

ACCIÓN SÍSMICA SOBRE LAS EDIFICACIONES

JAVIER ÁNGEL RAMÍREZ MASFERRER*

RESUMEN

Geológicamente hablando, se conocen con bastante aproximación los mecanismos que producen los terremotos; sin embargo, casi ninguno se consigue predecir con suficiente antelación.

Observando los efectos que producen los seísmos sobre las edificaciones, éstas se pueden proyectar para que los resistan lo mejor posible.

Palabras clave: Seísmos, edificios, terremotos, ondas, geología, estructuras, arquitectura.

PREÁMBULO

Todas las fotografías que se adjuntan en este artículo, se hicieron en el terremoto de Méjico de 1985. La cátedra de Cálculo de Estructuras II de la E.T.S. de Arquitectura de Madrid está permitiendo su utilización a toda persona que desee hacer uso de ellas con algún motivo científico, siempre y cuando lo solicite previamente.

El terremoto de Méjico tuvo lugar el 19 y 20 de Septiembre de 1985. Los dos temblores más importantes fueron de grado 7,8 y 7,3 en la escala de Richter. Produjo 4 200 muertos, 2 000 desaparecidos y dejó a 30 000 personas sin hogar, destruyendo totalmente 400 edificios y dañando seriamente a otros 700.

INTRODUCCIÓN

La Tierra no es un planeta internamente estático. Geológicamente hablando, vivimos en una etapa tranquila, ya que en la historia de nuestro planeta ha habido épocas de actividad geológica mucho más intensa que la actual.

* Conferencia pronunciada en la Real Academia de Doctores el 14 de febrero de 2001.

1. LA CAUSA DE LOS TERREMOTOS

Los movimientos de las grandes masas geológicas son, a escala humana, muy lentos, pero la masa implicada es enorme, por lo que la energía que en ellos entra en juego puede ser importante.

Un seísmo es la consecuencia de la liberación súbita de energía, que se ha ido acumulando en forma de tensiones en las masas geológicas, cuando el movimiento de éstas se ha visto impedido. Esto ocurre, cuando, debido al rozamiento natural de estas masas, su lento pero constante desplazamiento, se ve detenido o disminuido, acumulándose progresivamente la energía que tiende a producirlo.

Cuando los valores de la tensión superan a los de la resistencia del medio, éste se fractura, viéndose liberada súbitamente la energía. A veces, se observan, en superficie, desplazamientos considerables, por ejemplo en una falla.

2. CLASIFICACIÓN DE SEÍSMOS

A nivel técnico, los terremotos se clasifican a partir de magnitudes físicas, como por ejemplo la aceleración que producen en un punto del terreno, asignando por ejemplo grado VII a una aceleración del 8% la de la gravedad ($9,81\text{m/s}^2$), o grado IX a una del 30%.

A un nivel más coloquial, sobre todo antiguamente, la intensidad era meramente descriptiva, y así grado VII corresponde a que la mayoría de las personas se atemorizan, o grado IX a que hay pánico general. También se clasifican teniendo en cuenta sus efectos en las construcciones, lo que ha permitido catalogar los seísmos históricos a partir de las descripciones documentadas.

Profesionalmente se expresa la intensidad de un seísmo por su magnitud (palabra proveniente del griego «magna», que significa medida), la cual hace referencia a la cantidad de energía disipada por el fenómeno sísmico en su foco, es decir, el punto teórico del cual partirían las ondas que producen el sismo.

En la escala de Richter, se hace referencia al logaritmo de la amplitud máxima registrada a 100 kilómetros del epicentro, que es el punto de la superficie terrestre situado sobre el foco (también llamado hipocentro) del terremoto. Esta escala, al ser logarítmica, hace referencia a sismos que crecen considerablemente al crecer su magnitud, así por ejemplo un sismo moderado, o de magnitud 3 libera una cantidad de energía, un millón de veces menor, que uno de magnitud 7, muy destructor. El sismo más energético hasta ahora registrado, tiene intensidad menor a 9 en la escala de Richter.

