

LA INGENIERÍA ANTISÍSMICA

ANTISEISMIC ENGINEERING

En el Centenario del terremoto de San Francisco, el 18 de abril de 1906

Magnitud: 8.25 – 3.000 muertos y 28.000 edificios destruidos

RESUMEN

Desde el terremoto de San Francisco de 1906 hasta la Ingeniería antisísmica de hoy, el progreso permite la construcción de altos edificios incluso en las zonas sísmicas del mundo.

La investigación de materiales, el acero, el cemento y los centros de proceso de datos fueron los instrumentos que han causado la mejora. Ahora, los muertos por un sismo queda limitado a los países en vías de desarrollo.

Palabras clave: Sismo, ondas, vibraciones, movimientos tectónicos.

ABSTRACT

From the 1906 earthquake of San Francisco to the antiseismic engineering of today the progress allow the tall buildings also in the seismic zones of the world.

The materials research, the steel and concrete and the computing centres were the tools for the improvement. Now the deaths by the quake are limited to the developing countries.

Key words: Earthquake, waves, vibration, tectonic movements.

INTRODUCCIÓN

El sismo causado por la falla *San Andreas* en 1906, con epicentro a 45 km de profundidad, liberó 10^{24} ergios aproximadamente en tan sólo seis segundos y arrasó San Francisco.

En el centenario de este histórico terremoto, **Toyo Ito** ha terminado su pequeño rascacielos en el barrio Giza de Tokio para una exposición y venta de perlas cultivadas.

La fachada está llena de agujeros-pedrusco en forma de ventanas de vidrio. Estéticamente a unos gustará y a otros no, pero suponemos que el empresario de perlas cultivadas **Miki-**

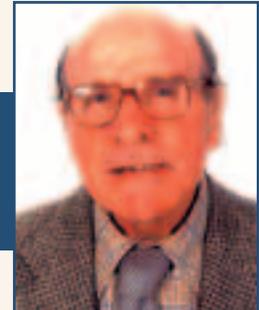
Recibido: 16/10/06

Aceptado: 21/12/06

Pascual Bolufer Mayans

Físico

Asociación Española de Periodismo Científico



moto estará contento con el diseño. Nosotros no entramos en el tema.

Nos interesa recordar el interés de **Toyo Ito** en que el edificio pueda resistir el próximo terremoto. Baste resaltar que la fachada está hecha con acero de sólo 12 mm. Todo está previsto para que el edificio oscile y pueda absorber así la energía del temblor. Ya es sabido que en Tokio es obligatoria la reglamentación antisísmica.

Se encuentra al lado de la placa del Pacífico. Las placas de la litosfera, al deslizarse sobre su sustrato, aproximan sus bordes o se deslizan lateralmente. La interacción de estos bordes produce la mayor parte de los movimientos tectónicos. De hecho, la concentración de los epicentros sísmicos fue la clave para trazar los límites de las placas.

En la memoria de todo japonés están presentes los terremotos de:

- 15 de junio de 1896 en Riku-Ugo: 22.000 muertos. Tsunami.

- 1 de septiembre de 1923 en Kwanto: 143.000 muertos. Magnitud: 8.2 Gran incendio en Tokio.

LAS ONDAS SÍSMICAS

Las fuerzas liberadas en la tierra por dislocación de fallas dan lugar a ondas mecánicas, es decir, vibraciones transmitidas por la tierra y disipadas por divergencia, absorción o amortiguamiento.

Las ondas sísmicas se generan en las placas tectónicas deslizantes y se transmiten hasta la superficie terres-

tre. Una vez allí, se propagan como ondas superficiales.

El sismógrafo registra ondas primarias (P) o de dilatación y secundarias (S) o cortantes.

Las primeras son longitudinales y entrañan variaciones de volumen.

Las ondas S son transversales, se propagan sin cambios de volumen y son análogas a las de las cuerdas vibrantes en Acústica. Estas ondas no pueden propagarse en las zonas líquidas de la Tierra como, por ejemplo, los océanos.

La velocidad de las ondas P es superior a la de las S y la velocidad de ambas es función de la profundidad. Los valores típicos de estas velocidades son 7 u 8 km/s para las ondas P y 4 ó 5 km/s para las ondas S.

La velocidad de las ondas P y S es función de la densidad y de las propiedades elásticas de las rocas que atraviesan.

