1 Refuerzo con acero

Existen muchas ventajas prácticas al usar, en general, una malla soldada, particularmente cuando los trabajadores no tienen mucha experiencia se sugiere una malla con varillas de (digamos) 7.5 mm, de acero de alta tensión, soldadas a cada 15 cm. Esta es una malla pesada y debe obtenerse en planchas planas (no en rollos) de 4.8 de largo y 2.4 m de ancho. Es más fácil colocar una rejilla plana con varillas normales de acero y es más adecuada para su uso con capas delgadas de gunita. Para mallas contiguas debe dejarse un traslape de unos 15 cm. El diseño es tal que todo el acero horizontal puede ser utilizado en planchas planas y sólo las planchas en ángulo, en las esquinas, tendrán que ser dobladas, para lo cual debe tenerse a mano, en la obra, un banco pesado.

Donde existe un cuerpo de trabajadores altamente capacitados, se pueden utilizar varillas de refuerzos normales y mallas livianas. El refuerzo con metal expandido no es adecuado y mejor es no usarlo. Para evitar cortes con desperdicio, los anchos, tanto del entablillado como de las vendas, deben ser fracciones de los anchos normales manufacturados. La plancha de 2.4 m puede ser utilizada en su totalidad en los entablillados principales de las esquinas, doblada longitudinalmente por el centro. También se obtendrán tiras de 1.2 m, 0.8 y 0.6 de ancho (ó 1.6 m + 0.8 m).

El entablillado horizontal inferior, a nivel del suelo, debe incluir una tira de 1.2 m y el ancho puede ser progresivamente reducido en los entablillados superiores. Los entablillados verticales pueden igualmente ser disminuidos pero el del nivel más bajo debe ser llevado a la longitud de la plancha de 4.8 m. Las tiras de gunita serán 10 cm más anchas que el acero, para dar una cobertura de 5 cm adicionales en cada lado.

11.7.2 *Entablillados y vendas*

La venda más baja será pues de 1.3 m de ancho y 5 cm de espesor. Estará colocada en forma continua alrededor de todo el local excepto donde queden interrupciones para puertas de entrada; aquí se forman estructuras porticadas con entablillados laterales angulados y utilizando una venda superior como dintel. Las vendas superiores también deben ser continuas y los recesos como los balcones se conectan con paredes de compresión para este propósito, construidas de ladrillo o gunita.

Los entablillados verticales principales en las esquinas son en forma de una L de 1.3 m por lado, con un espesor de gunita de 7.5. Los entablillados de las paredes de cruce son planos, 1.3 de ancho y los de las aperturas de puertas son de forma L o U, mientras que los de las ventanas salientes son en forma de Z y de anchos variantes.

Para los anclajes se utilizan clavos de 15 cm en las paredes, con tapones de expansión de plástico (por ejemplo Rawlplugs) colocados en huecos perforados con un taladro eléctrico. El revoque existente es retirado antes para dejar a la vista la superficie de la pared. Los perfiles livianos de madera están fijados para asegurar el espesor total de la gunita y para dar buenas líneas. Las puertas y las ventanas son protegidas con escudos de maderas duras. En la práctica, el porticado tal como está descrito dejará algunas pequeñas franjas de pared sin cobertura, y por lo tanto debería ser utilizada gunita sobre estas áreas para uniformizar. Si existen paneles de pared no reforzada entre ventanas, éstos deben ser reforzados con pedazos de malla. Todo el edificio puede ser sopleteado con algún lavado de color al terminarse.

11.8 Referencias

- LEFTER, A.; COLVILLE, B. 1975. Reinforcing existing buildings to resist earthquake forces. *U.S. Nat. Conf. Earthqu. Engng*, p. 226-234. Ann Arbor, Michigan, Earthquake Engineering Institute.
- MORAN, T. W. 1956. The use of gunita as a structural material; a survey of developments, 1930-1955. *The Structural Engineer, London*, vol. xxxiv, no. 2, 19 p.
- . 1965. *Report on a seminar on strengthening earthquake damaged buildings in San Salvador, Central America (1965)*, London, Ministry of Overseas Development. 12 pp.
- . 1969. *The strengthening of earthquake-damaged buildings*. London, SECED, Institution of Civil Engineers. 10 pp.
- ; LONG, W. B. 1964. *Report of a UN Mission to Skopje, on the strengthening of buildings damaged by the 1963 earthquake*, UNTAB, New York, 58 pp. 14 drawings.
- O'CONNOR, E. M. 1975. Correcting existing earthquake hazardous buildings, Long Beach, California. *U.S. Nat. Conf. Earthqu. Engng*, p. 216-225. Ann Arbor, Michigan, Earthquake Engineering Institute. Also, *Vth World Conf. Earthqu. Engng, Rome 1974*, p. 2976-2985.
- SEAOC. 1973. *Recommended lateral force requirements*. Structural Engineers Association of California (SEAOC), 31 pp.
- SPRACKLEN, R. W. 1973. Repair of earthquake damage at Holy Cross Hospital. *ASCE National Structural Engineering Meeting, April 1973*. San Francisco, California. (Preprint 1941), 15 pp.

- STRAND, D. R. 1973. Earthquake repairs, Kaiser Hospital, Panorama City, California. *ASCE National Structural Engineering Meeting, April 1973*. San Francisco, California (Preprint 1926), 15 pp.
- WYLLIE, L. A.; DEAN, R. 1975. Seismic failures and subsequent performance after repair. *ASCE Convention, April 1975, New Orleans, Louisiana*. (Preprint 3489), 21 pp.

Parte III

Implicaciones del riesgo sísmico

12 El proceso del ajuste humano al riesgo sísmico

Por EDGAR L. JACKSON y IAN BURTON

12.1 Introducción

Comencemos diciendo explícitamente algo acerca de nuestro tratamiento del concepto de riesgo sísmico. Queremos hacer una distinción de partida entre, por un lado, la naturaleza física de los sismos y su distribución, y, por el otro lado, la naturaleza menos clara del peligro sísmico. Esto es, probablemente, una distinción de sentido común, pero tiene importantes implicaciones, tanto teóricas como prácticas. No hay ningún peligro natural que no esté ligado al ajuste humano; la idea de peligro o riesgo implica automáticamente un componente humano o social (White, 1974). Para definir el grado de peligro sísmico de cualquier lugar dado, necesitamos tener en cuenta no sólo el sistema de eventos naturales sino también el tipo y la densidad de la población que ocupa la zona. Los daños producidos por los terremotos varían no sólo con la magnitud, localización y profundidad del evento sísmico, sino también, entre otras cosas, con el tipo de construcción y con las diversas acciones tomadas o no tomadas por las personas afectadas.

Para efectos del análisis social, el tratamiento del terremoto como un peligro más que como simple evento natural, tiene una implicación de particular importancia: se puede conocer mucho acerca de la respuesta humana a sismos por comparación con y mediante analogía a otros peligros geofísicos comparables, en particular inundaciones, de las cuales tenemos un conocimiento y una teoría más completa. De igual importancia son las implicaciones relativas a la política. Como sostienen Burton y Hewitt (1974), la política pública generalmente no ha logrado un tratamiento de los peligros como un todo. Esta insuficiencia ha dado como resultado el haber desperdiciado oportunidades para desarrollar políticas similares para eventos similares.

El riesgo sísmico, por lo tanto, puede considerarse como uno de entre toda una serie de peligros geofísicos, entre los que se incluyen las inundaciones, las sequías, y los ciclones tropicales, que el hombre encuentra en el proceso de desarrollar y utilizar los recursos de la tierra. Es útil en este momento el señalar lo que general-

mente ha sido una experiencia común en el siglo XX, la emergencia de dos tendencias aparentemente contradictorias. Por un lado, el conocimiento científico de los procesos geofísicos y los métodos tecnológicos de combatirlos han aumentado considerablemente, y mediante grandes inversiones de dinero continúan expandiéndose. Esto ha ido acompañado de una mayor habilidad para poder pronosticar mejor y para alertar a la población de eventos peligrosos inminentes. Una componente en ciertos casos ha sido la mayor capacidad de controlar o modificar los propios eventos. Por otro lado, ha habido una tendencia fluctuante hacia mayores niveles de daño y, en muchos países en desarrollo, también hacia mayores pérdidas de vidas (Ericksen, 1971; White, 1974).

¿Qué problemas reflejan estas tendencias? En cierta medida se plantea el problema de aplicar retroactivamente los nuevos desarrollos tecnológicos, las medidas estructurales sofisticadas no pueden ser aplicadas a construcciones más antiguas, de calidad inferior a la normal y peligrosas. Las tendencias también representan en parte que no se han utilizado los conocimientos científicos cada vez más perfeccionados de tal manera que disminuya y no aumente el peligro potencial. Hay una tendencia general a aplicar mal e incluso a dejar de lado la aplicación de desarrollos tecnológicos, o a depender de un solo tipo de ajuste. También hay pruebas de que la habilidad de proporcionar protección parcial contra inundaciones y poder dar alertas cerca de ellas frecuentemente ha generado un falso sentido de seguridad y ha alentado el abandono de medidas preventivas que podrían haber sido tomadas por individuos y comunidades, así como ha generado una actitud más casual y de demasiada confianza en relación al peligro (Beyer, 1974; Ericksen, 1974). Las mejoras de los códigos y métodos de construcción y, particularmente, de las posibilidades de predicción, aviso y control podrían tener efectos similares contra-intuitivos con respecto al peligro sísmico. En cierta medida, ahora estamos con respecto al riesgo sísmico, en una situación análoga a la que teníamos con respecto a las inundaciones hace algunas décadas. Es decir, estamos desarrollando rápidamente una capacidad para el pronóstico y podríamos estar casi en el umbral de un posible control parcial o de contar con mecanismos para modificar los propios eventos geofísicos. Tales adelantos en el campo de las inundaciones fueron seguidos por un dramático incremento de las pérdidas por inundación en algunos países, y por un crecimiento del peligro potencial de inundación en muchas regiones del mundo.

Nuestra intención es resumir en este trabajo lo que se sabe acerca de las dimensiones sociales de la respuesta al riesgo sísmico y manifestar lo que razonablemente pueda ser teorizado por analogía con otros peligros geofísicos, basándonos en la investigación geográfica del pasado y actual.

El convivir con terremotos y otros peligros geofísicos involucra dos componentes principales, es decir, la respuesta a eventos específicos y el proceso de ajuste o adaptación al riesgo. Cada componente puede ser subdividido en dos categorías:

- a. Respuesta a eventos específicos:
 - (i) Comportamiento durante el desastre.
 - ii) Recuperación después del desastre.
- b. Ajuste al riesgo:
 - (i) Adopción de medidas específicas (por ejemplo, un código de construcción, una política de zonificación para uso de la tierra, un plan de desastres) para reducir el peligro potencial.

- (ii) Estrategias de respuesta a largo plazo al riesgo (por ejemplo, la combinación de varios tipos de acciones, tal como las de los ejemplos de la cláusula anterior).

Aquí hemos decidido ignorar las cuestiones de la respuesta a eventos específicos, enfocando más bien nuestra atención en las categorías tercera y cuarta arriba mencionadas. Procedemos a partir de un pronunciamiento acerca del actual conocimiento de la respuesta al riesgo sísmico, a un intento para identificar aquellos factores que dan más luz acerca de las variaciones en las respuestas. Esto incluye el estado de conciencia y percepción del riesgo, la experiencia, la conciencia acerca de los ajustes, etc. Vamos a concluir con una discusión de aquellas áreas que creemos puedan producir oportunidades significativas en el futuro para mejorar el proceso de adaptación al riesgo sísmico.

12.2 Conocimiento del proceso de ajuste existente

Una característica que el riesgo sísmico comparte con otros peligros geofísicos es el creciente potencial de daños. Aunque las pérdidas locales, en términos de daño económico, pérdida de vidas y víctimas, puede fluctuar de año en año e incluso de década en década, el peligro potencial tiende a aumentar a medida que aumenta la población del mundo y ésta es más urbana, más concentrada, y más dependiente de una infraestructura sofisticada pero vulnerable. Sin embargo ésta es sólo una explicación parcial; a pesar de que no hay ventajas intrínsecas e incidentales asociadas con el fenómeno sísmico como podría haberlas para otros peligros, las zonas de alto riesgo sísmico pueden tener unas ventajas para el comercio, las comunicaciones, la ubicación estratégica y las zonas residenciales que no poseen otras zonas no-sísmicas (Mitchell, 1974). Ciertamente, éste es el caso para la costa de California y otras áreas sísmicas de la costa occidental de Norteamérica. Por coincidencia, por lo tanto, algunas de las zonas de mayor riesgo han atraído y probablemente continuarán atrayendo niveles desproporcionados de ocupación, inversión y construcción (Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, 1969, pág. 7).

Ahondando en este sentido están las presiones que a veces se hacen para ocupar tierras que no son óptimas. En la parte sur de San Francisco, nuevas áreas para vivienda se encuentran justo sobre la falla de San Andrés; en otras partes del área de la bahía de San Francisco se ha producido un denso desarrollo en tierra ganada al mar sin tener en cuenta que pueda estar sujeta a licuefacción; y por lo que respecta a la costa del sur de California, se han construido casas que están sujetas a la erosión de la costa y a deslizamientos (Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, 1969, pág. 73). Este tipo de problema no es sólo de Norteamérica. Cerca de Tokio, Japón, aproximadamente medio millón de personas viven en un área de 45 km² de tierra que está por debajo del nivel del mar, sujeta tanto a licuefacción como al peligro de tsunamis (Nakano, 1974).

Tampoco es probable que la experiencia y el impacto de eventos específicos deterioren de manera significativa el desarrollo continuo de zonas peligrosas. El deseo humano, comprensible, de reparar y reconstruir en vez de volver a levantar de nuevo en otro lugar, borrando así de la memoria la vivencia de un desastre reciente, ayuda a entender por qué, por ejemplo, el plano de las calles de San

Francisco fue poco alterado en la reconstrucción que siguió al terremoto de 1906 (Bowden, 1970). Más recientemente, parece que algunos de los aspectos del nuevo desarrollo de Managua, Nicaragua, están aumentando el riesgo en vez de aminorarlo (Kates y otros, 1973).

12.2.1 *Ajuste y peligro*

Para poder entender los actuales modelos de respuesta al peligro sísmico, es necesario primero identificar exactamente lo que se quiere decir por el concepto de ajuste en relación con la naturaleza de un peligro. Un ajuste es cualquier acción tomada, sea por un individuo o a nivel colectivo (por ejemplo el gobierno), que tiene la intención o el efecto, o ambos, de reducir el potencial de daño y, por lo tanto, los daños futuros (White, 1974).

La idea de ajuste implica un cambio de acción (o, por lo menos la posibilidad de cambiar) en respuesta a algún tipo de estímulo de tensión externa, sea éste social (por ejemplo proselitismo, opiniones de varios tipos de individuos interesados o grupos de intereses) o físicos (por ejemplo, un nuevo evento que demuestra la necesidad de un cambio y de mejoras en la política a seguir). Esto a su vez tiende a implicar que la gama de acciones en cualquier momento dado y en cualquier lugar dado raramente, o quizá nunca, se adecuará a una mezcla «óptima» de acción o estrategia —en el lenguaje sencillo, lo que puede hacerse para enfrentar el daño sísmico potencial raramente, o quizás nunca, coincide con lo que se está haciendo (White, 1961).

Así pues, nuestra principal consideración en este momento debe ser identificar dentro de lo posible la gama de ajustes alternativos al peligro sísmico, como medida de referencia con la cual poder evaluar las estrategias que prevalecen, con el doble objetivo de identificar por qué el mundo real no se adecúa al óptimo teórico y de identificar algunas vías útiles para mejorar esta situación.

También debemos señalar que los siguientes comentarios se aplican propiamente a Norteamérica, con sus valores socioculturales existentes y con la tecnología a su disposición. Es dudoso que otras partes del mundo difieran de manera significativa; sin embargo, lamentablemente, no existen datos fiables comparativos sobre los cuales basarnos para llegar a conclusiones sólidas.

Una distinción útil que también debemos hacer es la diferencia que existe entre la toma de decisiones y la respuesta a los niveles individuales y colectivos de la sociedad (Slovic y otros, 1974). Muchos ajustes al peligro sísmico requieren de recursos financieros y conocimientos tecnológicos que no están al alcance de los individuos particulares y, por lo tanto, sólo pueden ser adoptados a nivel colectivo, gubernamental. Sin embargo, el individuo particular puede tener y tiene un importante rol en el proceso de adaptación al riesgo ambiental, y es frecuente que la medida colectiva se tome en su nombre y considerando realmente su interés, así como el del comercio y la industria.

12.2.2 *Rango teórico de ajustes al peligro sísmico*

La siguiente presentación del rango teórico de ajustes al peligro sísmico hace una

distinción primaria entre las acciones al alcance del individuo particular y del gobierno. Es útil clasificar los ajustes en otros dos grupos principales: aquellos que pueden ser realizados durante y después de un evento sísmico (ajustes eventorrespuesta) y las medidas preventivas (ajustes preparatorios) que en mayor o menor grado reducen el potencial de daños para el caso de que ocurra un sismo.

Así pues, además de las acciones a gran escala después de que ocurre un evento, a menudo el individuo puede reducir significativamente el daño potencial haciendo pequeños cambios en la construcción y en el plano de su vivienda. Dado que la distribución de alimentos y otras necesidades de la vida suelen quedar muy alterados por causa de un terremoto, el individuo puede planear reducir al mínimo tales alteraciones teniendo a mano en forma bien protegida y accesible abastecimiento de comida, agua y otros, para el caso de una emergencia. Tales acciones pertenecen a la categoría de lo relativamente trivial. Más importantes son los ajustes que minimizan las pérdidas económicas del individuo, tales como la contratación del seguro sísmico y la selección de un diseño para su casa que resista mejor los temblores. Por ejemplo, se encontró durante el terremoto de San Fernando de California, en 1971 que, a pesar de que los edificios que más daños sufrieron fueron los antiguos de albañilería y otros igualmente peligrosos, entre los diseños relativamente modernos hubo diversos grados de daños. Viviendas de un piso, de madera, soportaron sacudidas fuertes, mientras que viviendas de dos pisos y con pisos a desnivel resultaron más susceptibles a la fracturación y al colapsamiento (Jennings, 1971, Steinbrugge y otros, 1971).

La acción de la comunidad después del desastre (sin hacer distinción en este momento entre los niveles locales, provinciales o nacionales) incluye operaciones de emergencia y procesos de evacuación cuando son necesarios, medidas generales pensadas para minimizar la desorganización social y económica y para restablecer el funcionamiento normal de la comunidad lo más rápidamente posible. Esto frecuentemente se logra dando ayuda financiera a los sectores privados y comerciales para la rehabilitación y restauración.

Los ajustes preparatorios de la comunidad son, no obstante, los que pueden lograr el impacto más significativo sobre el daño sísmico y el potencial de pérdidas. Tales preparaciones incluyen por lo general la investigación básica, el desarrollo y la implantación de códigos de construcción y otras medidas estructurales, el ordenamiento del territorio, el acopio de información, la planificación para afrontar el desastre, seguros, la planificación para la rehabilitación y los respectivos presupuestos. Las perspectivas para el futuro pueden incluir algún grado de predicción y control y, por lo tanto, medidas de alerta.

La lista anterior no es en absoluto exhaustiva pero servirá para comparar la amplia gama de precauciones viables con las acciones que realmente se llevan a cabo.

12.2.3 *Modelos de respuesta*

Con el paso del tiempo los peligros geofísicos han servido como un foco para la investigación geográfica; han emergido tres elementos comunes de respuesta. Primero, a pesar de que existe una amplia gama de medidas del tipo descrito, que teóricamente podrían ser adoptadas para encarar el riesgo y, por lo tanto, reducir el potencial del daño, quienes son responsables de la acción frecuentemente demues-

tran estar poco al corriente de las alternativas disponibles y tienen una gran preferencia por los procedimientos conocidos y probados. Segundo, todas las personas, sean expertos o legos, parecen emplear ciertos mecanismos inconscientes para reducir o evitar la incertidumbre inherente al futuro, particularmente por lo que afecta a sus propias vidas y responsabilidades. Tercero, el proceso de adaptación se caracteriza por un enfoque a corto plazo, orientado por la crisis, del desarrollo de nuevas estrategias y cambios de política (Slovic y otros, 1974).

Es necesario discutir hasta qué punto estos conocimientos generales sirven también para caracterizar la respuesta al peligro sísmico. La mayor parte del material de esta sección ha sido obtenido de una encuesta y de una extensa investigación bibliográfica (Jackson, 1974). En este trabajo, se entrevistó a 302 propietarios de vivienda en tres zonas urbanas de la costa occidental de Norteamérica (Los Ángeles, Vancouver/Victoria y Anchorage).

A los entrevistados se les entregaron dos series de preguntas acerca de sus reacciones en el pasado y en el presente respecto a los sismos y al riesgo sísmico. Se les preguntó, sin facilitarles ayuda de ninguna clase, qué medidas podrían y deberían ser tomadas durante y después de que ocurriera un terremoto, y qué medidas preventivas podría tomar el propietario para prepararse a futuros temblores. Luego se les preguntó si ellos mismos habían llevado a cabo algunas de las contramedidas que habían sugerido, o si estaban, en el momento de la entrevista, en proceso de adoptarlas. De esta manera, fue posible tener una idea del grado de conciencia de ajustes entre la población muestreada y, además, el grado de adopción de medidas.

La información obtenida en esta encuesta respalda el primero de los conocimientos generales deducidos en base a otros peligros geofísicos, es decir, que existía una limitada conciencia de alternativas y una gama reducida de ajustes adoptados.

En la tabla 12.1, las principales categorías de ajuste han sido clasificadas en subcategorías que reflejan una dimensión del tiempo para ser adoptadas, y en su mayor parte se explican por sí mismas. Así pues, vemos que para la mayoría de las categorías de ajuste, mucho más de la mitad de la muestra no pudo identificar ningún tipo de acción apropiada. Las excepciones fueron ajustes apropiados para los periodos de impacto inmediato y recuperación, tales como acciones evasivas y de autoprotección; esto parecería ser parte del pozo común de conocimientos, incluso entre gente que no tiene experiencia propia de terremotos. Quienes contestaron demostraron tener escasa conciencia de las medidas preventivas a largo plazo capaces de modificar el potencial de peligros y pérdidas.

El estudio de la columna de la tabla 12.1, que se refiere a la frecuencia de adopción de varias subcategorías de ajuste, ilustra el hecho de que esta gama es aún más limitada. Ya que no todos los encuestados habían tenido la experiencia de un terremoto que requiriese acción evasiva o protectora, no sorprende que tampoco hubieran tomado precauciones contra los terremotos. Sin embargo, las bajas proporciones de los que optaron por categorías de ajustes preventivos son aún más bajas que las de los que optan por similares, contra otros peligros geofísicos. Aún más, los encuestados parecían satisfechos al haber adoptado sólo uno o dos ajustes. La tabla también demuestra que la gente de la parte oeste de Norteamérica, como se representa en la muestra, tiende a primar las acciones durante el periodo de crisis más que las medidas preventivas a largo plazo. Fue más frecuente encontrar que los encuestados en este estudio sólo después de haber sufrido la experiencia de un terremoto destructivo habían tomado medidas preventivas. Hay dos maneras de

Tabla 12.1. Conciencia y adopción de ajustes por parte de los propietarios.

Categoría de ajuste	Mencionado por ¹		Adoptado por	
	Nº	%	Nº	%
A. Ajustes evento-respuesta				
El periodo inmediato de impacto	176	58.3	88	29.1
El periodo inmediato de recuperación	207	68.5	107	35.9
El periodo a largo plazo de recuperación	68	22.5	28	9.4
B. Ajustes preventivos				
Modificar el potencial de peligro y pérdida	24	7.9	15	5.0
Plan para el periodo de impacto	30	9.9	15	5.0
Plan para una recuperación inmediata	57	18.9	26	8.6
Plan para una recuperación a largo plazo ²	234	77.5	52	17.2

1. Algunos de los encuestados mencionaron más de uno en cada categoría de ajuste.

2. Las cifras de conciencia de esta categoría (seguro) están probablemente exageradas, ya que las preguntas fueron específicas, es decir quienes contestaron fueron ayudados. La cifra tan alta de adopción de seguro puede reflejar la creencia errónea de que su póliza de seguro realmente cubre ese riesgo.

tratar de describir la respuesta colectiva al peligro sísmico en Norteamérica. La primera es identificar de forma sucinta cuáles han sido los roles tradicionales jugados por los tres niveles principales de gobierno federal, estatal o provincial, y local (Joint Committee on Seismic Safety, 1974). La segunda es revisar brevemente la magnitud de adopción de medidas y algunos de los problemas principales relacionados con los diversos tipos de ajustes que se han llevado a cabo en cualquiera de estos niveles.

En el periodo comprendido entre 1950 y 1970 el gobierno federal de los Estados Unidos tuvo un papel cada vez más importante en la intervención en desastres en lo que se refiere a proporcionar fondos para ayuda y rehabilitación (Dancy y Kunreuther, 1969). Desde 1970, sin embargo, se ha intentado cambiar el énfasis de la ayuda (que ha quedado descentralizada en los diversos estados) poniéndolo en las medidas que reducen el riesgo (Norton, 1971). Ciertamente, siempre ha habido importantes presupuestos para estudiar y evaluar las posibilidades de vastas medidas para mitigar desastres, no sólo debidos a sismos sino también debidos a una amplia gama de peligros geofísicos (White y Haas, 1975). El gobierno federal también ha asumido parte de la responsabilidad de difundir información al público. Al mismo tiempo, puede tener un importante papel interactivo con otros niveles de gobierno, por ejemplo, proporcionando fondos igualmente cuantiosos para el desarrollo de planes estatales contra desastres, ayudando a las comunidades en la evaluación del riesgo sísmico, y desarrollando y fijando normas de construcción (Steinhart, 1969).

Como podía esperarse, los gobiernos estatales han tendido a asumir un rol de mediación entre los niveles federales y locales. También pueden promulgar una legislación obligatoria a nivel local, y proporcionar asistencia financiera y de planificación a las autoridades locales (Oakeshott, 1969; Oficina Ejecutiva del Presidente de los Estados Unidos, 1972). Es probable que la participación estatal en la reducción del peligro sísmico aumente, siguiendo el ejemplo del Comité Conjunto sobre Seguridad Sísmica de California (1974). Este cuerpo, auspiciado por el gobierno, ha desarrollado

una nueva legislación y ha hecho sugerencias de mejoras significativas relativas a la intervención del estado y a la política sobre ordenamiento del territorio, construcción de edificios, preparación para emergencias, seguros e investigación (Comité a. cit.).

En términos de planes contra los desastres y operaciones de emergencia, la principal responsabilidad para enfrentar los problemas sísmicos es de los gobiernos locales, que también tienen la responsabilidad final de adoptar y obligar a que se acaten medidas tales como códigos de construcción y zonificación para uso de la tierra. Desgraciadamente, puede resultar extremadamente difícil para un gobierno municipal o de distrito mantener una visión a largo plazo de la amenaza que supone el riesgo sísmico, especialmente en el contexto de demandas competitivas y de prioridades de naturaleza más inmediata. Aún más, las autoridades locales frecuentemente abordan problemas que incluyen las presiones del desarrollo y una plantilla de personal inadecuado para la inspección de edificios y nuevas construcciones, o para asegurarse de que se están acatando las reglamentaciones pertinentes. Como resultado, el problema sísmico probablemente será atendido, si es que lo es, de manera más o menos casual (Scott 1968).

Un estudio de la bibliografía sobre política gubernamental sugiere que ésta está dirigida hacia dos metas principales: reducir el riesgo a través de lo que serían medidas estructurales y disminuir el desastre mediante planes contra la catástrofe y operaciones de ayuda y rehabilitación. Cada uno de estos tipos de acción tiene un impacto sobre el problema pero, al mismo tiempo, puede argumentarse razonablemente que todos pueden, a la larga, contribuir a un aumento del potencial del riesgo y de las pérdidas.

Esencialmente, el efecto de medidas estructurales que reducen la vulnerabilidad del edificio al sacudimiento del terreno durante un sismo, puede ser el de elevar el umbral de los daños en relación con una escala de magnitud. El riesgo de ocupar un lugar dado es por lo tanto reducido, y el espacio habitable aumenta —pero con limitaciones. En otras palabras, tales desarrollos tecnológicos dan la oportunidad de resistir o sobreponerse a ciertos aspectos desfavorables del medio ambiente físico, pero sólo mientras no ocurran eventos que excedan aquellas condiciones para las cuales el edificio ha sido diseñado. En resumen, pues, las medidas estructurales pueden aumentar el potencial de pérdida alentando la ocupación en vez de que se eviten las zonas peligrosas. Pueden alentar una creencia infundada acerca de una protección total y hacer disminuir el grado de adopción de las medidas necesarias. En última instancia, no son los factores estructurales *per se* los que fallan; más bien el problema estriba en la ausencia de otras medidas necesarias.

Otra crítica que puede hacerse justificadamente es la dificultad de obligar al cumplimiento de los códigos de construcción —de los cuales dependen las medidas estructurales— sea a través de presiones económicas o debido a carencia de fondos para una inspección adecuada. Finalmente, dado que los códigos de construcción son rara vez retroactivos, poco puede hacerse para afrontar los problemas de los muchos edificios viejos que puedan ser extremadamente susceptibles a daños, de los cuales sus habitantes pueden tener un desconocimiento total.

Sería tonto argumentar que se abandonen los planes estatales y locales contra desastres y emergencias; tales medidas son en verdad necesarias. Sin embargo, su existencia —sin tener en cuenta si son o no adecuados— también puede, al igual que las medidas estructurales, dar lugar a un falso sentido de seguridad; «el gobierno se está preocupando del asunto». El conocimiento de que habrá ayuda sin

mayor esfuerzo tiende a hacer aumentar la despreocupación para que se adopten las mínimas precauciones.

Aunque con frecuencia es políticamente conveniente, el ajuste que hoy en día predomina —la existencia financiera para la rehabilitación y la reconstrucción— es probablemente el que tiene el efecto más negativo sobre la reducción del riesgo. Representa un cambio de énfasis, que se pone en el enfrentamiento con las pérdidas *después* del desastre. También representa, a diferencia de lo que ocurre con el seguro contra desastres, una negación de responsabilidad por parte de quienes se encuentran en riesgo, y en su lugar se desplaza el peso a que las pérdidas repercutan sobre toda la sociedad. El conocimiento de que se darán préstamos baratos y también subsidios después de un desastre es una buena manera de desinteresar al dueño de la casa o al comerciante para que éste tome medidas preventivas por sí mismo. Finalmente, la política de restauración lo más cercana posible a las condiciones de pre-desastre, sencillamente anima a que se continúen ocupando las áreas peligrosas.

Existen dos alternativas principales a los ajustes anteriores, pero ambas tienden a ser menos difundidas en cuanto a su adopción. Éstas son: la zonificación para el uso de tierra y el seguro. No puede haber ninguna duda de que, incluso con los más sofisticados adelantos en la tecnología de la construcción, el programa más efectivo para la reducción del peligro sería evitar que se construyera en zonas de elevado riesgo sísmico. (Oficina Ejecutiva del Presidente de los Estados Unidos, 1972, Vol. 1, pág. 73). Ciertamente, existen barreras contra la zonificación sísmica a escala local. Sin embargo, algunas de las clasificaciones generales que establecen categorías de zonificación como las que describe Steinbrugge (1968) podrían ser tenidas en cuenta junto con modificaciones de otras medidas tales como códigos de construcción, refinamientos estructurales y niveles de tarifas de seguros. Por ejemplo, las zonas de bajo riesgo tendrían requerimientos del código de construcción menos rigurosos —y las pólizas de seguro serían más baratas— y en cambio podría desalentarse o evitarse del todo la construcción en lugares de alto riesgo, exigiendo el cumplimiento estricto de todos los requerimientos del código y estableciendo tarifas de seguro muy altas (y obligatorias). La zonificación para el uso de tierra podría así ser la base para el desarrollo de una estrategia mucho más amplia y realista de reducción del riesgo y mitigación del desastre. Las objeciones principales para que esto se adopte incluyen la concentración de población que ya existe en zonas sub-óptimas y las presiones del desarrollo.

Existe seguro sísmico en Norteamérica, aunque su contratación parece ser poco frecuente. Entre los factores que contribuyen a este estado de cosas hay una reticencia por parte de la mayoría de las compañías de seguros a venderlo o a hacer de él una buena propaganda. También hay dificultades para estimar los niveles de riesgo sobre los cuales poder basarse para fijar tarifas realistas, y se tendrían que establecer grandes reservas, que podrían estar sujetas a una política tributaria sobre ganancias excesivas para afrontar las demandas de cualquier eventual desastre de gran escala (Vaughan, 1971).

Las acciones futuras hacia el desarrollo de medidas de predicción y control no necesariamente han de aliviar la situación actual. Ellas contienen los mismos tipos de peligro que se han señalado para las medidas estructurales, es decir, la generación de un falso sentido de seguridad y, aún peor, el posible abandono de alternativas. En lo que tendríamos que hacer más hincapié es en que, a no ser que tales esfuerzos sean cien por cien efectivos, entonces el abandono de tales alternativas

sólo puede dar como resultado que el potencial de pérdidas sea significativamente mayor en el futuro.

En resumen, las actuales políticas de dar respuesta al riesgo sísmico dependen en gran medida, ya sea de la tecnología existente y del desarrollo de mejoras a través de la investigación científica, o de acciones post-desastres, que pueden contribuir poco a reducir el número de víctimas, heridos y pérdidas económicas. Tales políticas pueden tender a aumentar la vulnerabilidad al potencial de riesgo y desastre, y asignar recursos de tal manera que los problemas puedan ser exacerbados en vez de reducidos. Este esquema no es el resultado del azar, ni es simplemente un reflejo de la irracionalidad humana. En verdad, todos los actores en tal sistema de respuestas podrían estar actuando en maneras bien pensadas, perfectamente sensatas y adecuadas. Tomadas en conjunto, sin embargo, el efecto neto de sus diversas acciones u omisiones podría ser el crear un potencial mayor de daños y preparar el proscenio para ese evento que todos están tratando de evitar —un desastre sísmico mayúsculo.

12.3 Nivel actual de comprensión de la respuesta al riesgo sísmico

En términos «objetivos», el comportamiento humano no siempre es racional o razonable, y por lo tanto no es fácil de explicar; por lo menos, es difícil sugerir explicaciones enteramente racionales para el tipo de comportamiento descrito en las páginas anteriores. Ya que la sociedad en general, a diferencia de un miembro o grupo de miembros individuales, está sujeta a pérdidas potenciales, a largo plazo, por acción de sismos, sería quizá «razonable» tener la esperanza de que exista un desarrollo general y una implantación de medidas muy avanzadas para afrontar la amenaza que a largo plazo puede muy bien convertirse en una realidad. Sin embargo, parece ser que este tipo de respuesta no se da —y más bien, como hemos tratado de demostrar, el proceso de adaptación se da más porque ocurre una crisis que por la consideración racional de las circunstancias ambientales.