La escala de Mercalli para clasificar los sismos, se basa en datos más subjetivos, pero más fáciles de entender por todos. Inicialmente la escala tenía 10 grados, pero en la actualidad ha sido mejorada por otros sismólogos. La versión de Medvedev, Sponheuer y Karnic (Escala MSK) consta de 12 grados. Se hace referencia, por ejemplo, a un sismo de grado 7 con «El pánico se extiende y las vibraciones son sentidas por los automovilistas; los badajos hacen sonar las campanas; las aguas estancadas se rizan y

enturbian; las carreteras se agrietan, así como las construcciones de hormigón armado, las casas viejas o de adobe son completamente destruidas».

3. ESTUDIO TEÓRICO DE LOS EFECTOS SÍSMICOS

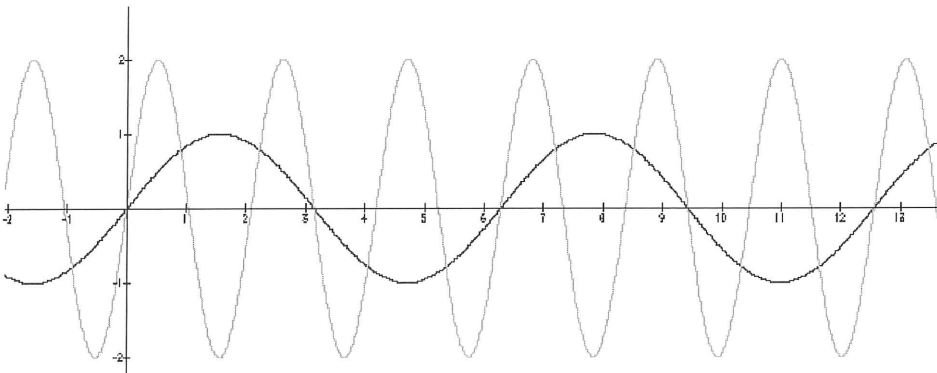
Las ondas sísmicas, no son, por lo general, de tipo armónico (senoidales), pero se estudian como tales, pues se demuestra teóricamente, que, una onda de cualquier tipo, produce el mismo efecto, que un conjunto de varias ondas armónicas (descomposición de una onda en ondas armónicas, a partir de la teoría de Fourier). Así, un terremoto real, se puede considerar como la suma de un conjunto de desplazamientos teóricos perfectamente senoidales actuando a la vez.

Cada onda senoidal, se caracteriza por ser un fenómeno repetitivo en el tiempo, y en el espacio, con dos parámetros principales, que son la amplitud, y la pulsación (el tercer parámetro, en este caso menos importante, es la fase). La amplitud es el valor máximo de desplazamiento en cada oscilación; la pulsación está relacionada con la frecuencia, que es el número de oscilaciones que se producen por unidad de tiempo en un mismo lugar o, por unidad de longitud, en un mismo instante. De esta forma se diferencian la frecuencia espacial y temporal, y de la misma manera la pulsación espacial de la temporal.

$$\begin{array}{ll}
 x = A \operatorname{sen}(\omega t + \varphi) & A = \text{amplitud} \\
 v = A \omega \operatorname{sen}(\omega t + \varphi) & \omega = \text{pulsación} \\
 a = -A \omega^2 \operatorname{sen}(\omega t + \varphi) & \varphi = \text{fase}
 \end{array}$$

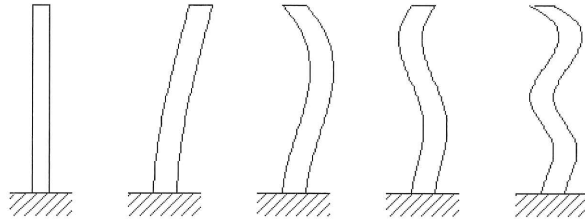
Ecuaciones fundamentales de una onda armónica.

En una onda armónica, la velocidad máxima de oscilación, es el producto entre la amplitud y la pulsación, y la aceleración el producto entre la amplitud y el cuadrado de la pulsación, siendo (según el segundo axioma de Newton) el esfuerzo adicional que tiene que soportar la estructura del edificio, proporcional al producto entre la masa del edificio y la aceleración a la que se ve sometido.



Representación de dos armónicas, uno del doble de amplitud, y triple pulsación que el otro.

