

# Lecciones del Terremoto

**RODOLFO SARAGONI HUERTA**

Ingeniero Civil Universidad de Chile. Doctor Universidad de California, Los Angeles, Profesor Ingeniería Sísmica y Ex Director del Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

El 3 de marzo de 1985 ocurrió a las 19 horas 47 minutos, un terremoto de magnitud de Richter 7.8 con epicentro en el mar a unos 30 kilómetros frente a Algarrobo y a unos 15 kilómetros de profundidad. Este terremoto de características moderadas a fuertes es el terremoto más destructivo que ha afectado a la zona central de Chile en este siglo, con la excepción del terremoto de Valparaíso del 16 de agosto de 1906.

El efecto del terremoto se extendió desde Los Vilos por el norte hasta Talca por el sur, produciendo 147 víctimas en una población aproximada de seis millones. Un sismo de magnitud similar ocurrió en 1976 en la ciudad de Tangshan en China produciendo 240.000 víctimas en una población expuesta de un millón de habitantes. En este sentido el terremoto del 3 de marzo resulta menos destructivo que el terremoto de China. Los daños del sismo, según cifras oficiales, alcanzaron a mil ochocientos millones de dólares, desconociéndose la disgregación de esta cifra. Los daños no afectaron de modo notorio al sector productivo, concentrándose éstos esencialmente en la infraestructura portuaria, hospitalaria, educacional, vial y de servicios sanitarios.

Los daños en el sector habitacional se tradujeron en 66.000 viviendas destruidas y 127.000 dañadas, concentrándose el daño en las casas de adobe de un piso, de ciudades o pueblos agrícolas y sus sectores rurales como Melipilla, Curacaví, Rengo, Machalí y Alhué, y de sectores urbanos como San Antonio, Llolleo, Valparaíso y sector poniente de Santiago.

Por otra parte el número de edificios de hormigón armado que fueron dañados por el sismo y que fueron diseñados con prácticas de diseño antisísmico es mínima. Sin embargo el colapso de unos pocos de ellos, así como el cuasi colapso de otros bajo la acción de este terremoto de características de moderado a fuerte es un llamado de advertencia sobre la conveniencia de revisión de las prácticas nacionales tanto de diseño como de construcción antisísmica.

A algunos meses de ocurrido el terremoto, es conveniente preguntarse qué lecciones nos ha dejado así como qué acciones es conveniente abordar para la reconstrucción en el futuro inmediato. Todos los terremotos que han afectado a nuestro país en este siglo han dejado lecciones trascendentes para el futuro, ya sea en las prácticas de diseño y de construcción o en la forma de abordar la emergencia. Así por ejemplo el terremoto de 1906 dio lugar a la creación del Instituto Sismológico, el terremoto de Talca de 1928 a la dictación en 1929 de la Ley de Construcciones Asísmicas. El terremoto de Chillán de 1939 difundió la construcción asísmica en base a albañilería enmarcada con pilares y cadenas, eliminando al adobe como solución habitacional antisísmica. Ello fue consecuencia de la observación del buen comportamiento sísmico que demostraron en Chillán seis casas construidas con este sistema. Como consecuencia de las recomendaciones de la comisión que estudió este terremoto se modificaron en 1949 las regulaciones antisísmicas de la Ordenanza General de Construcciones y Urbanización de 1931.

Los sismos del 21 y 22 de mayo de 1960 produjeron elevadas pérdidas humanas y materiales por efecto del maremoto así como por las fallas de deslizamiento, asentamiento y licuación de suelos. Las fallas producidas por las vibraciones estructurales fueron menores comparadas con la gran magnitud del

terremoto. La lección dejada por las fallas de suelos dieron un gran impulso en el país a la dinámica de suelos en especial y a la mecánica de suelos en general.

Entre 1959 y 1972 se estudió la Norma Chilena 433. Of. 72 "Cálculo Antisísmico de Edificios" que modifica la limitación de altura sísmica de los edificios permitiendo una mayor densificación en el uso del suelo. Hace posible, entre otros, la construcción en base a torres de la Remodelación San Borja en Santiago. En este mismo período, fines de la década del 60, se introduce el cálculo antisísmico de edificios con computadores.