Aquí no pretendemos necesariamente ofrecer explicaciones completas de los modelos de respuesta identificados; el conocimiento del comportamiento humano no ha producido una teoría que pueda darnos un grado significativo de poder predictivo. Sin embargo, de los estudios de respuesta a sismos y riesgos geofísicos análogos, podemos por lo menos tratar de identificar las condiciones bajo las cuales el proceso de ajuste y adaptación avanza para lograr un balance más armonioso, y también aquellas condiciones que impidan el proceso.

Al igual que el proceso del peligro ambiental, las raíces de la respuesta humana no se encuentran únicamente en el dominio humano ni únicamente en lo físico. En gran medida, los tipos de respuesta que las personas tienen hacia las presiones ambientales dependen de los procesos subyacentes cognoscitivos de percepción, experiencia e interpretación, frecuentemente modificados por la situación y las características de la personalidad. Sin embargo, el ambiente o un elemento del ambiente genera oportunidades en favor y barreras en contra, de ciertos tipos de comportamiento, y sus variantes características moldean significativamente el proceso cognoscitivo. El propio ambiente es luego modificado por las clases de acción que se escogen o se dejan de lado. El ambiente por un lado, y las percepciones,

actitudes y respuestas por el otro, no son por lo tanto dicotómicos; más bien, todos ellos son parte de un proceso complejo de realimentación.

Antes de continuar conviene aclarar otro punto. La mayor parte de la investigación sobre el peligro natural ha estado basada en encuestas diseñadas para determinar la percepción y la respuesta a la presión ambiental y ha tenido la tendencia de dejar de lado estudios comparables de ajuste colectivo (por ejemplo a nivel de gobierno). Podría, sin embargo, suponerse que el proceso de ajuste a diferentes niveles muestra más similitudes que diferencias; la evidencia limitada existente demuestra que es este el caso (Slovic y otros, 1974). La anterior revisión del conocimiento actual del ajuste ha identificado características de respuesta similares en términos generales en los sectores público y privado.

12.3.1 Variables «cognoscitivas»

La investigación sobre respuesta a sismos y otros peligros ha identificado muchas variables relacionadas con modelos de respuesta (Burton y otros, 1968). Algunas de éstas son más importantes para comprender los ajustes por individuos, mientras que otras tienen un valor más general. Algunas son relativamente inmutables; por ejemplo, características de personalidad, status socioeconómico, y familiaridad con el peligro. Otras podrían ser más susceptibles a la modificación; éstas incluyen grado de conciencia con respecto al peligro, métodos para tratar la incertidumbre, y conocimiento de ajustes alternos.

El quid del problema está en comprender las diversas maneras mediante las cuales las personas tratan el factor de la incertidumbre. Dos aspectos merecen una consideración especial: cómo se forman las interpretaciones y cómo, una vez formadas, éstas modifican el comportamiento aparente. Mientras que para la sociedad en su totalidad, la respuesta al riesgo está crudamente relacionada a las probabilidades objetivamente conmensurables, se ha encontrado que ni los legos ni los expertos utilizan comúnmente los principios de la probabilidad para estimar el riesgo y tomar decisiones. Es útil considerar al hombre no como «optimizante» (hombre económico) sino más bien como «satisfaciente» (limitadamente racional), dependiente en sus elecciones de un acceso limitado a la información, con una predisposición resultante de colocar restricciones cognoscitivas, en la interpretación (Kates, 1962). Entre las maneras más comunes mediante las cuales las personas parecen distorsionar la realidad y expresar ideas acerca de la incertidumbre (en este caso, por ejemplo, la frecuencia y/o magnitud de futuros sismos) se incluyen las siguientes: la «falacia del apostador»: creencia de que el que ocurra un evento en un año reduce la probabilidad de que ocurra en los años siguientes; las nociones erróneas de que la serie de eventos es cíclica; el fijar límites estrechos de confianza (una estimación demasiado baja de la magnitud probable); la evaluación de la intensidad futura solamente sobre la base de la experiencia pasada (la hipótesis de la «disponibilidad»); y la negación plena de que los sismos ocurrirán nuevamente en el mismo sitio (Slovic y otros, 1974). Un análisis de la percepción del peligro sísmico entre los residentes de zonas de riesgo da lugar a todas estas respuestas en mayor o menor grado. Esencialmente, lo que quieren decir es que las personas generalmente tienden a elevar la probabilidad de eventos con resultados deseables mientras que disminuyen la probabilidad de eventos no deseables.

Sin embargo, la relación entre las interpretaciones dadas explícitamente de las

series de eventos y el comportamiento no está clara (tal como ha sido demostrado por encuestas generalizadas), con respecto a sismos ni tampoco con respecto a otros peligros ambientales. Esto puede muy bien ser el resultado de la dificultad de obtener «verdaderas» estimaciones del riesgo. Como lo ha señalado Wolfenstein (1957), un individuo puede aceptar la posibilidad de daños, sostenido a un nivel intelectual, mientras que lo niega al nivel emocional; «la creencia de que podría existir peligro puede ser puramente verbal, y puede coexistir con una incredulidad a un nivel más profundo». También es posible que no tenga por qué haber una necesidad de que las personas mantengan una coherencia cognoscitiva entre sus creencias y su comportamiento con respecto a lo que la mayoría ve como un problema remoto, y podría haber otros factores, hasta ahora no identificados, que modifiquen la relación entre comportamiento y actitudes frente al riesgo.

No es fácil especificar el impacto exacto del estado de conciencia y experiencia de sismos, sea para definir estas interpretaciones o modular la selección de la acción a tomarse. La mayoría de los ocupantes de zonas de riesgo sísmico están familiarizados por lo menos en cierto grado con la naturaleza de una actividad sísmica anterior, ya sea por lo que han oído decir, o por los medios informativos. Ser conscientes, por lo tanto, parecería ser un estímulo necesario pero no suficiente para la entrada en acción. Mucho más efectiva es la experiencia personal real, particularmente la de una naturaleza vívida, tal como el haber sufrido un pérdida; esto, por supuesto, es parcialmente lo que se quiere decir por respuesta frente a una crisis. Aún así, en algunos casos, la experiencia personal puede actuar como un impedimento contra la acción en vez de como un estímulo. Por ejemplo, a nivel de un propietario individual de una casa, un cierto nivel de daño será suficiente para motivar que adopte algunos ajustes tales como la adquisición del seguro sísmico, mientras que otros, cuya experiencia es similar, pueden llegar a la conclusión de que las probabilidades de que ocurra otro evento son demasiado bajas como para que se justifique llevar a cabo otra acción (Jackson, 1974).

Esta divergencia es reflejada a nivel de la comunidad: la posibilidad de que se repitiera un sismo después de 1906 fue totalmente descartada en San Francisco (Thomas y Witts, 1971); la ciudad de Long Beach (California), en cambio, que sufrió daños grandes y generalizados durante el terremoto de 1933 ha instituido medidas de microzonificación muy completas y también de carácter estructural para intentar reducir la vulnerabilidad (Wiggins, 1971). De manera similar, las variaciones en la experiencia nacional con respecto a los peligros pueden ayudar a explicar la naturaleza de los ajustes que han sido seleccionados y la frecuencia con la cual son adoptados. Visvader y Burton (1974), por ejemplo, han notado que el nivel de respuesta a los sismos en Estados Unidos ha excedido en mucho al de la vecina Canadá, en parte debido a que no han ocurrido grandes desastres en este último país.

A nivel individual, la interpretación de la experiencia parece depender, por lo menos parcialmente, de características de personalidad. Una respuesta de mala adaptación durante el periodo de crisis, del tipo que describe Levine (1971), puede ir seguida de una incapacidad para adaptarse adecuadamente en un plazo más largo. El comportamiento adaptable, en cambio, resulta de un sentido de control interno más que externo, asociado con la acción protectora. Una respuesta efectiva durante el periodo de crisis puede resaltar la habilidad para encarar el miedo, reducir la tendencia a la negación y alentar una acción sostenida.

Otros factores importantes en la respuesta individual, tanto desde el punto de vista psicológico como del comportamiento, incluyen el nivel de ingresos, la educación y los procesos cognoscitivos mediante los cuales el riesgo es evaluado, no aisladamente sino en relación con otros problemas que compiten por el tiempo y los recursos, y en relación con las ventajas percibidas de la ocupación de la zona de peligro (Jackson, 1974).

De modo limitado, algunas de estas variables también subyacen en la respuesta de la comunidad. Esto es especialmente cierto en el sentido en que los individuos responsables de tomar decisiones por la comunidad están sujetos a algunas de las mismas presiones que sufren en su vida privada. Además, el rango y tipo de problemas que enfrenta la comunidad actúa como una restricción sobre los recursos y el talento que específicamente puedan ser dedicados a los problemas asociados con los sismos.

12.3.2 *Estado de conciencia respecto a medidas alternativas*

En los individuos la conciencia acerca de medidas alternativas preventivas es limitada, como ya lo hemos demostrado. Es posible que parte de esta conciencia se derive de lo que se oye y de los medios de comunicación. Más importante, sin embargo, es el impacto de la experiencia personal que puede conducir a una búsqueda obligada de acción adecuada. Sin embargo, no es deseable que se confíe en el impacto de la experiencia como un mecanismo para generar conciencia del peligro; mejor dicho, la conciencia se puede estimular, como en parte se hace ahora, proporcionando información al público acerca de las alternativas.

La información, en términos de artículos científicos, legislación y literatura dirigida, juega un rol al definir los alcances de los ajustes examinados por las agencias gubernamentales. La tradición y el precedente, sin embargo, quizás son más importantes.

12.3.3 *Interacciones*

Las decisiones tomadas en respuesta a los sismos u otro tipo de peligro, a cualquier nivel de gobierno, actúa como restricciones importantes a los tipos de acción tomada por otros niveles de gobierno y por individuos (Jackson, 1975). Este efecto de «interacción» es a veces a propósito, por ejemplo cuando un gobierno estatal da una ley que alienta u obliga a la adopción de medidas de zonificación para uso de la tierra a nivel local. También puede ser inadvertido, como por ejemplo cuando los planes contra desastres locales desalientan al propietario para que tome sus propias precauciones.

El efecto de una decisión no está necesariamente limitado al problema específico para el cual fue tomada. Esto se debe a que modifica el modo cómo otros (individuos y gobierno) ven el riesgo, evalúan el nivel requerido para mayor protección, definen su propia responsabilidad y escogen, o dejan de lado, ajustes al peligro. Así pues, las innovaciones de política pueden servir para ampliar el rango de opciones disponibles a otros niveles de gobierno, como es el caso del control estatal de la zonificación local para uso de la tierra. Por contraste, los efectos no son

siempre los deseados, ya que las innovaciones pueden servir para restringir el rango de opciones. Por ejemplo, se ha observado que los gobiernos locales podrían estar obligados a comportarse de manera distinta si ellos mismos tuviesen que sufragar la totalidad de los costos de desastre en vez de pensar en recibir ayuda externa (Kunreuther, 1973).

La principal implicación de estas observaciones es que tales efectos interactivos, quizás indeseables y quizás hasta ahora no reconocidos, deberían tomarse en cuenta cuando se están considerando innovaciones en la política. El no reconocer que nuevas políticas tales como subsidios, legislación y el desarrollo de una capacidad para pronosticar y alertar puedan reducir en vez de ampliar la gama de opciones para una sociedad en su totalidad, y puede conducir a disminuir en vez de aumentar la efectividad de la respuesta al peligro sísmico.

12.3.4 *Características del riesgo sísmico*

Hemos argumentado en líneas anteriores que la respuesta al riesgo sísmico tiene varias características en común con la respuesta de las personas frente a otros peligros ambientales (Hewitt y Burton, 1971). Sin embargo hay algunas características del riesgo sísmico que, aunque no son exclusivas de él, sirven para restringir aún más los tipos de respuesta que puedan darse. Primero, los terremotos son fenómenos relativamente raros aún en áreas que, a largo plazo y a escala regional, pueden ser consideradas como de alto riesgo sísmico. Segundo, representan algo más que una fluctuación extrema de condiciones ambientales normales, como por ejemplo, en el caso de una sequía. Estos dos factores combinados tienen implicaciones importantes en la respuesta humana, ya que significan que pocas personas esperan experimentar realmente un sismo destructivo; ni tampoco tienen una vivencia personal que parece actuar como aliento significativo a la acción. Más aún, no existen ajustes generales «comunes» en operación, tales como los que se toman, por ejemplo, para combatir el peligro de la nieve en las áreas metropolitanas vulnerables a nevadas.

Aún cuando un terremoto conmociona, el daño ocurre aparentemente de manera aleatoria. Mientras que pocos residentes urbanos escapan a los efectos de una gran nevada, y la mayoría, si no todos, de los agricultores en un área de sequía sufren algunas pérdidas, puede haber variaciones locales significativas en la intensidad de los daños sísmicos. Podemos entonces por lo menos entender, aunque no necesariamente estar de acuerdo con él, al residente de una área sísmica que ignora su propia vulnerabilidad.

El último factor importante es el periodo tan corto de inicio, que impide la adopción secuencial de medidas preventivas. En este caso los terremotos tienen más semejanza con las inundaciones que, pongamos por caso, con la erosión costera o la sequía, que son procesos continuos o de desarrollo lento y que dan lugar a una combinación de medidas de previsión y de emergencia. En la ausencia de previsión adecuada, la única alternativa en el caso de terremotos es una respuesta a la crisis.

12.3.5 *Discusión*

Hemos visto, pues, que la respuesta al peligro sísmico es un fenómeno relacionado con una compleja serie de factores físicos, psicológicos, sociales, políticos y económicos. Dadas las varias barreras individuales a la adopción de ajustes, no es sorpren-

dente que la respuesta sea limitada y esté orientada a la crisis. Tratemos ahora de juntar los hilos refiriéndonos a un ejemplo específico; se ha prestado mucha atención en la literatura, al seguro sísmico, y concretamente al debate de por qué parece haber una reticencia general entre el público a su adquisición. Han sido frecuentemente ofrecidas explicaciones simplistas pero debe quedar claro, de lo anterior, que ningún factor aislado nos da una explicación suficiente.

A no ser que fuese obligatoria, la compra del seguro requiere hacer el esfuerzo de estimar el riesgo de la vulnerabilidad personal. Como hemos visto, pocas personas pueden hacer esto y muchos aún niegan su propia vulnerabilidad, no sin razón, en vista de lo remoto del peligro. Sin una experiencia personal de terremotos, para la mayoría la amenaza y la realidad de pérdidas les resultan difíciles o hasta imposibles de visualizar. No sería correcto decir que la mayoría de las personas no tienen conciencia de la existencia del seguro sísmico, pero hay una sobrestimación general de su costo que naturalmente sirve para desalentar su compra. Finalmente, la compra del seguro sísmico implica el supuesto de responsabilidad por parte del propietario u hombre de negocios, mientras que en realidad hay una creencia general de que éste es un problema con el cual debe habérselas el gobierno; la disponibilidad de fondos gubernamentales y de préstamos para rehabilitación después de un desastre de este tipo actúa como un antiincentivo final (Jackson, 1975).

Como ya se ha discutido, el comportamiento humano no es siempre racional ni fácil de explicar; no es un proceso skinneriano de estímulo-respuesta. Por el contrario, podría objetivamente ser considerado «irracional». Hay evidencias, por ejemplo, para sugerir que algunas personas, habiendo tenido pérdidas severas, adoptan ciertos tipos de ajuste incluso estando convencidas de que nunca más serán afectadas. Lo hacen, parece, simplemente por la satisfacción psicológica de «estar protegidos».

12.4 Oportunidades para mejorar la respuesta al riesgo sísmico

En base al análisis anterior de los factores relacionados con el proceso de ajuste humano al riesgo sísmico, ¿qué oportunidades hay para mejorar la respuesta? Ciertamente, se requiere acción a todos los niveles de la sociedad, desde organizaciones internacionales hasta personas que viven bajo la amenaza diaria de daños sísmicos.

Admitiendo que puede hacerse mucho en los campos de la ingeniería, la geología y la planificación, en términos de mejorar el diseño estructural, de control de la actividad sísmica y de desarrollar las herramientas necesarias para la zonificación del uso de la tierra, aquí preferimos concentrarnos en dos temas que podemos comentar mejor desde el punto de vista del científico social.

Entre los factores que están relacionados con la respuesta, como se ha dicho previamente, hay varios que conducen a modificación mediante cambios de política. Éstos son: conciencia del riesgo e interpretación de la incertidumbre inherente; conciencia de medios alternativos de ajuste. Esto puede lograrse parcialmente proporcionando información y alertas.

12.4.1 Información

Dado el número y la variedad de los folletos informativos y otra literatura que describen varios aspectos del riesgo sísmico y que están al alcance del público en

general, por lo menos en Norteamérica, no parece ilógico suponer que los editores de tal información creen que en ella hay todo lo necesario para mejorar la respuesta individual al peligro sísmico. Sin embargo, el cuestionario ya comentado, respondido por habitantes de una zona de peligro, mostró claramente que las personas carecían de conciencia acerca de medidas preventivas. ¿Cuán profusamente se difunden las publicaciones? ¿Hay limitaciones intrínsecas en la información disponible actualmente? Éstas son preguntas difíciles de responder, principalmente porque en general no se sabe lo suficiente acerca del papel que las variaciones en el tipo de información (por ejemplo detalles, aspectos incluidos o excluidos, nivel de sofisticación del material), juegan para ayudar a las personas a afrontar la incertidumbre y, por lo tanto, a seleccionar la acción apropiada. Lo que puede decirse con cierto grado de confianza es que cualquier programa de información estará sujeto a los mismos tipos de prejuicios cognoscitivos descritos anteriormente. Una revisión de los programas de información disponibles en Norteamérica nos muestra una considerable variación en la calidad y la cantidad de la información. Mientras que unas pocas publicaciones se refieren únicamente a la naturaleza y a la distribución del riesgo sísmico, la mayoría dedican por lo menos algún espacio a la acción adecuada que puede ser realizada por los propietarios. El énfasis, sin embargo, tiende a darse a la respuesta en el periodo de crisis más que en las medidas preventivas.

En términos de mejorar la información en el futuro, la investigación psicológica indica que la información acerca de amenazas debe contener por lo menos dos componentes. Un intento de proporcionar con la mayor precisión posible una evaluación del riesgo, expresada en términos accesibles al ciudadano medio; y un esquema de la gama de acciones que pueden ser tomadas para disminuir el daño (Janis, 1962). Cualquier folleto informativo debe además responder aquellas preguntas que los residentes de zonas sísmicas han indicado que quisieran que fuesen respondidas en una encuesta realizada (tabla 12.2).

Tabla 12.2. Preguntas que deben ser respondidas en programas de información.

Pregunta	Mencionada por %
¿Qué hacer cuando ocurre un sismo?	32.8
¿Se dispone de ayuda del gobierno?	20.2
¿Qué hacer para prepararse?	13.2
Causas de los terremotos	8.3
¿Posibilidad de prevenir o predecir?	5.6
Probabilidad de que ocurra en el futuro (L) ¹	5.3
Información acerca de reglamentos de construcción (L)	5.0
Situación de fallas y terrenos peligrosos (L)	4.6
Daño que puede esperarse (L)	2.6
¿Cómo puede ayudar un individuo? (L)	2.3
¿Qué hacer para recuperarse de un terremoto?	1.7
Disponibilidad y coste del seguro (L)	1.3

Fuente: Jackson, 1974

1. (L) Preguntas que pueden variar sobre bases locales o regionales.

La publicación que se acerca más a satisfacer estos requerimientos es «Safety and Survival in an Earthquake» (publicada en 1969 por la Oficina de Preparación para

Emergencias). De manera clara y sencilla y sin dramatismo, esta publicación describe la situación de las zonas de riesgo sísmico de los Estados Unidos, dando a conocer los peligros potenciales. La información acerca de cómo el propietario puede enfrentarse al problema está dividida en tres partes: antes, durante y después del sismo. Antes del sismo, se alienta al propietario, como ciudadano, a que respalde activamente la adopción de reglamentos locales de construcción, planes contra desastres e investigación; se le incita a que revise su propia casa para identificar posibles peligros, e intente asegurarse de que cualquier nueva construcción se ajusta a los reglamentos de construcción y esté alejada de peligros geológicos; como padre de familia él debería de llevar a cabo simulacros de terremotos con la familia, mantener a mano aditamentos tales como una linterna y prepararse para actuar previendo lo que tendría que hacer en caso de que ocurriese un sismo. Luego se dedica espacio a una detallada consideración de acciones durante y después de un sismo.

Esta publicación bien podría servir como modelo para otros programas informativos. El contenido variaría en los detalles locales o regionales según las variaciones de condiciones locales (véanse las preguntas marcadas (L) en la tabla 12.2). Además, cualquier información, si ha de tener éxito, debe ser probada antes de una distribución masiva, para evaluar la aceptación del público y su impacto potencial.

12.4.2 *Predicción y alertas*

Si la información va dirigida parcialmente a la reducción de la incertidumbre, entonces un esfuerzo más útil sería poder dar alertas precisas acerca de cuándo, dónde y la magnitud de posibles sismos. Aunque se puede sacar algún provecho examinando la respuesta frente a alertas contra otros eventos geofísicos, tales como inundaciones y tsunamis, todavía hay pocos datos sobre los cuales basar pronósticos precisos acerca de cómo responderán las personas a alertas sísmicas.

Realmente, quizás la pregunta más urgente acerca de una política pública sísmica es cuál será la probable respuesta a alertas, y cuál es la mejor manera posible de incorporar esta respuesta a las políticas actual y futura. ¿Será un problema el pánico? ¿Habrá más personas heridas y otros daños en una evacuación apresurada, desorganizada, del área afectada de las que habría si se quedasen ahí durante el terremoto? ¿La industria y el comercio paralizarán la construcción y las inversiones? ¿Cuál será el impacto económico? ¿Qué tipo de estrategias deberían seguir los gobiernos locales? ¿Sufrirá la economía local? ¿Cuáles serán las consecuencias de una alerta que resulte ser falsa y quién acepta la responsabilidad si las cosas van mal? A la luz de estas preguntas urgentes aún no contestadas, hay otras consideraciones morales más profundas acerca del problema de una alerta sísmica. Si no se da la alerta, por ejemplo, debido a una serie de incertidumbres, ¿se debería señalar a alguien como responsable por las muertes, víctimas y pérdidas económicas que hubieran podido evitarse?

Preguntas como éstas no tienen soluciones sencillas, económicas ni tecnológicas. Ilustran sin embargo, la urgencia de la necesidad de abordar las consecuencias sociales y económicas de la predicción sísmica. Cuanto más nos acerquemos a desarrollar la habilidad para pronosticar un sismo con precisión, tanto más urgente será esta necesidad.

¿Qué sabemos pues y qué podemos teorizar razonablemente acerca de una respuesta probable a alertas sísmicas? Una situación paradójica parece darse entre las personas tomadas individualmente: mientras que la *oportunidad* de tomar medidas preventivas aumenta aproximadamente en proporción al plazo del periodo de alerta, la *propensión* a hacerlo disminuye aproximadamente en la misma proporción. Los residentes de áreas sísmicas, cuando fueron preguntados acerca de su posible reacción a alertas sísmicas, contestaron que responderían más favorablemente a alertas a corto plazo con una actuación para evitar el problema. Confiarían en que sería el gobierno el que actuaría para alertas a más largo plazo que un día, sin duda alguna, para las que superarían un mes (Jackson, 1974).

Estos resultados son hipotéticos, pues están basados en lo que dice la gente que haría en vez de basarse en observar su anterior comportamiento. Sin embargo, tales resultados concuerdan con las anteriores conclusiones sobre la respuesta a la crisis. También sugieren ciertas implicaciones, tales como si no hay subsidios u otros incentivos públicos para la acción privada, el gobierno debe estar preparado a aceptar la mayor parte de la responsabilidad para afrontar la situación; y que las alertas a largo plazo deben ser repetidas con frecuencia creciente hasta cuando se espera que ocurra el evento.

Se sabe todavía menos, en realidad, acerca de la respuesta de la comunidad a las alertas sísmicas. Sin embargo, en base a una revisión de la bibliografía sobre respuestas a presiones y a alertas, Haas (1974) ha desarrollado una serie de hipótesis entre las cuales encontramos las siguientes. La respuesta a las primeras alertas será minimizar la seriedad de la predicción de estos eventos. Los funcionarios públicos de las zonas a las cuales van dirigidas las alertas tratarán de evitar tomar una posición pública acerca de la probable validez de la predicción; si esto no es posible, sus comentarios y acciones tenderán a debilitar la credibilidad del pronóstico. Habrá considerable variación en la flexibilidad de la respuesta; la mayor indecisión la demostrarán organizaciones con ambientes relativamente «estables», tales como bancos y oficinas gubernamentales.

Esto implica que la predicción sísmica y la alerta no será la panacea universal al problema tal como lo suponen muchas personas. Ciertamente, aunque la predicción puede llegar a ser inevitable incluso en un futuro próximo, debe ser incorporada a las estrategias actuales y no reemplazarlas. Las alertas no deben crear un falso sentido de seguridad entre el público; más bien, el público debe estar enterado de sus limitaciones.

Las incertidumbres expresadas en los párrafos anteriores señalan una conclusión definitiva: la necesidad urgente de investigación detallada de la respuesta probable a alertas sísmicas entre individuos y grupos y a todos los niveles del gobierno.

12.5 Conclusiones

En este trabajo, hemos intentado caracterizar algunos de los factores sociales que subyacen a la respuesta al riesgo sísmico, y llegar a un cierto entendimiento del problema general. Obviamente, mucho del conocimiento necesario aún falta, y por lo tanto se requiere investigación. El problema más urgente es el de las consecuencias reales y potenciales de las alertas sísmicas. El conocimiento de los efectos

indirectos de las decisiones políticas también es escaso. La investigación sobre las interacciones entre ajustes individuales al peligro, y una política general deben ser dirigidas a determinar qué estrategias serían las que con mayor probabilidad promoverían la adopción de ajustes beneficiosos a nivel de toda la sociedad. Otras cuestiones vitales son: las maneras como quienes toman decisiones interpretan y actúan sobre la información; cómo perciben y definen su propia responsabilidad y la de los demás, y el impacto de esto sobre la política; cómo definen las fronteras temporal y espacial para sus decisiones; y hasta qué grado evalúan lo adecuadas que fueron decisiones anteriores en el contexto de las limitaciones externas dinámicas.

La experiencia en cuanto a inundaciones y otros peligros naturales nos lleva a sugerir tres recomendaciones acerca de los métodos contemporáneos referidos al riesgo sísmico:

1. Un mayor conocimiento científico del riesgo sísmico no nos llevará de por sí a reducir el daño sísmico o la pérdida de vidas.
2. Una mayor habilidad para pronosticar sismos y dar alertas no necesariamente nos conducirá a una acción que reduzca la vulnerabilidad o la exposición al riesgo, y podría hacer aumentar ambas cosas.
3. La capacidad tecnológica para modificar eventos sísmicos podría, tomando en consideración todos los factores, aumentar el potencial de pérdidas.

No es el conocimiento científico ni la capacidad tecnológica *per se* lo que falla. Son las consecuencias de su uso una vez que salen del mundo de la ciencia al mundo de los asuntos humanos. Estos peligros de la mala aplicación del conocimiento científico existen debido a la incapacidad de manejar variables sociales, y a veces por la incapacidad de aplicar tales conocimientos cuando éstos existen. Un tratamiento sólido del riesgo sísmico depende de una capacidad de relacionar el conocimiento científico con el social y lograr una mezcla satisfactoria que nos conduzca a una acción sabia. Esto implica una amplia metodología de «sistemas» relativos a la interacción del campo humano y el ambiente geofísico.

El reconocimiento de las amplias dimensiones del problema y de la gama de acciones y estrategias potencialmente muy grande a disposición de los individuos, comunidades, gobiernos regionales y nacionales, así como a nivel internacional, es un requisito previo esencial para seleccionar las respuestas apropiadas. Otro elemento es la especificación precisa de los objetivos sociales para formular una política de respuesta al riesgo sísmico. Los objetivos sociales probablemente incluirán la reducción y disminución de muertes, daño a propiedades y desarreglos provenientes de los terremotos. También podría incluir la liberación del miedo y de la ansiedad, la disminución de los efectos ambientalmente perturbadores y el evitar los efectos socialmente traumáticos de los desastres. Una especificación más precisa de estos objetivos es difícil, y para definir prioridades entre ellos se requiere una cuidadosa articulación de valores y metas sociales.

12.6 Referencias

- BEYER, JACQUELYN L. 1974. Global summary of human response to natural hazards: floods. In G. F. White (ed.), *Natural hazards, local, national, global*, p. 265-274. New York, Oxford University Press.

- BOWDEN, M. J. 1970. Reconstruction following catastrophe: the laissez-faire rebuilding of downtown San Francisco after the earthquake and fire of 1906. *Proc. Assoc. Amer. Geographers*, vol. 2, p. 22-26.
- BURTON, I.; HEWITT, K. 1974. Ecological dimensions of environmental hazards. In F. Sargent (ed.), *Human Ecology*, p. 253-283. North-Holland Publishing Company.
- ; KATES, R. W.; WHITE, G. F. 1968. The human ecology of extreme geophysical events. *Natural Hazard Research*, University of Toronto, Department of Geography. (Working paper No. 1).
- DACY, D. C.; KUNREUTHER, H. 1969. *The economics of natural disasters*. New York, The Free Press.
- ERICKSEN, N. J. 1971. Human adjustment to floods in New Zealand. *New Zealand Geographer*, vol. 27, p. 105-129.
- HAAS, J. E. 1974. Forecasting the consequences of earthquake forecasting. *Natural Hazard Research*, p. 42-61. University of Colorado, Institute of Behavioral Science. (Working paper No. 25.)
- HEWITT, K.; BURTON, I. 1971. *The hazardousness of a place: a regional ecology of damaging events*. Toronto, University of Toronto Press.
- JACKSON, E. L. 1974. Response to earthquake hazard: factors related to the adoption of adjustments by residents of three earthquake areas of the west coast of North America. Unpublished Ph.D. thesis, Department of Geography, University of Toronto.
- . 1975. Impact of public policy on private response to hazard. Paper presented to the annual meeting of the Ontario Division of the Canadian Association of Geographers, Carleton University, Ottawa.
- JANIS, I. L. 1962. Psychological effects of warnings. In G. W. Baker and D. W. Chapman (ed.), *Man and society in disaster*, New York, Basic Books.
- JENNINGS, P. C. (ed.) 1971. *Engineering features of the San Fernando earthquake, February 9, 1971*. Pasadena, Calif., California Institute of Technology, Earthquake Engineering Research Laboratory.
- JOINT COMMITTEE ON SEISMIC SAFETY. 1974. *Meeting the earthquake challenge*. California Division of Mines and Geology. (Special publication no. 45).
- KATES, R. W. 1962. *Hazard and choice perception in flood plain management*. Chicago, University of Chicago, Department of Geography. (Research paper no. 78).
- ; HAAS, J. E.; AMARAL, D. J.; OLSON, R. A.; RAMOS, R.; OLSON, R. 1973. Human impact of the Managua earthquake disaster. *Natural Hazard Research*. University of Colorado, Institute of Behavioral Science. (Working paper no. 23).
- KUNREUTHER, H. 1973. Values and Costs. In: *Building Practices for disaster mitigation*. Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards.
- LEVINE, J. 1971. Response to emotional problems of the San Fernando earthquake. In: Joint Committee on Seismic Safety. *Earthquake risk, conference proceedings*. California Division of Mines and Geology.
- MITCHELL, T. C. 1974. Global summary of human response to natural hazards: earthquakes. In G. F. White (ed.), *Natural hazards, local, national, global*, p. 274-284. New York, Oxford University Press.
- NAKANO, T. 1974. Natural hazards, report from Japan. In G. F. White (ed.), *Natural hazards, local, national, global*, p. 231-243. New York, Oxford University Press.
- NORTON, C. 1971. Congressional directions in risk reduction and disaster relief. In: Joint Committee on Seismic Safety. *Earthquake risk, conference proceedings*, p. 101-108. California Division of Mines and Geology.
- OAKESHOTT, G. B. 1969. Geologic hazard reduction programs at the state level: the example of California. In R. M. Olson and Mildred M. Wallace (eds.), *Geologic hazards and public problems*, p. 233-247. Santa Rosa, Calif., Office of Emergency Preparedness.
- SCOTT, S. 1968. Preparing for future earthquakes: Unfinished business in the San Francisco Bay Area. *Public Affairs Report*, No. 9, Berkeley, Calif., Institute of Governmental Studies.
- SLOVIC, P.; KUNREUTHER, H.; WHITE, G. F. 1974. Decision processes, rationality, and adjustment to natural hazards. In G. F. White (ed.), *Natural hazards, local, national, global*, p. 187-205. New York, Oxford University Press.
- STEINBRUGGE, K. V. 1968. *Earthquake hazard in the San Francisco Bay Area: a continuing problem in public policy*. Berkeley, Calif., Institute of Governmental Studies.

- ; SCHADER, E. E.; BIGGLESTONE, H. C.; WEERS, C. A. 1971. *San Fernando earthquake, February 9, 1971*. San Francisco, Pacific Fire Rating Bureau.
- STEINHART, J. S. 1969. The federal interests in earthquake and geologic hazard programs. In R. M. Olson and Mildred M. Wallace (eds.), *Geologic hazards and public problems*, p. 211–219. Santa Rosa, Calif., Office of Emergency Preparedness.
- THOMAS, G.; WITTS, M. M. 1971. *The San Francisco earthquake*. New York, Stein and Day.
- UNITED STATES OF AMERICA, EXECUTIVE OFFICE OF THE PRESIDENT. 1972. *Disaster Preparedness*. 3 vols. Washington, D.C., Office of Emergency Preparedness.
- UNITED STATES OF AMERICA, NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 1969. *Earthquake Engineering Research*. Washington, D.C., Committee on Earthquake Engineering Research, Division of Engineering, National Research Council.
- VISVADER, HELEN; BURTON, I. 1974. Natural hazards and hazard policy in Canada and the United States. In G. F. White (ed.), *Natural hazards, local, national, global*, p. 219–231. New York, Oxford University Press.
- WHITE, G. F. 1961. Choice of use in resource management. *Natural resources journal*, vol. 1, no. 1, p. 23–40.
- . 1974. Natural hazards research: concepts, methods, and policy implications. In G. F. White (ed.), *Natural hazards, local, national, global*, p. 3–16. New York, Oxford University Press.
- ; HAAS, J. E. 1975. *Assessment of research on natural hazards*. Cambridge, Mass., MIT Press.
- WIGGINS, J. H. 1971. Earthquake safety in the city of Long Beach based on the concept of balanced risk. In: Joint Committee on Seismic Safety. *Earthquake risk, conference proceedings*, p. 61–65.
- WOLFENSTEIN, MARTHA. 1957. *Disaster: a psychological essay*. Glencoe, Ill., Free Press.

13 El seguro y las consecuencias económicas de los terremotos

Por P. PERRENOUD y E. STRAUB

13.1 Consideraciones generales (por P. PERRENOUD)

13.1.1 *Introducción*

Sería pretencioso tratar de resumir en unas pocas páginas el complejo fenómeno económico desencadenado por un terremoto. Sería igualmente difícil analizar todas las consecuencias de un terremoto en lo que se refiere al seguro. Por esta razón, el siguiente artículo tiene que ver con los aspectos más amplios del problema, en un intento de aislar las razones de la situación actual y sembrar algo de semilla para futuros pensamientos.