En esta descomposición de la onda, aparecen muchos armónicos (generalmente infinitos), que sumados producirían una perturbación igual a la estudiada. Se denominan armónicos principales, a aquellos, que sumados, producen una onda casi igual a la estudiada; son los de mayor amplitud, y pulsación parecida a la de la onda estudiada, y sus múltiplos correspondientes. Estos armónicos son de vital importancia porque el edificio posee sus frecuencias propias de oscilación, y tenderá a oscilar según éstas, aunque el estímulo posea otra frecuencia. En caso de que el sismo tenga alguno de sus armónicos principales coincidentes con una frecuencia propia del edificio, este puede colapsar fácilmente, consecuencia de oscilaciones cada vez mayores.



Esquema de los principales periodos de vibración de un edificio.

A pesar de que existen técnicas más o menos avanzadas para estudiar los seísmos, habría que tener en cuenta multitud de factores, como el tipo de terreno, la forma y materiales que componen el edificio, los armónicos que componen el seísmo, por lo que, muchas veces, es muy difícil avanzar afirmaciones certeras sobre él.



Por ejemplo, el seísmo ha afectado seriamente a un edificio, y no a otros.

4. EFECTOS SOBRE LAS CONSTRUCCIONES

La energía se propaga, atenuándose la onda, a medida que se aleja del lugar en el que se ha originado el seísmo (hipocentro). En terrenos duros (roca), la onda apenas se amortigua; en terrenos blandos (arcillas), se amortiguan, sobre todo los armónicos de alta frecuencia, cambiando éstos a veces de frecuencia, por lo que, el seísmo pasa a tener períodos mayores, en general más peligrosos para las edificaciones, ya que, con la misma energía, los desplazamientos son mayores.

El terremoto, se siente como oscilaciones bruscas del terreno, que se transmiten a los edificios.

Normalmente, en un edificio, existen cargas, o acciones, que se equilibran con las reacciones en el suelo. En el caso del seísmo, este equilibrio no es posible, pues es el suelo el que se mueve, y, el inmueble, no puede, por lo general, equilibrarse con reacciones exteriores, por lo que, deberá oscilar y disipar la energía que reciba, quizás rompiendo en parte su estructura, pero sin colapsar.

La acción sísmica es un problema dinámico, pues el seísmo le impone al edificio movimientos y aceleraciones importantes. Las aceleraciones verticales son las menos problemáticas, por dos motivos. El primero es que el edificio ha sido concebido sobre todo para soportar la acción vertical del peso, y aguantará un esfuerzo adicional en esta dirección, ya que en el diseño se admite la posibilidad de existencia de sobrecargas, que se tienen en cuenta, utilizando los coeficientes de seguridad adecuados, horizontalmente, está proyectado para esfuerzos menores, frecuentemente sobrepasados con creces por el seísmo. El segundo motivo es que el edificio es mucho más rígido en cuanto a su desplazamiento vertical que horizontal, por lo que las vibraciones verticales son de periodo mucho menor.

El problema aparece, cuando los elementos proyectados para resistir principalmente esfuerzos verticales, se ven sometidos a esfuerzos oblicuos importantes, que son el resultado del peso vertical, y una oscilación horizontal. Entonces, el edificio se deforma lateralmente, y frecuentemente los pilares rompen como consecuencia de esfuerzos horizontales, para los que no fueron preparados.

Así se produce la pesadilla de cualquier persona en un terremoto. Fallan los pilares y se juntan los solados en un sándwich mortal.

El inmueble tiende a recuperar su forma, como consecuencia de la elasticidad de los materiales. Las perturbaciones en el medio, varían en dirección y sentido, por lo que, las construcciones empiezan a oscilar alrededor de su posición de equilibrio.

Parece ser, que algunas veces, el exceso de carga vertical puede hacer que se sobrepase la resistencia a compresión de un pilar, y éste quede en parte machacado. Si el seísmo continúa, los pilares adyacentes deben soportar la carga que le correspondería a éste, y el fenómeno puede irse propagando.

En general, es difícil asegurar que un pilar ha roto por compresión, pues, como ya se ha dicho, los esfuerzos que suelen dañar a los edificios suelen ser predominantemente horizontales, rompiendo muchos pilares, no por compresión excesiva, sino por esfuerzos cortantes o momentos excesivos creados por esfuerzos horizontales.



Los pilares de este edificio soportaban perfectamente los empujes verticales a los que estaban sometidos, pero no han sido capaces de soportar las oscilaciones horizontales del sismo, fallando prácticamente todos ellos, mientras que la estructura horizontal ha resistido. A la derecha de la imagen, sobre el penúltimo solado, un muro pantalla de hormigón ha resistido.