En este período ocurren los terremotos moderados de La Ligua de 1965 y de Papudo de 1971. Algunos de los efectos que se observaron en el sismo del 3 de marzo de 1985 se insinuaron, especialmente con el terremoto de 1971. Se prueba por primera vez el comportamiento de edificios altos de hormigón armado con este terremoto. El comportamiento observado de viviendas de un piso en albañilería así como viviendas sociales de un piso o en altura media restringe las soluciones constructivas empleadas hasta ese entonces a la vivienda de albañilería enmarcada con pilares y cadenas.

## LAS LECCIONES POSITIVAS DEL TERREMOTO

Las lecciones dejadas por el sismo pueden dividirse entre positivas y negativas. En primer término se analizarán las lecciones positivas dejadas por este terremoto.

### El terremoto mejor instrumentado a nivel mundial

El terremoto del 3 de marzo, proporcionó una información valiosa sin precedentes, de gran importancia para zonas sísmicas. Fue la primera vez que un conjunto de instrumentos modernos y sensibles estaban instalados en el terreno permitiendo registrar un terremoto de magnitud de Richter 7.8. Siendo el terremoto de magnitud mayor registrado por acelerógrafos a nivel mundial.

El terremoto del 3 de marzo fue medido por aproximadamente 30 acelerógrafos.

Estos instrumentos miden las aceleraciones del suelo sólo en sismos fuertes o terremotos, en dos direcciones horizontales y una vertical, no se saturan (no se salta la aguja), están diseñados para medir en el epicentro y en lugares en que pueden haber fallas estructurales importantes.

La red nacional de acelerógrafos de alta densidad que instaló el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile con la colaboración de la Organización de Estados Americanos permitió saber cómo entregan, este tipo de terremotos, su energía en el tiempo y cómo esta entrega afecta el comportamiento de los edificios. Así fue posible determinar que el evento del 3 de marzo estaba constituido por dos terremotos, el primero de magnitud de Richter 5.3, con epicentro en el mar frente a Algarrobo, con una duración de movimiento fuerte de 10 segundos y el segundo que ocurrió inmediatamente después, de magnitud de Richter 7.8 con epicentro en el mar frente a San Antonio con una duración de movimiento fuerte de 30 segundos. La duración total de ambos terremotos alcanzó a 120 segundos.

Los datos que se han obtenido en ciudades como Llolleo,

Melipilla, Valparaíso, Viña del Mar y Santiago, permitirán estudiar las causas reales de las fallas estructurales que se observaron en edificios de esas ciudades. En particular, el registro de aceleraciones que se obtuvo en Llolleo, es el más importante por ser el más próximo al epicentro del terremoto principal. Este registro será usado extensamente en el futuro para el diseño de la nueva generación de edificios altos. Los valores máximos que se registraron en Llolleo en sentido horizontal son de 0.667 g. y 0.85 g. en vertical (g = aceleración de gravedad).

El registro obtenido en Melipilla permitirá estudiar científicamente las causas de la falla de miles de casas de adobe de esa ciudad y sus alrededores evitando así inconvenientes especulaciones sobre su comportamiento.

El registro de aceleraciones, obtenido en la plaza de Viña del Mar permitirá estudiar la causa de la falla de los edificios altos de esa ciudad. El registro se obtuvo a unas quince cuadras de la ubicación de los edificios.

El mapa que se muestra en la Fig. 1 indica la dirección y los valores de las aceleraciones horizontales máximas registradas.

daño observado con los registros y mejorar el diseño en el futuro, comparando sobre bases más racionales las características de los terremotos que ocurren en Chile con los que ocurren en otras partes del mundo.

El comportamiento sísmico del parque de edificaciones modernas afectadas por el terremoto puede considerarse satisfactorio. Las fallas se concentraron en tipos de construcciones bien específicas y en particular en generaciones de ellas. En este sentido el nivel del diseño sísmico puede considerarse como satisfactorio. En particular, el examen de la Norma Chilena de Diseño Antisísmico de Edificios, en lo que se relaciona con evitar el colapso de las estructuras.