En términos de seguro, un terremoto es entendido como cualquier movimiento súbito de la corteza terrestre, registrado por observatorios especiales, que causa daños visibles o que podrían ser debidamente probados por expertos, a una propiedad asegurada. Es importante, sin embargo, que tal daño sea causado por un evento natural y no por efectos del hombre, como por ejemplo una explosión subterránea.

13.1.2 *Aspectos económicos*

Obviamente, si se desploma un acantilado en el mar o si hay un deslizamiento de una montaña, puede haber pérdida significativa de pastizales o tierra para la agricultura. Por razones evidentes, este tipo de pérdida nunca puede ser objeto de seguro.

Las otras consecuencias de un terremoto (destrucción de casas, etc.) pueden ser más fáciles de determinar, por lo menos sobre bases individuales. Sin embargo, el efecto total de un terremoto en una región o un país no puede ser expresado simplemente como la suma de pérdidas individuales. Debido a una combinación de factores, es un múltiplo de esta suma.

Tomemos un caso muy simple: para una fábrica, la pérdida de un técnico es relativamente pequeña, ya que puede ser reemplazado muy rápidamente; sin embargo, la desaparición total de un laboratorio de investigación o de una oficina

ejecutiva, es decir de varias personas clave, puede significar la paralización o incluso la ruina de la empresa. Análogamente, con respecto a daños materiales, la destrucción de una máquina puede ser rápidamente remediada, mientras que una interrupción prolongada de producción debido a la pérdida de mucho equipo significa no sólo una considerable pérdida de ganancias sino también la desaparición de un mercado, ya que los clientes encontrarán otros proveedores.

También debe comprenderse que las pérdidas que son una consecuencia de lo anterior pueden exceder ampliamente la suma del daño directo inicial.

A escala local o regional, la destrucción de viviendas, redes de distribución y de pequeñas industrias puede ser contrarrestada mediante un esfuerzo nacional. Pero si un terremoto afecta a un sector particularmente susceptible del país, por ejemplo industrias claves, puertos o centros administrativos, por más que se proporcione ayuda internacional inmediata, el desarrollo del país puede quedar severamente retrasado. En cualquier evento, la ayuda internacional tiene primariamente una función humanitaria y da una prioridad absoluta a la salvación de la vida humana.

13.1.3 Seguro y peligro sísmico

Un especialista en este campo ha dicho que el peligro sísmico es un «polizón». En el verdadero sentido de las palabras, no existe en realidad un «seguro sísmico», en contraposición con el seguro de vehículos o el seguro de vida.

¿Cómo tiene lugar este estado de cosas? Si es cierto que el que asegura es principalmente un apostador, no se puede negar que está acostumbrado a aceptar riesgos calculados y que el juego tiene que acatar ciertas reglas:

- a. El evento que se asegura debe ocurrir con cierta regularidad, en un determinado espacio de tiempo.
- b. El daño sufrido debe ser medible, es decir debe ser posible calcular la probabilidad de que ocurra y el grado.
- c. Los riesgos deben estar distribuidos geográficamente.
- d. La cantidad de daño debe ser limitada.

Es fácil ver que el peligro sísmico no obedece a estas reglas y, particularmente en las ramas de la propiedad, le quita al asegurador la poca seguridad que él ha logrado deducir de su experiencia, adquirida en los últimos dos siglos.

En principio, el seguro sísmico por lo tanto no tiene cabida en el seguro tradicional. Así pues, ¿cómo ha logrado introducirse? En el seguro de vida todos los fenómenos naturales siempre han sido cubiertos. Las compañías comenzaron sus operaciones en los países donde los terremotos no eran una amenaza. A medida que sus operaciones se extendieron a zonas amenazadas y creció el seguro de grupo, la posibilidad de una catástrofe fue mayor, particularmente para las compañías que operaban en las zonas sujetas a movimientos sísmicos.

El seguro de construcción a todo riesgo por otro lado, cubre el peligro sísmico añadiendo sólo una sobretasa o, según el asegurador, con un adecuado incremento de la prima total. En cuanto al seguro marítimo, el riesgo sísmico es sólo de importancia secundaria; si las cosas van de mal en peor, es posible la acumulación en un puerto.

Por lo tanto quedó al seguro contra incendios para alimentar el virus capaz de atacar toda una epidemia de pérdidas. Debe hacerse una distinción entre: el cubrir

el riesgo contra un incendio debido a un sismo, y cubrir daños materiales causados por el propio evento sísmico. Estas dos variantes se dan por separado o combinadas, según la práctica de los diversos mercados. La interpretación es difícil y ha dado lugar a muchos problemas. Un ejemplo: el asegurado tiene una póliza contra incendios después de un sismo; su local está parcialmente dañado por el sismo y luego por el fuego; ¿cómo pueden separarse los daños?

13.1.4 *Mercado de la cobertura sísmica*

En la estrategia de mercado de una compañía de seguros, el seguro sísmico no puede ser un artículo de venta masiva. A lo más será utilizado como una ayuda para las ventas. Este estado de cosas proviene principalmente de las dificultades para determinar las especificaciones (mientras que es posible definir un «riesgo» en el área de incendios, no hay tal técnica para aseguradores en lo que se refiere al seguro sísmico) y de la imposibilidad de calcular una prima realista.

El principal problema, sin embargo, es el hecho de que una compañía de seguros no tiene una capacidad ilimitada para absorber el riesgo. Aún con la ayuda de una red internacional muy sofisticada para redistribuir el riesgo, se llega rápidamente a la saturación, como ha sido el caso en Japón y México, obligando a las compañías a reducir el porcentaje cubierto. En muchos casos, sin embargo, la compañía de seguros no recibe el precio que considera justificado en vista de los riesgos que está cubriendo. Finalmente, en la mayoría de los países, los beneficios anuales de esta rama de los negocios están sujetos a impuestos.

Todo esto complica por qué muchas compañías no han hecho esfuerzo alguno para incrementar sus ofertas sobre seguros sísmicos. Han aceptado tales riesgos en parte por razones comerciales «para ofrecer un servicio a buenos clientes», o a veces por tener una actitud pasiva debido a la ignorancia del riesgo que realmente están corriendo. Sus ofertas por lo tanto incluyen principalmente riesgos comerciales e industriales y, en ciertos casos, viviendas que requieren de cobertura para la parte hipotecada. Sin embargo, ya que la clase de persona que con mayor probabilidad toma este tipo de seguro es el dueño de una propiedad particularmente expuesta a riesgos, industrial o comercial, no es para sorprenderse que la mayoría de riesgos se concentren en zonas de alto riesgo, lo cual conduce a una selección pronunciada desfavorable al asegurador.

13.1.5 *El ofrecimiento del seguro*

En casi todos los países el seguro sísmico viene a ser una adición a la póliza contra incendios de compañías de accionistas, cooperativas, mutuas o compañías del estado, las cuales siguen todas las mismas normas empíricas y confían mucho en el reaseguro internacional. Es difícil estimar la capacidad del mercado mundial de absorber el riesgo sísmico. Actualmente, hay unas 200 compañías de reaseguros en todo el mundo, a lo cual debemos añadir varios centenares de compañías que toman seguros directos y que también hacen negocios de reaseguro. Aunque no existe ninguna regla acerca de la suma que cada compañía puede soportar en el caso de una pérdida catastrófica, un cálculo aproximado sería el hecho en función de las reservas

para catástrofes y de ciertas reservas libres de las compañías que operan en el reaseguro. Dado que las hojas de balance no ofrecen tal información sobre este tema, nos vemos obligados a hacer unos cálculos muy vagos: en el mejor de los casos, es decir si todas las compañías que operan en reaseguros fuesen a aceptar un máximo de negocios en el área sísmica, la capacidad mundial probablemente se situaría alrededor de los dos mil millones de dólares por pérdidas, siendo este total, sin embargo, dependiente del sistema de distribución del riesgo y de los márgenes netos sobre las primas recibidas. A diferencia de lo que ocurre en la práctica normal de seguros, la expresión «capacidad mundial» tiene un significado muy restringido en este contexto. En realidad, los aseguradores y reaseguradores saldrían muy mal parados de una catástrofe grande y necesitarían muchos años para rehacer sus reservas.

Otra manera de estimar la capacidad mundial es examinar las sumas aseguradas para zonas particularmente expuestas al peligro. Para Japón, el compromiso total probablemente llegue a un total de 1 600 000 000 \$ de suma asegurada, mientras que para Ciudad de México (sin ninguna definición precisa de la zona sísmica) la cifra sería de 6 700 000 000 \$ con una pérdida máxima posible naturalmente bastante por debajo de esta cifra.

Un esfuerzo a gran escala se está haciendo actualmente por parte de los aseguradores para lograr una mayor claridad acerca de los compromisos en áreas particularmente expuestas. ¿Tendrá esto un efecto restrictivo sobre el tipo de negocio? Todo parece señalar que así será si las condiciones fundamentales no cambian.

13.1.6 *Algunas soluciones*

Debe mencionarse en primer lugar el hecho de que ciertos países con bajo riesgo, tales como España y Nueva Zelanda tienen cobertura obligatoria de seguro sísmico incorporada en las pólizas contra incendio, pagándose las primas a un fondo especial.

En áreas expuestas a riesgo sísmico, sin embargo, la creación de una cobertura obligatoria o la formación de fondos locales probablemente se encontrará con las dificultades insuperables del conocimiento científico actual de terremotos y las técnicas de seguros. No necesitamos decir que un fondo internacional, ciertamente una idea magnífica en su concepto de solidaridad, sería muy delicado establecerlo en la práctica.

¿Qué puede hacerse para incrementar la capacidad mundial? La respuesta es breve: «más claridad con respecto a este tipo de seguro». Todas las partes interesadas tienen que trabajar en esta dirección y coordinar sus acciones a escala mundial; es por esta razón que nosotros particularmente damos la bienvenida a la iniciativa tomada por UNESCO.

Sin embargo, empezando por el consumidor, consideramos que los dueños de propiedades industriales y comerciales y el público en general deben estar preparados para pagar un mayor precio para mejorar las construcciones, las cuales deberían garantizar, no sólo la protección de las vidas humanas, sino ofrecer mayor resistencia al daño material producido por temblores de tierra menores y medianos.

El asegurador tiene que hacer un esfuerzo especial para concebir un texto claro y para analizar riesgos (por zona, tipo de construcción, etc.) para poder cobrar primas que, aunque no sean exactas, son por lo menos equitativas. El asegurador

también debe organizar la redistribución de riesgos para poder reducir su impacto sobre la economía nacional y para poder difundirla por todo el mundo bajo condiciones aceptables para sus socios. Estas condiciones incluirían estadísticas precisas de obligaciones y un margen adecuado para reaseguro.

Es, sin embargo, responsabilidad de los gobiernos hacer una contribución definitiva para que el seguro pueda en su forma actual, con su agilidad y flexibilidad característica, continuar jugando su papel de distribuidor del riesgo, colector y distribuidor de compensación, un sistema que ha funcionado muy bien en anteriores terremotos, particularmente en el caso de Managua.

La función de las autoridades comienza con la planificación del uso de la tierra (en el presente, en muchos países, la industria está situada en las zonas más expuestas). Continúa con el estímulo sistemático de la investigación local e internacional de las causas y efectos de sismos y tiene una forma práctica en el tema de las reglamentaciones de construcción, diseñadas no sólo para salvaguardar vidas humanas sino para evitar daños a la propiedad. El costo de estas medidas es sin duda muy alto, pero si se puede lograr salvar vidas humanas y si se evita un retroceso en el desarrollo económico de un país, están más que justificadas.

Dentro del sistema actual de seguros, los gobiernos no sólo deben ver el bienestar de las compañías locales y examinar la solidez de sus coberturas de reaseguro, sino también deberían facilitar la formación de reservas para pérdidas catastróficas. Estas reservas deben ser invertidas en valores que por sí mismos no estén afectados por un posible terremoto. Aún más, la libre transferencia a moneda de las primas de reaseguro facilitaría mucho la distribución mundial de riesgos.

Mientras tanto, los gobiernos tendrán que aceptar la idea de que la capacidad de la industria de seguros para absorber pérdidas enormes es limitada y que la única solución a corto plazo en ciertos casos sería reducir el porcentaje de cobertura.

13.2 Consideraciones actuariales (por E. STRAUB)

13.2.1 *Formulación del problema*

«Más claridad con respecto al seguro contra peligros naturales» tal como lo dice P. Perrenoud en la primera parte de este trabajo, es absolutamente esencial desde el punto de vista de los actuarios de seguros. Aquí, más claridad significa más transparencia acerca del potencial del daño sísmico, permitiendo una mejor evaluación de los compromisos máximos por zona, del tamaño necesario del fondo de reserva para catástrofes, de las primas adecuadas, y/o de un programa aceptable de reaseguros para catástrofe.

Los aspectos actuariales de los problemas relacionados con el seguro y reaseguro sísmico pueden ser esbozados en estos puntos:

- a. Los terremotos son eventos raros con un potencial para hacer daño extremadamente alto.
- b. Las estadísticas de reclamos por lo tanto sólo son de uso muy limitado.
- c. A diferencia de lo que ocurre con las ramas normales de seguro, el cálculo de una prima adecuada sólo viene en tercer lugar después del compromiso máximo por zona y de la suma destinada a fondo para catástrofe.

d. La cuantificación de una cantidad mínima de información crucial y la adhesión a un simple modelo es el problema principal. Hay peligro de perderse en teorías y modelos complicados.

13.2.2 Información mínima numérica

Describamos primero un conjunto de datos necesarios para solucionar los anteriores problemas. Estos datos forman el marco de referencia de un modelo matemático que se esbozará más adelante. Los datos mismos se obtienen al dar respuesta a las siguientes preguntas:

1. ¿Dónde están las acumulaciones relevantes de valores asegurados y de qué magnitud son las correspondientes sumas totales aseguradas?
2. ¿Cuál es la frecuencia media de un evento sísmico de una intensidad dada en un área de concentración dada?
3. ¿Cuál es el nivel medio de daños causados por una intensidad sísmica dada en un área de concentración dada?

La respuesta a la primera pregunta nos lleva a un inventario de zonas de concentración con los correspondientes grados de exposición, es decir:

Área de concentración N ^o $j =$	1	2	...	N
Exposición	× × ×	× × ×	...	× × ×

Una zona de concentración puede ser una zona sísmica, una región geográfica, una población, un suburbio, etc., según el grado de detalle de la información disponible. La exposición se expresa mejor en términos del total de sumas aseguradas. Estos totales, sin embargo, no siempre son fáciles de determinar, particularmente para los reaseguradores, debido a acumulaciones no conocidas, participaciones indirectas, programas de reaseguro no proporcionales, y cosas por el estilo.

Si no es posible usar el total de las sumas aseguradas como una medida de exposición, tienen que ser usados otros parámetros menos precisos, tales como el número de riesgos, el volumen de las primas o, peor aún, la población o el área de la superficie.

La respuesta cuantitativa a la pregunta (2) para cada zona de concentración consiste en una tabla de la forma

Intensidad sísmica	V	VI	...	XII
Frecuencia = número promedio de eventos por año	× × ×	× × ×	...	× × ×

Las compañías de seguro no están interesadas principalmente en las magnitudes de los sismos y la ubicación de los epicentros, sino más bien en el impacto de un terremoto sobre una zona de concentración, es decir la intensidad del evento. Las frecuencias nos indican con qué frecuencia media ocurre un evento de una intensidad dada para cada zona. Una frecuencia de por ejemplo 0.05 por año corresponde a un periodo de retorno medio de 20 años.

La relación entre magnitud e intensidad no es sencilla, ya que depende de la profundidad del foco, la distancia epicentral, las condiciones del suelo, etc. Hemos trabajado, para efectos prácticos, con una tabla muy aproximada que relaciona magnitud, intensidad y distancia como sigue: una intensidad mínima Mercalli Modificada IX, por ejemplo, es inducida por un evento sísmico de magnitud Richter de por lo menos 7, 7.7 ó 8.3 a distancias de 0-50 km, 50-180 km y 180-310 km respectivamente. Las intensidades obtenidas de esta manera fueron luego normalizadas exponencialmente. Además, tomamos en consideración —por lo menos en cierto grado— el juicio personal de los aseguradores, en base a sus experiencias en países afectados por terremotos. Algunos resultados numéricos de estos procedimientos están dados en la tabla 13.1. Nosotros apreciaríamos mucho la crítica constructiva acerca de estas cifras para poder llegar a estimaciones más precisas.

Finalmente, al contestar la pregunta (3) para cada zona de concentración, llegamos a un conjunto de cifras del siguiente tipo:

Intensidad del terremoto	V	VI	...	XII
Severidad = el nivel del				
daño promedio como %	×××	×××	...	×××
de exposición				

Las severidades son lo más difícil de estimar, pues las estadísticas de reclamos son escasas y poco fiables, ya que cambian con facilidad la densidad de seguros, la composición de ofertas y la naturaleza de los riesgos. Sin embargo el problema puede ser parcialmente simplificado considerando más bien las pérdidas máximas probables.

Tabla 13.1. Promedio acumulativo de frecuencia de eventos para algunas zonas de concentración.

Zona de concentración	Número anual promedio de eventos sísmicos de intensidad mayor que o igual a Mercalli Modificada							
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Santiago de Chile	0.25	0.18	0.13	0.09	0.06	0.03	0.02	0.01
Bogotá, Colombia	0.14	0.10	0.06	0.02	0.01	0.01	—	—
Ciudad de México	0.62	0.38	0.20	0.07	0.03	0.02	0.01	—
Haifa, Israel	0.08	0.03	0.01	0.01	—	—	—	—
Tokio, Japón	0.30	0.18	0.10	0.06	0.03	0.01	—	—
Manila, Filipinas	0.18	0.09	0.05	0.02	0.01	0.01	—	—
Estambul, Turquía	0.14	0.04	0.01	0.01	—	—	—	—
Lisboa, Portugal	0.35	0.14	0.06	0.03	0.01	—	—	—

Obsérvese que el conjunto de cifras que se ha descrito es un mínimo absoluto, en el sentido de que uno requiere, por supuesto, una idea cuantitativa de exposiciones, frecuencias y severidades, pero el grado de precisión de este marco depende del detalle, por ejemplo del grado de intensidad, tipo de negocio y/o categoría de riesgo. Nótese también que las exposiciones y las severidades dependen de la oferta que se esté considerando, mientras que las frecuencias son «universales», es decir iguales para todas las compañías de seguros.

13.2.3 *Esquema del modelo matemático*

Cada una de las frecuencias anteriores se considera como un valor medio de una variable aleatoria que es «el número anual de terremotos» para una zona de concentración dada y un grado de intensidad (se supone una distribución de Poisson).

Lo mismo es aplicable al nivel de los daños: el nivel real de daños como porcentaje de la exposición se supone que fluctúa alrededor de la severidad (y se supone que tiene una distribución Beta). De esto obtenemos probabilidades para el potencial de pérdidas por zonas de concentración y grados de intensidad respectivamente (distribuciones compuestas de Poisson), dependiendo de tres parámetros clave, exposición, frecuencia y severidad.

Es fácil combinar estas distribuciones de probabilidades arbitrariamente (dado que se supone independencia, las combinaciones también son Poisson compuesta; los grados de daños, sin embargo, ya no son Beta). Las dos combinaciones más importantes son por supuesto «todas las intensidades para una zona de concentración dada» y el potencial total de catástrofe de la oferta, es decir, la combinación de «todas las intensidades y zonas de concentración juntas». Así pues, llegamos a una distribución de probabilidades para el potencial de catástrofe que, a su vez, es la base para los cálculos y la toma de decisiones para el seguro tal como se describe en adelante.

13.2.4 *Consecuencias prácticas*

13.2.4.1 Pérdidas máximas probables (PMP)

Contrariamente, por ejemplo, al Seguro de Incendio Industrial, donde las PMP se definen para cada riesgo individual, aquí consideraremos las PMP por evento en el sentido de «lo peor que nos podría pasar en, digamos, cien años».

Es cierto que esta manera de medir los daños es mucho más familiar para quienes lo practican que el nivel promedio de daño, porque es más fácil de estimar, p.e. lo que costaría una repetición del terremoto de 1906 de San Francisco, en lugar de los costos de un terremoto promedio. Así pues, el primero —y en muchos aspectos el más importante— de los cálculos actuariales es la comparación de las PMP calculadas en base a un modelo, con los correspondientes cálculos hechos por ingenieros, aseguradores, y sismólogos. Sólo después de haber ajustado nuestro modelo a las cifras mencionadas por los profesionales (para PMP y de igual manera para las frecuencias), podemos decir que el modelo está adecuadamente «sintonizado» y podemos proceder a cálculos adicionales.

13.2.4.2 Evaluación de la capacidad máxima por área de concentración

La capacidad máxima que una compañía puede asignar a un área de concentración depende principalmente de (1) sus obligaciones en otras áreas; (2) el volumen de su fondo para catástrofes; (3) la intensidad de la prima y (4) el criterio de estabilidad. La estabilidad puede medirse por «la probabilidad tolerable de ruina» (ruina técnica, no necesariamente ruina en términos de quiebra financiera); en otras palabras, una probabilidad aceptable de que los reclamos excederán las primas más las reservas en cualquier momento dentro de una perspectiva dada de planificación. Por lo tanto, si la gerencia de una compañía de seguros está preparada para tolerar la «ruina técnica» con una probabilidad digamos del 1 % en 20 años, y si además se conoce el volumen del fondo para catástrofes y las tasas de primas, por medio del modelo podemos asignar compromisos máximos a las áreas de concentración de manera que el criterio de estabilidad se cumpla. El propio procedimiento es de «tanteo»; se comienza con un conjunto de valores máximos de compromiso y se reajustan hasta que se obtiene la cifra tolerable de probabilidad de ruina.

13.2.4.3 Reserva para catástrofes y tasas de primas

Por otro lado, dada la estabilidad requerida (en términos de probabilidad tolerable de ruina) y dados los compromisos, podemos calcular fácilmente ya sea el volumen de la reserva para catástrofes o la tasa mínima de prima.

A diferencia de lo que ocurre con las ramas normales de seguros, aquí hay que considerar dos unidades de información: los impuestos sobre «ganancias de seguros» y la renta de la inversión del capital del fondo para catástrofes. Un resultado positivo en un año no puede ser interpretado como un beneficio del asegurador, dado que gran parte de éste se necesita para incrementar el fondo de catástrofes en vista del carácter no equilibrado de este negocio. Sin embargo, una vez que el fondo para catástrofes ha llegado a un nivel razonable, la renta de la inversión de éste es cuantiosa y tiene que ser considerada cuando se calcula la prima técnica mínima.

13.2.4.4 Cobertura de reaseguro sísmico

La forma más importante de reaseguro contra sismos es el llamado Tratado de Exceso de Pérdidas por Catástrofes, que estipula que el reasegurador pagará, sujeto a un máximo (= monto cubierto) en el evento de un sismo, aquella parte del total de daños asegurados que exceda de una suma fija retenida por el asegurador directo (retención).

Para el cálculo del monto máximo de cobertura (aceptable para el reasegurador), de la prima de reaseguro y de las reservas necesarias, podemos proceder de la misma manera señalada arriba para el asegurador directo, con la única diferencia de que el marco del modelo (es decir exposiciones, frecuencias y severidades) tiene que ser cambiado de acuerdo con las condiciones del tratado para el reaseguro.

13.2.5 *Comentarios finales*

Hemos tratado de demostrar con un modelo simple y con un mínimo de datos numéricos, que es posible determinar cifras fundamentales tales como el compro-

miso máximo por área, las pérdidas máximas probables, las tasas mínimas técnicas de primas y el fondo para catástrofes.

También debe mencionarse que los cálculos correspondientes son suficientemente sencillos como para ser llevados a cabo en pocos minutos. Para simplificar, a propósito, no hemos dado una formulación exacta matemática del modelo, pero para un tratamiento más riguroso del tema el lector puede ver el Apéndice (13.4). El modelo mismo ciertamente puede ser criticado. Sin embargo, lo recomiendo a pesar de (o, más bien, debido a) su simplicidad. Como ha dicho el estadístico norteamericano Mark Kac: «La función principal de los modelos no es tanto explicar y predecir —aunque en última instancia éstas son las funciones principales de la ciencia— como azuzar la mente y plantear cuestiones difíciles».

13.3 Referencias

- FRIEDMAN, D. 1971. *Insurance and the natural hazard. The ASTIN Bulletin*, vol. VII, Part I.
RICHTER, C. 1958. *Elementary seismology*. Freeman and Co.
STRAUB, E. 1973. *Earthquakes and statistics from the insurance point of view*. International Statistical Institute, Vienna Congress Proceedings, 1973.
UNESCO. 1972. *Report of the consultative meeting of experts on the statistical study of natural hazards and their consequences (SC/WS/500)*.

13.4 Apéndice

*Comentarios Actuariales sobre el Seguro de Peligros Naturales**

por ERWIN STRAUB

1. *Preliminares*

Me límito a mencionar unas cuantas fórmulas matemáticas. Se omiten las pruebas ya que todos los resultados son conocidos de otras áreas actuariales.

2. *Información básica*

Dividimos la cartera en zonas sísmicas o lo que llamamos *áreas de concentración* numeradas desde $j = 1$ hasta $j = J$.

La E_j significa el compromiso total o la *exposición* de la compañía en el área j . Las *intensidades* Mercalli Modificada de sismos están numeradas desde $i = 1$ hasta $i = I$.

El número promedio λ_{ij} de eventos de intensidad i en el área j se llama la *frecuencia*. Asimismo, designamos el nivel de daño promedio Y_{ij} (expresado como un porcentaje de E_j) como *severidad*.

* Reproducido de la publicación «Mitteilungen der Vereinigung Schweizerischer Versicherungsmathematiker», Volumen 1975, Parte II.

Así pues, el mínimo de datos que forman el *marco* del modelo matemático descrito a continuación consiste en un conjunto de *exposiciones, frecuencias y severidades*.

$$E_j, \lambda_{ij} \text{ and } y_{ij} \text{ for } i = 1 \text{ to } I \text{ and } j = 1 \text{ to } J.$$

3. Notaciones y supuestos

K_{ij} = número de eventos por año
 X_{ij} = monto del daño
 $\eta_{ij} = X_{ij}/E_j =$ nivel de daño
 K_{ij} se supone ser Poisson, con parámetro λ_{ij}
 η_{ij} se supone ser Beta, con parámetros $\alpha + \beta =$ una constante y

$$\frac{\alpha}{\alpha + \beta} = E[\eta_{ij}] = y_{ij}.$$

En consecuencia:

$$V_{ij}(x) = \text{Prob} [X_{ij} \leq x] = B\left(\frac{x}{E_j}\right).$$

Donde $B(x)$ es la distribución Beta de η_{ij} .

Además, para un total anual de reclamaciones Z_{ij} :

$$F_{ij}(x) = \text{Prob} \left[Z_{ij} = \sum_{k=1}^{K_{ij}} X_{ij,k} \leq x \right] = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda_{ij}^n}{n!} e^{-\lambda_{ij}} V_{ij}^{(n)}(x),$$

donde $X_{ij,k}$ son las reclamaciones para la catástrofe número k .

La K_{ij} , $X_{ij,k}$ y también por lo tanto la Z_{ij} se suponen ser estocásticamente independientes.

4. Total de reclamaciones por área de concentración y globales

Escribiendo:

$$Z_{.,j} = \sum_{i=1}^I Z_{ij} = \text{total de reclamaciones en el área } j \text{ resultado de sismos de todas las intensidades.}$$

$$\text{y } Z_{..} = \sum_{j=1}^J Z_{.,j} = \sum_{i,j} Z_{ij} = \text{el total de reclamaciones de toda la cartera}$$

obtenemos las siguientes distribuciones:

$$F_{.,j}(x) = \text{Prob} [Z_{.,j} \leq x] = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda_{.,j}^n}{n!} e^{-\lambda_{.,j}} V_{.,j}^{(n)}(x)$$

con
$$\lambda_{.j} = \sum_{i=1}^I \lambda_{ij} \quad \text{y} \quad V_{.j}(x) = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_{.j}} V_{ij}(x)$$

y
$$F_{.}(x) = \text{Prob}[Z_{.} \leq x] = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda_{.}^n}{n!} e^{-\lambda_{.}} V_{.}^{(n)}(x)$$

con
$$\lambda_{.} = \sum_{j=1}^J \lambda_{.j} = \sum_{i,j} \lambda_{ij}$$

y
$$V_{.}(x) = \sum_{j=1}^J \frac{\lambda_{.j}}{\lambda_{.}} V_{.j}(x) = \sum_{i,j} \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_{.}} V_{ij}(x).$$

Expresando los momentos de $Z_{.j}$ y $Z_{.}$ en términos de las cifras claves, exposición, frecuencia y severidad nos da:

$$E[Z_{.j}] = \lambda_{.j} y_{.j} E_j \quad \text{y} \quad \text{Var}[Z_{.j}] = \lambda_{.j} c_{.j} E_j^2$$

y
$$E[Z_{.}] = \sum_{j=1}^J \lambda_{.j} y_{.j} E_j, \quad \text{Var}[Z_{.}] = \sum_{j=1}^J \lambda_{.j} c_{.j},$$

donde
$$y_{.j} = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_{.j}} y_{ij}, \quad c_{.j} = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_{.j}} c_{ij},$$

con
$$y_{ij} = E[\eta_{ij}], \quad c_{ij} = E[\eta_{ij}^2].$$

Más adelante omitiremos los subíndices donde sea posible; así pues K puede significar K_{ij} o K_j o $K_{.}$.

5. Pérdidas Máximas Probables (PMP)

Si X_m es la reclamación individual de catástrofe m ava y K el número de reclamaciones, entonces

$$H(x) = \text{Prob}[\max_{1 \leq n \leq K} X_n \leq x] = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda} V^n(x) = e^{-\lambda \{1-V(x)\}},$$

que es la mayor distribución de reclamaciones que tienen la cualidad útil, tal que

$$H_{.j}(x) = \prod_{i=1}^I H_{ij}(x) \quad \text{y} \quad H_{.}(x) = \prod_{j=1}^J H_{.j}(x) = \prod_{i,j} H_{ij}(x).$$

con esto definimos las PMP como sigue:

para una dada ϵ (e.g. $\epsilon = 1\%$) la pérdida máxima probable M es $M = X_\epsilon$, donde X_ϵ es

la solución de $H(x) = 1 - \epsilon$.

nótese que $M_{.j} \geq \max_{1 \leq i \leq I} M_{ij}$

Y $M_{..} \geq \max_{1 \leq j \leq J} M_{.j} \geq \max_{i,j} M_{ij}$.

6. Probabilidades de ruina

Las probabilidades de ruina se utilizan como criterios de estabilidad cuando se calculan las primas, las capacidades máximas, el volumen del fondo para catástrofes y la cobertura de reaseguros. Como una primera aproximación asumimos que el monto de las reclamaciones individuales está distribuido exponencialmente:

$$\varphi(U, \pi) = \frac{\lambda\mu}{\pi} e^{-U(1 - \lambda\mu/\pi)},$$

donde $\varphi(U, \pi)$ = probabilidad de ruina para un horizonte infinito de planeamiento, U = reserva inicial (= fondo para catástrofes), π = ingreso anual procedente de las primas, λ = promedio anual del número de reclamaciones, μ = promedio de las reclamaciones individuales por catástrofes.

Por lo tanto, mirando toda la cartera tenemos que poner

$$\lambda\mu = E[Z_{..}] = \sum_{j=1}^J \lambda_{.j} \gamma_{.j} E_j.$$

De esto podremos, por ejemplo, calcular las capacidades máximas E_j siempre que el resto de los parámetros —particularmente la probabilidad tolerable de ruina— estén dados.

Una manera más precisa es reemplazar la distribución exponencial por una distribución Gamma:

$$G_n(x) = \frac{\gamma^n}{\Gamma(n)} \int_0^x z^{n-1} e^{-\gamma z} dz,$$

para la cual

$$\frac{n}{\gamma} = E[Z_{..}] \quad \text{y} \quad \frac{n + n^2}{\gamma^2} = \frac{1}{\lambda} \text{Var}[Z_{..}].$$

Esto corresponde a usar una distribución compuesta Poisson que tenga los primeros dos momentos como el «correcto».

7. *Reaseguro contra exceso de pérdidas*

Las consideraciones básicas para calcular las primas de reaseguro, las reservas para catástrofes y las PMP son las mismas que para el seguro directo, sin embargo, las variables originales deben ser transformadas de acuerdo con las condiciones del contrato, es decir:

$$X_{ij} \longrightarrow X_{ij}^* = \begin{cases} 0 & \text{si } X_{ij} \leq R_j \\ X_{ij} - R_j & \text{si } R_j < X_{ij} \leq R_j + D_j \\ D_j & \text{si } R_j + D_j \leq X_{ij} \end{cases},$$

donde X_{ij} = reclamación original individual por causa de catástrofes
 X_{ij}^* = reclamación individual del exceso
 R_j = retención
 D_j = monto cubierto } para el área n° j bajo el contrato de exceso de pérdidas

Por supuesto las cifras clave también están transformadas

$$E_j^* = D_j,$$

$$\lambda_{ij}^* = \lambda_{ij} \{1 - V_{ij}(R_j)\},$$

$$y_{ij}^* = \frac{1}{D_j \{1 - V_{ij}(R_j)\}} \left\{ \int_0^{D_j} V_{ij}(x + R_j) x dx + D_j \frac{1 - V(R_j + D_j)}{1 - V(R_j)} \right\}.$$

8. *Comentarios finales*

El modelo también puede ser utilizado para otros peligros distintos de los terremotos, por ejemplo para Australia reemplazamos intensidades por peligros naturales poniendo la letra $i = 1$ = incendio de bosques, $i = 2$ = una tempestad de viento, $i = 3$ = inundación e $i = 4$ = terremoto.

Todos los cálculos pueden ser realizados con una computadora de escritorio en pocos minutos. Quisiera agradecer a Ron Grünig su ayuda en la programación.

14 Algunos aspectos de la planificación del desarrollo físico para asentamientos humanos en las regiones propensas a terremotos

Por ADOLF CIBOROWSKI

14.1 Introducción

El hombre moderno, no obstante todo su desarrollo intelectual, su sofisticación tecnológica y sus habilidades técnicas, todavía está a merced de las fuerzas naturales. La escala y la complejidad del desarrollo económico hacen al hombre más y más dependiente de un funcionamiento eficiente de sistemas económicos muy amplios y de facilidades técnicas. Por lo tanto, él, ahora, no sólo podría ser vulnerable a desgracias directas causadas por desastres naturales, sino también indirectamente vulnerable a catástrofes que ocurren en áreas geográficamente muy distantes.

Los principales temas de este capítulo son las medidas de planificación física necesarias para que los asentamientos humanos sean más seguros o menos vulnerables, en su totalidad o en determinadas componentes, frente a los desastres causados por los terremotos y la cadena de acontecimientos que éstos conllevan. Tales medidas pueden ser tomadas a niveles nacionales, regionales o locales, cuando se programa el desarrollo de asentamientos existentes o la selección de lugares para nuevos asentamientos humanos.