Algunos pilares parecen haber roto por compresión, pero esto no se puede asegurar. Obsérvese como la carpintería metálica de esta planta, cuya rotura es mucho menos dúctil que la del hormigón, o lo que es lo mismo, más frágil, ha desaparecido totalmente.

En cualquier caso, lo que sí que se observa en todos los terremotos, es que los primeros en fallar son los pilares. Si se consigue que la estructura siga resistiendo, a pesar del fallo de alguno de sus elementos, se pueden salvar muchas vidas.



Detalle de un pilar que no ha resistido.

Los edificios están diseñados para que todos sus elementos soporten en conjunto las acciones a las que se ven sometidos; por lo que, generalmente, cualquier rotura acrecienta de forma imparable los daños. Así, una primera regla, sería que, sísmicamente, una construcción resiste lo que resiste el elemento estructural que primero se rompa; ya que, cuándo falla totalmente un elemento, se produce una sobrecarga en otros cercanos, que sumada a la sobrecarga sísmica puede producir la rotura de estos, de esta manera el fallo estructural puede irse propagando.

La forma de que no continuase propagándose el fallo de elementos estructurales sería que éstos, en caso de romper, lo hiciesen de manera dúctil, en forma de que, aún rotos, mantuviesen parte de su resistencia, a la vez que se van rompiendo y alcanzando nuevos estados de equilibrio repetidamente, dando tiempo a que se detenga el seísmo antes de su fallo total.

Ante un seísmo, la construcción tiene que trasladarse en horizontal, moviéndose sus plantas bajas unidas al suelo, siendo sus plantas altas arrastradas por aquellas. Por lo general las plantas altas sufren desplazamientos mayores, oscilando con más fuerza. Si fallan los pilares de las plantas inferiores, el edificio puede llegar a volcar.

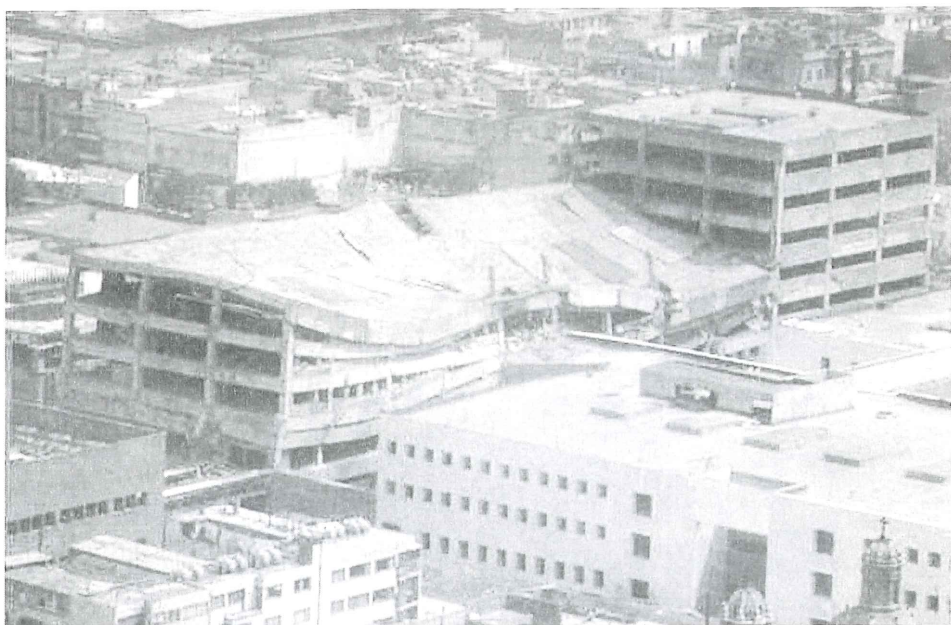
En el caso de que el edificio tenga juntas de dilatación, las partes separadas por las juntas se comportan de manera independiente, pudiendo romper alguna de ellas, y otras no.



Las plantas desaparecen como por arte de magia, como este edificio, aparentemente intacto, al que le falta una planta. El pilar, fuera incluso de su posición, ha resistido, permitiendo salvar al edificio del colapso total. Obsérvese que muchos vidrios permanecen intactos. No se han caído ni las cortinas.