### La Cultura Sísmica de la Población

El reducido número de víctimas que dejó el terremoto, se debe entre otras causas, a que ocurrió un día domingo a las 8 de la noche y a la actividad premonitrice que acompañó al terremoto en los días previos a su ocurrencia, que permitió que los medios de comunicación, dieran instrucciones a la población sobre

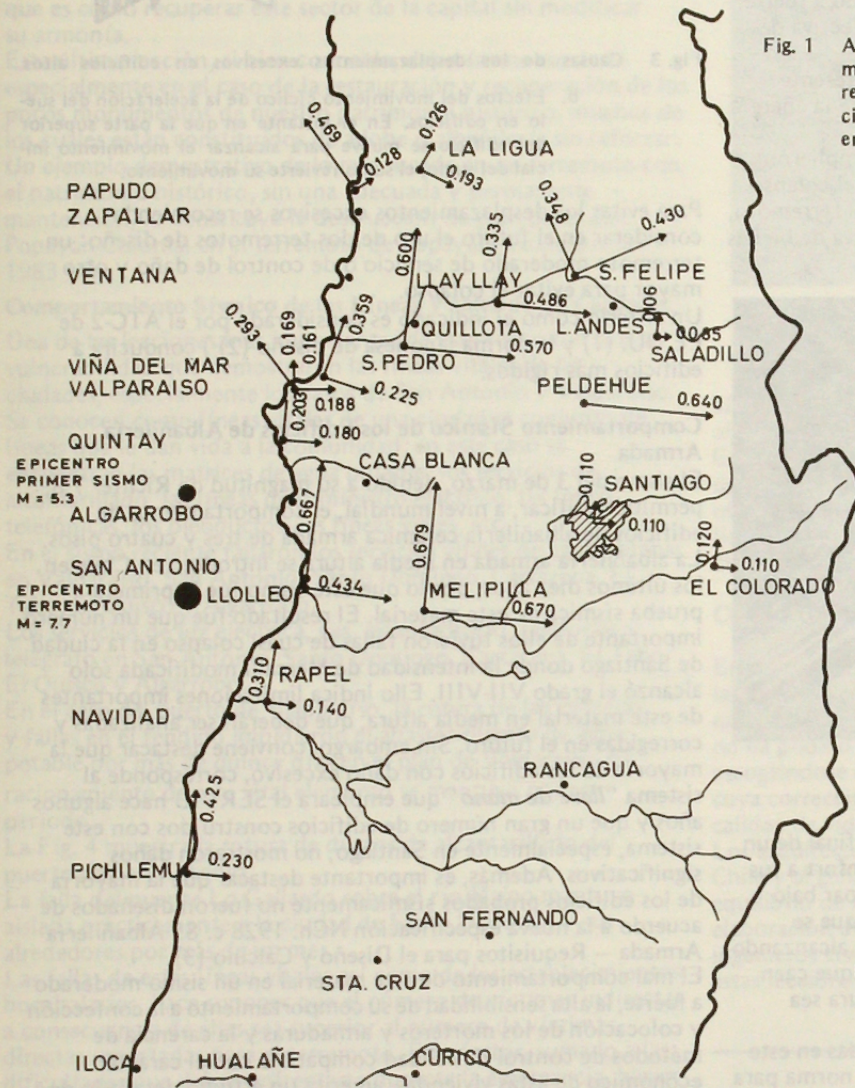


Fig. 1 Aceleraciones máximas horizontales del terremoto del 3 de Marzo de 1985 medidas por la red de acelerógrafos. Flechas indican la dirección y el valor de la aceleración máxima medida en aceleración de gravedad.

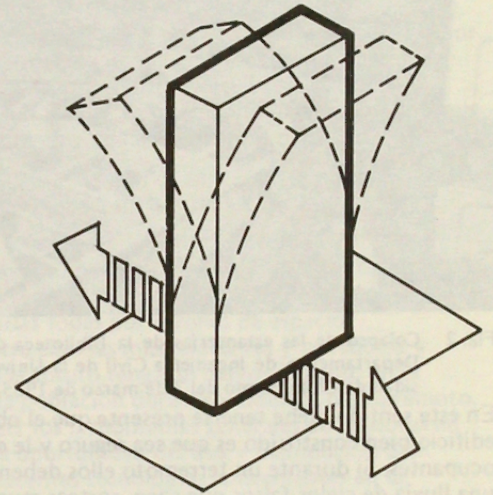


Fig. 3 Causas de los desplazamientos excesivos en edificios altos.

a. Los edificios actúan como péndulo en relación al movimiento del suelo.

### Comportamiento global de los edificios y servicios durante el terremoto

La importancia adicional y a escala mundial de la instrumentación que operó durante el terremoto es que ella está ubicada en una zona con gran cantidad de edificaciones modernas, en baja, en media y en altura, de edificaciones construidas siguiendo prácticas de diseño en hormigón armado de Alemania y Estados Unidos, de instalaciones de infraestructura básica como hospitales, colegios, cuarteles de bomberos, de servicios vitales, etc. Ello permitirá relacionar el

cómo comportarse durante un terremoto. Ello evitó un número importante de pérdidas de vidas humanas a consecuencia del pánico, que habrían perecido aplastadas por la frecuente caída de tejas, antepechos, antepechos, marquesinas, tímpanos y otros elementos no estructurales.