Otras medidas, relacionadas con los patrones para uso de la tierra, distribuciones funcionales y organización espacial, son importantes principalmente a nivel local y deben ser tomadas en consideración cuando se diseña un asentamiento, un pueblo o una ciudad en su totalidad o cuando se hacen planes detallados para zonas de desarrollo particulares.

14.2 Cadenas de acontecimientos

Es raro que sólo un tipo de desastre natural azote un asentamiento y a su población. En la mayoría de los casos se desarrolla una cadena de acontecimientos y el resultado final desastroso es un efecto acumulativo de fenómenos y fuerzas secuenciales. Además, cuando una catástrofe se debe a una combinación de varias fuerzas y

elementos naturales, un acontecimiento no sólo puede «abrir la puerta» al siguiente, sino que puede hacer que el siguiente sea más destructivo.

Algunos ejemplos de las cadenas más comunes de acontecimientos desastrosos originados por un sismo son los siguientes:

- Terremoto — avalancha — inundación;
- Terremoto — fuego — conflagración;
- Terremoto — contaminación del agua potable — epidemias de enfermedades;
- Terremoto — tsunami — inundaciones en costas distantes.

La planificación física debe tomar en consideración todas las posibles cadenas de eventos y debe introducir las medidas apropiadas para poner fin o limitar su desarrollo.

14.3 Propósitos generales y objetivos de planificación

La tarea general de la planificación física y del diseño de cualquier región, ciudad o pueblo, es trasladar los objetivos sociales y económicos del desarrollo a patrones físicos de uso de la tierra, logrando una calidad apropiada del ambiente, necesaria para la actividad humana, su bienestar y satisfacción.

El propósito de la planificación física es, por lo tanto, el de coordinar en términos de programación y espaciales los muchos y diferentes componentes del complejo proceso del desarrollo, y orquestrar las actividades que moldean el ambiente hacia un resultado armónico.

Quiénes hacen la política y los planificadores, encontrarán en el proceso de planificación, un número de situaciones conflictivas, demandas y criterios, así como conflictos de intereses entre ciudadanos individuales y entre varios grupos sociales de distintos intereses. La tarea de los planificadores, y de quienes hacen la política es por lo tanto encontrar la solución más apropiada, frecuentemente basada en avenencias y concesiones mutuas.

En las áreas propensas a terremotos, un planificador físico debe incorporar a los esquemas de planificación para el desarrollo físico de una zona dada, todas las medidas que sean necesarias y estén a su disposición para que la ciudad sea sismo-resistente y segura para la vida humana. Estas medidas, comenzando con la selección del sitio y el estudio de patrones de uso de la tierra, podrían estar en conflicto con algunos otros intereses o criterios de desarrollo. Exactamente en ese momento surge la necesidad de hacer una de las más dramáticas concesiones.

Algunas medidas protectoras (en el campo de los patrones de desarrollo físico) conllevan costos adicionales. Hasta dónde disminuir el riesgo y a qué costo adicional, es una de las preguntas fundamentales para los políticos, y debe ser contestada en base a las opciones que presenten los planificadores profesionales.

Sin embargo, hay muchas medidas que involucrarán poco costo adicional e incluso ninguno. Algunas de ellas pueden ser hasta muy sencillas y muy claras como, por ejemplo, actuar de manera planificada en contraste con actuar al azar. La adopción de tales medidas, aunque sea económicamente simple, también exige experiencia profesional, decisión política y un compromiso a fondo por parte de todos aquellos que están interesados en la tarea de construir una ciudad mejor y más segura.

14.3.1 *Prevención y mitigación*

En las zonas sísmicamente activas todavía no podemos predecir o evitar terremotos. Podemos, sin embargo, proteger los edificios contra su destrucción, aunque frecuentemente a un alto costo.

Teóricamente, podemos construir ciudades a prueba de terremotos, pero la experiencia ha demostrado, que esta solución, aunque posible no es económicamente factible. En la práctica, sólo algunos de los edificios más importantes son construidos para ser absolutamente sismo-resistentes.

Las principales acciones por lo tanto son enfocadas a las tareas de disminuir el nivel de riesgo y de reducir las consecuencias secundarias de la catástrofe inicial.

14.3.2 *Objetivos directos*

Los objetivos directos de la planificación física como herramienta de prevención contra la destrucción causada por terremotos deben ser:

Disminuir el nivel del riesgo potencial.

Mitigar las consecuencias de eventos destructivos.

Mitigar o evitar el desarrollo de una cadena de eventos desastrosos.

Localizar y limitar el ámbito de las catástrofes.

Facilitar las operaciones de rescate.

Facilitar la organización de la vida durante el primer periodo post-desastre.

Facilitar y acelerar la rehabilitación y la reconstrucción.

14.3.3 *Objetos que deben ser protegidos y su jerarquía*

La definición adecuada de lo que debe ser protegido por medidas de planificación física y la definición de su jerarquía de importancia deben servir como guía para toda decisión de planificación y para la selección de las concesiones mutuas más justificadas entre las varias soluciones costo-beneficio. La jerarquía sugerida y la lista de los más importantes objetos a ser protegidos podría ser como sigue:

a. La vida humana.

b. Actividades económicas (instalaciones y equipamientos) para:

la industria y el manufacturado

el almacenamiento de abastecimientos básicos

c. La capacidad operacional de la ciudad y de la región.

Redes de infraestructura de:

transporte y comunicación

suministro de energía

abastecimiento de agua

desagüe y drenaje

d. Servicios e instalaciones sanitarias.

e. Servicios de vivienda.

f. Servicios sociales y culturales:

instalaciones educativas

instalaciones comerciales

instalaciones culturales

(Nótese que algunos de éstos, cuando están bien protegidos, podrían ser utilizados como albergues temporales o para otras funciones de emergencia);

g. Objetivos especiales:

lugares de referencia

monumentos históricos

h. Bienes muebles personales.

14.4 Medidas generales a nivel de planificación física para evitar y/o mitigar los efectos de una catástrofe

El objeto de la planificación física es el ESPACIO. Por lo tanto las principales medidas protectoras están relacionadas con el uso adecuado del espacio y con la organización espacial.

La medida más importante en la planificación física de una ciudad, para que ésta sea resistente a los terremotos y a sus consecuencias, es la selección apropiada de los lugares para su desarrollo. El primer paso crucial es, por lo tanto, evaluar cuidadosamente las condiciones naturales existentes. El segundo es definir zonas con distintos grados de riesgo. El tercero es definir los patrones de uso de tierra (la ubicación de diversos programas de desarrollo), seleccionando las áreas de más bajo riesgo disponibles para ubicar los componentes más importantes de la ciudad. Generalmente, éstas serán las zonas residenciales e industriales. Toda otra medida de planificación, tal como se señala más abajo y se describe en otras partes de este capítulo, puede resultar más efectiva o puede no tener ninguna utilidad, según la decisión primaria acerca de dónde y sobre qué clase de terreno se ubica el programa de desarrollo.

Los campos principales para la aplicación de medidas de protección en la planificación física son:

Elección del lugar.

Distribución de actividades y de población.

Patrones para uso de la tierra.

Distribución funcional.

Sistema de comunicaciones.

Diseño general de sistemas de abastecimiento.

Plan urbanístico detallado a nivel de diseño de componentes del asentamiento (formas de edificios, distribución de calles, modificación del paisaje, etc.).

14.5 Acción a nivel nacional y/o regional

Los planes para desarrollo físico tanto nacionales como regionales se preparan sobre mapas a escala de 1:1 000 000, 1:500 000 ó 1:200 000, y la naturaleza determina el nivel de generalización de las decisiones de planificación y de los modelos de desarrollo. Tales planes nunca incluyen los detalles de los modelos de desarrollo o de uso de la tierra.

Dentro de las regiones de alto riesgo o de riesgo uniformemente distribuido, es imperativo evitar la concentración de población y de actividades económicas en uno o en muy pocos lugares. Si un terremoto ocurriese en tal lugar, las consecuencias podrían ser desastrosas para la vida y la economía de toda una región o todo un país.

La política nacional acerca de la descentralización de la población y de las actividades económicas debería estar basada, entre otras cosas, en:

Un concepto de planificación socioeconómico y físico para una red nacional o regional de asentamientos.

El uso de los lugares de plantas industriales nuevas como un incentivo para el desarrollo de un modelo apropiado y deseable de asentamiento.

Una política nacional de urbanización podría contemplar otras medidas, tales como: La ubicación de nuevas ciudades y poblaciones en áreas con el menor riesgo posible (zonas de menor probabilidad sísmica).

La limitación de la expansión de asentamientos existentes ubicados en zonas de alto riesgo.

Evitar construir nuevas plantas manufactureras y almacenes en zonas de alto riesgo.

Otras medidas adicionales podrían ser introducidas al diseñar el desarrollo de los sistemas nacionales/regionales de transporte, telecomunicaciones y de abastecimiento de energía.

Para facilitar las operaciones de ayuda durante una emergencia, toda región propensa a terremotos debería estar equipada con un número de centros de emergencia. La función de tales centros sería la de mantener en funcionamiento abastecimientos de emergencia incluyendo:

Alimentos y medicinas.

Materiales de construcción y herramientas sencillas para la construcción.

Elementos prefabricados para la construcción de viviendas temporales.

Elementos para la reparación de estructuras de ingeniería, puentes, viaductos, etc.

Cualquier otro equipo de emergencia acorde con las necesidades y condiciones locales.

14.6 Acción a nivel local

Un plan maestro para el desarrollo urbanístico consiste en una combinación de programas sociales y económicos para el desarrollo y define el modelo de dicho desarrollo; el alcance y la metodología de la elaboración de dicho plan varía de un país a otro y depende de los sistemas políticos y sociales, del nivel de desarrollo y de la tecnología disponible.

Debido a que tal plan constituye una guía para la construcción de una ciudad, es imperativo que todas las medidas físicas para proteger una ciudad contra una catástrofe sísmica, o para mitigar los efectos de terremotos fuertes, deben ser incorporadas a un plan maestro y deben constituir sus componentes integrales y sus directrices.

14.6.1 Definición de zonas de gran riesgo

Para definir zonas de riesgo sísmico potencial dentro de una región más amplia (es decir, cuando se está buscando un lugar para el desarrollo de una nueva población,

preparando planes regionales, etc.), debe prepararse un mapa de zonificación sísmica. Tal mapa indica las intensidades sísmicas máximas esperadas en regiones muy grandes y puede ser elaborado en base a la información y datos acerca de sismos del pasado y a resultados de los estudios geológicos y sismo-tectónicos. El mapa ofrece sólo las características generales de una región más amplia y no es suficiente para los efectos de un plan maestro y para la planificación física detallada.

Para poder seleccionar los lugares más seguros para los componentes más importantes y/o vulnerables del desarrollo urbano debe ser realizada una investigación mucho más detallada. Esto dará como resultado un mapa de microzonificación sísmica.

Este mapa deberá indicar la intensidad sísmica probable, tomando en consideración las condiciones locales y su diversidad en zonas limitadas y en los lugares de desarrollo potencial. Dicho mapa deberá ser preparado haciendo uso de los registros de un acelerógrafo (si es que existe), y debe tener presente la geología del sitio, la estructura del suelo, y su capacidad de soportar carga, el régimen de agua subterránea y los posibles cambios de nivel de la capa freática, y debe presentar conclusiones con respecto a la probabilidad y nivel del riesgo y/o recomendaciones acerca del diseño de edificios. Tales mapas deben ser usados como una base fundamental para el diseño de los patrones de uso de la tierra.

14.6.2 *Áreas construidas existentes de alto riesgo social y/o económico*

Hay algunas zonas especiales, dentro de las zonas construidas de la mayoría de las ciudades existentes, que son altamente sensibles y vulnerables a cualquier tipo de catástrofe. Debido a que su vulnerabilidad podría ser no sólo de tipo puramente técnico o económico, sino más frecuentemente de naturaleza social, tales zonas pueden representar un importante problema político para las autoridades locales.

Dos de los tipos de zonas más sensibles son:

1. *Zonas residenciales de bajos ingresos*

En su mayor parte éstas son zonas de «barriadas», tugurios y callejones, frecuentemente desarrollados en forma ilegal, construidas pobremente y con una concentración comparativamente alta del sector más pobre de la población urbana.

Por regla general, los grupos residenciales más pobres ocupan las zonas del más alto riesgo (llanos fluviales sujetos a inundaciones, laderas peligrosas, zonas por debajo del nivel del mar, etc.). La probabilidad, por lo tanto, de que estas zonas sean las primeras en sufrir los efectos de fenómenos naturales y las más vulnerables al desarrollo de una desastrosa cadena de acontecimientos es muy alta.

La consecuencia de una catástrofe en estas zonas será:

Probabilidad de un alto número de víctimas.

Probabilidad de enfermedades epidémicas y hambre.

Miseria humana.

Posibilidad de desasosiego social.

Carencia de recursos propios para la reconstrucción y, por lo tanto, una inmediata carga pesada sobre la economía local.

La creencia de algunas autoridades locales de que una catástrofe natural ayudará

a solucionar el problema de las barriadas destruyendo o forzando a la gente a regresar a las zonas rurales no puede ser más equívoca. Es una falsa y peligrosa concepción. La gente permanecerá en el lugar y pueden estallar problemas sociales y políticos.

Por lo tanto, es imperativo que haya programas de renovación para tales zonas, incluyendo la reubicación de los habitantes a zonas más seguras, preferiblemente dentro de la misma ciudad, como una de las más altas prioridades de los programas para una «ciudad más segura».

2. *Antiguas zonas industriales*

Éstas representan un tipo de riesgo muy complejo. Como consecuencia de la acción combinada de un sismo severo y sus efectos secundarios fácilmente se puede producir una destrucción total.

Como consecuencia, la ciudad deberá afrontar:

Daños a la economía.

Desempleo.

Una interrupción del abastecimiento de bienes manufacturados.

Un proceso largo y costoso de reconstrucción que deberá ser combinado con la modernización.

Por lo tanto, la modernización de tales zonas puede ser recomendada como una de las medidas preventivas más importantes.

14.6.3 *Patrones para el uso de la tierra*

Los patrones para el uso de la tierra a nivel de un plan maestro urbano definen la asignación de distintas zonas con fines residenciales, industriales, mixtos, recreacionales, transporte y otros tipos de desarrollo. En otras palabras, el mapa de uso de la tierra debe definir el tipo de uso y la densidad de uso para cada pedazo de terreno dentro de la zona planificada.

Por lo tanto, las principales medidas protectoras a este nivel de planificación son: Coordinación de los usos de la tierra propuestos con los patrones de riesgo existentes, es decir, reservar las zonas de mayor riesgo para un desarrollo agrícola generalizado, como espacios libres de zonas verdes intraurbanas, etc. y ubicar los programas de desarrollo más sensibles dentro de las zonas de menor riesgo.

Segregación funcional de usos de la tierra (para evitar tipos mixtos de desarrollo, que representan riesgos adicionales en caso de una cadena desastrosa de eventos).

Aislamiento, por medio de espacios libres, de las zonas industriales y las zonas residenciales y subdivisión de distritos residenciales más grandes en sistemas de espacios libres y franjas verdes. Tales franjas pueden servir para limitar los incendios que frecuentemente son consecuencia de un sismo, y para servir como las primeras zonas a utilizar en una evacuación de emergencia de la población.

Descentralización de los servicios administrativos y económicos clave dentro de una ciudad.

Formulación de reglamentos de zonificación relativos a la calidad de los materiales de construcción y a las estructuras.

14.6.4 *Densidad de desarrollo*

Una recomendación muy importante es la de mantener las densidades del desarrollo a un nivel bajo. Esta regla frecuentemente entra en conflicto directo y fuerte con las demandas económicas de un desarrollo de alta densidad y puede ser más agravada por el funcionamiento de un mercado libre de las tierras. Sin embargo, ésta es una de las principales medidas protectoras para mitigar las consecuencias directas de un sismo y de sus secuelas desastrosas: incendios, explosiones y pánico. Los niveles de densidad adecuados no pueden ser prescritos en una regla general. Cada opción dependerá de las condiciones locales y de muchas concesiones de naturaleza económica, técnica y social.

14.6.5 *Redes de infraestructura*

El diseño de las vías de comunicación debe asegurar su funcionamiento efectivo en una situación de emergencia, durante la catástrofe y durante el periodo inmediatamente posterior. El acceso libre a cualquier lugar de la ciudad es una condición previa indispensable para las operaciones de rescate (es decir acceso para las brigadas contra incendio) y para la evacuación de la población. Vías principales suficientemente anchas, pueden servir además de «cortafuegos».

Por lo tanto:

Cada distrito urbano o parte de una zona urbanizada debe tener no menos de dos caminos de acceso.

Los principales caminos y calles deben estar integrados en un solo sistema que ofrezca vías alternas, accesos alternativos a los puntos focales principales de la ciudad y empalmes con las carreteras regionales y nacionales.

Las calles principales deben ser suficientemente anchas para evitar un bloqueo de los canales de tráfico a causa de edificios desplomados.

Cuando sea posible hay que evitar que las avenidas principales atraviesen zonas de gran riesgo.

Las vías de evacuación y de emergencia deben estar especialmente marcadas y protegidas contra cualquier bloqueo incidental.

Todos los cuellos de botella potenciales deben ser suplementados con desvíos de emergencia y rutas alternas.

Por analogía con la red de caminos, la red ferroviaria debe ser desarrollada como un sistema global, o aún mejor, como un sistema circular, con numerosos empalmes con la red de ferrocarriles nacional o regional.

Otra tarea principal es la de asegurar el abastecimiento de agua en una situación de emergencia y posteriormente. Una interrupción del abastecimiento de agua en tales ocasiones puede ser fatal, con consecuencias catastróficas adicionales. Para que los sistemas de abastecimiento de agua sean sismo-resistentes, pueden recomendarse los siguientes puntos:

Contar con abastecimiento de agua de más de una fuente, localizada si fuese posible a una buena distancia una de la otra.

Desarrollar fuentes de suministro adicionales para emergencia, es decir, pozos profundos que puedan ser regularmente utilizados como fuentes de abastecimiento de agua para fines industriales.

Diseñar el sistema como un número de circuitos cerrados de tuberías troncales y de distribución para cada subdivisión de la zona urbanizada. El sistema de circuito cerrado, a diferencia del sistema «terminal», ofrece una opción cuando una determinada tubería se rompe, de tal modo que el suministro de agua pueda venir desde otra dirección.

El tener la seguridad de contar con agua suficiente en una emergencia, para combatir los incendios, es imperativo en todas las zonas de alto riesgo, estén o no equipadas con un sistema de abastecimiento de agua. Las plantas industriales importantes y los edificios públicos más vulnerables deben tener en la medida de lo posible, sus propias fuentes de emergencia. En las zonas residenciales el problema puede ser parcialmente solucionado construyendo embalses o depósitos al aire libre; algunas piscinas también pueden ser utilizadas para este objetivo.

El sistema local para suministro de energía debería, cuando fuera posible, estar incorporado a un sistema más amplio a escala regional o nacional. De no ser así, tendría que haber más de una fuente de abastecimiento para el servicio del Sistema.

Las líneas de alta tensión para la energía eléctrica deben seguir un trazado seguro, con una franja de terreno libre, sin construcciones. Es obligatoria la prohibición del cruce de tales líneas sobre los techos de edificios residenciales, establecimientos industriales y áreas de almacenamiento.

Los edificios públicos, hospitales y otros elementos sensibles de la ciudad deberían tener sus propias fuentes de energía eléctrica para emergencias. Las vías principales y caminos de evacuación deben tener sistemas de iluminación de emergencia alimentados por una fuente independiente.

En zonas sísmicamente activas no es recomendable un sistema único de calefacción central para todo un distrito. Cuando sea justificado por otras razones, debe ser ejecutado muy cuidadosamente, utilizando uniones elásticas y un sistema a baja presión, en vez de los sistemas más populares de alta presión.

14.6.6 *Adquisición del terreno*

La disponibilidad pública de terreno, o el control público del mercado de terrenos y del valor de la tierra, es un requisito indispensable para:

El diseño de patrones adecuados de uso de la tierra y la adopción de medidas protectoras para la planificación física.

La implantación bien lograda de los planes.

Los medios y la manera de adquisición del terreno dependen de los sistemas locales sociopolíticos y económicos. Las posibles maneras de adquirir terreno son: La expropiación bajo una reglamentación de emergencia.

La adquisición a precios controlados o del mercado, pagados en bonos o en efectivo, para reventa o alquiler a largo plazo después de que se diseñe un nuevo plan de desarrollo.

La toma para efectos públicos de una determinada parte de toda la tierra disponible, de propiedad particular.

Derechos de pre-compra.

14.7 Nivel de detalle del diseño

A este nivel de planificación de una población, todas las reglas y recomendaciones indicadas en las secciones anteriores son válidas. Además, debido a la naturaleza misma de un plan detallado de inversión, se pueden dar algunas de las directrices relacionadas con la forma de los edificios, el paisaje y el diseño de las calles de acceso.

14.7.1 Reglas básicas

Las reglas fundamentales para el diseño detallado de cualquier componente de estructura urbana son:

Ubicar edificios y otras estructuras de ingeniería en aquellas áreas y en aquellos terrenos que ofrecen el menor riesgo sísmico.

Evitar situaciones en las cuales el derrumbamiento de una estructura puede dañar o paralizar otra estructura o elementos vitales de los sistemas de servicios urbanos.

14.7.2 Forma de los edificios

La primera regla sería que la forma de los edificios fuese lo más sencilla posible y mantener homogeneidad tanto de forma como de diseño estructural. Una forma horizontal apropiada de un edificio puede ser de crucial importancia para su resistencia a un sismo. Esa forma debe ser lo más sencilla posible. Edificios muy largos, edificios en forma de L o en zigzag, alas añadidas al cuerpo principal y patios internos, deben evitarse, ya que pueden provocar la acumulación de fuerzas destructivas en algunos puntos críticos de la estructura. En la dimensión vertical, la regla de simplicidad es tan importante como en la horizontal.

La distancia entre edificios debe ser determinada para evitar el impacto de un edificio sobre otro. Además, debe garantizarse que el espacio libre comprendido entre edificios no quede totalmente cubierto si se desploman las estructuras.

Las salidas de los edificios residenciales y públicos deben facilitar la evacuación en casos de emergencias. Por ejemplo, las salidas de las escaleras en edificios de departamentos deben conducir a ambos lados del edificio. Las salidas únicas hacia patios cerrados o semicerrados deben ser absolutamente evitadas.

14.7.3 Red de calles

Como regla general, el plano de los principales caminos troncales debe ofrecer completa seguridad ante el hecho de que estos caminos queden bloqueados por edificios y otras estructuras colapsadas por inundación accidental, por alambres aéreos que hubiesen caído, por árboles tumbados o por congestión accidental de tráfico.

Los cruces de las principales calles que van a ser usadas para acceso de emergencia y de evacuación pueden ser diseñados siguiendo los siguientes modelos:

- La distancia de los edificios a las vías de tráfico debe ser igual o mayor que la altura de los edificios.
- Se recomienda que haya dos vías de tráfico separadas.
- El ancho de la franja verde entre vías de tráfico debe ser, cuando sea posible, igual o mayor que el de una vía de tráfico, para usarse en caso de emergencia como vía adicional de tráfico, para uso peatonal (evacuación), o como una zona de almacenamiento de emergencia.
- Las tuberías de agua y otros elementos de infraestructura deben ser colocadas debajo de la franja del medio y no debajo de las vías de tráfico.
- Los árboles a lo largo de los caminos principales deben ser plantados a una distancia de las vías de tráfico suficiente para evitar que causen bloqueos en caso de que caigan.

14.8 Comentarios finales

Es, por supuesto, impracticable o incluso imposible informar acerca de todas las medidas potenciales a ser incorporadas en los planes de desarrollo físico dentro de las limitaciones impuestas a este trabajo. El texto incluye, por lo tanto, sólo una selección de tales medidas, dando énfasis a ejemplos relativos a diferentes campos de acción, pero sin un tratamiento exhaustivo de los temas o sin entrar en una presentación técnica detallada de planes, normas y patrones. Esto requeriría un trabajo adicional y no puede ser generalizado fácilmente. Aquellos variarán de un lugar a otro y de uno a otro caso, según las condiciones naturales locales y las impuestas por el hombre, es decir: estructuras geológicas y tectónicas, nivel de desarrollo económico y tecnológico, sistemas sociales y políticos, etc.

Las conclusiones más generales y fundamentales son:

- Que no es factible diseñar una ciudad completamente a prueba de desastres cuando la ubicación es mala. Por lo tanto, la selección del sitio es la primera medida decisiva.
- Que en muchos países será imposible abandonar totalmente aquellas zonas propensas a terremotos. Por lo tanto, es de importancia primordial seleccionar los lugares menos peligrosos entre los disponibles y desarrollar medidas para prevención de desastres.
- Que cuando se planifiquen patrones de desarrollo físico de cualquier asentamiento humano, uno de los pasos iniciales más importantes será la evaluación de las condiciones existentes, tectónicas, geológicas y del subsuelo, a efectos de definir zonas de distintos niveles de riesgo. Esta información proporcionará las guías fundamentales para planificar el uso de la tierra, para la selección de emplazamientos y para la ubicación de edificios y otras estructuras.
- Que la mayoría de las medidas de planificación pueden ayudar a disminuir las consecuencias de un fenómeno natural, pero no pueden evitarlas. Ellas podrán ayudar a limitar el ámbito de una catástrofe y facilitar todas las acciones necesarias de emergencia, ayudando así a salvaguardar la vida humana.

La tarea de orquestar y guiar el desarrollo de una red nacional de asentamientos o de una sola ciudad es mucho más amplia y más compleja que las responsabilidades

y la competencia de un solo planificador. Exige un amplio sentido social y político y una gran responsabilidad. La condición indispensable para cualquier planificación física significativa y para cualquier adopción acertada de medidas protectoras contra desastres sísmicos potenciales es, por lo tanto, que las autoridades nacionales y locales, políticas y administrativas se percaten del reto que se les plantea.

15 Implicaciones sociales y administrativas: protección, socorro y rehabilitación

Por JEAN DOUARD

15.1 Los efectos de los terremotos

La Tierra siempre ha sido, y es todavía, el escenario de fenómenos físicos cuya fuerza, magnitud o duración pueden ser desastrosos. Durante miles de años el hombre fue aterrorizado por estos fenómenos, de los cuales frecuentemente él era una víctima indefensa y acerca de los cuales no entendía ni el origen ni la causa. Los veía sólo como una expresión de la furia de misteriosos poderes superiores. El desarrollo acelerado de la ciencia y la proliferación de aplicaciones industriales de los descubrimientos científicos han permitido al hombre descubrir los orígenes y las causas de estas catástrofes, entender sus efectos y evitar, o por lo menos atenuar, sus consecuencias previsibles. Al mismo tiempo, sin embargo, el desarrollo industrial ha llevado a una ampliación y agravación de sus consecuencias al crear nuevos riesgos de creciente gravedad que todavía son difíciles de controlar y dominar.

Los sismos catastróficos tienen consecuencias directas e indirectas. Directamente matan y hieren, destruyen viviendas, instituciones, oficinas públicas, establecimientos industriales y comerciales, destruyen los servicios públicos esenciales, tales como las redes de agua, gas y electricidad, destruyen puentes, carreteras y represas, destruyen los medios de comunicación, tales como el teléfono, el telégrafo, la radio. Indirectamente conducen a condiciones insalubres que podrían llevarnos a epidemias serias, mientras que al destruir determinadas actividades industriales, también pueden causar el escape de sustancias peligrosas al suelo, a la atmósfera o al agua, dando lugar a la contaminación y al riesgo de envenenamiento.

Un sismo es el único fenómeno catastrófico natural que contiene todos estos efectos y consecuencias por sí mismo.

Los terremotos también pueden tener efectos secundarios tales como deslizamientos, que pueden crear presas temporales que luego ceden y dan lugar a súbitas inundaciones, causando grandes pérdidas de vidas, y tsunamis, que se propagan cientos o miles de millas desde el epicentro del evento sísmico. Además de la destrucción directa de la vida humana y de la propiedad, las epidemias, la contaminación y los incendios son algunas de las consecuencias indirectas. Mediante la

previsión, las medidas preventivas y la organización racional del socorro para salvar vidas humanas, podemos ahora, hasta cierto punto, defendernos y proteger el medio ambiente que rodea al hombre y sus medios de subsistencia.

Pocos países pueden afirmar que están realmente a salvo de catástrofes sísmicas, aunque algunas zonas están más expuestas a ellas que otras. Es tarea de los gobiernos de los países situados en estas zonas preparar una organización eficiente de ayuda, que sea constantemente operativa y que pueda ser inmediatamente movilizada. Esto no quiere decir que exista una respuesta absoluta, válida para todos los países. Sin embargo, hay ciertos principios sobre la base de los cuales pueden obtenerse resultados notables si son adaptados a una situación particular. No es por lo tanto cuestión de imponer una panacea universal, que no existe, sino de indicar lo que parece ser la mejor solución que puede adoptar un país a la luz de sus circunstancias particulares, geográficas, políticas, administrativas y financieras.

15.2. Responsabilidades de las autoridades públicas

Cualesquiera que sean sus principios constitucionales o su forma de gobierno, toda nación ha confiado la función ejecutiva a un conjunto de servicios, a personas que representan y ejercen la autoridad. Estas autoridades públicas, en nombre de la nación, asumen responsabilidades morales, políticas y económicas sobre los individuos que la constituyen, como también sobre las comunidades públicas o privadas. Estas responsabilidades se ven claramente en el caso de un desastre, aun cuando éste sea de ámbito local y sus efectos calamitosos afecten sólo a una pequeña parte de la nación.

La idea de un desastre nacional, que ponga en juego todos los recursos del país a beneficio de parte de sus miembros, fue reconocida, con todas sus implicaciones, hace sólo unas pocas décadas. Hoy día la solidaridad nacional (e internacional) no es meramente una expresión de la caridad individual, sino la caridad elevada a un nivel superior y, por lo tanto, transformada. Además, por deseable que sea desde el punto de vista de los valores éticos de nuestra civilización que la solidaridad permanezca involucrada en la caridad, no se puede negar que las consideraciones de interés tanto individual como colectivo refuerzan el concepto de ayuda mutua sin consideraciones de diferencias raciales, políticas o religiosas.

Los terremotos, que están entre los más serios de todos los desastres que pueden afectar a la humanidad, involucran profundamente la responsabilidad de las autoridades públicas. Debido a su diversidad y a su extensión, los desastres causados por sismos frecuentemente son de tal magnitud como para que el grupo social afectado por ellos sea incapaz de ayudarse a sí mismo con sus propios recursos, generalmente destruidos, disminuidos o que han quedado inoperantes. Lo súbito de un sismo y el efecto estupefaciente sobre las víctimas exige la improvisación de ayuda, más que en el caso de cualquier otro tipo de desastre. Es, por lo tanto, tarea de las autoridades públicas prever la posibilidad de sismos y, en el caso de un desastre, salvaguardar vidas y la propiedad en la medida de lo posible y, después, asegurar al máximo un pronto retorno a la vida normal en las regiones afectadas.

PREVER significa tratar de conocer lo que pueda suceder o lo que probablemente ha de suceder. Consiste, en primer lugar, en buscar las causas primarias,

analizarlas, identificarlas y estudiarlas, para conocer las señales premonitoras de un evento y para poder determinar con la máxima certeza dónde existe el peligro y su inminencia. A pesar de las dificultades encontradas, en las décadas recientes se han logrado apreciables progresos en el conocimiento de las causas primarias de los terremotos.

La previsión será incompleta e inadecuada si no toma en consideración los efectos que un sismo puede causar en cualquier zona en particular, dadas sus características —topografía, hidrografía, población, vivienda, plantas industriales, obras de ingeniería civil, etc.: El no encontrarse preparado puede tener consecuencias trágicas. Cuanto más completa y precisa sea la evaluación, tanto más fácil será la tarea para las autoridades responsables de la protección y seguridad de la población.

Como parte de la tarea de las autoridades públicas de prever y predecir, la noción complementaria que supone la ACCIÓN PREVENTIVA actualmente está adquiriendo una importancia creciente. La prevención es mejor y menos costosa que la acción reparadora. Sólo en las décadas recientes se ha dado crédito a la idea de que las consecuencias calamitosas de los terremotos pueden ser evitadas.

Sin embargo, no todos los edificios ni todas las obras de ingeniería están construidas para resistir los eventos sísmicos. No todas las regiones en las cuales es más probable que se produzcan terremotos están provistas de una infraestructura de enlaces y comunicaciones o poseen servicios de socorro capaces de operar en todas las circunstancias. Es tarea de los funcionarios públicos tomar las medidas apropiadas para limitar o reducir los efectos de los sismos antes de que éstos se produzcan. Tales medidas en su mayor parte no entran en el contexto de este artículo, pero es aconsejable referirnos a ellas, aunque sólo sea para dar énfasis a la complejidad del problema sísmico.

SALVAGUARDAR las vidas humanas y las condiciones materiales que permitan a los seres humanos subsistir y desarrollarse es el objetivo final, pero hasta que esto se logre los terremotos siempre causarán víctimas y destrucción de la propiedad. Por lo tanto, es tarea de las autoridades organizar el rescate y la ayuda para salvar vidas que estén en peligro y salvar de la destrucción total la propiedad amenazada. El socorro en el caso de un desastre, particularmente de un terremoto, no es enteramente efectivo a no ser que sea inmediato y a no ser que haya suficientes personas calificadas con conocimiento técnico, competencia para actuar y entrenamiento individual y como grupo para proporcionar esta ayuda, y que exista suficiente equipamiento, adecuado a las necesidades y a las condiciones del terreno. La coordinación de las operaciones es una regla de acción básica a ser observada si es que ha de hacerse el mejor uso del personal y del equipo. Esta coordinación debe entrar en juego tanto dentro de cada grupo como entre grupos, siendo especialmente necesaria si la zona afectada es muy extensa, si el número de víctimas es muy alto y si el daño es muy serio y variado. Por ejemplo, la búsqueda de víctimas del terremoto en las ruinas requiere de estrecha coordinación entre los grupos de búsqueda y los grupos responsables para liberar las víctimas, los grupos de primeros auxilios y los grupos responsables para llevar a las víctimas a las instalaciones médicas o centros hospitalarios para tratamiento médico o quirúrgico, según sea el caso.

Sin embargo, no todas las víctimas de terremotos están afectadas físicamente. También están los que se han quedado sin vivienda. Físicamente ilesos, sin embargo necesitan apoyo moral, tanto como ayuda material. En la mayoría de los casos son incapaces de encarar la situación rápidamente. Tienen que ser agrupados, conforta-

dos y consolados. Hay que reunir a las familias, buscar a los desaparecidos, organizar centros de descanso y de albergue temporal. En la medida de lo posible, todos los que estén capacitados físicamente deben ser incluidos en grupos de voluntarios para distraer sus mentes de ansiedades y dolencias propias.