Muchos fallos no son propiamente estructurales. Es muy típico, por ejemplo, que se desprendan paredes o incluso fachadas enteras de la estructura, ya que, frecuentemente, sus soportes son más débiles que la estructura propia del edificio. Colabora a este fenómeno el comportamiento distinto de la estructura y de otros elementos constituyentes del edificio.

Es posible, que algunas construcciones giren en algún instante, sobre sí mismas. El desplazamiento de cada parte del edificio es mayor cuanto más alejada se encuentre ésta del eje de giro. Si girase, por ejemplo, alrededor de un eje, aproximadamente vertical, las paredes más alejadas del eje, posiblemente las exteriores, sufren grandes desplazamientos, rompiéndose, y quedando éste como una naranja pelada.



Un pilar no ha resistido, y el fallo estructural ha comenzado a propagarse. La rotura no es total, porque el sismo se ha detenido a tiempo, y porque el edificio ha sido capaz de amortiguar las sobrecargas, alcanzando nuevas posiciones estables mientras se rompe. Obsérvese como otro edificio adosado, de construcción similar, incluso más alto, ha resistido el temblor.



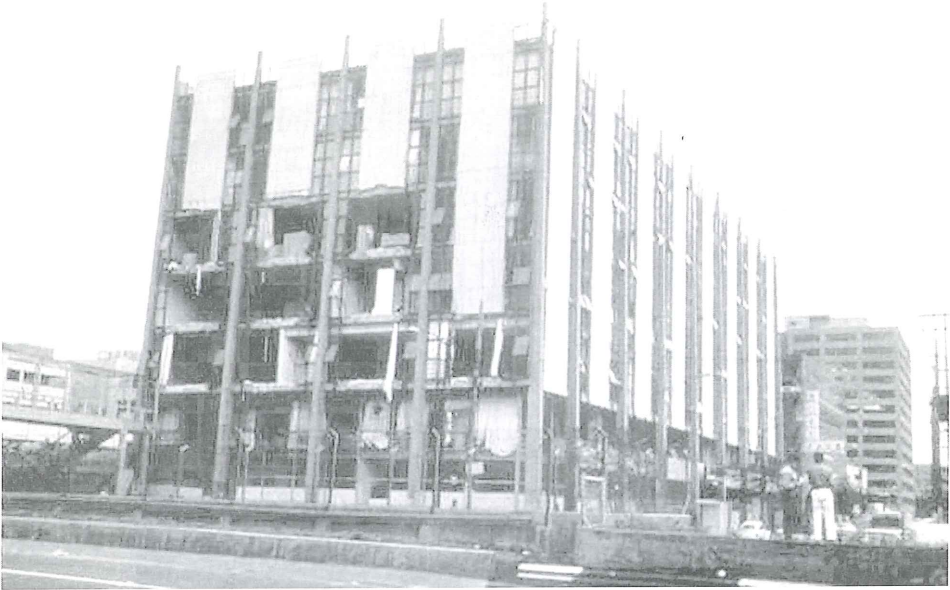
Con el fallo de pilares en plantas bajas, este edificio ha volcado.



Parte de este edificio ha roto, separado de su parte lateral por una junta de dilatación. Como no ha colapsado, pueden haberse salvado muchas vidas, incluso en la parte volcada. Obsérvese, como, curiosamente, muchos vidrios del edificio permanecen intactos.

Es importante darse cuenta de que un esfuerzo de torsión sobre el conjunto del edificio no se manifiesta como tal en los pilares, sino como esfuerzos laterales en los mismos, que producen sobre ellos esfuerzos cortantes y momentos flectores, que, como ya hemos comentado, son los que suelen romper los pilares.

En general, la respuesta de un edificio es diferente a la de otro, por lo que, si dos están en contacto o muy cercanos, al llegar el sismo oscilan de forma diferente golpeando el uno contra el otro, machacándose ambos. Sería pues recomendable, que hubiese entre los dos una separación, o junta, que permitiera la oscilación sin choque; ésta debería ser al menos la suma de las amplitudes de oscilación de cada uno de ellos.



No es aconsejable permanecer cerca de las fachadas en caso de sismo, ni cuando se está dentro ni cuando se está fuera del edificio, pues es muy frecuente la separación de la estructura del edificio de las partes no resistentes, como pueden ser las fachadas.