Simultáneamente con ello, se pudo apreciar, especialmente durante la emergencia, la cultura sísmica que tiene la población en su comportamiento tanto individual como solidario con los afectados. Ello no ocurre en otros países en el grado observado en este sismo.

## LAS LECCIONES NEGATIVAS DEL TERREMOTO

Consideremos a continuación las lecciones negativas entregadas por el terremoto, las cuales requieren de una identificación de sus causas a objeto de evitar la repetición de sus efectos en el futuro.

### Comportamiento Sísmico de los Edificios Altos de Hormigón Armado

El objetivo de la ingeniería antisísmica contenido en nuestra norma NCh. 433 "Diseño Antisísmico de Edificios" puede expresarse como "que los edificios no colapsen durante terremotos desusualmente intensos, tengan daños reparables durante terremotos intensos y no tengan daños durante sismos moderados".

En este sentido, el objetivo de nuestra norma no se alcanzó en algunos edificios de hormigón armado construidos con anterioridad a la vigencia de la norma, en particular en una zona de Viña del Mar.

El conjunto de edificios constituidos por el Acapulco, Hanga Roa y el Faro —construido posteriormente en el sector de Reñaca Alto— se caracterizan por limitaciones en el diseño y en la calidad de su construcción. El colapso de uno de ellos y el cuasicolapso de otros, para un terremoto de moderado a fuerte, debe hacernos meditar en el futuro sobre la forma efectiva de evitar que ello vuelva a ocurrir.

En este sentido la situación es más grave si se tiene presente que el terremoto del 3 de marzo liberó sólo el 60% de la energía que entregó el sismo de Valparaíso de 1906.

Los restantes edificios altos de hormigón armado cumplieron con el objetivo de las normas de ingeniería de evitar el colapso de ellos, sin embargo su excesiva vibración durante el terremoto, produjo pánico en sus habitantes, destrucción excesiva de bienes muebles y elementos no estructurales (Ver Fig. 2).



Fig. 2 Colapso de las estanterías de la Biblioteca del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Sismo del 3 de marzo de 1985.

En este sentido, debe tenerse presente que el objeto final de un edificio bien construido es que sea seguro y le de confort a sus ocupantes. Si durante un terremoto ellos deben escapar bajo una lluvia de cielos falsos que caen, sortear muebles que se mueven, desplazarse por corredores y escalas sin luz, alcanzando la calle bajo antechos, quebravistas, vigas y vidrios que caen de lo alto, entonces, no puede decirse que la estructura sea segura y antisísmica.

Ello constituye una de las grandes lecciones aprendidas en este terremoto: los desplazamientos que permite nuestra norma para edificios altos parecen excesivos, permitiendo un daño no estructural y un pánico en los usuarios no aceptable. Esta es una materia en que tanto arquitectos como ingenieros deberán estudiar a la brevedad para resolverlo.

Este fenómeno fue observado por primera vez en el terremoto de Nicaragua de 1972, en que el edificio del Banco Central, diseñado con la práctica norteamericana, sobrevivió el terremoto, sin embargo el gran daño en elementos arquitectónicos condujo a su posterior demolición.

Los desplazamientos relativos excesivos entre piso de las estructuras, causante de la mayoría de los daños arquitectónicos,

se producen por el movimiento cíclico de la estructura, tal como se muestra en la Fig. 3. En esta figura se muestra, que al mismo tiempo que la parte superior del edificio se mueve para alcanzar el movimiento inicial del suelo, el suelo revierte su movimiento.

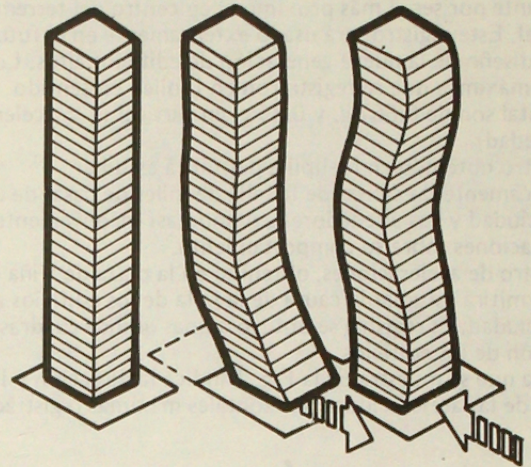


Fig. 3 Causas de los desplazamientos excesivos en edificios altos.