En la superficie tienen lugar ondas análogas a las anteriores que se denominan ondas R (**Rayleigh**) y ondas L (**Love**). Son las más lentas-entre 2.7 y 3 km/s. Estas ondas corresponden a las olas que se propagan por la superficie de un lago o mar.

Las ondas R pueden considerarse como ondas longitudinales mientras que las L son transversales y tienen un movimiento vertical y rotatorio. Ambas son las causantes de la mayoría de los daños. Los efectos de las ondas Love son el resultado de la sacudida horizontal que actúa sobre los cimientos del edificio.



Una calle de San Francisco durante el temblor del 18 de abril de 1906. Mientras hay casas casi intactas, otras están destruidas.

En general, las ondas de superficie se consideran ondas de cortadura o cizalla.

Las ondas sísmicas poseen frecuencias que, en general, no concuerdan con ninguna de las frecuencias naturales del suelo; por consiguiente, suponiendo que el medio es elástico, homogéneo e isotrópico, se presupone que la frecuencia y la forma de la onda son una combinación de las diferentes frecuencias y modos naturales del suelo.

El sismograma contiene sólo las ondas P,S y **Rayleigh** mientras que las ondas **Love** no son registradas por péndulos verticales.

A lo largo de su trayectoria, las ondas sufren transformaciones por causa de los cambios de densidad del suelo, la estratificación, etc. Así pues, en las interfases de los estratos se producen reflexión, refracción, difracción y polarización de la onda; dependiendo de la densidad, el suelo amortigua la vibración, y atenúa en mayor proporción las frecuencias más elevadas; la inelasticidad produce, además, asentamientos diferenciales por lo que hay. que tener en cuenta la anisotropía de los suelos.

Las rocas terrestres tienen propiedades elásticas a causa de las cuales se deforman y vibran cuando son presionadas por fuerzas aplicadas a

ellas. Después del seísmo suceden numerosas réplicas de menor intensidad para estabilizar el terreno.

Los seísmos son consecuencia de la energía enorme de los movimientos tectónicos que intervienen a nivel de fallas activas. Esta energía se transmite a lo ancho de la superficie terrestre en forma de una vibración de baja frecuencia cercana a 1 Hz/s, capaz de causar daños considerables a las estructuras y a la población según la proximidad del epicentro o se-

gún la manera como se propaguen las ondas.

Medición del terremoto

Hay un problema básico: un seísmo de tipo volcánico, con foco superficial, puede causar graves daños a una pequeña población, o incluso arrasarla, pero a poca distancia del epicentro casi no se ha notado. Otro seísmo, pero esta vez tectónico, de epicentro profundo y tal vez sin causar víctimas, ha producido grandes desplazamientos de terreno.

Una estación de sismología consta de tres acelerómetros, según las coordenadas del espacio X,Y,Z, pero las amplitudes de las ondas registradas en un sismograma no representan la amplitud real del movimiento del suelo.

Para evaluar la energía sísmica liberada por el terremoto seguimos dos criterios: uno científico, instrumental, los acelerómetros, llamado Magnitud, y otro no instrumental, que mide los efectos geológicos observados, llamado Intensidad. Otra manera de medir la Intensidad es la escala modificada de **Mercalli**, que clasifica los terremotos en intensidades de 1 a 12 en función de la evaluación subjetiva de los daños causados.

Ciertas configuraciones geológicas pueden amplificar la onda sísmica con efectos catastróficos. Baste



San Francisco en 1906. El cruce Golden Gate Avenue/Larkin Street. Igualmente junto a un edificio intacto, otro hundido.

recordar el seísmo de México en 1985: cuando las ondas se propagaban por capas sedimentarias de aluviones, se produjeron fenómenos de reverberación que multiplicaron la amplitud del movimiento sísmico en la superficie. En este caso puede haber temblores que aumentan a medida que nos alejamos del epicentro.

LA INGENIERÍA

Necesitamos conocer la capacidad de resistencia de un edificio al seísmo. La solución, muy usada también en España, es la mesa vibrante. Se construye la maqueta del edificio, se la coloca en la mesa vibrante, movida generalmente por cilindros hidráulicos, y se la somete a las vibraciones de un seísmo simulado de la intensidad calculada para la zona en donde se construirá el edificio. Una impresora de salida nos da los resultados que permiten predecir el comportamiento de la estructura.

También se usa el acelerómetro con el que se simulan acelerogramas del movimiento del substrato con características estadísticas apropiadas para las sacudidas sísmicas.

Son de indudable utilidad los parámetros de diseño sísmico presentados en forma de espectros de frecuencia o como histogramas de tiempo-aceleración.