De la misma manera, si en una estructura aparece una grieta, la mayoría de las veces, ésta se cierra y se abre repetidamente, produciéndose choques entre sus dos caras, cada vez que se cierra. Estos choques machacan fácilmente cualquier material.

Los techos, sobre todo los que abarcan grandes áreas, pueden desplomarse, principalmente por su parte central.

Si el edificio es grande, puede que una parte sufra un desplazamiento, y otra no, de manera que la parte intermedia se vea retorcida. Fenómenos parecidos pueden ocurrir cuando el inmueble es poco homogéneo, ya sea en materiales o en forma, en cuyo caso se comporta como varios bloques independientes.

Estas son algunas de las posibles roturas que puede sufrir un edificio en caso de terremoto; comprenderlas ayudará al diseño de edificios antisísmicos.

5. COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS

En caso de sismo, también es muy importante el comportamiento de los suelos sobre los que se sitúan los edificios, o en los que se encuentran sus sótanos o cimentaciones.

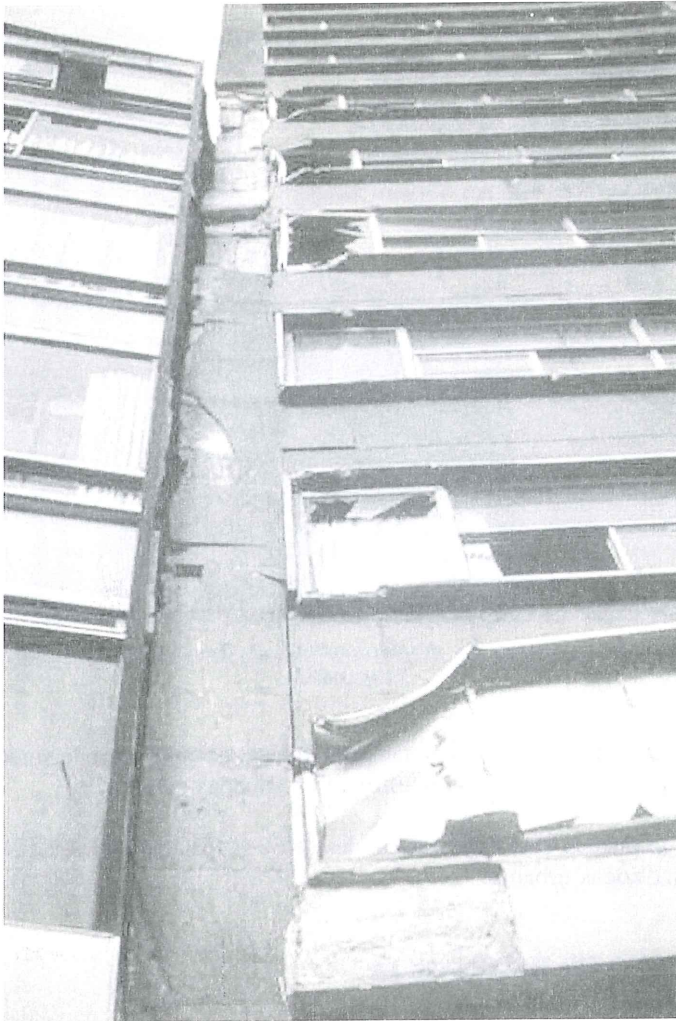
El mejor suelo sobre el que puede estar situado un edificio, si acontece un terremoto, es la roca dura. Es el mejor terreno, pues las ondas se propagan rápidamente a través de él, mientras que, en materiales blandos ocurren dos fenómenos que hacen que



Este edificio ha perdido toda su fachada, quedando como una naranja pelada, quizás alguno de sus armónicos de vibración colabora en el giro sobre sí mismo.

su comportamiento sísmico sea peor. El primero de ellos es que los armónicos que forman el sismo se ven amortiguados, pero sobre todo los de mayor frecuencia, reforzándose con la energía sobrante los de menor frecuencia, más peligrosos para las edificaciones. El segundo fenómeno, es que la onda sísmica pasa sin dificultad de un terreno duro a otro blando, pero no viceversa, por lo que las ondas van rebotando en los terrenos duros y acumulándose en los blandos, circulando por ellos muchas ondas desordenadas, de ida y vuelta, mezclándose todo tipo de oscilaciones. El fenómeno es similar a lo que acontece con las olas del mar cerca de los acantilados de roca, en las que éstas rebotan, formando, frente al acantilado, una zona de aguas muy revueltas, pero no en las playas de arena en las que las olas rompen.