Estas ansiedades son compartidas por una gran parte de la población de un país afectado, incluso por los que están fuera de la zona devastada. Tarea de las autoridades es dar información objetiva, clara y precisa acerca de la situación real, por medio de anuncios oficiales y conferencias de prensa en forma regular. La libertad de prensa es considerada de forma generalizada como una de las libertades fundamentales; sin embargo, debe admitirse que frecuentemente se abusa de esta libertad, dando lugar a informaciones distorsionadas, inexactas y perturbadoras que, al alterar la opinión pública, debilitan la confianza del país en las autoridades responsables del socorro e impiden las propias operaciones de ayuda.

Prever y salvaguardar no es suficiente. Las autoridades también tienen que asumir la responsabilidad de restablecer la normalidad. Eso quiere decir no sólo la RECONSTRUCCIÓN de edificios, carreteras, obras de ingeniería, sino también la RECONSTITUCIÓN de las condiciones de vida en las zonas devastadas, y al mismo tiempo aprovechar las circunstancias para mejorar la situación previa, aplicando medidas protectoras para el caso de otros sismos y permitiendo que las familias sin vivienda puedan volverse a instalar en otras en condiciones más seguras, más fáciles y más confortables.

Mientras que las autoridades gubernamentales ahora reconocen la mayor amplitud de sus responsabilidades por lo que se refiere a la PREVISIÓN y a la SALVAGUARDA, algunas todavía son reticentes por lo que se refiere a la RECONSTRUCCIÓN. Tienen que hacerse esfuerzos y sufragarse los gastos de quienes han quedado sin hogar y de las víctimas, que en la medida de lo posible deberán ser compensados por sus pérdidas y sufrimientos. El desastre no debe ser motivo de provecho para ellos, ni tampoco causarles una disminución de su nivel de vida, sólo es justo pedirles que contribuyan material y económicamente al trabajo de la reconstrucción. Por otro lado, sería inadmisibles recargarles su propiedad reconstituida con hipotecas que les produzcan una carga demasiado grande o que sean de una duración excesiva. La forma en la que la ayuda de las autoridades debe materializarse no puede ser expresada en una fórmula que cubra todos los aspectos legales o matemáticos. Cada sismo crea casos específicos que requieren un estudio individual y un tratamiento especial. El objetivo debe ser restablecer finalmente para todos el mismo nivel económico y social que tuvieron antes de que se produjera el desastre.

En resumen, tanto si se trata de la predicción de terremotos, de tomar medidas contra sus efectos, de limitar o reducir sus consecuencias, de organizar la ayuda para salvar el mayor número de vidas y de propiedad que sea posible, como de ayudar a que las cosas regresen a la normalidad lo más rápidamente y mejor posible, las autoridades tienen una creciente responsabilidad en asumir los problemas morales, materiales y financieros. En la mayoría de los estados, la autoridad es delegada a varios niveles, en los cuales las autoridades locales, provinciales y nacionales asumen su parte de la responsabilidad en proporción con su responsabilidad política y sus recursos económicos. Es, por tanto, natural que las obligaciones estén igualmente distribuidas en el caso de un desastre tan catastrófico como un terremoto. La manera en la que las tareas y responsabilidades deben ser compartidas entre las varias autoridades, no puede ser fijada por una fórmula general que cubra todos los

aspectos. Sin embargo, analizando las metas operacionales que deben lograrse es posible llegar a elementos o principios fundamentales que pueden ser adaptados a las situaciones particulares de gobiernos deseosos de cumplir con sus obligaciones en este campo.

15.3 Objetivos operacionales

PREVER, SALVAGUARDAR y RECONSTRUIR son las responsabilidades de las autoridades públicas en un estado amenazado por la eventualidad de un terremoto. Para poder asumir estas responsabilidades y distribuir los deberes y tareas que conllevan de una manera eficiente y equitativa, las autoridades tienen que conocer, en primer lugar, las metas a lograr, y luego desarrollar la maquinaria para la acción operativa.

Una vez que las metas a lograr han sido determinadas, éstas condicionan la estructura del servicio operacional a ser usado por las autoridades. Es a la luz de estas metas que cabe fijar los poderes legales vertidos en este servicio y los medios que deben ser puestos a su disposición. En base a la experiencia adquirida en muchos países, desde quienes todavía están en una etapa de improvisación tardía hasta los que tienen una organización altamente perfeccionada para socorro, pueden determinarse tres metas operacionales esenciales, que corresponden a las tres responsabilidades fundamentales —PROTEGER, ALERTAR y AYUDAR.

15.3.1 *Protección*

Esta meta es muy amplia, ya que cubre los conceptos de la previsión y la acción preventiva. En lo que se refiere a terremotos, el primer paso para proteger a la población es estimar el riesgo. Esto supone llevar a cabo una investigación teórica y práctica con miras a identificar las grandes zonas en las cuales ocurren sistemáticamente los sismos y, dentro de estas zonas, identificar las regiones más amenazadas, y si fuera posible, eventualmente, predecir el lugar, la hora y la intensidad de un determinado evento sísmico. Tal conocimiento es esencial si es que la población expuesta a ese riesgo ha de estar alertada. La medida protectora más importante consiste en llevar a cabo estudios técnicos de métodos para la construcción de edificios y otras obras de ingeniería resistentes a los sismos. La protección de la población implica además la aplicación de medidas en áreas amenazadas, tales como el corte de la corriente eléctrica, el cierre del suministro de gas y agua, la evacuación de edificios que son inseguros y el reunir a la población en sectores previamente seleccionados que parezcan seguros. Estas medidas, si han de ser efectivas, deben ser tomadas tan pronto como se pueda dar una alerta.

15.3.2 *Alerta*

El poder predecir un temblor, aun con muy poca anticipación, podría significar la salvación de muchas vidas, pero tiene que admitirse que los adelantos en este sentido hasta ahora todavía no han dado resultados concretos. Es, por lo tanto,

deseable que los servicios a los cuales se les ha confiado la protección de la población se mantengan al tanto de los adelantos logrados en este sentido, de tal manera que puedan estar listos para que cualquier nuevo descubrimiento pueda ser aprovechado.

En las condiciones actuales, debido a lo inadecuado de la predicción y de las medidas de protección, los terremotos siempre causarán pérdidas de vidas y de propiedades, y siempre podrá haber una secuela desastrosa de incendios, inundaciones, contaminación del aire, agua y suelo, etc. Por lo tanto, la principal preocupación de los servicios responsables para la protección de la población será la organización del socorro.

15.3.3 *Socorro*

El socorro, en el caso de un terremoto, significa primero tratar de salvar las vidas que se encuentran en peligro, y luego proporcionar a los sobrevivientes medios de subsistencia hasta que se estabilicen las condiciones.

Salvar vidas en peligro implica recoger a los heridos, tanto a los que pueden moverse como a los que no lo pueden hacer, dándoles primeros auxilios y dirigiéndolos o transportándolos a unidades médicas móviles, donde médicos especialmente cualificados para este tipo de trabajo puedan tratarlos de acuerdo con la seriedad de sus heridas y luego, si es necesario, evacuarlos, después de los primeros auxilios a sus heridas, a hospitales equipados para un tratamiento completo, médico y quirúrgico. Al mismo tiempo, las personas enterradas en las ruinas tienen que ser encontradas y rescatadas. Los supervivientes tienen que ser tratados de la misma manera que los heridos que se encuentran fuera de las ruinas. Los cuerpos de los muertos deben ser reunidos en zonas preparadas para este fin, con todos los artículos o indicaciones que puedan ayudar a su identificación. Simultáneamente, hay que organizar centros de descanso para recibir a los supervivientes ilesos, para reunificar familias, para servir comida y bebida, para proveer de comodidades para el descanso y para empadronar hombres, mujeres y adolescentes que estén en condiciones de participar en las operaciones de socorro o en la administración de los centros de descanso. Tan pronto como sea posible, hay que habilitar centros temporales de alojamiento, para que quienes carecen de viviendas puedan organizar su vida diaria —comidas, cama, servicios higiénicos, etc.

Durante los primeros días estos centros serán por supuesto rudimentarios, pero gradualmente pueden mejorarse, sea organizando viviendas temporales, como tiendas de campaña, casas portátiles, o por la transferencia de quienes carecen de vivienda a otras zonas que no han sido afectadas por el desastre.

Pasará mucho tiempo antes de que la situación vuelva a ser normal. Durante el periodo de transición, sin embargo, deben estar al alcance de quienes han quedado sin casa unas condiciones aceptables de vida. La distribución de comidas en los centros de descanso y en los centros de alojamiento temporal debe, lo más pronto posible, ser sustituida por la distribución de equipamiento y comodidades que permitan a los que han quedado sin vivienda preparar sus propias comidas. Gradualmente, las personas deberán aprovechar sus propias posibilidades para satisfacer sus necesidades, su manera, hasta el momento en que se les pueda ofrecer un empleo remunerado, de acuerdo con sus habilidades.

Hay muchas maneras posibles de lograr estas metas, maneras que han sido ensayadas en distintos países. La función del servicio que se ha confiado, con la responsabilidad total para este trabajo, puede ser concebida sea de manera relativamente amplia o de manera restringida. En cualquier caso, y sea cual sea la estructura política y administrativa del Estado, tiene que respetarse el principio fundamental de que se requiere una organización operacional planificada. Para proteger a una población contra peligros sísmicos, la improvisación en la escena de las operaciones tiene pocas probabilidades de conducir a una acción efectiva. Las autoridades públicas, completamente conscientes de sus responsabilidades, deben actuar de manera estudiada cuidadosamente, en base a una política lógicamente construida que, sin que se piense que sea definitiva, debe ser aplicada y desarrollada por un servicio especial con recursos financieros adecuados, personal cualificado, y equipamiento apropiado para sus necesidades. No debe de olvidarse, sin embargo, que para sacar provecho de la experiencia operacional, de los adelantos científicos y de los cambios en las condiciones de vida y el medio ambiente, la política básica debe evolucionar continuamente para poder seguir siendo eficaz.

15.4 Acción de las autoridades públicas

Para proteger a la población contra desastres, particularmente terremotos, el primer paso de las autoridades públicas bien podría ser establecer el servicio que tendrá la tarea de proporcionar tal protección, en representación de aquellas y bajo su cabal responsabilidad. A este servicio lo llamaremos, por conveniencia, Servicio de Protección Civil. La necesidad de establecer este tipo de servicio es un principio fundamental reconocido y aplicado por casi todos los Estados.

La organización de un servicio especializado de este tipo puede, sin embargo, ser concebida de acuerdo con diferentes principios rectores y dentro de diferentes estructuras administrativas. La elección es una decisión de las autoridades públicas, tomada a la luz de su política general, de las exigencias constitucionales y de las estructuras administrativas. Con todo y con eso el número de posibilidades es limitado. Cada una de ellas tiene sus ventajas y sus desventajas.

15.4.1 *Alternativa 1*

La protección de la población es confiada a un ministerio funcional especial. Ésta es una opción que se ofrece a los funcionarios públicos que son conscientes de sus responsabilidades en un mundo en el cual los peligros que provienen de la industria humana y de su progreso son más numerosos, más variados y más serios, y también en países donde tales peligros se combinan con los que implican los frecuentes desastres naturales o las tensiones internacionales persistentes. Esta alternativa permite que el «Ministro para Protección Civil» tenga amplias funciones administrativas y operacionales, extensos poderes para emitir directrices y medios legales, financieros y operacionales acordes con la importancia de sus funciones. Sobre todo, esto asegura que el Servicio de Protección Civil tenga gran libertad de acción y sea completamente independiente, pues este ministro está al mismo nivel que

otros ministros y trata con ellos de igual a igual. Por otro lado, es una solución costosa, y absorbe a un gran número de personas.

15.4.2 *Alternativa 2*

El Servicio de Protección Civil se crea como un secretariado o subsecretariado de Estado de acuerdo con la importancia que se le asigne. En cualquiera de los casos está adscrito a la oficina del primer ministro o a un ministerio.

Si está adscrito a la oficina del primer ministro, el Servicio de Protección Civil retiene algunas de las ventajas que tendría si fuese un ministerio. Su libertad de acción está limitada tal vez por la necesidad de obtener la aprobación del primer ministro, por lo menos en el caso de decisiones importantes. Por otro lado, tal aprobación, en principio, le confiere poder ejecutivo y da a sus decisiones una autoridad que reduce las posibles objeciones o protestas por parte de los servicios ministeriales.

Si el Servicio está adscrito a un ministerio, la pregunta es ¿a qué ministerio? Podría ser uno de los ministerios funcionales que tendrían participación en su trabajo: Obras Públicas o Equipamientos, Salud Pública o Bienestar Social, Construcción o Ambiente, Economía o Finanzas. Todas estas alternativas pueden ser justificadas, pero en cada caso el Servicio de Protección Civil corre el riesgo de ver que sus funciones esenciales queden subordinadas a las funciones técnicas del ministerio en cuestión. Los servicios de este último probablemente tenderían a demostrar un interés marcado en éstos, y a darles prioridad, asignando fondos o ambientes de trabajo, o personal, o servicios de transporte. Por otro lado, el Servicio de Protección Civil puede estar adscrito a un Ministerio de Defensa o al Ministerio del Interior.

Ubicar el Servicio de Protección Civil en el Ministerio de Defensa lógicamente conlleva hacerlo responsable de la protección de la población bajo toda circunstancia, sea en el caso de desastres debidos a causas naturales o por actividad humana, o en el caso de desastres relacionados con conflictos internacionales. Una asociación íntima con el Ministerio de Defensa significa que el Servicio de Protección Civil podría, en el proceso de prepararse para su función durante época de guerra, tener facilidades que serían útiles para su función en época de paz. Obtendrá más fácilmente la ayuda de los militares, incluyendo un cuerpo disciplinado bien dirigido y los servicios especializados entrenados para operaciones de campo bajo condiciones que se asemejan a las operaciones militares.

Esto por supuesto tiene una desventaja —el peligro de que el Servicio de Protección Civil quede demasiado integrado en las fuerzas armadas. Además, la Protección Civil es un servicio difícil, constantemente en evolución, que necesita ser modernizado regular y frecuentemente. Un conocimiento de cómo funciona y de sus procedimientos, así como de las personas que trabajan en él a distintos niveles, exige una cierta estabilidad en lo que se refiere a su personal clave. Las obligaciones o servidumbres a las que están sujetos los oficiales militares son incompatibles con tal estabilidad y, por lo tanto, con un funcionamiento eficiente de un servicio de Protección Civil.

El asignar este servicio al Ministerio del Interior tiene la ventaja de colocar al secretariado de Estado directamente bajo el ministerio ante el cual los representan-

tes del gobierno en las principales divisiones administrativas son responsables, aquél que da apoyo y guía a las comunidades locales, y que generalmente tiene toda la policía a sus órdenes. Los servicios de este ministerio también están acostumbrados a preparar leyes y reglamentos públicos, que el Servicio de Protección Civil necesitaría para legalizar la realización de sus tareas —requisas e indemnizaciones en particular.

La principal desventaja de esta solución es el peligro de que el Servicio de Protección Civil sea politizado, con las resultantes influencias y presiones que pueden impedir y hasta interferir en el funcionamiento eficiente y la organización del socorro, y crear desigualdades con respecto a protección, por razones que puedan no ser de importancia principal.

15.4.3 *Alternativa 3*

El Servicio de Protección Civil forma parte integral de un Ministerio como una Dirección General, Dirección, División o Servicio, según la importancia que se le dé.

Si se adopta esta alternativa, los argumentos aparentemente predominantes son los de que el Ministerio elegido sea el del Interior. Es en ese Ministerio donde el Servicio de Protección Civil será el más independiente y eficaz, además de tener la autoridad y libertad de acción necesarias para llevar a cabo sus responsabilidades, particularmente para obtener la cooperación de otros ministerios o de servicios importantes públicos, semipúblicos o privados y para coordinar la participación en las operaciones de ayuda de todos los medios de intervención obtenidos.

15.5 **La organización de la protección civil**

15.5.1 *Estructura administrativa*

El Servicio de Protección Civil es un cuerpo responsable de la protección general de la población contra los efectos y las consecuencias de desastres naturales o desastres que resulten de las actividades científicas, industriales y económicas del hombre.

La experiencia adquirida por varias naciones que ya tienen servicios coherentes para la Protección Civil y por grandes asociaciones de carácter mundial, tales como la Cruz Roja Internacional, demuestran que la maquinaria de protección civil debe consistir en una sede central nacional y oficinas descentralizadas en las distintas provincias, distritos y otras divisiones territoriales. Estos servicios deben ser establecidos con bases permanentes.

La dirección de la sede nacional debe ser confiada a un jefe seleccionado por su competencia, experiencia, autoridad, habilidad organizativa y capacidad de negociación.

Las atribuciones de la sede nacional deben ser compartidas por un número de sectores administrativos, tres de los cuales son esenciales:

1. Acción preventiva.
2. Reconstrucción.
3. Operaciones.

La importancia dada a cada uno de estos sectores varía, según que las funciones del Servicio de Protección Civil se conciben de manera amplia o restringida.

15.5.1.1 Acción preventiva

El sector de acción preventiva, concebido en términos amplios, puede estar encargado de la investigación y los estudios sismológicos, con todas las implicaciones que tales estudios tienen para la construcción de edificios y obras de ingeniería, la localización de asentamientos humanos y otras medidas preventivas. En este caso, se debe reservar una sección para cada categoría de estudios y de investigación.

Si la Protección Civil se concibe en forma restringida, tales estudios e investigaciones están en manos de cuerpos técnicos externos y el sector de acción preventiva requiere únicamente de algunos especialistas cualificados que deben mantener el enlace con dichos cuerpos, mantenerse informados de sus trabajos y hacer uso de la información obtenida para que la aprovechen otros sectores del servicio central.

Si los estudios y la investigación básica no son incluidos en las funciones del Servicio de Protección Civil, por lo menos se podrá seguir y hacer uso del trabajo realizado por los servicios técnicos.

La acción preventiva no exige solamente medidas técnicas. En cada caso conlleva disposiciones y/o regulaciones legislativas. Parece lógico confiar al Servicio de Protección Civil el estudio y la elaboración de tales textos. Esta tarea será incorporada al sector de acción preventiva, garantizando la organización de un servicio especial de expertos en leyes. Claramente estos expertos en leyes trabajarán en colaboración íntima con los técnicos, pero también con el sector de operaciones, que está vitalmente comprometido y mejor calificado que cualquier otro para evaluar el valor práctico de las medidas contempladas.

También es el sector de acción preventiva el que redactará los diversos tipos de documentos —folletos, panfletos, películas o grabaciones— diseñados para autoridades municipales y locales o para el público, para informarles acerca de riesgos posibles, de los pasos que deben darse para reducir las consecuencias de sismos desastrosos, de las precauciones a tomarse para evitar el peligro cuando éste surja y de los primeros auxilios que se deben proporcionar a los heridos.

15.5.1.2 Reconstrucción

El sector de reconstrucción, si es que se concibe la Protección Civil en términos amplios, toma la responsabilidad de todas las medidas y actividades que permitan que la población retorne a condiciones normales en las regiones afectadas. Estas medidas y actividades se llevan a cabo en tres etapas —provisional, de transición y definitiva. Durante la primera de estas etapas no puede negarse la competencia del Servicio de Protección Civil, pero es menos evidente en las otras dos. ¿Corresponde al Servicio de Protección Civil la construcción o la habilitación de viviendas temporales, determinar cómo las viviendas destruidas han de ser reconstruidas, decidir si es o no es conveniente reconstruir en un lugar menos vulnerable, discutir estos problemas con las personas afectadas, determinar los procedimientos para otorgar préstamos, subsidios y adelantos, y fijar las cantidades? ¿Es realmente tarea

suya, si no el restaurar las redes de comunicaciones y abastecimientos de gas, agua y electricidad, por lo menos supervisar o coordinar este trabajo? Aunque se pueden esgrimir argumentos en favor de ambas posiciones, uno no puede dejar de sentir que es preciso dar un toque de atención sobre las consecuencias de asignar demasiadas responsabilidades al Servicio de Protección Civil —responsabilidades que normalmente recaen en servicios ya existentes que están perfectamente calificados y mejor equipados que aquél para poder afrontar situaciones excepcionales.

Parece, por lo tanto, prudente, cuando se diseña la estructura organizativa de un Servicio de Protección Civil nacional, limitar la competencia del sector de reconstrucción a las medidas de socorro que deben ser tomadas durante la primera etapa de la reconstrucción: la organización de centros de descanso y centros de alojamiento temporal, la distribución de alimentos y de fondos en efectivo para emergencias, el transporte de familias que están siendo alojadas por parientes o amigos, dar a los supervivientes los medios para recuperar de las ruinas de sus casas muebles, ropa de cama, vestimenta y otros bienes familiares o individuales que puedan encontrar, la organización de depósitos de cadáveres donde puedan ser reunidos los cuerpos con miras a ser identificados y sepultados, o trasladados de acuerdo con los deseos de sus familias, la organización de centros para la búsqueda de personas desaparecidas, etc. Aunque el sector de reconstrucción puede participar perfectamente en las otras etapas del retorno a la normalidad, no es deseable, a no ser que el Servicio de Protección Civil sea injustificadamente grande, dar a este sector las funciones o tareas que son responsabilidad de todo el Servicio.

15.5.1.3 Operaciones

El sector de operaciones cumple la verdadera misión de un Servicio de Protección Civil, la que siempre tendrá, aun cuando la acción preventiva y la reconstrucción sean puestos total o parcialmente en otras manos.

El sector de la sede central que es responsable de esta misión debe ser, por lo tanto, el mayor y debe tener departamentos que correspondan a cada una de sus funciones principales. Aparentemente estas funciones se pueden subdividir así:

La primera función es el estudio, diseño y distribución de textos legislativos y administrativos (leyes, reglamentos, decretos, órdenes, instrucciones, cartas circulares) en base a los cuales se puedan preparar los planes para la organización de la ayuda en las divisiones territoriales a distintos niveles.

El entrenamiento del personal de mayor o menor experiencia que tendrá que hacer efectivos estos planes es una segunda función del Servicio de Protección Civil, que exige el establecimiento de un departamento en el sector operaciones de la sede nacional.

Toda instrucción debe ser dada a través de manuales, para asegurarse de que sea uniforme. La preparación de estos manuales debe ser confiada a un comité de redacción que tenga un representante cualificado del departamento de «instrucción» del sector operaciones y tres o cuatro expertos competentes, seleccionados entre el personal ejecutivo que tenga considerable experiencia de campo. En base a estos manuales, debe darse entrenamiento a los maestros (personas que tengan posiciones de autoridad o de mando, que darán la instrucción teórica), a los instructores (personal no supervisor que pondrá a prueba por medio de ejercicios prácticos

el conocimiento teórico y las habilidades físicas de los alumnos), y finalmente a las personas que en realidad estarán haciendo el trabajo.

La tercera función del sector operaciones es la búsqueda, el estudio y la selección del equipo requerido por los grupos operacionales. Esto implica establecer un departamento de «equipamiento» en dicho sector.

La importancia de estas actividades técnicas frecuentemente es subestimada. Sin embargo son vitales desde el punto de vista de la calidad del equipo, para que sea tan sencillo y efectivo como sea posible y también para lograr el menor precio —un factor que no debe menospreciarse. Las actividades técnicas son las que permitirán la homologación de varios tipos de equipamiento, el establecer especificaciones para los fabricantes en cuanto a dimensiones, capacidad, peso, accesorios internos o externos, suministro de energía, etc. Fijar estas normas es generalmente tarea de un comité de técnicos y usuarios competentes y experimentados, seleccionados por el jefe del sector operaciones. Los miembros de este comité pueden proceder de servicios públicos o de empresas privadas.

15.5.2 *Estructura de la zona*

La distribución geográfica y la ubicación de las oficinas de zona merecen una atención muy cuidadosa. No puede recomendarse ninguna estructura definida, ya que la configuración geográfica y la administración territorial de cada país difieren, siendo necesarios arreglos especiales. Parece posible, sin embargo, dar algunos principios rectores que pueden ser adaptados a las situaciones nacionales particulares.

La sede nacional y las oficinas de zona deben estar establecidas en las mismas poblaciones donde se encuentran las autoridades públicas con las cuales el Servicio de Protección Civil tiene que trabajar. Sin embargo, es una medida inteligente evitar el centro de la población o un camino con tráfico pesado, de tal modo que estos servicios operacionales tengan la mayor libertad de movimiento posible en todo momento. Los locales en los cuales se ubican estas oficinas deben ser en lo posible construidos para resistir los movimientos sísmicos. La selección de sitio ha de dictarla la necesidad de que se mantenga permanentemente en funcionamiento pese a todas las circunstancias. Todos los medios de comunicación deben estar disponibles —teléfono, telégrafo, télex, radio.

Los centros de socorro deben estar distribuidos por todo el territorio nacional de tal manera que no quede ninguna parte de la población sin ayuda.

Centros de socorro inicial tienen que instalarse a petición de las autoridades locales o municipales en los pueblos más pequeños. Obviamente, las comunidades pequeñas aisladas, que son de difícil acceso, o las comunidades en cuyo territorio existe algún peligro especial y que por lo tanto son más vulnerables, deben ser las primeras en contar con estos centros de socorro inicial.

Los centros secundarios que, en una emergencia, cubren las parroquias o municipios sin centro de socorro inicial, pero que también apoyan a los centros iniciales si es que se les pide, deben estar ubicados de tal manera que puedan llegar a la escena de operaciones en un lapso de 15 minutos. Sobre el terreno, esto significa un radio de unos 8 a 20 km, según la facilidad o dificultad de acceso bajo todo tipo de condiciones.

Los centros principales de socorro se instalan en los pueblos principales de la división territorial cubierta por la oficina de área. Tendrán que llegar a la escena de operaciones en menos de media hora, que en términos de distancia sobre el terreno significa un máximo de 25 a 40 km, según la facilidad o dificultad de acceso bajo todo tipo de condiciones; en las ciudades grandes, donde las distancias y las dificultades del tráfico hacen que las operaciones sean más lentas, es prudente proporcionar unidades de avanzada en los distritos principales. Estas unidades sirven como centros iniciales de socorro hasta que llega el refuerzo principal.

15.5.3 *Estructura operacional*

Las labores de rescate, socorro y primeros auxilios a las víctimas, y de alivio para los que no tienen vivienda, constituyen las actividades operacionales específicas del Servicio de Protección Civil.

Las operaciones de campo son el resultado final de una serie de medidas preparatorias que incluyen el entrenamiento de personal, la selección de equipamiento, la constitución de unidades operacionales adecuadamente dirigidas y la adopción de un plan para enviar estas unidades a la acción.

15.5.3.1 Entrenamiento de personal

La primera cuestión consiste en decidir si todo el personal debe recibir el mismo entrenamiento multidisciplinario o si es preferible que se entrene a especialistas. El entrenamiento multidisciplinario es una respuesta económica, pero tal entrenamiento nunca puede ser completo. Si no es de suficiente duración, el conocimiento será sólo superficial. Además, no todos tienen las mismas aptitudes. El entrenamiento multidisciplinario dejará sin desarrollar ciertas aptitudes individuales, y a la vez provocará que ciertas personas se imaginen que son especialistas cuando realmente pueden hacer más daño a todas las personas. Ofrecido en los centros de socorro, rápidamente producirá personal que puede ser utilizado para maniobras sencillas y al mismo tiempo pondrá de manifiesto aptitudes o fomentará intereses especiales que los centros especializados de entrenamiento desarrollarán. El entrenamiento en un tema específico no excluye la posibilidad de entrenamiento en cualquier otro. En verdad, es necesario que el personal más experimentado del Servicio de Protección Civil sea calificado en varios temas. Sin embargo, cada tema debe enseñarse como un curso separado. De ahí la necesidad de que haya centros de estudios especializados.

Para proporcionar entrenamiento básico sólido y para entrenar al personal especializado se necesitan profesores e instructores. El valor del curso depende del nivel de calificación de los maestros e instructores, que deben ser entrenados en centros especiales o por lo menos por medio de cursos específicos en los centros de entrenamiento especializado.

Películas, transparencias y modelos son de un marcado valor educacional para entrenar al personal operacional que ha de trabajar en zonas afectadas por sismos, y también serán útiles para mejorar la organización del socorro en caso de desastre, y para elaborar planes prácticos de las diversas operaciones involucradas en el retorno

a la normalidad, lográndose los mejores resultados mediante la fotografía aérea y la interpretación foto-topográfica de las fotografías obtenidas de esta manera.

Algunas operaciones de rescate o socorro exigen el uso de equipos, productos y técnicas especiales que requieren instrucciones específicas. El entrenamiento de personal especializado frecuentemente requiere mucho tiempo, y es natural que un número considerable de alumnos no estén capacitados y, por consiguiente, sean eliminados del curso. La materia principal de la cual se da instrucción especial, aparte de cómo combatir incendios ordinarios, es el rescate de personas enterradas en las ruinas de edificios o en deslizamientos de tierras. Este aspecto es vital en el caso de un terremoto en el cual distritos enteros, y a veces poblaciones íntegras, son devastadas y quedan personas enterradas, muchas de las cuales están heridas pero otras no han sufrido daño alguno y pueden salvarse si la ayuda llega rápidamente y la labor de rescate es realizada con el debido cuidado. Ha habido personas cuyo rescate se ha producido cuatro, cinco y hasta quince días después de un desastre.

Lo primero es buscar y encontrar a los supervivientes enterrados. Preguntar a las personas que viven en los edificios que se han derrumbado y a los vecinos que pudieron salvarse dará una información inicial acerca del número de personas desaparecidas. La búsqueda puede ser efectuada con perros entrenados o con equipo acústico o electrónico, o con sensores ultra sensibles capaces de detectar el calor de un cuerpo vivo.

Dado que los supervivientes tienen que ser encontrados lo más rápidamente posible, las operaciones de búsqueda y rescate no pueden ser responsabilidad del mismo grupo. Una vez que el equipo de búsqueda ha señalado el lugar donde alguien está enterrado, continúa sus búsquedas en otros lugares, mientras el equipo de rescate entra en acción.

El trabajo de este último consiste en abrirse paso a través de los escombros hasta la víctima sin alterar el equilibrio frecuentemente precario de los escombros, de materiales de construcción, muebles y otros objetos. El equipo de búsqueda debe siempre estar acompañado de un médico, preferiblemente un especialista en reanimación, pues se podría necesitar que él tuviera que administrar primeros auxilios antes de liberar a la víctima, para ayudarla a sobrevivir y a resistir el shock de las maniobras que son necesarias para su rescate. Los equipos sólo utilizan herramientas de mano. Las herramientas automáticas, tales como perforadoras o taladros neumáticos deben ser usadas con gran cuidado, para evitar herir accidentalmente a la persona que estuviese atrapada bajo los escombros.

La coordinación entre equipos de búsqueda y equipos de rescate es esencial, si es que ha de lograrse un silencio absoluto en el lugar, lo cual a veces es necesario para poder detectar sonidos muy tenues o voces de auxilio.

15.5.3.2 Selección del equipo

La efectividad de los equipos de socorro en la escena de un desastre depende principalmente del equipo de que disponen. La selección de equipo para estos grupos, entre los muchos tipos de equipo que frecuentemente existen en el mercado, puede dejarse a los usuarios. Sin embargo, el determinar las categorías del equipo y fijar las normas a ser observadas por los fabricantes es una responsabilidad de la sede nacional. Esta tarea delicada presupone un conocimiento de las necesida-

des de los usuarios y de las condiciones bajo las cuales se usará el equipo. Las decisiones deben ser guiadas, pero no dictadas, por consideraciones financieras, tales como el precio, el costo de la operación, el costo del mantenimiento, la vida útil o factores relacionados con los repuestos. A fin de cuentas, la eficacia operacional debe ser el factor determinante, conjuntamente con las necesidades de los usuarios y las condiciones bajo las cuales se usará el equipo.

La preparación de listas modelo del equipo mínimo necesario para las distintas categorías de centros de socorro y para los tipos más frecuentemente utilizados, y el establecimiento de normas a ser observadas por los proveedores, constructores y fabricantes requieren una amplia experiencia y competencia técnica. Ésta es una responsabilidad que debería ser confiada a grupos de trabajo, presididos por representantes cualificados de la sede nacional del Servicio de Protección Civil y, particularmente, del sector de operaciones. Estos grupos de trabajo deben estar constituidos por representantes de los centros de socorro que utilizarán el equipamiento así como por expertos técnicos nombrados por los fabricantes de modo que los requerimientos de los usuarios y las posibilidades de los productores puedan combinarse de la mejor manera posible.

15.5.3.3* Operaciones en el campo

Los grandes desastres, en particular los terremotos, crean situaciones contra las cuales los centros de socorro no tienen los medios suficientes para afrontarlas. Esto quiere decir que hay que prever la existencia de una organización especial para estas operaciones excepcionales, en base a dos fundamentos esenciales: unidades móviles operacionales y planes para la organización del socorro.

Unidades móviles operacionales

Los deberes asignados a estas unidades presuponen su disponibilidad en todo momento, gran movilidad, personal cualificado y entrenado, equipo potente y considerable autonomía de acción. El tipo de unidad móvil operacional que se asemeja más a estos requerimientos es el de un cuerpo permanente. Cuando los mismos centros de socorro están equipados con profesionales, el entrenamiento de unidades móviles operacionales es meramente un problema de fondos y de suficiente personal. Por costosa que sea esta solución es sin duda la mejor, incluso en el caso de que los centros de socorro sean sólo semiprofesionales, es decir, que cuenten con voluntarios bajo las órdenes de profesionales, pues se mantienen las ventajas de un cuerpo único.

En los países donde el servicio militar es obligatorio, las unidades móviles operacionales pueden estar constituidas fácil y económicamente por reclutas, asignados a esas unidades en vez de a unidades militares. En este caso, los oficiales deben ser permanentes y pertenecer a los centros de socorro.

En todos los casos habrá dificultades de reclutamiento, entrenamiento inicial, entrenamiento regular periódico y movilización. Esta última posibilidad tiene una desventaja seria adicional: reducirá el personal de los centros de socorro justamente cuando estos necesitan de todo su equipo humano y puede significar tener que recurrir a refuerzos que posiblemente estén ocupados en operaciones.

Planes para la organización de socorro

No es suficiente tener centros de socorro y unidades móviles operacionales para considerar que se pueden afrontar todas las situaciones creadas por un desastre sísmico de gran escala. La organización del socorro debe planificarse con anticipación y las operaciones de campo deben coordinarse adecuadamente.

Deben hacerse esfuerzos para operar lo más rápida y eficientemente posible a fin de limitar el número de víctimas y evitar que ocurran mayores daños. La única manera de asegurar una intervención rápida es tener a la gente disponible casi inmediatamente en la escena del desastre o en sus alrededores. Estos equipos de socorro inicial son luego fortalecidos por grupos enviados, primero desde el distrito administrativo principal, luego, desde el nivel territorial superior y finalmente desde el nivel nacional.

A cada nivel debe haber un plan para la organización del socorro. Su valor y su efectividad dependen de su simplicidad y flexibilidad, que a su vez dependen de que se observen tres reglas fundamentales, sacadas de la experiencia con desastres de los más diversos tipos, en países que difieren enormemente en sus estructuras constitucionales y administrativas, costumbres y forma de vida. Estas reglas son:

1. Debe haber un solo comando.
2. Las tareas deben ser asignadas al menor número posible de servicios operacionales.
3. Las personas asignadas a cada uno de estos servicios deben ser idóneas para las tareas respectivas y deben recibir la notificación de sus responsabilidades con anticipación.