- b. Efectos del movimiento cíclico de la aceleración del suelo en edificios. En el instante en que la parte superior del edificio se mueve para alcanzar el movimiento inicial del suelo, el suelo revierte su movimiento.

Para evitar los desplazamientos excesivos se recomienda considerar en el futuro el uso de dos terremotos de diseño: un terremoto moderado de servicio o de control de daño y otro mayor para evitar el colapso.

Un criterio como el indicado es considerado por el ATC-2 de EE.UU. (1) y la norma japonesa de diseño (2) ) conducirá a edificios más rígidos.

### Comportamiento Sísmico de los Edificios de Albañilería Armada

El sismo del 3 de marzo, debido a su magnitud de Richter 7.8, permitió verificar, a nivel mundial, el comportamiento de edificios de albañilería cerámica armada de tres y cuatro pisos. La albañilería armada en media altura se introdujo en Chile en los últimos diez años, por lo que este sismo fue la primera prueba sísmica de este material. El resultado fue que un número importante de ellos tuvieron fallas de cuasi colapso en la ciudad de Santiago donde la intensidad de Mercalli modificada sólo alcanzó el grado VII-VIII. Ello indica limitaciones importantes de este material en media altura, que deberán ser analizadas y corregidas en el futuro. Sin embargo, conviene destacar que la mayoría de los edificios con daño excesivo, corresponde al sistema "llave de mano" que emplea el SERVIU hace algunos años y que un gran número de edificios construidos con este sistema, especialmente en Santiago, no mostraron daños significativos. Además, es importante destacar que la mayoría de los edificios probados sísmicamente no fueron diseñados de acuerdo a la nueva especificación NCh. 1928 c. 85 Albañilería Armada — Requisitos para el Diseño y Cálculo (3).

El mal comportamiento de este material en un sismo moderado a fuerte, la alta sensibilidad de su comportamiento a la confección y colocación de los morteros y armaduras y la carencia de métodos de control de calidad compatible con el carácter económico de estas viviendas, amerita un estudio detallado de la respuesta sísmica de este material en media altura para el futuro.

### Comportamiento Sísmico del Adobe

Al instante de ocurrir el sismo, se desarrollaba una fuerte polémica entre los que recomendaban el uso de este material como asísmico siguiendo ciertas prácticas constructivas y los que lo consideraban como un peligro público por su alta vulnerabilidad.

El pobre comportamiento exhibido por el adobe en la zona epicentral para este sismo de características de moderado a

fuerte, indudablemente ha postergado la controversia, pero no la ha eliminado.

El colapso de miles de viviendas de este material en zonas agrícolas como Melipilla, Alhué, Rengo y Machalí, así como en el sector poniente de Santiago y el Almendral de Valparaíso, ha dejado de manifiesto que no se puede recomendar el uso del adobe en zonas sísmicas en forma liviana o basado en analogías no siempre válidas o en observaciones casuísticas. Ello no significa que en algunas zonas del país no pueda construirse posiblemente en adobe, pero ello requiere de mayores estudios. Como conclusión de este terremoto, en relación al adobe, se obtuvieron al menos dos lecciones. La primera, que el adobe se constituyó en una trampa mortal en la zona epicentral o en zonas alejadas del epicentro, pero de suelos de mala calidad, como fue el caso de las ciudades de Rengo y Curacaví. La segunda, que el adobe sin una adecuada mantención permanente se degrada rápidamente en su capacidad sísmica. El caso más significativo de este aspecto es el sector poniente de Santiago: Esta zona de la ciudad resistió el sismo de Valparaíso de 1906 sin mayores problemas; en cambio, el comportamiento de estas mismas viviendas para el reciente sismo fue lamentable, planteando de paso uno de los mayores problemas urbanísticos, que es cómo recuperar este sector de la capital sin modificar su armonía.

Esta última lección, si bien conocida, deberíamos asociarla especialmente en el caso de la restauración y recuperación de los pocos monumentos de nuestro patrimonio histórico, muchos de los cuales están constituídos de adobe o albañilería sin reforzar. Un ejemplo demostrativo de lo que sucede en un terremoto con el patrimonio histórico, sin una adecuada y permanente mantención, lo constituye la destrucción de gran parte del Popayán Colonial en el terremoto de Popayán, Colombia de 1983 (4).