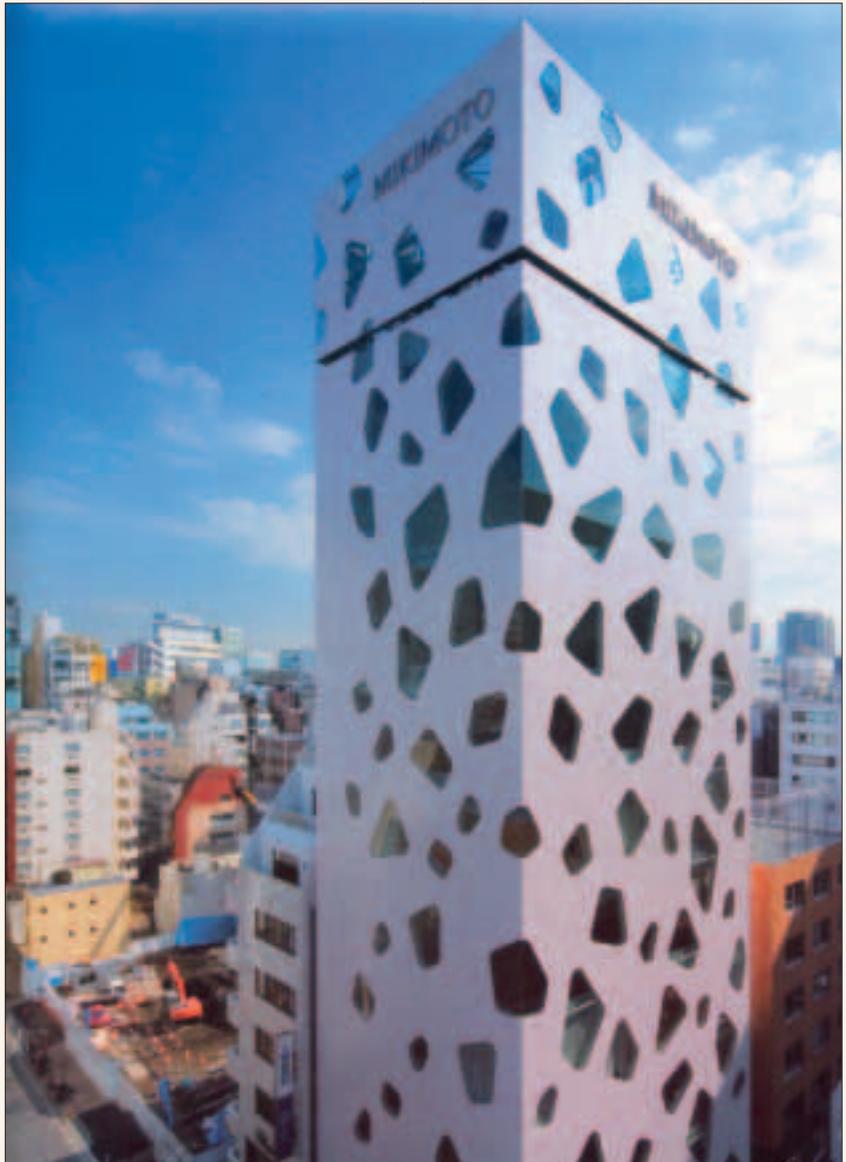
EL SEÍSMO DE TARAPACA, CHILE

El 13 de junio de 2005 un seísmo de magnitud 7,9 sacudió el norte de Chile sorprendiendo a ingenieros y arquitectos el buen comportamiento de algunas estructuras, según el sismólogo chileno **Jaime Campos**.

Fue una buena ocasión para repasar la normativa en Ingeniería antisísmica. En Chile hay tres normativas sobre riesgo sísmico:

- La NCh 433 Of96 de diseño sísmico de edificios.
- La NCh 2745 Of2003 sobre aislamiento sísmico.
- La NCh 2369 Of2003 sobre diseño sísmico de estructuras industriales.

La experiencia ha indicado que una obra correctamente construida, calculada y con una Mecánica de suelos apropiada, no presenta proble-



Torre Mikimoto en Ginza, Tokio.

mas, lo que demuestra que la normativa es la adecuada.

No obstante, la actual norma chilena se refiere a los seísmos de tipo costero, los más frecuentes, pero falta normativa para los terremotos intraplaca.