El comando único es tan esencial en una organización de socorro como lo es en una organización de defensa militar. Las situaciones creadas por un desastre son demasiado súbitas, demasiado complejas y demasiado fluidas como para que se deje el poder de decisión a un comité o a una comisión. Los grupos colectivos son siempre más lentos, pues tardan en reunirse y en tomar decisiones. Son propensos a interpretar la información disponible de manera diferente y a no estar de acuerdo respecto a la urgencia de la situación, a las verdaderas necesidades y a la naturaleza y magnitud de las fuerzas que deben entrar en acción.

Solamente una persona responsable, un jefe, puede reaccionar rápida y adecuadamente, a la vista de una situación particular, a nuevas situaciones que se originan por las circunstancias cambiantes o a demandas de ayuda que vienen de las unidades ocupadas en operaciones de socorro, demandas que no siempre son justificadas y que deben ser críticamente examinadas por alguien que conozca lo que hace y que no esté sujeto a las presiones dramatizantes, y distorsionadoras del medio ambiente inmediato o de individuos, o muchedumbres asustadas por el impacto del desastre y propensas a ceder al pánico.

A pesar de que la responsabilidad de tomar decisiones ha de ser únicamente del jefe, es obvio que éste necesita asistentes. Ningún jefe puede ser omnisciente, ni puede estar en todas partes al mismo tiempo. El jefe debe, además, saber mantenerse en los límites de sus atribuciones. Podrá considerar necesario atender él mismo una situación particularmente compleja, o avalar con su presencia a un asistente que esté afrontando problemas excepcionales.

Cualquiera que sea la magnitud de un desastre, el director de las operaciones de socorro tiene las responsabilidades siguientes:

Mantenerse informado de la situación y de su evolución, lo cual conlleva la búsqueda y la verificación de información para luego proporcionarla a la autoridad que debe usarla.

Mantener el orden en la zona afectada, de modo que los equipos de socorro tengan completa libertad de acción y de movimiento, evitar el pánico y reprimir el saqueo

Rescatar a las víctimas y administrar primeros auxilios a los heridos, luego, atención médica y, finalmente, evacuarlos a centros hospitalarios.

Afrontar todos los efectos del desastre y tratar de controlarlos, o por lo menos limitar las consecuencias.

Proporcionar alimento y vivienda durante un cierto período a las personas sin hogar que no han sufrido heridas.

Reunir los cuerpos de los muertos, identificarlos y colocarlos en un depósito de cadáveres mientras se espera que tenga lugar el entierro o que sean reclamados por la familia.

Facilitar los medios de transporte para cubrir todas las necesidades.

Llevar a cabo lo más rápidamente posible el trabajo más urgente necesario para restablecer los medios de comunicación y las redes de suministro de agua y electricidad y el sistema sanitario en la zona afectada.

Todas estas tareas imperativas pueden ser divididas en seis servicios como máximo. No es deseable tener un número mayor, como tampoco lo es recargar un solo servicio con demasiadas tareas.

Los seis servicios son:

El Servicio de Enlace-Transmisión.

El Servicio de Policía-Información.

El Servicio de Rescate-Socorro.

El Servicio Médico, al cual son llevados los heridos, por el Servicio de Rescate-Socorro que administra los primeros auxilios.

El Servicio de Bienestar-Alojamiento temporal.

El Servicio de Transporte-Obras Públicas.

Cada servicio está a cargo de un jefe seleccionado por sus cualidades personales, sea del servicio público, de una organización o empresa privada o sobre una base individual.

15.6 Disposiciones legales

La organización de un Servicio de Protección Civil debe tener un fundamento legal sólido. Su estructura y sus operaciones deben basarse en una ley y sus reglamentaciones correspondientes.

La ley expresa el deseo de las autoridades públicas de dar al país una organización de socorro. Los reglamentos son textos que dan efectos ejecutivos y compulsorios a la ley en relación con individuos y cuerpos públicos o privados.

Los reglamentos relacionados con la acción preventiva formularán las medidas que deben ser tomadas en anticipación de los riesgos cuando se construyen edificios (en particular edificios altos) u obras de ingeniería civil —camino, puentes, túneles, presas, sistemas de abastecimiento de gas, agua y electricidad— o cuando se trata de

edificios frecuentados por un gran número de personas, tales como hospitales, colegios, teatros y auditorios, tiendas grandes, almacenes, etc.

Hay un riesgo real de incendio en caso de un sismo destructivo. Esto siempre debe ser previsto y las reglamentaciones preventivas deben ser aplicadas allí donde los riesgos son mayores.

Los edificios muy altos también plantean nuevos problemas para los servicios de socorro y los servicios para combatir incendios, problemas difíciles de solucionar con los medios normalmente disponibles, y que son diseñados para edificios bajos o de mediana altura. Estas dificultades deben ser previstas cuando se construyen esos edificios.

En los edificios frecuentados por el público, el mayor peligro proviene de la presencia de una muchedumbre no organizada y heterogénea, propensa al pánico. La supervisión es difícil, y las salidas normales y de emergencia no son lo suficientemente numerosas y accesibles. La circulación de un lugar a otro es un proceso lento e inconveniente ya en condiciones normales, y resulta aún más difícil durante una emergencia. Hay que establecer reglamentaciones preventivas para remediar la situación en la medida de lo posible, de acuerdo con el tipo de edificio, mejorando el flujo de tráfico y de evacuación, fijando normas para el ancho de los pasadizos, escaleras y salidas de evacuación, proporcionando extintores de incendios que entren en acción automáticamente, etc.

De las plantas industriales peligrosas, en las que ocurren los accidentes más espectaculares son las refinerías de petróleo y los grandes depósitos de hidrocarburos líquidos o licuados.

Cuando ha de construirse una nueva planta de este tipo en una zona sísmica es preferible primero asegurarse de que se ha seleccionado un lugar aislado, bastante retirado de cualquier otra construcción, y prohibir la construcción en una zona cercana a ésta. Las propias instalaciones deben estar sujetas a reglamentaciones estrictas.

Las reglamentaciones relacionadas con la organización del socorro son, si no las más importantes a ser promulgadas, sin duda las más urgentes. El prever o evitar un desastre no ocurre siempre sólo a veces, pero siempre hay que llevar el socorro lo más rápida y efectivamente posible. El contenido de dichas reglamentaciones tiene que ver con la organización de la sede nacional, las responsabilidades exactas de los diferentes niveles de la maquinaria del área con respecto al socorro, los procedimientos para organizar el socorro y la asignación de presupuesto para los gastos de la organización del socorro.

15.7 Conclusiones

Este estudio de la organización del socorro en casos de desastres, con referencia especial a terremotos, que es el tema principal de este capítulo, no pretende ser necesariamente completo ni definitivo, ni servir para todos los propósitos posibles.

Habrá logrado su finalidad si llama la atención acerca de la diversidad y complejidad de los deberes y las tareas que recaen sobre quienes son responsables de la defensa y la protección de la población en zonas propensas a la devastación por terremotos.

El periodo de reconstrucción y de retorno de la población afectada a una vida normal no cae dentro del ámbito de este estudio, pues se sitúa fuera de la fase de emergencia. Las medidas temporales de acomodamiento, si son diseñadas cuidadosamente, proporcionan condiciones aceptables que permiten a la población esperar arreglos transitorios mejorados hasta que se complete todo el trabajo de reconstrucción.

Tampoco se ha intentado estudiar las medidas a tomar para el aprovisionamiento de esta población que espera ser «rehabilitada». Tales medidas pueden ser incorporadas en los planes normales para el aprovisionamiento de la población, con unos cuantos ajustes, que no siempre serán fáciles de hacer pero que son factibles. Demandan meramente una buena coordinación entre los diversos departamentos del gobierno —comercio, agricultura, economía, etc.— y entidades particulares.

La ayuda del extranjero es frecuentemente necesaria y siempre bienvenida, si se toman en consideración las verdaderas necesidades y las costumbres de la población afectada. Todos los países, sean donantes potenciales o víctimas potenciales, deben reconocer la necesidad de coordinar la oferta y la demanda para evitar el despilfarro o las carencias. No debe permitirse que el generoso impulso de ayudar a quienes se han visto afectados por un desastre sea disperso, mal dirigido y perdido, pues ofrece una oportunidad para que las personas de todas las nacionalidades, razas y religiones expresen su solidaridad en forma amplia. A todo nivel, desde el del equipo de socorro que rescata a las personas de las ruinas o de los incendios, hasta el nivel del gobierno de un país miles de millas distante de la escena del desastre, la organización planificada y la cooperación coordinada deben ser consideradas como imperativos indispensables.

Si este estudio ha convencido al lector de esa necesidad, habrá logrado su objetivo.

Parte IV

Informe final de la Conferencia intergubernamental sobre la evaluación y la disminución de los riesgos sísmicos

París, 10-19 de febrero de 1976

1. Introducción

Por la resolución 2.222, la Conferencia General de la Unesco, en su 18a. reunión, autoriza al Director General a que, con la cooperación de las organizaciones apropiadas del sistema de las Naciones Unidas y de los órganos científicos no gubernamentales internacionales competentes, promueva el estudio de los peligros naturales de origen geofísico y de los medios de protección contra ellos, particularmente organizando una Conferencia Intergubernamental sobre la Evaluación y la Disminución de los Riesgos Sísmicos.

A fin de dar a esta Conferencia una sólida base científica y técnica, el Director General convocó en la Sede de la Unesco en diciembre de 1974 un Comité Preparatorio de Expertos, cuya tarea se definió en los siguientes términos:

i) examinar los progresos realizados en las esferas de la sismología, de la ingeniería antisísmica y materias conexas, desde la reunión intergubernamental sobre sismología e ingeniería antisísmica, celebrada en la Sede de la Unesco en abril de 1964;

ii) preparar un proyecto de orden del día para la Conferencia Intergubernamental;

iii) asesorar sobre las medidas que habría de adoptar la Unesco con la cooperación, cuando proceda, de las organizaciones internacionales no gubernamentales competentes, para preparar la Conferencia.

El informe de ese Comité Preparatorio, que contiene sus propuestas relativas al orden del día y a la organización de la Conferencia, se incluyó en el documento SC - 75/WS/14 y se transmitió a los Estados Miembros acompañado de la carta circular (CL/2405) por la cual el Director General les invitaba a participar en la Conferencia.

Con anterioridad a la Conferencia, la Secretaría de la Unesco invitó a destacados especialistas a que prepararan documentos de trabajo acerca de cada punto del orden del día propuesto. Los documentos se enviaron por anticipado a los Estados Miembros y a las organizaciones internacionales invitadas y se presentaron en la propia Conferencia como documentos SC - 76/SEISM/3-19. La Secretaría de la

Unesco presentó una nota titulada «Mecanismos de Cooperación Internacional» (documento SC - 76/SEISM/20).

La Conferencia se reunió en la Sede de la Unesco, en París, del 10 al 19 de febrero de 1976.

2. Participación

Estuvieron representados por delegados los siguientes 45 Estados Miembros de la Organización: Alemania (República Federal de), Argelia, Austria, Bulgaria, Canadá, Congo, Chile, China, Dinamarca, Ecuador, España, Estados Unidos de América, Francia, Ghana, Grecia, Guatemala, Hungría, India, Indonesia, Irán, Iraq, Islandia, Italia, Jamaica, Japón, Jordania, México, Mónaco, Nepal, Noruega, Nueva Zelanda, Países Bajos, Perú, Portugal, Reino Unido, República Árabe Libia, República Democrática Alemana, Rumania, Suecia, Suiza, Trinidad y Tobago, Túnez, Turquía, Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas y Yugoslavia.

Los siguientes Estados Miembros estuvieron representados por observadores: Bolivia, Brasil, Colombia, Egipto, Haití, Pakistán y Panamá.

La Santa Sede estuvo representada por un observador.

Asistieron a la Conferencia representantes de la Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas del Socorro para casos de Desastre (UNDRO), el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), el Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y también observadores de las siguientes organizaciones internacionales:

Organización Árabe para la Educación, la Cultura y la Ciencia (ALECSO).

Centro Latinoamericano de Física (CLAF).

Centro Sismológico Regional de América del Sur (CERESIS).

Consejo Internacional de Monumentos y Lugares de Interés Artístico e Histórico (ICOMOS).

Consejo Internacional de Uniones Científicas (CIUC).

Unión Internacional de Arquitectos (UIA).

Organización Internacional de Unificación de Normas (OIUN).

Unión Internacional de Asociaciones de Ingenieros (UIAI).

Asociación Internacional de Ingeniería Antisísmica (AIIA).

Liga de Sociedades de la Cruz Roja (LSCR).

Federación Panamericana de Sociedades de Ingeniería (UPADI).

3. Inauguración de la Conferencia

Declaró inaugurada la Conferencia el representante del Director General de la Unesco, Señor Abdul Razzak Kaddoura, quien se refirió en primer lugar a la extrema intensidad de los daños ocasionados por los grandes terremotos, no sobrepasados por ningún otro fenómeno natural, que han causado en los últimos 12 años la pérdida de más de 100 000 vidas humanas y de millares de millones de dólares de bienes. Seguidamente el Sr. Kaddoura describió la acción desarrollada

por la Unesco en cuestiones de sismología y de ingeniería sísmica desde la anterior reunión intergubernamental de 1964. Esa acción comprendía la promoción de proyectos apoyados por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, la organización de simposios, el envío de misiones para estudiar las catástrofes sísmicas y el establecimiento de centros internacionales y regionales para el tratamiento de datos y para la formación en sismología e ingeniería sísmica. El Señor Kaddoura señaló que, si bien la reunión intergubernamental de 1964 había tenido como principal objetivo el adelanto del conocimiento científico, el fin primordial de la presente Conferencia consistiría en promover la plena aplicación del conocimiento científico y técnico en beneficio de la humanidad.

4. Elecciones

La Conferencia eligió la siguiente Mesa:

Presidente:

Profesor Jai Krishna (India).

Vicepresidentes:

Profesor Keizaburo Kubo (Japón).

Profesor Nathan M. Newmark (EE.UU.).

Dr. Emilio Rosenblueth (México).

Profesor E.F. Savarensky (URSS).

Relator General:

Dr. John Tomblin (Trinidad y Tobago).

5. Orden del día

La Conferencia aprobó el siguiente orden del día:

1. Elección del Presidente.
2. Aprobación del Reglamento.
3. Elección de los Vicepresidentes y del Relator.
4. Aprobación del Orden del Día.
5. Aprobación del Programa y Calendario.
6. Constitución de las comisiones.
7. Constitución de los grupos de trabajo.
8. Evaluación de los riesgos sísmicos.
 - 8.1 Zonación sísmica.
 - 8.2 Microzonación (comprendidos los efectos de las fallas, los deslizamientos, los corrimientos de tierra, etc.).
 - 8.3 Predicción de terremotos.
 - 8.4 Sísmicidad inducida.
 - 8.5 Tsunamis.
9. Medidas de ingeniería para reducir las pérdidas.
 - 9.1 Edificios (legislación relativa a la construcción, materiales y diseño locales, etc.).

- 9.2 Servicios públicos (ferrocarriles, comunicaciones, canalizaciones, carreteras, etc.).
- 9.3 Planes de urbanización.
- 9.4 Estructuras y plantas especiales (grandes presas, centrales nucleares, pozos de petróleo fuera costa, etc.).
- 9.5 Reforzamiento de las estructuras existentes.
- 10. Consecuencias de los riesgos sísmicos.
 - 10.1 Consecuencias económicas (pérdidas y seguros, estudios de costos-beneficios, modelos matemáticos, etc.).
 - 10.2 Consecuencias humanas (conciencia del riesgo, reacciones psicológicas, información del público, etc.).
 - 10.3 Consecuencias sociales (protección civil, medidas legislativas y reglamentarias, etc.).
- 11. Cuestiones generales.
 - 11.1 Parámetros sísmicos para proyectos de ingeniería.
 - 11.2 Estudio de los terremotos sobre el terreno.
 - 11.3 Enseñanza y formación interdisciplinarias.
- 12. Ejecución.
 - 12.1 Estudios interdisciplinarios sobre la mitigación de las pérdidas causadas por los terremotos.
 - 12.2 Mecanismos de cooperación internacional.
- 13. Aprobación del Informe.

6. Organización de las tareas

Con el objeto de permitir la discusión completa de todos los puntos del anterior Orden del Día, la Conferencia instituyó tres Comisiones y dos Grupos de Trabajo, conforme se indica a continuación:

Comisión A (Evaluación de los riesgos sísmicos):

Presidente:

Profesor Stephan Mueller (Suiza).

Vicepresidente:

Dr. Mansoor Niazi (Irán).

Relator:

Dr. M.J. Berry (Canadá).

Comisión B (Medidas de ingeniería para reducir las pérdidas):

Presidente:

Profesor Giuseppe Grandori (Italia).

Vicepresidente:

Dr. Sergei Bubnov (Yugoslavia).

Relator:

Dr. Luis Esteva (México).

Comisión C (Consecuencias humanas, sociales y económicas):

Presidente:

Dr. Otto Glogau (Nueva Zelanda).

Vicepresidente:

Sr. W. Wangsadinata (Indonesia).

Relator:

Sr. K. Westgate (Reino Unido).

Grupo de Trabajo sobre Investigación Interdisciplinaria:

Convocador

Profesor N. N. Ambraseys (Reino Unido)

Grupo de Trabajo sobre Mecanismos de Cooperación Internacional:

Convocador:

Dr. Ulf Ericsson (Suecia)

La Mesa de la Conferencia, compuesta por el Presidente, los Vicepresidentes y el Relator General de las sesiones plenarias y los Presidentes de las tres Comisiones, estuvo asistida por el Secretario General de la Conferencia.

7. Debate general

Una lista completa de los temas en el orden en que se presentaron durante el debate general sería larga y reiterativa. Por lo tanto, se han resumido los temas bajo tres epígrafes que son: adelantos recientes en la investigación, problemas actuales para los cuales se sugirieron o pidieron soluciones, y objetivos futuros que requieren atención prioritaria.

7.1 *Progresos recientes de la investigación*

Es evidente que se han logrado muchos progresos gracias a la cooperación bilateral e internacional, con la ayuda de los organismos internacionales, especialmente la Unesco. Muchos estudiantes han recibido formación superior en el Instituto Internacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica de Tokio y en el Instituto de Ingeniería Antisísmica y de Ingeniería Sismológica de Skoplie. En numerosos países, la sismología se ha organizado mucho mejor. En China, por ejemplo, se ha progresado notablemente en estos últimos años mediante un enfoque interdisciplinario total y la participación de muchos observadores aficionados para completar los estudios de los especialistas en la predicción y otros aspectos de la sismología aplicada. Se citaron ejemplos de la importancia de instruir a una gran parte de la población, primero, en la observación del comportamiento de los animales y otros fenómenos naturales como medio de predecir inmediatamente los grandes terremotos y, segundo, en la comprensión general de los peligros de los terremotos a fin de reducirlos o eliminarlos. En el Japón, una estrecha cooperación interdisciplinaria ha permitido notables avances en la tecnología de los edificios de gran altura, los puentes de gran luz y los túneles en terrenos poco consistentes. En la Unión Soviética, los estudios interdisciplinarios han conducido a notables mejoras en el mapa de zonación sísmica y en la escala sísmica del código de edificación. Se han comprobado con éxito nuevos métodos matemáticos de evaluación de riesgos y de predicción de terremotos. En los Estados Unidos se está haciendo un nuevo esfuerzo nacional para establecer normas de diseño asísmico confiadas a

un importante grupo interdisciplinario en el que participan desde el principio las autoridades encargadas de aplicar la reglamentación definitiva.

En lo que se refiere a la recopilación de datos, se comunicó que se habían obtenido valiosos resultados con acelerógrafos para movimientos de gran intensidad. Con respecto a las prácticas de observación, se observó que un comité de la Asociación Internacional de Sismología y Física del Interior de la Tierra estaba preparando una edición revisada y más completa del manual existente. El representante de la Comisión Internacional de Grandes Presas (CIGP) señaló que en estos últimos años se habían perfeccionado mucho los métodos de simular con modelos la reacción de las grandes presas y se habían registrado los progresos consiguientes en la disminución de los riesgos.

7.2 *Problemas actuales*

Uno de los problemas esenciales reside en la necesidad de pasar de la teoría a la práctica en la aplicación de los proyectos sísmicos. Hay un grupo selecto de ingenieros de formación superior que comprenden y aplican las técnicas antisísmicas, pero no hay comunicación entre ellos y los pequeños constructores. Varios delegados insistieron en la necesidad de introducir cambios en los proyectos de edificios para viviendas particulares, especialmente para evitar cubiertas demasiado pesadas. Plantean un problema especial las construcciones rurales de adobe, por lo que es necesario investigar las técnicas adecuadas de refuerzo, usando material local que pueda adquirirse fácilmente. Varios delegados señalaron la necesidad de educar al público en los medios de evitar los peligros sísmicos, con documentos escritos en el lenguaje más sencillo posible. Es necesario conocer las necesidades y costumbres particulares de cada población antes de prescribir medidas para reducir los riesgos, especialmente porque las consecuencias sociales varían mucho de un país a otro.

Entre los problemas que entorpecen el progreso de la investigación destinada a evaluar los riesgos, se mencionaron dificultades tales como la negativa frecuente de los gobiernos a atribuir importancia a la investigación sísmológica, la escasez de fondos para la investigación y la falta de estímulo a los estudiantes para que trabajen en sismología. En algunos países no faltan fondos, pero se necesitan en cambio expertos extranjeros para ayudarles en los programas de formación.

A nivel administrativo, se suscitaban algunas cuestiones relativas a la manera de definir los grados de riesgo admisibles y a quién correspondía establecer esos grados. Se reconoció también la necesidad de establecer parámetros y criterios de diseño que ayuden a tomar decisiones. Se sugirió que podría lograrse la aplicación de normas en los proyectos sísmorresistentes si las compañías de seguros estuvieran dispuestas a fijar primas graduadas dentro de un margen más amplio y mejor ajustado a la realidad. Se recalcó la necesidad de tomar medidas de protección de los monumentos históricos contra los daños causados por los terremotos.

7.3 *Objetivos futuros*

Uno de los temas más repetidos en relación con este epígrafe fue un llamamiento a los sismólogos, geólogos e ingenieros a una comprensión mutua y examen conjunto de los problemas que plantean los riesgos sísmicos. Un delegado sugirió

que se preparara un glosario de las tres especialidades. Para una mejor recopilación de datos sobre los efectos sísmicos cercanos, se necesitan muchos instrumentos más sencillos, como los acelerógrafos, para evaluar cuantitativamente los movimientos del terreno. Se reconoció como objetivo futuro el establecimiento de parámetros específicos de los movimientos del terreno, la radiación de energía y la disminución de los esfuerzos. También se consideró importante para la predicción el análisis global de modelos tectónicos y de liberación de energía.

Por lo que atañe a la difusión de informaciones, algunos delegados sugirieron que se preparase un manual de experimentos geofísicos sencillos y su interpretación, y un manual para edificios pequeños en los países en desarrollo. Se consideró conveniente que los ingenieros mecánicos y eléctricos conocieran suficientemente el diseño sismorresistente para comprobar que el material que utilicen está bien diseñado y anclado en las regiones de actividad sísmica. Se pidió una mayor difusión de los informes de las misiones de sismología de la Unesco y se sugirió que esas misiones podrían ofrecer una oportunidad para formar sobre el terreno a buenos estudiantes investigadores. Un delegado recomendó que se organizaran seminarios sobre temas que pudiesen reunir a expertos en varias disciplinas conexas.

8. Evaluación de los riesgos sísmicos

8.1 *Zonificación sísmica*

El debate giró en torno al documento SC - 76/SEISM/3. El primero de los autores, al presentar el documento, pasó revista a los procedimientos actuales y llamó la atención sobre los problemas que plantea la definición de regiones potenciales de origen, de magnitudes máximas posibles, de condiciones de referencia del terreno y de curvas de atenuación.

Se debatió el acopio y la organización de los datos geocientíficos básicos. Se subrayó que los catálogos de parámetros de origen son esenciales para el estudio del riesgo sísmico y que los parámetros catalogados deberían ir acompañados de los errores estimados. Se recomendó la cooperación entre la Unesco y los gobiernos, con el fin de recopilar todas las informaciones históricas relativas a los terremotos que hayan producido daños graves.

Se insistió sobre la necesidad de datos instrumentales más numerosos en la región próxima del sismo, ya que se comprenden mal los procesos físicos en esa región.

Si bien se manifestó un acuerdo general en cuanto a la utilidad de los datos de intensidad macrosísmica para la cartografía de los daños causados por los terremotos y a que estos datos pueden servir de indicadores del riesgo sísmico, se expresó preocupación en cuanto a la viabilidad de encontrar relaciones unívocas entre la intensidad y los parámetros físicos del movimiento del terreno.

En vista de que se encuentran algunas dificultades al aplicar la escala actual de intensidades macrosísmicas, se recomendó su puesta al día, de acuerdo con las prácticas modernas de construcción y la elaboración de versiones compatibles que puedan aplicarse a las distintas condiciones regionales.

Se admitió de un modo general que para determinar los riesgos sísmicos deben tenerse en cuenta todos los datos geocientíficos y que la sismicidad determinada histórica e instrumentalmente debe combinarse con todos los datos geológicos y geofísicos disponibles.

Se desarrolló un debate general sobre algunas de las técnicas de tratamiento de datos utilizadas para la compilación de los mapas de zonación sísmica. Se señaló que los catálogos históricos existentes, que abarcan más de 1000 años, demuestran que a veces la sismicidad no es un fenómeno estacionario en las regiones continentales.

Se reconoció también que la relación entre magnitud y frecuencia sólo es válida en el intervalo de las magnitudes intermedias y que, cuando se trata de magnitudes más elevadas, las desviaciones pueden ser apreciables.

Se estimó que, para el análisis de los datos, deberían buscarse modelos más perfectos que los utilizados en la actualidad, a fin de explotar plenamente el potencial de algunas bases de datos.

Se reconoció que pueden existir varios tipos de mapas de zonación sísmica para un territorio, teniendo cada uno de ellos su uso propio. La Comisión tomó nota con interés de los procedimientos detallados seguidos por algunos países para la compilación de los mapas de zonación sísmica de sus territorios.

Se propuso que se consultara e invitara a contribuir a la compilación de mapas sismotectónicos a geólogos y otros geocientíficos.

Se presentó a la Comisión el concepto de estimación del riesgo sísmico como ayuda para la toma de decisiones. Se señaló que tales cálculos requieren el análisis conjunto de una serie de funciones estadísticas, entre las que figuran como típicas las de los movimientos sísmicos del suelo, la distribución de la población en función del tiempo, la distribución de los edificios y otras obras de ingeniería de importancia crítica en función del tiempo, la propensión de estos edificios y obras a los daños y la proporción de pérdidas humanas. Pueden calcularse también funciones por separado para las pérdidas materiales y para las víctimas humanas. Con los criterios normales para la toma de decisiones se debería buscar la manera de reducir las pérdidas humanas a cero y las pérdidas materiales a un nivel admisible.

8.2 *Microzonación sísmica y problemas conexos*

Los datos giraron en torno al documento de trabajo SC - 76/SEISM/4. El autor presentó los principales aspectos del problema e indicó que, a veces, se considera que la microzonación comprende la interacción suelo-estructura. Se convino en que la microzonación debería estudiarse como un tema especial de investigación, con el fin de calcular la reacción de las diferentes condiciones del suelo a los movimientos sísmicos. El resultado de esos cálculos pueden presentarse en forma de mapas de microzonación que abarquen sectores locales.

Se convino en que los términos microsismos y terremotos pequeños se prestan a diferentes interpretaciones y que se deberían formular definiciones claras. Se puso de manifiesto una diferencia de opiniones en cuanto a la aplicabilidad de los datos relativos a los microsismos y terremotos pequeños a la determinación de los movimientos fuertes del terreno causados por terremotos de gran intensidad. La

utilización de los microsismos y terremotos pequeños sigue siendo un tema merecedor de investigación.

Los datos procedentes de observaciones recientes inducen a pensar que los métodos analíticos y numéricos actuales pueden ser demasiado simplificados y que todavía no permiten predecir con seguridad las diferencias en el movimiento de la superficie en muchos casos prácticos. Ahora bien, los métodos analíticos pueden ser de valor para ampliar los datos procedentes de las observaciones a emplazamientos cercanos con diferentes condiciones del suelo, sobre todo en regiones alejadas del epicentro.

Se sugirió que la manera más apropiada de seleccionar los movimientos sísmicos a fines de proyecto es reunir un grupo de sismogramas de movimientos intensos obtenidos en condiciones comparables, y extrapolar a partir de estos sismogramas mediante un simple cambio de escala. Las condiciones locales del suelo pueden modificar considerablemente el espectro de la respuesta, lo que ha de tenerse presente. Si se ha de hacer hincapié en un sólo parámetro como criterio para diferentes condiciones del suelo, la velocidad máxima del terreno es probablemente el mejor.

La licuefacción del suelo y los fenómenos conexos, los tsunamis y la sismicidad inducida que acompaña a las grandes presas se identificaron como problemas importantes específicos de cada localidad.

Se expresó inquietud ante la escasez de acelerogramas de movimientos intensos de que disponen los sismólogos para la región próxima al epicentro. Se acordó por unanimidad que deberían montarse muchos más instrumentos de registro de movimientos fuertes en las regiones propensas a sismos, con miras a aumentar el acervo mundial de datos relativos a las diferentes condiciones del suelo. Algunos de estos instrumentos deberían agruparse preferentemente en disposiciones tridimensionales con miras a estudiar las respuestas de los diferentes suelos.

8.3 *Predicción de terremotos*

El Secretario General presentó el tema, haciendo hincapié en el gran interés del público en general con respecto a la previsión de terremotos y recordó a los delegados que las actas de la Comisión serían utilizadas por los gobiernos y por la Unesco como orientación para las futuras actividades, tanto en las esferas científicas como socioeconómicas.

El autor del documento de trabajo SC - 76/SEISM/5 resumió los principales puntos de éste. Puso de manifiesto que en los estudios sobre predicción de terremotos debía alcanzarse un alto grado de fiabilidad y que esto exigiría grandes esfuerzos de cooperación internacional. Describió también algunos aspectos del programa de predicción en la Unión Soviética.

La Comisión escuchó el relato del éxito obtenido recientemente al predecir un gran terremoto en la provincia de Liaoning (China); esa predicción fue el resultado de un enfoque complejo que combinó las actividades de un gran número de científicos y de trabajadores aficionados. Los fenómenos principales que se vigilaron habían comprendido los cambios de inclinación y levantamiento de los terrenos, las variaciones de los campos geomagnético y eléctrico, las variaciones espacio-temporales de la sismicidad, y el comportamiento de los animales.

Luego se examinó el programa de predicción de los Estados Unidos de América.

Se hizo hincapié en que este programa todavía se ocupaba principalmente de la investigación de los métodos de previsión, y que pasaría algún tiempo antes de que las predicciones se pudieran hacer con una fiabilidad satisfactoria. La investigación en materia de predicción carecía todavía de una base teórica adecuada, especialmente en lo que se refiere a la formación de fallas rumbo-deslizantes. Por consiguiente, se ha concentrado la atención en los estudios de la deformación de la corteza más bien que en las variaciones de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas.

A pesar de un programa intensivo desarrollado en el Japón, todavía no parece haber una coherencia suficiente entre los fenómenos precursores que se han vigilado en ese país para garantizar predicciones fiables.

Otros delegados describieron distintos estudios realizados en laboratorio y sobre el terreno, encaminados a la predicción de terremotos.

La comisión procedió entonces a debatir las repercusiones sociales y económicas de la predicción de terremotos, iniciando el debate R. Kueneman (Canadá).

El orador puso de manifiesto los dilemas que se plantean a los especialistas en ciencias sociales al tratar de estudiar los problemas asociados a la formulación de políticas sociales, a fin de resolver los efectos posibles de la predicción de un terremoto inminente. Hizo hincapié en que los resultados de la investigación en ciencias sociales sobre las catástrofes son pertinentes a los efectos de la predicción de terremotos. Discutió los aspectos principales de esta investigación; alertas, higiene mental, comportamiento económico, repercusiones en materia de seguros y jurídicas. Expresó su preocupación de que algunas medidas tomadas en materia de política como resultado de la predicción de terremotos podrían dar origen a desigualdades sociales y económicas.

Se informó a la Comisión del programa norteamericano en este terreno.

Se puso de manifiesto la necesidad de educar al público y se describieron y discutieron las experiencias china y japonesa en materia de educación e información del público sobre las predicciones y las medidas de precaución.

8.4 *Sismicidad inducida*

El autor presentó el documento de trabajo SC - 76/SEISM/6 y facilitó cierta información suplementaria, refiriéndose en particular al Primer Simposio Internacional sobre Sismicidad Inducida, celebrado en el mes de septiembre de 1975 en Banff (Canadá). Se examinaron los siguientes temas:

1. Sismicidad inducida por los embalses

Se sugirió que los sismos inducidos por los embalses podrían desencadenarse, o bien por aumento de la presión intersticial, o bien, más raramente, por aumento de los esfuerzos debidos a la carga. En consecuencia, se subrayó que el conocimiento de los esfuerzos en los alrededores del embalse antes de proceder a llenar éste de agua es un requisito previo para evaluar la posibilidad de sismicidad inducida.

Los conocimientos actuales hacen creer que inducen terremotos aproximadamente un embalse de cada 14, entre aquellos que tienen una profundidad máxima superior a 100 m y un volumen de agua superior a 10^9 m³. Hubo un consenso general de que la prudencia aconseja una cuidadosa vigilancia de la posible actividad sísmica en las proximidades de todos los nuevos embalses

que sobrepasen los citados límites de magnitud, antes de que se carguen de agua, mientras se cargan e inmediatamente después.

2. Sismicidad inducida por las explotaciones mineras

Se señaló que una de las características peculiares de los sismos inducidos por los trabajos de explotación minera es la de que pueden producirse en un campo de esfuerzos litostáticos. Otro de sus rasgos especiales es que la región focal de esos terremotos es accesible. Por lo tanto, la disposición tridimensional de sismógrafos en las minas sirve tanto para el desarrollo de las técnicas de seguridad como para el estudio del proceso de formación de fallas.

3. Sismicidad inducida por inyección de fluidos

Se entiende que este proceso consiste en que se desencadena una rotura de las rocas bajo la acción de los elevados esfuerzos locales producidos por la mayor presión del fluido. Algunos delegados informaron sobre casos de sismos inducidos por la extracción de petróleo a partir de rocas sedimentarias.

8.5 *Tsunamis*

El delegado de la URSS presentó el documento de trabajo SC - 76/SEISM/7.

Se hizo notar que, aunque nunca se ha observado directamente el proceso real de generación de los tsunamis, se cree, en general, que es análogo a un movimiento tipo émbolo en el fondo de los océanos. Se sugirió que también los grandes desplazamientos elásticos, las oscilaciones del fondo de los océanos, los hundimientos submarinos y las corrientes de turbidez pueden ser tsunamigénicas.