#### Comportamiento Sísmico de las Líneas Vitales de las Ciudades

Una de las lecciones más importantes de este sismo fue la alta vulnerabilidad que demostraron las líneas vitales de las ciudades, especialmente los casos de San Antonio y Valparaíso. Se conocen como líneas vitales de una ciudad al conjunto de líneas que le dan vida a la comunidad; en este caso se encuentran las matrices de agua potable, los servicios de alcantarillado, las líneas de suministro eléctrico, las líneas telefónicas, los oleoductos, las líneas viales, etc.

En el sismo reciente fallaron los servicios vitales de agua potable en Valparaíso, San Antonio, Santo Domingo, Cartagena, El Tabo, El Quisco y Algarrobo.

Los servicios de luz eléctrica, gas, alcantarillado, teléfonos y telégrafo en San Antonio, Santo Domingo, Cartagena, El Tabo, El Quisco y Algarrobo.

En el caso del puerto de Valparaíso, la rotura de las cañerías y fallas en el tendido impidieron el abastecimiento de agua potable por más de quince días en el plan de Valparaíso. El racionamiento de este vital elemento se mantuvo por ese período.

La Fig. 4 muestra la rotura de ductos de alcantarillado del puerto de San Antonio.

La falla del puente Lo Gallardo sobre el río Maipo mantuvo aislada prácticamente a la ciudad de Santo Domingo y sus alrededores por más de un mes.

Las fallas de estas líneas vitales así como de los establecimientos hospitalarios, hace suponer que el número de víctimas indirectas a consecuencia de ellas sea superior al número de víctimas directas reportadas para el terremoto. Este factor, sumado a las dificultades que deben enfrentarse durante la emergencia, hacen recomendable la incorporación de arquitectos e ingenieros antisísmicos, en el diseño de las futuras líneas vitales de las ciudades.

#### Influencia del Suelo en los Daños

El sismo del 3 de marzo nuevamente demostró la importancia de la calidad del suelo en la respuesta de viviendas y edificios. El distinto grado de respuesta observado especialmente en la ciudad de Santiago en diferentes sectores de ella debido a los suelos, reitera la necesidad de incorporar en los planos reguladores de las ciudades el concepto de la microzonificación



Fig. 4 Falla de líneas vitales en el puerto de San Antonio. La falla del suelo produjo la falla de este colector de alcantarillado.

sísmica. Esta es una tarea que deberían abordar los arquitectos al definir el uso de los suelos.

En el caso particular de San Antonio, de suelos constituídos por dunas de arenas negras parcialmente saturadas, donde se observaron numerosos asentamientos, deslizamientos y licuaciones parciales o totales, la microzonificación sísmica de la ciudad definirá en gran medida el uso futuro del suelo.

#### CONCLUSIONES

En este artículo se ha tratado de dar una breve descripción de las principales y más recientes lecciones de diseño antisísmico que ha dejado el terremoto del 3 de marzo de 1985. La revisión no ha podido cubrir las todas por razones de espacio, escogiéndose de entre ellas las más relevantes y novedosas y cuya corrección en el futuro tenga un mayor impacto en la calidad de vida de la población durante y después del terremoto. Los arquitectos al ser los responsables generales de las obras en Chile y al generar la oportunidad del uso y mantención del equilibrio de las diferentes tecnologías convenientes en la elaboración de los proyectos, pueden en conjunto con los ingenieros sísmicos y otros especialistas incorporar en el futuro estas lecciones a la práctica profesional.

#### REFERENCIAS

1. ATC-2, "An Evaluation of a Response Spectrum Approach to Seismic Design of Buildings", Applied Technology Council, San Francisco, Calif., 1974.
2. International Association for Earthquake Engineering, "Earthquake Resistant Regulations—A World List—1984". "New Seismic Design Method for Buildings in Japan", July 1984.
3. Albañilería Armada—Requisitos para el Diseño y Cálculo, Norma Chilena NCh. 1928. c.85 (En consulta).
4. Huaco, D., M. Hall, R. Saragoni, M. Hashizume y C. Lomnitz, "El Terremoto de Popayán del 31 de Marzo de 1983". Informe Técnico CE-RESIS-UNESCO SC/RP 562605.3, Lima, Perú, 1984.