Los suelos del Norte se caracterizan por su alto contenido en compuestos salinos (principalmente cloruros, sulfatos, carbonatos y nitratos) que permiten una cimentación con excelentes propiedades mecánicas, estáticas y dinámicas, razones que justifican su correcto comportamiento durante el seísmo, excepto en taludes y algunos casos aislados.

La roca situada a pocos metros de profundidad redujo la amplifica-

ción del fenómeno provocando menores daños a estructuras correctamente diseñadas y construidas.

ESTRUCTURAS SISMO-RESISTENTES

Pueden ser rígidas y/o flexibles. La estructura flexible, aunque se deflexe notoriamente, transmite la vibración sin oponer resistencia. Lo cierto es que la estructura debe ser lo suficientemente fuerte para evitar el colapso y, al mismo tiempo, razonablemente dúctil para disipar en deformaciones plásticas parte de la energía sísmica absorbida.

La ductilidad estructural se puede definir como la aptitud de adquirir deformación progresiva bajo carga

constante (o ligeramente creciente) sin presentar disminución alguna en su resistencia. La ductilidad es un comportamiento inelástico. La deformación plástica es permanente. El comportamiento opuesto se llama fragilidad.

EL SISTEMA NO LINEAL

Presuponemos que el sistema oscilatorio cumple la Ley de **Hooke**, es decir, que la relación de la carga aplicada a la deformación producida es lineal. Pero la mayoría de los materiales tienen un comportamiento diferente: inicialmente siguen una trayectoria esfuerzo-deformación que es lineal, pero, a partir de un determinado punto, llamado *punto de fluencia*, el cambio es súbito. Por ejemplo, las estructuras de acero o de hormigón armado.

La mayoría de las estructuras presentan un comportamiento elástico hasta cierto punto y de ahí en adelante entran en un estado no elástico o plástico. El sismo intenso lleva a la estructura más allá del límite elástico, entrando en la región plástica; los elementos dúctiles absorben energía en gran cantidad y salvan a la estructura del colapso total.

Una estructura que funcione elásticamente, aún en el más intenso de los sismos, se sale de cualquier presupuesto.

La estructura soporta las cargas verticales y se diseña para que pueda soportar elásticamente las fuerzas horizontales del sismo.

Puede ser útil el edificio suspendido, un núcleo, generalmente una torre de hormigón armado, monolítica, de alta resistencia, que lleva la totalidad de las cargas verticales y horizontales.

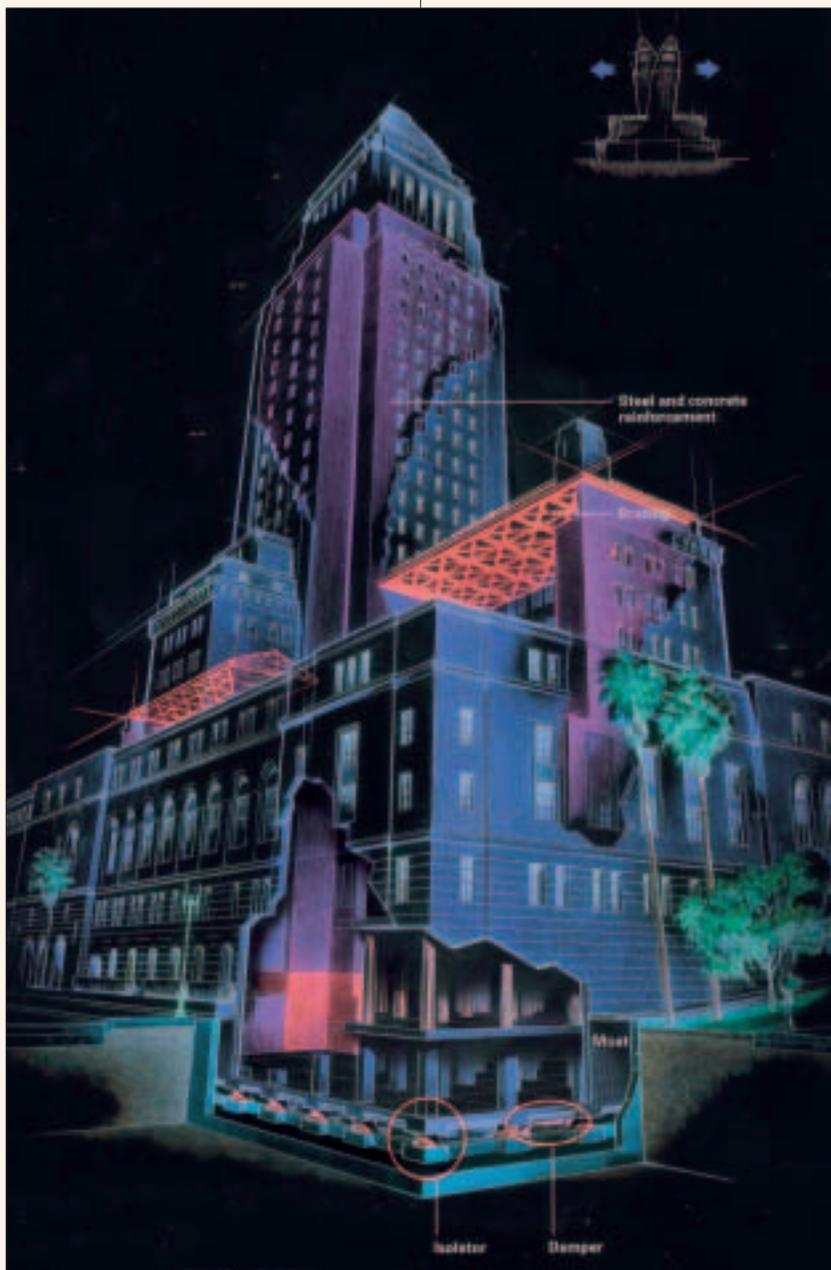
Finalmente mencionemos las láminas que usa **Koyo Ito** en su edificio de Ginza caracterizadas por su bajo espesor (12 mm de acero). Existen dos tipos fundamentales: cáscaras y membranas. Las primeras derivan su resistencia de su misma forma. Las láminas trabajan como superficies funiculares bidimensionales, por ser de ínfimo espesor, no siendo capaces de resistir esfuerzos de compresión, flexión o cortante, pero son resistentes