El carácter de los tsunamis depende de su generación, de su propagación y de su transformación en las costas. La teoría de su propagación está razonablemente bien desarrollada, pero se comprenden peor los detalles de su transformación en bahías, estuarios, etc.

El Secretario de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental describió la labor del Grupo Internacional de Coordinación del Sistema de Alerta contra los Tsunamis en el Pacífico y del Centro Internacional de Información sobre Tsunamis de Honolulu.

Se describió el sistema de alerta contra los tsunamis del Japón como un programa integrado por tres partes: predicción, difusión de la alerta y evacuación.

Se expresó inquietud ante el hecho de que los sistemas de alerta contra los tsunamis son inadecuados en algunos países del cinturón circumpacífico, donde se producen anualmente un 80% aproximadamente de los daños ocasionados por los tsunamis.

Se hizo observar que, en el Japón, con su sistema de alerta bien organizado, se está haciendo actualmente hincapié en la construcción de grandes obras de ingeniería civil destinadas a proteger las costas y en el desplazamiento de las poblaciones de las tierras bajas hacia terrenos más elevados que ofrecen, por consiguiente, mayor seguridad.

Varios delegados subrayaron la necesidad de perfeccionar los servicios de información pública a fin de aprovechar plenamente los actuales sistemas de alerta contra los tsunamis.

Resoluciones

Zonación y microzonación sísmicas

Resolución 8.11

La Conferencia *recomienda* que los Estados Miembros alleguen recursos para fomentar el desarrollo de los métodos geofísicos y estadísticos necesarios para comprender las características de los sismos catastróficos;

Recomienda que la Unesco fomente y coopere en proyectos regionales, tales como el estudio de la sismicidad de la región balcánica, y en la zonación y microzonación de regiones donde actualmente no se cuente con recursos adecuados, por ejemplo, en los cinturones andino y alpino-himalayo;

Recomienda además que la Unesco y la Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas del Socorro en Casos de Desastre, en colaboración con organizaciones científicas internacionales no gubernamentales (por ejemplo, AIIA, UIGC, AISFIT, etc.), estimulen y contribuyan a las investigaciones y cooperación internacionales en materia de zonación y microzonación sísmicas, convocando simposios y estableciendo grupos de trabajo sobre temas pertinentes, tales como la catalogación, la revisión de la escala de intensidades, los métodos y las leyendas de los mapas de zonación y de riesgos, el análisis de los datos de sacudidas fuertes, y la correlación de parámetros macrosísmicos e instrumentales.

Resolución 8.12

La Conferencia *recomienda* que los Estados Miembros tengan en cuenta la siguiente acción a fin de mejorar la evaluación de los riesgos sísmicos locales y regionales:

1. Buscar datos históricos pertinentes y sistematizar esta información en forma de catálogos y resúmenes.
2. Comprobar que sus redes sismográficas son adecuadas, están puestas al día y funcionan debidamente, tanto en materia de instrumentos como en técnicas de análisis de datos.
3. Confeccionar mapas de ingeniería geológica y neotectónicos de las zonas críticas y efectuar estudios geológicos detallados de las zonas en que han sobrevenido terremotos destructores, a fin de comparar esas zonas con otras en las que pudieran ocurrir en el futuro terremotos similares.
4. Instalar registradores de movimientos fuertes donde se necesiten datos y prestar atención a su conservación sistemática. A fin de obtener datos más completos, conviene instalar algunos registradores de movimientos fuertes en batería con algunos instrumentos en pozos de sondeo.
5. Recoger datos macrosísmicos inmediatamente después de sobrevenir cada terremoto y presentar esos datos regularmente en forma de resúmenes.
6. Proporcionar personal capacitado en los niveles profesional y técnico.
7. Elaborar y perfeccionar técnicas de microzonación, aplicarlas a la preparación de mapas locales de microzonación e incluirlas, si procede, en los códigos locales de construcción.

Resolución 8.13

Observando la importancia fundamental de disponer de listas exactas de datos de epicentros para la preparación de mapas de zonación, y que diversos organismos ya cuentan con listas mundiales en forma legible por computadora.

La Conferencia *recomienda* que un solo organismo agrupe la mayor cantidad posible de esas listas, y emprenda la tarea de convertirlas a un formato común y de refundirlas en una lista única editada en cooperación con los organismos nacionales.

Recomienda además que la lista central se difunda ampliamente en todas las etapas de preparación, como base para estudios de la sismicidad regional o mundial.

Predicción de terremotos

Resolución 8.3

La Conferencia *reconoce* la importancia de crear una capacidad fiable de predicción de los terremotos. Además, se deberían realizar investigaciones sobre los problemas socioeconómicos, de comportamiento y jurídicos relacionados sobre bases regional, nacional e internacional.

La Conferencia *alienta* a los Estados Miembros a instituir órganos nacionales que se encarguen de los aspectos técnicos y socioeconómicos de la predicción de los terremotos. Además, en vista de la suma utilidad de la actual Conferencia Intergubernamental, esta Conferencia *alienta* a la Unesco a organizar reuniones interdisciplinarias a intervalos adecuados para que sirvan de medio de intercambio de las informaciones más recientes relativas a este tema.

Sismicidad inducida

Resolución 8.41

A fin de prestar la máxima protección posible a las presas y a las poblaciones que viven aguas abajo de éstas, contra los riesgos asociados a la sismicidad inducida, la Conferencia *recomienda* a los Estados Miembros donde se proyecte la construcción de grandes embalses que efectúen una detenida vigilancia sísmica para conseguir un buen control hipocéntrico y los parámetros de origen de los sismos en la zona del embalse, dos años o más antes de iniciar la construcción. Además, se *recomienda* que hagan mediciones de la tensión inicial cerca de los puntos más profundos del futuro embalse, utilizando las técnicas disponibles, tales como la fracturación hidráulica y el método de la roseta de deformación, como medio para comprender el mecanismo de la sismicidad inducida después de proceder a llenar el embalse.

A los fines de esta resolución un «gran embalse» es aquel que alcanzará una profundidad máxima de más de 100 m, y un volumen máximo superior a 10^9 m³ al nivel de explotación.

Resolución 8.42

Como la interpretación de los fenómenos de sismicidad inducida requiere un enfoque interdisciplinario, la Conferencia *recomienda* que la Unesco preste su apoyo a los Estados Miembros que emprendan investigaciones en esta materia, facilitándoles asesoramiento y formación con miras a un tratamiento y evaluación más eficaces de los datos observados.

Tsunamis

Resolución 8.5

La Conferencia *recomienda* que los Estados Miembros emprendan la siguiente acción con la asistencia de la Unesco y su COI, la UNDRD y el PNUD:

1. Mejorar y hacer funcionar sensores estables y precisos para registrar los tsunamis en alta mar;
2. Diseñar e instalar sismógrafos de periodo largo y banda ancha en estaciones sismológicas; continuar y completar el tratamiento automático de los datos sísmicos; conseguir la integración de los métodos hidrofísico y sismológico de alerta eficaz contra los tsunamis;
3. Mejorar los canales de comunicación utilizados en el sistema de alerta contra los tsunamis, comprendido el empleo de satélites;
4. Ampliar considerablemente la red de microbarógrafos y mareógrafos instalados en tierra;
5. Estudiar y desarrollar más a fondo la teoría de la generación y propagación de los tsunamis;
6. Compilar esquemas de zonación de tsunamis en el Pacífico y otras costas expuestas a las inundaciones;
7. Tomar medidas razonables de protección de ingeniería en las zonas pobladas e intercambiar información técnica por medio de simposios internacionales;
8. Mejorar la información del público y la conciencia de la amenaza de los tsunamis;
9. Ampliar las actividades del Comité de Tsunamis de la UICG, el ITIC, la UNDRD y la COI;
10. Ampliar o crear sistemas de alerta contra los tsunamis en todos los países amenazados por ellos.

9. Medidas de ingeniería para reducir las pérdidas

9.1 Edificios sismorresistentes

La sesión versó sobre algunos de los problemas más importantes relacionados con el diseño sísmico de los edificios, las características más destacadas de los códigos de construcción formulados en los últimos años, las cuestiones anexas a la puesta en práctica de estos códigos y los resultados de la investigación.

En la presentación del documento de trabajo (SC - 76/SEISM/8) y en el debate, se observaron los rasgos más salientes de los códigos modernos: una jerarquía de métodos detallados y simplificados de análisis estructural, siguiendo normas de proyecto más prudentes en los métodos simplificados; consideración explícita de la ductilidad admisible en la definición de los espectros reducidos de diseño; criterios de base estocástica para la superposición de las reacciones a las tres componentes de los movimientos sísmicos; requisitos de multiplicidad de los servicios generales; consideración explícita de la interacción suelo-estructura por lo que respecta a la forma en que contribuye a modificar los periodos naturales de vibración y a introducir un amortiguamiento de la radiación; consideración de los momentos de inversión para revisar los esfuerzos en los pilares y la capacidad de

los cimientos; consideraciones especiales relativas al diseño de los nudos y detalles estructurales, de modo que se consiga que las conexiones sean normalmente más resistentes que los elementos que unen. También se mencionó especialmente la conveniencia de expresar los requisitos de diseño en los términos más sencillos y de adoptar formatos que se presten a una fácil puesta al día.

En el mismo contexto, se defendió el análisis modal frente a métodos que se suponen más refinados, como el análisis dinámico gradual, ya que la aplicación de estos métodos al diseño en la práctica no parece justificada en la actualidad, en vista de los importantes efectos que no tienen en cuenta. Se consideró aconsejable definir los espectros de diseño en determinadas zonas sísmicas mediante dos parámetros (aceleración máxima efectiva del terreno y velocidad espectral de amortiguamiento cero para periodos intermedios).

Se consideró indispensable para su aplicación, que en la elaboración de los códigos de construcción participen los distintos grupos que han de servirse de ellos.

Aunque se admitió que la incertidumbre que afecta a los parámetros del movimiento del suelo es considerablemente mayor que la que afecta a los parámetros estructurales, está justificado que se realicen notables esfuerzos de investigación sobre estos últimos, en vista de la amplia posibilidad de aplicación de los resultados correspondientes.

Se debatió extensamente el problema de la seguridad de las viviendas de bajo costo en las zonas rurales de los países en desarrollo, y se abogó enérgicamente por una cooperación internacional en la investigación y desarrollo en esta materia.

Se prestó especial atención al problema de la unificación de los códigos de construcción. La mayoría de los participantes consideró que no es viable ni un código general ni siquiera un marco común de código; no obstante, se consideró muy conveniente la formulación de directrices generales sobre los principios básicos de diseño.

Se subrayó la importancia de preparar códigos de construcción en los que se tengan en cuenta las propiedades de los materiales de que se dispone localmente y las correspondientes normas de control de la calidad.

Se reconocieron las consecuencias de los requisitos de la resistencia sísmica sobre los conceptos arquitectónicos y el proceso de proyecto.

9.2 *Servicios públicos (ferrocarriles, comunicaciones, canalizaciones, carreteras, etc.)*

El debate se centró en torno al documento de trabajo SC - 76/SEISM/9. Se reconoció que los criterios para evaluar la seguridad de las redes de servicios públicos se encuentran aún en una fase inicial de desarrollo. Los problemas que presentan mayor interés son:

- a) La evaluación de los desplazamientos relativos entre diferentes puntos; ello exige construir dispositivos especiales de medida.
- b) Un diseño de las redes tal que permita que se produzcan deformaciones considerables, sobre todo en puntos seleccionados de antemano (empleo de conexiones especiales).
- c) Problemas especiales relacionados con el manejo de fluidos a alta presión.

Al evaluarse la fiabilidad de los servicios públicos de importancia vital, deben tenerse en cuenta dos grupos de problemas:

- a) Los relacionados con el comportamiento de las conducciones principales (líneas principales), caso en el que no suele ser viable la duplicidad de las instalaciones.
- b) Los sistemas reticulados dentro de las ciudades, caso en que dicha duplicidad es viable y conveniente.

Se subrayó la necesidad de adoptar criterios cuantitativos para el diseño de los sistemas de anclaje para los elementos grandes de equipo (mecánico, eléctrico, químico, etc.).

9.3 *Planes de urbanización*

Durante el debate se examinaron problemas de planificación urbana desde el punto de vista de las medidas que han de adoptarse con miras a reducir las posibles consecuencias de los terremotos.

En la presentación del documento de trabajo SC - 76/SEISM/10 y en el debate que siguió se suscitaron los siguientes puntos importantes:

1. El contraste entre la situación ideal en la que la planificación puede empezar partiendo de cero y la situación real en la que sólo pueden tomarse se citaron algunas medidas que se han tomado en Estados Unidos y en el Japón para describir cuantitativamente los posibles riesgos existentes y para legislar de manera eficaz con miras a reducirlos. Se mencionaron los problemas que plantea la reinstalación de comunidades urbanas y se señaló la falta de todo análisis sistemático al respecto. La experiencia demuestra que a menudo las comunidades se resisten mucho a abandonar el lugar donde viven.
2. La jerarquía de los factores que requieren protección varía de un país a otro y por eso la planificación urbana debe basarse en cada país en las prioridades que éste haya establecido.
3. Se consideró que era muy importante definir exactamente los distintos grados de riesgo sísmico en las zonas urbanas. Esa evaluación debería tener como consecuencia directa una política de utilización racional del terreno, que sirviera de base para reglamentar la construcción sismorresistente. Se discutió ampliamente la conveniencia de basar los criterios de planificación en análisis compartidos de diferentes tipos de riesgo, y de riesgo sísmico en diferentes zonas.
4. Se recomendó que todo proyecto de ordenación regional o urbana emprendido en zonas sísmicamente activas vaya precedido, desde sus mismos comienzos, de estudios de ingeniería sismológica que definan las microzonas caracterizadas por diferentes grados de riesgo.
5. Para aplicar satisfactoriamente las estrategias de planificación, se consideró indispensable que las comunidades en conjunto participaran activamente en todas las fases del proceso de ordenación urbana en que se hubieran de tomar decisiones.

9.4 *Estructuras especiales*

Bajo este epígrafe se consideraron dos grupos principales de estructuras especiales: las centrales nucleares y las grandes presas.

Cuando se trata de seleccionar los parámetros sísmicos para los proyectos, ambos tipos de estructuras requieren estudios similares. La evaluación de la sismicidad regional varía, con arreglo a la información disponible relativa a las condiciones sismotectónicas cerca del emplazamiento: cuando las fallas están bien definidas y se dispone de registros históricos de terremotos, es posible hacer cálculos razonablemente exactos de la sismicidad; cuando esa información es escasa, las estimaciones de las intensidades máximas han de basarse en estudios de la geología local y regional y en la actividad sísmica conocida de zonas comparables de la corteza terrestre.

Se puso en duda la validez de los modelos usuales de las ondas de cizalla monodimensionales para predecir la influencia de las condiciones locales del suelo sobre la respuesta sísmica, ya que esos modelos no tienen en cuenta las componentes verticales del movimiento o las ondas superficiales que contribuyen de manera importante al movimiento, al menos para frecuencias inferiores a 1 hertz. Como la evidencia experimental está a menudo en contradicción con los resultados de estos métodos, las predicciones deberían basarse en la comparación con movimientos registrados en condiciones similares del suelo. Se recomendó que el movimiento se especifique en la primera capa competente por debajo del emplazamiento, más bien que al nivel de la base rocosa.

Centrales nucleares

El análisis de la respuesta dinámica de las centrales nucleares plantea problemas especiales. Al presentar el documento de trabajo SC-76/SEISM/12 y en el debate ulterior, se subrayó que la interacción suelo-estructura influye considerablemente en la respuesta; los criterios usuales para el estudio de este fenómeno no explican la pérdida de energía de alta frecuencia en la superficie de contacto de los cimientos del suelo. La aplicación de los métodos de elementos finitos a los problemas de la interacción suelo-estructura presenta consideraciones inconvenientes. Se recomendó insistentemente que se hagan estudios comparados de registros obtenidos simultáneamente en los cimientos y en campo abierto. Con frecuencia se realiza un análisis gradual de la respuesta estructural no lineal, pero, en general, no se tienen en cuenta la interacción tan importante entre las respuestas debida a las diferentes componentes del movimiento del terreno. El equipo montado sobre la estructura principal se diseña basándose en los espectros de respuesta del piso, no teniéndose en cuenta la reducción de la respuesta ocasionada por la interacción equipo-estructura.

Se examinaron los reglamentos de proyecto, concediéndose particular atención a los dos niveles de intensidad que se propugnan generalmente y a la influencia de la magnitud de los esfuerzos sobre los valores de amortiguación que hayan de adoptarse. Se criticó el requisito de que la intensidad del terremoto que sirve de base sobre la que operar sea igual a la mitad del terremoto que exige la detención de seguridad del reactor, y se indicó que el asunto se está estudiando actualmente.

Se discutieron algunos problemas relacionados con la especificación de los espectros de proyecto: puede demostrarse que los criterios de seguridad óptima conducen a espectros de proyecto cuya forma difiere de los compatibles con los

criterios de fiabilidad fija; además, la incertidumbre en los periodos naturales excluye el utilizar plenamente la disminución de las coordenadas del espectro que aparece en las altas frecuencias.

Se señaló la escasez de datos sobre movimientos fuertes en el campo próximo. Se reconoció la significación de los terremotos de pequeña magnitud originados debajo de emplazamientos determinados en regiones de baja sismicidad. También se examinó la dificultad de aplicar los datos de los movimientos fuertes a condiciones que difieran de las que se dan en los emplazamientos donde se haya efectuado el registro original, así como la necesidad de tener en cuenta las condiciones locales y los mecanismos focales del sismo, cuando se trate de correlacionar la magnitud y la intensidad. También se estudió la posibilidad de aislar las estructuras de las ondas sísmicas y de los desplazamientos de las fallas.

Grandes presas

Como en el caso de las centrales nucleares, en el documento SC - 76/SEISM/11 y en el debate se insistió en la conveniencia de instalar baterías de instrumentos en las cercanías de la construcción, así como en sus cimientos y en diversos puntos de la superestructura.

Ciertos problemas específicos de las grandes presas merecen especial atención, tales como la formulación y calibración de modelos bifásicos para representar el comportamiento de los sistemas suelo-agua en pedraplenes o terraplenes; el examen de las interacciones tridimensionales, así como de los efectos de ondas progresivas en la respuesta dinámica; la adopción de procedimientos mejorados de control de la consolidación a fin de evitar asentamientos no uniformes de terraplenes; la instalación de baterías de instrumentos antes de la construcción para detectar la sismicidad inducida, si existiera; las medidas de protección contra los desplazamientos graduales y relativamente súbitos a lo largo de las fallas; la radiación de energía a través de los cimientos y contrafuertes.

Se señaló que los criterios de diseño asísmico de las presas de tierra deberían basarse en la limitación del asentamiento de la cresta más bien que en los límites de tensión.

Cuando las condiciones geológicas sugieren la posibilidad de sismicidad inducida, debería suponerse que se pueden generar terremotos de la magnitud máxima regional.

Se destacó el interés de la Comisión Internacional de Grandes Presas (CIGP) por recibir y distribuir información concerniente al diseño asísmico y al comportamiento de las presas. Se hicieron comentarios sobre el comportamiento satisfactorio observado en algunas presas que han sufrido sismos moderados.

Se discutió con cierta extensión sobre las combinaciones de cargas que han de suponerse en el diseño. Se debatió exhaustivamente la sugerencia de que debe preverse que se presenten simultáneamente el nivel máximo de crecida y el terremoto más intenso posible en la región por debajo de la presa; sin embargo, la mayoría de los delegados no consideraron aplicable esta sugerencia. Se consideró muy conveniente el estudio de las tensiones tectónicas regionales para evaluar la sismicidad inducida.

En vista de las dificultades anexas a la predicción del desplazamiento de fallas,

se recomendó el empleo de materiales autorregenerables no cohesivos en el núcleo de las presas de tierra.

Se subrayó la necesidad de efectuar estudios sumamente minuciosos de la geología local, habida cuenta de la posibilidad de que se derrumben los taludes dentro del embalse, generando ondas.

9.5 *Reforzamiento de las construcciones existentes y de las dañadas*

Se examinó el problema de la restauración y del reforzamiento de las construcciones desde el punto de vista de los requisitos y de las políticas a seguir. Se señaló que la restauración significa en el mejor de los casos la recuperación de la resistencia original de una construcción, mientras que el reforzamiento implica una mejora de la capacidad de la construcción para resistir a las fuerzas sísmicas. Se formularon advertencias en cuanto a la posibilidad de que las obras de restauración puedan en realidad debilitar las construcciones.

Se reconoció que las recomendaciones detalladas contenidas en el documento SC - 76/SEISM/13 eran principalmente de aplicación en las condiciones específicas para las que se han establecido y que condiciones diferentes exigirían soluciones diferentes. El problema merece la atención de las autoridades locales y de los ingenieros, porque la actual escasez de viviendas y su probable persistencia a lo largo de los próximos decenios exige acciones encaminadas a hacer seguros los edificios que sobrevivan.

Distintos delegados insistieron en la necesidad de perfeccionar las actuales escalas de intensidad basadas en los daños producidos. Ahora bien, se llegó a la conclusión de que no debería debatirse este tema, debido al gran número de escalas que ya existen y por su escasa relación con el tema principal del Orden del Día.

La observación del comportamiento de las estructuras reales debe utilizarse para perfeccionar los sistemas de proyecto y construcción. De ahí que deba analizarse el comportamiento de las estructuras dañadas por los terremotos, tratando de comprender y describir cuantitativamente las razones de los fallos. La introducción de nuevos sistemas de estructuras y tecnologías de construcción conduce a nuevas clases de fallos, por lo que el intercambio de información sobre los daños sísmicos ofrece la máxima importancia.

Se examinaron los problemas especiales que plantea el refuerzo de los monumentos y se acordó que las recomendaciones generales aprobadas en relación con el punto que se examina deberían considerarse aplicables a aquéllos.

Resoluciones

Resolución 9.11

Dado que el estudio del comportamiento de los edificios sometidos a terremotos intensos es de gran importancia para comprobar y perfeccionar los criterios y métodos de proyecto y construcción, la Conferencia *recomienda* que las misiones de la Unesco continúen realizando un análisis de los edificios no dañados, dañados o destruidos por terremotos intensos.

Resolución 9.12

Reconociendo que los códigos de construcción desempeñan una función fundamental en la reducción de los riesgos sísmicos, la Conferencia *recomienda* que la Unesco preste apoyo al intercambio de ideas y directrices oportunas para establecer los principios generales sobre los que se base la formulación de los códigos de construcción.

Resolución 9.13

Es necesario el estudio teórico y experimental de las propiedades estáticas y dinámicas básicas de los materiales, elementos y sistemas estructurales con miras a establecer métodos sencillos para el proyecto de diferentes tipos de estructuras, especialmente de edificios de obra de fábrica y prefabricados. La Conferencia *recomienda* que la Unesco busque la cooperación de las organizaciones internacionales pertinentes a fin de formular criterios para la asignación de recursos destinados a la investigación y de preparar medios auxiliares para los proyectistas, como son directrices y manuales basados en los criterios óptimos de diseño sismorresistente.

Resolución 9.14

La Conferencia *recomienda* que sismólogos e ingenieros trabajen conjuntamente en materia de diseño asísmico, los primeros para definir los riegos y los segundos para determinar la forma en que debe tenerse en cuenta el riesgo en el proyecto.

Resolución 9.15

La Conferencia *recomienda* que la Unesco invite a la Unión Internacional de Arquitectos a que aliente a sus miembros a colaborar con los ingenieros sismólogos en la planificación y proyecto de edificios e instalaciones en zonas propensas a terremotos, desde las fases iniciales del proceso.

Resolución 9.16

La Conferencia *recomienda* a aquellos Estados Miembros que aún no han promulgado normas y códigos mínimos obligatorios para los materiales y la construcción, que así lo hagan.

Resolución 9.17

Observando la necesidad de una mayor afluencia de datos relativos al campo próximo de los terremotos y de observar el comportamiento de distintos tipos de estructuras en condiciones críticas.

La Conferencia *invita* a los Estados Miembros a que, con la asistencia de la Unesco, establezcan Zonas Sísmicas Experimentales en regiones de elevada sismicidad y escasa densidad de población. Dentro de cada Zona, habría que establecer instalaciones básicas sencillas y accesos en forma de una red de senderos señalizados. Se pediría al país de que se tratara que facilitara la entrada y salida de visitantes, con sus suministros y equipos, y que prestara cualquier otra asistencia que estuviere a su alcance.

Resolución 9.2

Reconociendo: a) que la tecnología del diseño asísmico de las redes de servicios públicos se encuentra actualmente en fase de desarrollo, y b) que los daños de

origen sísmico experimentados por las redes de servicios públicos entrañan grandes riesgos para la vida de las comunidades modernas, la Conferencia *recomienda* que la Unesco preste asistencia a los actuales programas cooperativos de los gobiernos en esta materia, que se hayan organizado con miras al intercambio de información y de personal.

Resolución 9.31

Reconociendo la importancia de *Hábitat: Conferencia de las Naciones Unidas sobre los Asentamientos Humanos* para los esfuerzos que se realizan a nivel mundial, regional y subregional en orden a mejorar los asentamientos humanos, la Conferencia *recomienda* que la Unesco tome las medidas oportunas para pedir a *Hábitat* que incluya en su orden del día el estudio de los asentamientos humanos en zonas propensas a terremotos.

Resolución 9.32

Observando que en el planeamiento futuro del desarrollo urbano, son muy importantes factores tales como la microzonación sísmica y las implicaciones socioeconómicas del riesgo sísmico, la Conferencia *recomienda* que la Unesco tome las medidas oportunas para prestar, si se le pide, asistencia técnica encaminada a promover el intercambio internacional de información sobre estas cuestiones.

Resolución 9.33

La Conferencia *recomienda* que ningún proyecto de ordenación regional o urbana que se emprenda con la participación de la Unesco y que se refiera a zonas sísmicamente activas se realice sin que intervengan, lo antes posible, expertos en zonación sísmica, microzonación, riesgos sísmicos y proyectos semirresistentes.

Resolución 9.41

La Conferencia *recomienda* que los Estados Miembros presten especial atención a la selección de los emplazamientos para la construcción de centrales nucleares en regiones propensas a terremotos. Antes de iniciar el planeamiento y proyecto de una central nuclear deberían efectuarse minuciosas investigaciones de las características sísmicas de la región y una comparación de los diferentes emplazamientos, teniendo en cuenta criterios de orden social y económico.

Resolución 9.42

La Conferencia *recomienda* a los Estados Miembros que pongan en conocimiento de la Comisión Internacional de Grandes Presas (CIGP) todas las observaciones relativas al comportamiento de las presas existentes, así como los resultados de las investigaciones que permitan mejorar: a) la estimación de los movimientos del suelo a fines de proyecto; b) el comportamiento de los materiales bajo cargas; y c) los métodos de cálculo de las deformaciones y de los esfuerzos en grandes estructuras de hormigón o de terraplén.

Resolución 9.43

Observando: a) que las fábricas de productos químicos, las centrales nucleares, las grandes presas y otras instalaciones similares pueden poner en peligro las vidas de los habitantes de la región vecina, si se vieran sujetas a terremotos de gran intensi-

dad sin cumplir las adecuadas normas de diseño; y b) que en la actualidad el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) propone unas normas internacionales para la seguridad de las centrales nucleares contra las catástrofes sísmicas, la Conferencia *recomienda*:

1. que todo Estado Miembro publique sus propios reglamentos o códigos sísmicos completos, correspondientes a esas instalaciones, junto con información sobre la sismicidad y los datos técnicos de base; y
2. que, al formular los apropiados códigos o reglamentos, cooperen todos los Estados Miembros, con la asistencia de la Unesco y el OIEA.

Resolución 9.44

La Conferencia *recomienda* que los Estados Miembros intensifiquen la adquisición de sismogramas de movimientos intensos: 1) utilizando, de ser posible, Zonas Sísmicas Experimentales; 2) instalando un mayor número de instrumentos para el registro de movimientos fuertes en las centrales nucleares y en campo abierto, en regiones en que sean de esperar terremotos intensos; y 3) instalando densas redes de registradores de movimientos fuertes en las regiones de réplica de los terremotos importantes.

Los experimentos deben proyectarse de modo que proporcionen datos sobre la propagación de las ondas en función del mecanismo focal y de la distancia al foco, la amplificación en el emplazamiento y la interacción suelo-estructura.

Resolución 9.5

La Conferencia *recomienda*:

1. que la Unesco apoye la cooperación e investigación internacionales con miras a idear medios prácticos para reducir el riesgo de daños sísmicos en: a) las viviendas rurales construidas por los propios habitantes utilizando materiales localmente disponibles, y b) viviendas construidas sin la intervención de ingenieros, es decir, edificadas sin aplicar los principios de la ingeniería y en cuyo caso los factores socioeconómicos descartan la participación de ingenieros o técnicos calificados. Las medidas adoptadas deberían comprender:
 - i) la formulación de soluciones prácticas, basadas en experiencias concretas e investigaciones experimentales;
 - ii) la preparación de material gráfico sencillo, que pueda ser comprendido fácilmente por el común de los propietarios de las viviendas y los artesanos;
 - iii) la capacitación de los propietarios de las viviendas y de los artesanos con miras a la puesta en práctica de las soluciones ideadas;
2. que la Unesco actúe de centro de acopio y distribución de documentos e informes técnicos que considere de importancia, en los que se describan experiencias y los métodos seguidos en distintos países para reforzar y restaurar las construcciones, en los casos en que no se disponga en general de este tipo de documentos;
3. que la Unesco prepare un conjunto de directrices unificadas para describir los daños causados por los terremotos, con la asistencia de un grupo de trabajo especialmente designado;
4. que los Estados Miembros consagren especial atención al refuerzo de los hospitales, teatros, escuelas y otros edificios que puedan alojar un gran número de personas. Estos edificios deberían inspeccionarse periódicamente,

comprobando a fondo sus condiciones de seguridad y también inmediatamente después de un terremoto causante de daños;

5. que los Estados Miembros presten especial atención a la salvaguardia de los monumentos históricos contra los daños producidos por los terremotos y a la restauración y el refuerzo convenientes de esas construcciones, ya que ello plantea a veces problemas de ingeniería fundamentalmente diferentes de aquellos de las construcciones ordinarias de vida limitada. Estos problemas apenas se han examinado a la luz de la tecnología moderna y merecen especial interés.

10. Consecuencias de los riesgos sísmicos

10.1 Consecuencias económicas de los riesgos sísmicos

El Secretario General de la Conferencia presentó el documento de trabajo SC - 76/SEISM/14, que realzó la importancia de las consideraciones económicas dentro del conjunto de las implicaciones sociales y la necesidad de analizar los problemas de los seguros contra los riesgos sísmicos.

El delegado de Suiza, coautor del documento de trabajo, esbozó a continuación los puntos más salientes del mismo, destacando:

1. la necesidad de comprender que, cuando se produce un terremoto, las pérdidas indirectas (por ejemplo, las debidas a incendios o interrupciones de la producción) son a menudo más importantes que las pérdidas directas, pero más difíciles de evaluar y controlar.
2. que, desde el punto de vista del seguro y del reaseguro, el riesgo sísmico es como un polizón que se introduce subrepticamente en el mundo de los seguros. Lo más importante es adquirir una idea clara de las pérdidas que pueden ocasionar los terremotos.

En el caso de los terremotos, el cálculo de las primas debería considerarse tan sólo como una tercera prioridad, después de la evaluación de la responsabilidad máxima de las compañías de seguros y del cálculo de una reserva adecuada para casos de catástrofe.

Los datos numéricos básicos que precisan las compañías de seguros para determinar cuantitativamente las pérdidas posibles y fijar una reserva adecuada para casos de catástrofe pueden definirse preguntándose:

- a) ¿Dónde se encuentran las acumulaciones geográficas de los riesgos de seguro y cuál es el importe total de las sumas aseguradas?
- b) ¿Cuál es la frecuencia media de los sismos de una intensidad determinada en una zona dada, o sea, el periodo medio de repetición?
- c) ¿Cuál puede ser el grado medio de los daños producidos por un sismo de una intensidad determinada en una zona dada?

Varios delegados describieron los principios por los que se rige el funcionamiento de los planes de seguros en sus respectivos países, señalando las ventajas relativas de los programas privados y nacionales de seguros contra terremotos. La Conferencia observó que en algunos países, como Nueva Zelanda, el Japón, la URSS y los Estados Unidos de América existen planes viables de seguros que

cubren los riesgos sísmicos. Se está llevando a cabo un estudio en la Universidad de Pennsylvania (Estados Unidos) para determinar, entre otras cosas, por qué razón la población se asegura o no se asegura contra terremotos e inundaciones en los Estados Unidos. Se indicó que las compañías de seguros podrían contribuir considerablemente a disminuir los riesgos sísmicos, estableciendo tarifas graduadas para conseguir la aplicación de los conocimientos actuales en el diseño y consiguiendo que ese diseño se aplique en la construcción. Sin embargo, en muchos países el seguro contra terremotos se practica de una forma bastante simplista y hay que actuar seriamente para dotar a estos seguros de una base razonablemente científica.

La Conferencia examinó la metodología del estudio de las distribuciones estocásticas de los diferentes tipos de daños sísmicos, utilizando datos tomados de la geofísica, la ingeniería y la economía como guía para tomar decisiones en materia de seguros, en la forma realizada en la URSS. La Conferencia tomó nota del ofrecimiento hecho por la Academia de Ciencias de la URSS, de facilitar información sobre esta metodología y sobre los correspondientes programas de cálculo automático.

10.2 *Consecuencias de orden humano de los riesgos sísmicos*

El Secretario General de la Conferencia presentó el documento de trabajo SC - 76/SEISM/15 sobre las dimensiones sociales de la reacción humana ante el riesgo sísmico. Subrayó la importancia de estos problemas y la necesidad de que se apliquen en la práctica los conocimientos técnicos y prácticos acumulados por la ciencia.

El debate versó sobre las consecuencias de orden humano de los riesgos sísmicos y los delegados se refirieron principalmente a los siguientes puntos:

1. Conciencia del problema sísmico entre las personas:
 - a) Estudios para averiguar las reacciones personales ante las catástrofes sísmicas en determinados países o regiones.
 - b) Medidas prácticas para estimular esta conciencia.
 - c) Ejemplos de medidas educativas prácticas, que comprenden el empleo de los medios de comunicación de masas, películas, etc. Estas medidas deben basarse en los hechos y no en la emotividad, que puede resultar contraproducente.
 - d) Ejemplos de medidas administrativas y legislativas, que comprenden el adiestramiento en la actitud de alerta, la legislación nacional y local, los servicios voluntarios y la creación de dispositivos de coordinación para el eficaz aprovechamiento de dicho plan de alerta.
2. Comportamiento y reacción individual sobre la aparición o amenaza de terremotos:
 - a) Estudio de las condiciones que pueden conducir al pánico.
 - b) Medidas prácticas para contrarrestar la aparición del pánico, por ejemplo, soluciones de ingeniería tales como evitar la excesiva flexibilidad de los edificios, el diseño de vías de salida rápida y segura, educación del público, etc.
 - c) Estudio de las circunstancias que originan problemas de salud mental y medidas prácticas para contrarrestar estos problemas.
 - d) Actitudes individuales ante las amenazas frecuentes y poco frecuentes de terremotos.

3. Existencia o no de una asistencia institucionalizada después de producirse las catástrofes.

Los delegados dirigieron su atención hacia los problemas prácticos con que se enfrentan los distintos Estados Miembros en relación con las consecuencias de orden humano y sociológico de los riesgos sísmicos. Uno de los delegados se refirió a la necesidad que tienen los países que carecen de normas adecuadas de construcción asísmica de información sobre los medios más eficaces para despertar la conciencia del riesgo sísmico. Sin esta conciencia del público no se podrá llegar a una legislación.

En ciertos países existen zonas con construcciones sismorresistentes. Estos países requieren una modalidad diferente de legislación, que fomente la acción individual y colectiva más eficaz contra el riesgo sísmico, y pueden beneficiarse de la información obtenida en otros países que se enfrentan con problemas análogos.

Se observó que la reacción humana frente al riesgo sísmico constituye un fenómeno complejo, en el que intervienen factores restrictivos individuales y de situación. Se precisan investigaciones psicológicas y sociológicas para poner de manifiesto las condiciones del comportamiento humano durante las catástrofes y después de ellas, comprendida la psicología colectiva de las situaciones de estrés que conducen a la angustia y al pánico.

10.3 *Consecuencias de orden sociológico de los riesgos sísmicos*

El documento de trabajo SC - 76/SEISM/16 sobre las consecuencias sociológicas del riesgo sísmico fue presentado, en ausencia de su autor, por el Relator de la Comisión C.

Se señalaron a la atención de los delegados los principios de la organización de un socorro especial de urgencia o de un servicio de protección, como respuesta de la sociedad al riesgo sísmico.

Se facilitó información sobre los métodos que se emplean para hacer frente a este género de catástrofes. Se señaló que en los Estados Unidos de América existen dos organizaciones gubernamentales para prestar ayuda en casos de desastre, una de las cuales, la Federal Disaster Assistance Administration, se ocupa específicamente de los desastres naturales. Esta institución presta asistencia en forma de servicios públicos y ayuda individual, comprendidos los siguientes sectores: viviendas, paro forzoso, alimentación, préstamos y subvenciones.

Se tomó nota de que en algunos otros países, por ejemplo, en Nueva Zelanda, el Japón y la URSS, existen también medidas para estar prevenidos contra estos desastres.

Se mencionó el valor que encierra la ayuda voluntaria en casos de desastre, especialmente la que presta la Liga de Sociedades de la Cruz Roja.

El representante de la Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas del Socorro para Casos de Desastre explicó la labor que llevaba a cabo la Oficina y apoyó las conclusiones generales del documento de trabajo. Indicó que la Oficina ejercía dos funciones principales: 1) la coordinación de los socorros; 2) la organización de la prevención contra los desastres. Resaltó las repercusiones que tienen las catástrofes naturales en los países en desarrollo y llegó a la conclusión de que era esencial realizar en esos países estudios de vulnerabilidad en relación con los

proyectos más importantes, al menos para evitar inversiones importantes en las zonas de mayor riesgo.

La Conferencia discutió toda una serie de posibles medidas que deberían tenerse en cuenta con miras a la disminución de los riesgos sísmicos. Se sugirió que convendría hacer lo necesario para determinar un conjunto óptimo de estas medidas a fin de lograr una disminución eficaz de los riesgos. Se dieron a conocer a la Conferencia los enfoques ideados en la URSS, México y otros países para lograr esa optimización.

Resoluciones

Resolución 10.01

La Conferencia, reconociendo el valor de las investigaciones realizadas en los últimos años sobre los aspectos de orden humano, social y económico de los sismos y otras catástrofes, *recomienda* que la Unesco estimule la prosecución de las investigaciones sobre los aspectos sociales y económicos, a fin de llegar a un conocimiento suficiente para utilizar los resultados de la sismología y de la ingeniería asísmica con objeto de mitigar los efectos de esas catástrofes.

Resolución 10.02

La Conferencia *recomienda* a los Estados Miembros que, al tratar de reducir los riesgos sísmicos, adopten combinaciones óptimas de las siguientes medidas: a) ordenación del aprovechamiento del terreno; b) códigos de construcción; c) medidas educativas y de otras clases para mejorar los edificios no construidos con arreglo a las normas de ingeniería y que no cumplan los códigos de construcción; d) políticas fiscales y otros incentivos económicos; e) seguros; f) planeamiento de medidas urgentes de intervención; g) planeamiento de socorros; h) investigaciones sobre esta materia.

Estas medidas deberían adoptarse en el plano internacional, nacional, regional y local.

Resolución 10.03

La Conferencia *recomienda*:

- a) que la Unesco fomente estudios sobre las distribuciones estocásticas de las diferentes clases de daños causados por los terremotos, en función de factores geofísicos, ingenieriles, económicos y sociales. La Conferencia *recomienda* además que se empleen los resultados de esos estudios al adoptar decisiones en cuanto a la disminución de los riesgos sísmicos en todos los tipos de construcción, comprendidas las viviendas tradicionales;
- b) que, bajo los auspicios de la Unesco, se establezcan los mecanismos internacionales apropiados para coordinar los estudios antes mencionados y aplicar sus resultados mediante la celebración de seminarios teóricos y prácticos.

Resolución 10.04

La Conferencia *recomienda* que en las misiones de reconocimiento sísmico que envíe la Unesco figuren expertos de las ramas apropiadas de la economía y de las ciencias sociales.

Resolución 10.1

La Conferencia *recomienda* que la Unesco, en cooperación con otros órganos de las Naciones Unidas y las organizaciones internacionales pertinentes, convoque a expertos de todos los países con programas de seguros contra terremotos, junto con los delegados interesados de otros países en los que no existan esos programas de seguros y de las principales compañías de seguros y reaseguros, sismólogos, ingenieros especializados en problemas sísmicos, economistas y sociólogos, para estudiar la posibilidad de establecer un marco general viable para la puesta en práctica de un seguro contra los terremotos y de iniciar un programa a largo plazo de estudios sobre los problemas de los seguros contra terremotos.

Resolución 10.21

La Conferencia *recomienda* que la Unesco promueva entre los Estados Miembros la investigación a nivel local de las actitudes y reacciones tradicionales ante los riesgos sísmicos. La Conferencia *recomienda* además que, cuando proceda, se integren dichas actitudes y reacciones tradicionales en el esfuerzo nacional de disminución o bien se utilicen para lograr soluciones innovadoras a nivel local.

Resolución 10.22

La Conferencia *recomienda* que la Unesco aliente a los Estados Miembros: a) a estudiar en qué medida el individuo y la comunidad tienen conciencia de los riesgos sísmicos, a fin de determinar los requisitos que deba reunir el material educativo, y b) a difundir ese material educativo por los medios adecuados, y a ejercer un control continuo para evaluar los resultados de ese esfuerzo.

Resolución 10.3

La Conferencia *recomienda* a los Estados Miembros que formulen, aprueben y pongan oportunamente al día planes para la aplicación y reglamentación de medidas de emergencia a raíz de terremotos, ajustándose a las necesidades locales. La Conferencia *recomienda* asimismo que se practiquen ensayos de las medidas de emergencia a nivel de la colectividad, además de los programas y prácticas a escala nacional, en zonas de alto riesgo sísmico.

11. Cuestiones generales

11.1 *Parámetros sísmicos para proyectos de ingeniería*

La presentación del documento de trabajo SC - 76/SEISM/17 se orientó hacia el examen de criterios para seleccionar los parámetros y los grados de intensidad a utilizar en los proyectos. Un proyecto racional de ingeniería exige la adopción de decisiones óptimas, y la información requerida debe ajustarse a este enfoque. No basta contar con estimaciones aisladas de los valores separados para magnitudes e intensidades máximas. Es necesario también evaluar el grado de incertidumbre que afecta a esas estimaciones.

Se efectuó un análisis de los problemas con que se tropieza en el proceso de conversión de la información geológica, sismotectónica e histórica en los valores

cuantitativos que se precisan para las decisiones que hay que tomar en ingeniería. Se examinaron dos grupos de problemas: los definidos por la respuesta de estructuras aisladas en un punto determinado y los relacionados con la respuesta de sistemas distribuidos en el espacio. El primer grupo comprende, por ejemplo, el proyecto asísmico de edificios, en tanto que el segundo abarca, entre otras cosas, el proyecto de redes de servicios públicos vitales o la estimación de la distribución estocástica de las pérdidas globales máximas causadas por un terremoto en una región dada.

Los problemas del primer grupo pueden abordarse por medio de mapas de probabilidad sísmica, que, en su forma más sencilla, consisten en la representación gráfica de los valores de parámetros aislados que presentan periodos de repetición dados. Como diferentes parámetros guardan una correlación más estrecha con la respuesta sísmica de diferentes sistemas, deberían prepararse, y de hecho se han preparado en algunos países, juegos de mapas de probabilidad sísmica en los que se representen diferentes parámetros (tales como la aceleración máxima del suelo, la velocidad o las ordenadas de los espectros de respuesta correspondientes a distintos periodos naturales y valores de la amortiguación). Estos mapas contienen información en forma apropiada para la toma de decisiones y sirven de base para los mapas de zonación sísmica, cuyos coeficientes y espectros se especifican para proyectos normales.

Cuando interesa la respuesta de sistemas distribuidos en el espacio, se requieren modelos del proceso de generación del terremoto y de la atenuación de la intensidad en función del emplazamiento relativo respecto del foco sísmico.

Se ha puesto de manifiesto que las decisiones en materia de ingeniería dependen mucho de los modelos probabilísticos de la sismicidad, lo que exige una investigación más a fondo. Las principales dificultades que se prevén están relacionadas con la escasez de información estadística y con la necesidad de formular modelos conceptuales del proceso de acumulación y liberación de la energía en zonas determinadas.

Como en otras sesiones, se dedicó gran atención a la conveniencia de construir instrumentos capaces de registrar directamente las velocidades de las partículas del suelo.

La incertidumbre más importante que afecta a las estimaciones de la intensidad en puntos determinados es la referente a las evaluaciones geofísicas y geológicas. El empleo de los criterios del análisis de Bayes no aporta nuevos datos, pero facilita un marco racional para su análisis.

Se debatió con cierta extensión el problema de estudiar más a fondo las correlaciones entre las intensidades de Mercalli modificadas y los parámetros registrados instrumentalmente.

Como corolario de las conclusiones relativas a los modos de presentar la información para las decisiones en materia de ingeniería, se prestó atención una vez más a la conveniencia de ampliar el número y la extensión de las redes de instrumentos sismológicos y de tomar medidas que aseguren un servicio y una conservación adecuados, así como la transformación y la interpretación de los datos.

11.2 *Estudio de los terremotos sobre el terreno*

El debate se basó en el documento SC - 76/SEISM/18. El autor resaltó que los conocimientos sobre la evaluación y la disminución de los riesgos sísmicos deben

basarse en el crecimiento de la masa de datos de observación fiables. Esto solamente puede conseguirse mediante el estudio de los terremotos sobre el terreno, y no basta simplemente con escuchar conferencias o leer informes.

Desde 1962 se han producido diecinueve catástrofes sísmicas que han hecho que la Unesco considerase justificado el envío de misiones. Estos terremotos han causado la muerte de unas 94.000 personas y daños por un valor aproximado de 1800 millones de dólares.

Se hizo observar que, por desgracia, transcurren por lo regular varias semanas hasta que las misiones de la Unesco tienen acceso a los países devastados por las catástrofes. Se consideró que esta demora era muy grande y se sugirió que la Unesco:

- a) ofrezca al país afectado el envío de una misión de reconocimiento, y
- b) envíe inmediateamente un consultor especial que llegue al país en el que ha sobrevenido el terremoto en el plazo de 72 horas.

Se subrayó que la composición de las misiones de la Unesco de cuatro especialistas como máximo debe adaptarse a cada caso concreto de desastre; los terremotos que sobrevienen en emplazamientos urbanos requieren, evidentemente, un equipo distinto que las zonas rurales. Se insistió en que la misión de reconocimiento era de carácter general y que posteriormente podrían requerirse misiones especializadas.

Se desarrolló un extenso debate en torno a la composición de las misiones sobre el terreno. Algunos delegados insistieron en que deberían incluirse expertos de las regiones propensas a terremotos en las misiones enviadas a otros países. Otros delegados, si bien aceptando esta opinión, insistieron igualmente en que deberían incluirse expertos locales en las misiones de la Unesco. Se sugirió también que se facilitara la participación de estudiantes jóvenes dedicados a la investigación.

Se informó a la Conferencia acerca de un «enjambre» de terremotos que se han producido recientemente en Islandia. Se describieron algunas de las características peculiares de estos acontecimientos.

El representante del Banco Interamericano de Desarrollo describió las actividades de esta entidad en la fase de reconstrucción que sigue a los desastres sísmicos en América Central y del Sur.

11.3 *Enseñanza y formación interdisciplinarias*

Uno de los delegados del Japón presentó el documento de trabajo SC - 76/SEISM/19 sobre este punto. El tema principal del documento es que la especialización desemboca en una falta de contacto y de comprensión mutua entre los distintos especialistas y que debe tratarse de colmar esas lagunas fomentando los estudios interdisciplinarios.

Se inició el debate con una petición de los delegados de que se prepare un glosario plurilingüe que contribuya a establecer una terminología común. Se propuso definir tres niveles diferentes de formación interdisciplinaria: primeramente, estudios de larga duración a nivel de postgraduados; en segundo lugar, seminarios de unas pocas semanas de duración para ingenieros en ejercicio que deseen ponerse al día respecto de las nuevas técnicas; y, en tercer y último término, seminarios breves especialmente dedicados a funcionarios técnicos gubernamentales y legisladores. Por lo que respecta a los seminarios de duración corta e intermedia, se sugirió que cada uno de ellos se concentrara en una región y sus

problemas peculiares. Esos seminarios correrían conjuntamente a cargo de especialistas extranjeros y personal homólogo local.

En respuesta a una pregunta sobre en qué fase debería iniciarse la enseñanza de los riesgos sísmicos, se explicó que, en algunos países, se inicia normalmente en la escuela secundaria, mientras que en otros se presenta el tema hasta un nivel postgraduado especializado. En materia de educación de adultos, se señaló que un grupo nacional estaba preparando folletos destinados principalmente a los artesanos y constructores modestos, con el fin de demostrar, con ayuda de diagramas, el empleo de los nuevos materiales de construcción que, en muchas partes del mundo, están sustituyendo rápidamente a los materiales tradicionales.

A continuación se pasó a tratar de la posibilidad de crear nuevos centros internacionales de formación, especialmente en vista del hecho de que algunos de los centros ya existentes habían perdido recientemente parte de su carácter internacional. Prevalció la opinión general de que la revitalización de las instituciones internacionales actuales sería preferible a la creación de otras nuevas. Se acordó que la Unesco debería tratar de apoyar dos modalidades principales de enseñanza interdisciplinaria, a saber, la formación postgraduada en centros internacionales y cursos más breves que se concentren en problemas regionales.

Resoluciones

Resolución 11.11

La Conferencia *recomienda* a los Estados Miembros que se intensifiquen y coordinen las investigaciones en torno a las correlaciones existentes entre la intensidad de los terremotos y los parámetros físicos, y que se publiquen los resultados.

Resolución 11.12

En vista de la importancia de la velocidad de las partículas del terreno en la determinación del índice de gravedad de un movimiento intenso del suelo, la Conferencia *recomienda* que se proyecten y desarrollen, con el asesoramiento técnico y el estímulo de la Unesco, instrumentos apropiados poco costosos para un registro.

Resolución 11.13

La Conferencia *recomienda* que la Unesco continúe esforzándose para que se acopien los registros mundiales actuales y futuros de los movimientos intensos, junto con sus datos macrofísicos correspondientes cuando sea posible y se publiquen con vistas a mejorar la evaluación de los parámetros de proyecto sísmico.

Resolución 11.14

La Conferencia *recomienda* que la Unesco estimule el desarrollo de una instrumentación de ingeniería fácil de manejar y duradera, que esté al alcance de todos los Estados Miembros. Juntamente con centros regionales o nacionales que tengan objetivos similares, la Unesco debería cooperar también en la formación técnica necesaria de las personas que manejen esos instrumentos.

Resolución 11.15

La Conferencia *recomienda* que la Unesco organice un grupo de trabajo con la

finalidad de preparar instrucciones, que se utilizarán en la organización y funcionamiento de las redes nacionales de instrumentos registradores de movimientos intensos, y en la transformación e interpretación de los datos registrados.

Resolución 11.16

La Conferencia *recomienda* que los Estados Miembros se sirvan, siempre que sea posible, de redes sismológicas para mejorar las posibilidades de detección de sismos y para estimar los parámetros sísmicos, y *destaca la importancia* de la participación y de la cooperación de los organismos nacionales y regionales en la asignación de recursos de telecomunicación para la transmisión de las señales sísmicas.

Resolución 11.2

Las misiones de reconocimiento sísmico desempeñan un importante papel como la fase inicial del estudio de los terremotos sobre el terreno. Estas misiones deberían enviarse lo antes posible (de preferencia dentro de las 72 horas) después de producirse la catástrofe.

La Conferencia *insta*, pues, a la Unesco y a los Estados Miembros a que tomen todas las medidas posibles para facilitar la entrada de los miembros de las misiones y de los instrumentos apropiados. Esas medidas podrían comprender, cuando proceda, la simplificación de los trámites fronterizos para las misiones sobre el terreno patrocinadas por la Unesco y por los Estados vecinos.

La Conferencia *recomienda* que se dé la difusión más amplia y rápida posible a los informes de las misiones sobre el terreno.

La Conferencia *recomienda* también que la Unesco, en consulta con los Estados Miembros, prepare una lista al día de los expertos disponibles para las misiones de reconocimiento sísmico. Las misiones deberían incluir expertos de los países propensos a terremotos.

Resolución 11.31

La Conferencia *recomienda* que la Unesco contribuya a la organización de cursillos de formación en sismología e ingeniería asísmica con la colaboración de centros ya establecidos, y sugiere que los países de acogida cooperen proporcionando profesores locales, y en la traducción y difusión de los textos explicados.

Resolución 11.32

La Conferencia *recomienda* que la Unesco, en cooperación con otras organizaciones internacionales competentes, organice un grupo de trabajo para compilar un glosario en las esferas interdisciplinarias de la sismología, sismología aplicada a la ingeniería, la geofísica y la sismotectónica en los idiomas utilizados por la Unesco.

Resolución 11.33

La Conferencia *recomienda* que los Estados Miembros situados en zonas sísmicamente activas atribuyan mayor importancia a la mejora de los sistemas educativos en las universidades e institutos técnicos, que combinen las ciencias sismológicas, geofísicas y geológicas con la ingeniería asísmica.

Resolución 11.34

Observando que es necesario una comprensión mutua más profunda y un mejor

intercambio de información entre sismólogos, geólogos, ingenieros sismólogos y urbanistas en lo que se refiere a la prevención de las catástrofes sísmicas, la Conferencia *recomienda* que la Unesco y sus Estados Miembros fomenten la enseñanza y la formación en materia de sismología, sismología aplicada a la ingeniería e ingeniería asísmica, enviando expertos para la celebración de seminarios de corta duración sobre las materias de interés en los diferentes países y para los centros internacionales de formación e investigación (tales como el IISEE).

Resolución 11.35

Observando la necesidad de facilitar la formación en las materias pertinentes en los países expuestos a riesgos sísmicos, la Conferencia *recomienda* que la Unesco establezca equipos móviles de expertos en los temas relacionados con los riesgos sísmicos, para promover la formación y la investigación con miras a la máxima reducción de los riesgos sísmicos en los países menos familiarizados con los progresos y consecuencias logradas en estas materias. Podría invitarse a estos equipos de expertos a que presten asesoramiento y orientación para sentar las bases de una formación básica en materia de ingeniería asísmica y sismología.

Resolución 11.36

Reconociendo el gran valor de la comprensión pública en orden a mitigar los riesgos sísmicos en los países propensos a terremotos, la Conferencia *recomienda* que la Unesco coordine con los Estados Miembros interesados la difusión de los actuales conocimientos científicos y técnicos, en forma apropiada para su aplicación en la enseñanza y la formación generales del público, tanto en las escuelas como en la educación de adultos.

12. Ejecución

12.1 *Estudios interdisciplinarios sobre la mitigación de las pérdidas causadas por los terremotos*

Por invitación del Presidente, el Convocador del Grupo de Trabajo sobre Investigaciones Interdisciplinarias presentó el informe del Grupo (documento SC - 76/SEISM/WG/1). El Secretario General invitó a la Conferencia a que considerase este informe como documento de trabajo sobre este punto del Orden del Día y sugirió que, si aceptaba las propuestas presentadas por el Grupo de Trabajo, las desarrollara y ampliara en cierta medida a fin de facilitar una orientación a la Unesco sobre la acción que ésta entendiéndose que debería emprenderse en cuanto a cada uno de los problemas que el Grupo ha comprobado que exigen un enfoque interdisciplinario. Sugirió que en algunos casos podrían formularse propuestas concretas para emprender programas de investigación a escala mundial o regional.

Un delegado propuso la siguiente adición a la lista de problemas presentada por el Grupo de Trabajo:

«Evaluación de los riesgos sísmicos»

Este problema interdisciplinario implicará la estimación de las distribuciones estocásticas de los diferentes tipos de daños producidos por los terremotos para determinados territorios y periodos de tiempo, sobre la base de un análisis conjunto de todos los datos pertinentes: geofísicos, económicos, sociales y de ingeniería. Esas distribuciones podrán utilizarse como base para la adopción de decisiones en la práctica con miras a la disminución de los riesgos sísmicos».

Por lo que se refiere a la elección de típicos movimientos sísmicos del terreno, los delegados de Bulgaria, Grecia, Rumania, Turquía y Yugoslavia propusieron conjuntamente la iniciación de un proyecto para la disminución del riesgo sísmico en la región balcánica, con los objetivos siguientes:

- i) Utilización de los datos del anterior estudio de la sismicidad de la región balcánica, para ampliar los conocimientos en materia de ingeniería asísmica y de planificación física.
- ii) Documentación de la metodología para el diseño de estructuras de ingeniería y servicios públicos, y aplicación de los resultados de las investigaciones citadas a problemas prácticos de prevención de catástrofes y preparación previa.
- iii) Programa de formación e investigación mediante el establecimiento de un instituto internacional en Skoplie, con la participación de instituciones afines de los países de la región.

Esta cooperación regional iniciada por los países balcánicos estaría abierta a la participación de otros países vecinos y sería de esperar que los resultados del proyecto resultaran beneficiosos para todos los países expuestos a riesgos sísmicos.

En relación con el mismo problema, los delegados del Irán y de Turquía sugirieron que un estudio regional de la sismicidad y sismotectónica de las cordilleras de Anatolia-Zagos-Hindukush-Himalaya constituiría una buena oportunidad de cooperación regional.

Con referencia al problema de la sismicidad inducida, el delegado de Grecia declaró que se tomarían medidas para concertar estudios interdisciplinarios de ese tipo de sismicidad, que realizarían equipos internacionales en los emplazamientos de los actuales y futuros embalses de Grecia.

Resoluciones

Resolución 12.11

La Conferencia *recomienda* que la Unesco aliente y apoye los proyectos mencionados en la parte de su informe relativa a este punto del Orden del Día y que patrocine una serie de seminarios, simposios y grupos interdisciplinarios de trabajo, regionales e internacionales, que estudien e informen sobre temas concretos relacionados con problemas de alcance regional o general.

Algunas de estas reuniones podrán ser organizadas, bajo el patrocinio de la Unesco, por organizaciones internacionales no gubernamentales, como son uniones y asociaciones científicas internacionales. La organización de otras, singularmente reuniones de trabajo y seminarios regionales, precisan de fuerte apoyo por parte de los Estados Miembros.

Entre los participantes deberían figurar grupos escogidos de investigadores jóvenes en activo.

Se consideran de la máxima prioridad los siguientes problemas interdisciplinarios:

- i) *La elección de los sismos de diseño*
Entre los puntos que contribuirán a la comprensión de este problema se encuentran: los estudios sismotectónicos, los datos instrumentales e históricos sobre la sismicidad, (zonación sísmica), y sobre las condiciones geológicas y edáficas locales (microzonación) y los datos pertinentes sobre movimientos intensos.
- ii) *La especificación de criterios para los proyectos de ingeniería*
A este respecto, habrán de tenerse en cuenta los siguientes factores: riesgo admisible, factores económicos (por ejemplo, estudios costos-beneficios), consideraciones arquitectónicas e ingenieriles, disponibilidad local de materiales y métodos de construcción.
- iii) *La sismicidad inducida y su influencia social*
En el estado actual de los conocimientos, este importante problema requiere de los esfuerzos conjugados de expertos en tectónica, mecánica de las rocas, hidrología, sismología e ingeniería, así como de la atención de los sociólogos.
- iv) *La interpretación de los registros históricos y arqueológicos de terremotos*
La búsqueda y evaluación de acontecimientos históricos exige la cooperación interdisciplinaria de historiadores, arqueólogos y especialistas en ciencias de la tierra, así como la participación de científicos experimentados en datación absoluta.
- v) *Las consecuencias de la predicción de los sismos*
Interesan a este respecto los efectos sociales y económicos, así como el problema de formular las predicciones de la forma más eficaz.
- vi) *Las investigaciones interdisciplinarias para aumentar la resistencia a los terremotos de las viviendas y edificios rústicos no construidos por ingenieros*
Este importante problema, de especial interés para los países en desarrollo, exige la atención de arquitectos, ingenieros, especialistas en antropología social y economistas.
- vii) *Consecuencias económicas y sociales y seguros en relación con la mitigación de las catástrofes sísmicas*
Este punto implica la cooperación de economistas, especialistas en matemáticas aplicadas y especialistas de seguros, así como de sismólogos e ingenieros con práctica en problemas de análisis de riesgos.
- viii) *Evaluación de los riesgos sísmicos*
La estimación de la distribución estocástica de los diferentes tipos de daños sísmicos, basada en un análisis multidisciplinario de todos los datos pertinentes, servirá de base práctica para tomar decisiones con miras a reducir los riesgos sísmicos.

La Conferencia acordó que, si llega a establecerse el propuesto Comité Consultivo en materia de sismos, constituirá un mecanismo apropiado para planificar la realización de las investigaciones interdisciplinarias señaladas en los ocho puntos que anteceden.

Resolución 12.12

La Conferencia *insta* a los Estados Miembros a que comprendan la necesidad de desarrollar trabajos interdisciplinarios en sus propios países, con miras a la evaluación y disminución de los riesgos sísmicos. Se debería atender especialmente a la formación interdisciplinaria a nivel universitario.

12.1 *Mecanismos de cooperación internacional*

A invitación del Presidente, el Convocador del Grupo de Trabajo II presentó su informe sobre este punto del Orden del Día a la sesión plenaria de la Conferencia.

El debate que se desarrolló a continuación versó en torno a la cuestión de si las resoluciones de la presente Conferencia serían aplicadas mejor y más efectivamente por un comité consultivo no gubernamental o bien por un órgano intergubernamental. El Secretario General señaló que se trataba de una cuestión fundamental que había de decidirse antes de examinar en detalle ninguna propuesta. El Presidente invitó a la Conferencia a que indicase si deseaba votar sobre esta cuestión. El delegado del Reino Unido manifestó que, a su juicio, no era necesaria tal votación y sugirió que la Conferencia pasase a examinar el proyecto de resolución propuesto por el Grupo de Trabajo.

A invitación del Presidente, la Conferencia examinó a continuación, párrafo por párrafo, el proyecto de resolución contenido en el informe del Grupo de Trabajo (documento SC - 76/SEISM/WG/1).

El delegado de China, si bien reconoció la importancia de las reuniones internacionales como la presente Conferencia, opinó que la composición y las funciones del Comité propuesto por el Grupo de Trabajo no estaban suficientemente claras y que, en el momento actual, resultaba prematuro constituir ese Comité. Explicó la posición de su Gobierno con respecto a aquellas organizaciones internacionales no gubernamentales que aún no habían respondido a la resolución 6.51, aprobada por la Conferencia General de la Unesco en su 18a. reunión, y declaró que, en consecuencia, su delegación no participaría en la votación sobre esta propuesta.

Con respecto al párrafo 1 de este proyecto de resolución, el delegado de la URSS propuso sustituir la frase «en general... riesgos sísmicos» por las palabras «sobre la preparación de un programa de investigaciones interdisciplinarias a largo plazo que emprenderían conjuntamente la Unesco y la UNDRO para promover la cooperación internacional en esta materia».

Los delegados del Iraq, Suecia y la URSS presentaron enmiendas al texto del proyecto de resolución, que fueron aceptadas por la Conferencia.

En cuanto al párrafo 2 del proyecto de resolución, el delegado de Turquía presentó una enmienda en la que se proponía sustituir el propuesto comité de especialistas y observadores representantes de organizaciones internacionales no gubernamentales por un comité compuesto por representantes de veinte Estados Miembros elegidos por la Conferencia General de la Unesco. Esta enmienda fue rechazada por 17 votos contra 8 y 6 abstenciones.

El párrafo 1, en su forma enmendada, fue aprobado por unanimidad; el párrafo 2, en su forma enmendada, fue aprobado por 24 votos contra 2 y 7 abstenciones; el párrafo 3, en su forma enmendada, fue aprobado por 23 votos contra uno y 7 abstenciones; el párrafo 4 fue aprobado por 28 votos, con ninguno en contra y 2

abstenciones. La resolución en conjunto, que comprendía las enmiendas aprobadas, fue aprobada por 21 votos, con ninguno en contra y 6 abstenciones; su texto es el siguiente:

Resolución 12.21

Deseosa de que la Unesco, sus Estados Miembros y otras organizaciones internacionales pertinentes pongan en práctica sus recomendaciones en la mayor medida de lo posible.

Reconociendo que la aplicación de muchas de sus recomendaciones implicará una acción concertada por parte de varias organizaciones internacionales (gubernamentales y no gubernamentales) y de la Unesco y la UNDRO en particular.

Consciente de que sus recomendaciones requerirán un amplio grado de cooperación interdisciplinaria en las ciencias naturales, humanas, sociales y de la ingeniería.

Atribuyendo gran importancia a la creación y establecimiento de un mecanismo apropiado de consulta y coordinación internacionales a estos fines.

Recomienda:

1. Que la Unesco, en consulta con la UNDRO, establezca un comité internacional, que se denominará «Comité Mixto sobre la Evaluación y la Disminución de los Riesgos Sísmicos», para que asesore a la Unesco y a la UNDRO en cuanto al cumplimiento de las recomendaciones y resoluciones de esta Conferencia, y sobre la preparación de un programa de investigaciones interdisciplinarias a largo plazo, que emprenderán conjuntamente la Unesco y la UNDRO para promover la cooperación internacional en esta materia.
2. Que este Comité esté compuesto por: a) especialistas (no más de 10) seleccionados por la Unesco y la UNDRO, en consulta con los Estados Miembros y teniendo en cuenta la necesidad de asegurar una representación geográfica equitativa; b) observadores que representen a determinadas organizaciones internacionales no gubernamentales.
3. Que el Comité funcione de conformidad con los reglamentos de la Unesco aplicables a este género de comités consultivos; en particular, los Estados Miembros y los Miembros Asociados de la Unesco tendrían derecho a enviar observadores a las reuniones del Comité.
4. Que, además del asesoramiento mencionado en el anterior párrafo 1, el Comité esté presto a asesorar a la Unesco y a la UNDRO y, por conducto de éstas, a los Estados Miembros, sobre el modo más adecuado de servirse de la amplia gama de disciplinas pertinentes y la manera de lograr la combinación más eficaz de la acción científica y administrativa, en un abordamiento concertado del problema de los riesgos sísmicos y su disminución. En particular, el Comité debería estudiar y asesorar en cuanto a qué aparato intergubernamental sería conveniente.

Se aprobó por unanimidad, menos una abstención, la siguiente resolución propuesta por los delegados de Islandia y de la República Democrática Alemana:

Resolución 12.22

La Conferencia,

Observando que en el último decenio se han conseguido enormes progresos a

escala mundial en lo que respecta a evitar las pérdidas producidas por los terremotos y que se esperan realizar nuevos progresos.

Consciente de que ya se poseen conocimientos para salvar vidas humanas y reducir las graves consecuencias económicas de los terremotos.

Observando que esos conocimientos no se aplican aún en la práctica en extensas regiones del mundo que corren peligro de catástrofes sísmicas.

Reconociendo la urgente necesidad de una acción coordinada a escala internacional para lograr nuevos progresos en materia de evaluación y disminución de los riesgos sísmicos.

Subrayando la utilidad de un amplio intercambio a nivel intergubernamental de ideas y experiencias sobre novedades en materia de sismología, ingeniería sísmica y esferas conexas.

Teniendo en cuenta la oportuna iniciativa de la Unesco de promover las investigaciones interdisciplinarias convocando esta Conferencia Intergubernamental sobre la Evaluación y la Disminución de los Riesgos Sísmicos:

1. *Encomia* las actividades de la Unesco en esta esfera.
2. *Propone* que la Conferencia General de la Unesco, en su 19a. reunión, incluya la prosecución y expansión de las actividades de la Unesco encaminadas a promover las investigaciones científicas y tecnológicas interdisciplinarias en materia de sismología asísmica y esferas conexas en el programa de la Unesco para 1977-1978.
3. *Recomienda* a los gobiernos de aquellos Estados Miembros en que puedan esperarse pérdidas por terremotos que inviertan recursos más cuantiosos en el estudio de las cuestiones relacionadas con los riesgos sísmicos.

El terremoto del 4 de febrero de 1976 en Guatemala

En su Sesión Plenaria de apertura, la Conferencia guardó un minuto de silencio en memoria de los hombres, mujeres y niños que perdieron sus vidas en el catastrófico terremoto del 4 de febrero de 1976 en Guatemala.

El Presidente de la Conferencia dirigió el siguiente telegrama al General Kjell Langerud, Presidente de la República de Guatemala:

DELEGADOS CONFERENCIA INTERGUBERNAMENTAL SOBRE EVALUACIÓN Y DISMINUCIÓN RIESGOS SÍSMICOS REUNIDOS HOY 10 DE FEBRERO EN SEDE DE LA UNESCO OBSERVARON MINUTO DE SILENCIO EN MEMORIA DE LAS VÍCTIMAS DEL TERREMOTO DEL 4 DE FEBRERO EN GUATEMALA Y RENOVARON SU DETERMINACIÓN DE HACER TODO LO POSIBLE PARA EVITAR REPETICIÓN DE EVENTOS TAN TRÁGICOS RESPETUOSAMENTE

JAI KRISHNA PRESIDENTE CONFERENCIA

Se recibió la siguiente respuesta:

PROFUNDAMENTE AGRADEZCO SU EMOTIVO MENSAJE DE CONDOLENCIA Y SOLIDARIDAD CON EL PUEBLO GUATEMALTECO EN ESTOS MOMENTOS CRUCIALES POR LOS QUE ATRAVIESA ATENTAMENTE

KJELL EUGENIO LANGERUD GARCIA

PRESIDENTE DE GUATEMALA