a la tensión. Les falta rigidez transversal pero son útiles desde el punto de vista antisísmico.

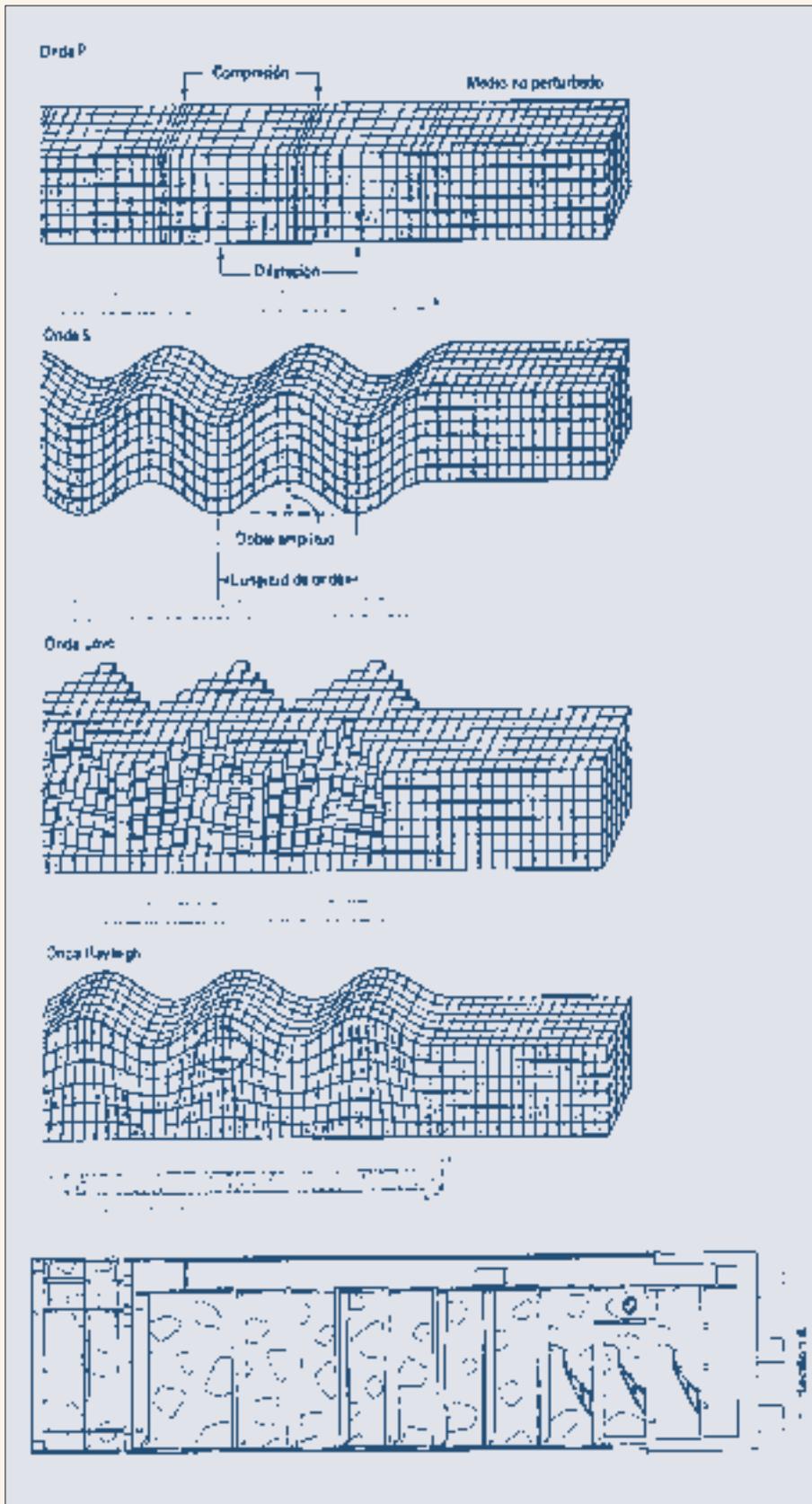
En San Francisco, en 1906, había ya rascacielos con estructura de acero bien diseñados. Recordemos al *Spreckels*, de 19 plantas y el *Chronicle*, de 16, que sufrieron pocos daños.

INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

El suelo, soporte de la estructura, es el agente transmisor de la excitación sísmica desde el foco hasta la superficie. Si la estructura está rígidamente fija en el lecho de roca, el movimiento de ésta se aplica en forma de fuerzas laterales de inercia.



El Ayuntamiento de Los Angeles sufrió graves desperfectos durante el sismo de 1994. La restauración llevó tres años a base de acero. La torre tiene 150 m y está unida a las dos alas norte y sur por dos estructuras horizontales de acero. Lo más dramático fue aislar la base del edificio con aislantes de acero y neopreno para que el edificio pudiera moverse independientemente del suelo. Alrededor del Ayuntamiento se cavó un foso (moat). Arriba, a la derecha, un gráfico muestra la oscilación de la torre. Gráfico adaptado de NGM.2006.



Los cuatro tipos de ondas sísmicas de arriba abajo.
 Ondas P, de compresión-dilatación del terreno
 Ondas S, cortantes
 Ondas Love superficiales
 Ondas Rayleigh. Cada grano de arena describe una elipse.
 De Bruce A. Bolt, Earthquakes. Ed. W. Freeman & Company, 1976.

Hay planos de cimientos de San Francisco, a comienzos del siglo XX, que sitúan troncos de madera paralelos y horizontales sobre el lecho de roca. Sobre ellos se construye la casa de modo que puede deslizarse a derecha e izquierda sobre los troncos durante el sismo.

Una embarcación en un lago acusa las ondas P de compresión pero no sufre desperfectos importantes durante el terremoto.

La experiencia demuestra que estructuras diseñadas con rigurosos procesos de análisis y diseño dinámico han sufrido cuantiosos daños. La causa son defectos de construcción, por ejemplo, uniones imperfectas entre vigas y columnas. Tiene su mérito el cuidado que ha puesto **Toyo Ito** en su edificio de Ginza de soldar cuidadosamente las vigas y columnas con anclajes de refuerzo y una supervisión rigurosa.

BIBLIOGRAFÍA

- BOLT, B. A. *Elastic waves in the vicinity of the earthquake source*. Prentice-Hall.1995.
- ESTRADA G. *Estructuras antisísmicas*. CECSA.1975.
- GONZALEZ-RUBIO, E. *Comparación de esfuerzos en estructuras debidos a la aplicación de normas sísmicas*. Universidad de los Andes. Bogotá,1992.
- MAY, W.J. *Terremotos*. Ed.Blume.1980.
- HURTY, C. *Dynamics of structures*. Prentice-Hall Inc.1990.
- LARSEN, S.*Reliving the Frisco Quake*.San Francisco. Science, 21 April 2006.
- MIRTI, S. *Toyo Ito Glass Boulder Tower*. Domus nº 890, marzo 2006.
- SEMBLAT J.F..*Séisme en ville. La Recherche*. Juin 2006. ■