Así, podemos resumir, que en caso de seísmo, los suelos sueltos, sobre todo rellenos recientes y mal compactados, son los que tienen peor comportamiento; porque, por



Estos dos edificios han oscilado de manera diferente, golpeándose, pero no quedando dañados por encima de la zona en que coinciden sus alturas. Hubiera sido precisa una junta de dilatación más generosa, para que no se golpeasen.

un lado, éstos se hunden o se desplazan, afectando muy negativamente a las construcciones adyacentes, y por otro, la onda sísmica se acumula en ellos, produciéndose fácilmente efectos de resonancia, cuya oscilación sísmica crece cada vez más, y, a menos de que el seísmo sea muy corto, destruye cualquier edificación. Esto no ocurre en suelos firmes y rígidos, por lo que, sísmicamente hablando, estos últimos son mejores.

Ante un terremoto, las carreteras situadas sobre terrenos blandos se agrietan, pues son demasiado rígidas como para desplazarse con ellos, y las vías de tren, más elásticas, suelen doblarse, con el peligro que esto representa para viandantes y vehículos.



Esta pasarela no ha asimilado los desplazamientos de los dos edificios que une, y se ha desprendido.

Si el terreno tiene una cierta rigidez también puede agrietarse, propagándose, frecuentemente, las grietas, a través de las estructuras situadas sobre él.

También se pueden desestabilizar taludes de tierra, produciendo deslizamientos que pueden arrasarse zonas urbanas.

6. FENÓMENO DE RESONANCIA

Las aceleraciones a que se ven sometidas las distintas partes, dependen, entre otras cuestiones, de las características de la onda sísmica, y de las frecuencias naturales de oscilación del edificio.

Cuando el seísmo posee un armónico de amplitud considerable, que coincide con una frecuencia de oscilación natural del edificio (o período fundamental), éste entra en resonancia, y la aceleración crece en cada periodo, por lo que, irremediablemente, será destruido, a menos que el seísmo cese rápidamente, o que la ruptura de alguna de las partes del edificio varíe su frecuencia natural de oscilación, o que el rozamiento interno de los materiales sea suficiente como para disipar la energía.

En edificios de pisos, el período fundamental depende en gran manera del número de pisos, y en cada caso existen fórmulas, más o menos empíricas, que permiten conocer aproximadamente este valor para cada inmueble.

Se puede estudiar teóricamente, la respuesta de un edificio ante un seísmo, a partir de un acelerograma (esquema teórico del seísmo). La construcción resistirá, si todas



El suelo sobre el que está asentada esta calle, es más blando que ella. Al moverse éste, el asfalto, más rígido, se ha agrietado.

sus partes consiguen responder a los movimientos coherentemente, ya sea trasladándose juntas, o girando alrededor de los mismos ejes en cada instante. Para ésto, en los estudios teóricos, se suele suponer que los distintos nudos no pueden variar su distancia, pues los elementos que forman la estructura no pueden ni alargarse ni acortarse.

El fenómeno de resonancia, suele afectar más a los edificios altos, cuyas frecuencias propias de vibración son menores, por lo que, con la misma energía, sufren desplazamientos mayores, y se comportan peor sísmicamente, aunque puede haber cierta aleatoriedad, y edificios altos pueden resistir, y otros más bajos colapsar.

Un edificio se proyecta, teniendo en cuenta unos coeficientes de seguridad que asegurarán su funcionamiento en las peores condiciones, por lo que, las construcciones actuales suelen ser bastante resistentes a los terremotos. De esta forma, se dice que un

edificio bien hecho, ya es de por sí antisísmico, sin tomar ninguna medida adicional, aunque, en lugares de elevada sismicidad, se toman medidas adicionales.



Este edificio, tenía dos zonas con dos alturas distintas, como puede apreciarse en las ventanas de la última planta. Curiosamente, la zona más elevada ha resistido, aunque esto no suele ser así. Quizás su frecuencia de resonancia no haya coincidido con la del sismo, mientras que en la otra parte sí.

7. CONSTRUCCIÓN ANTISÍSMICA

Cuando se quiere que una construcción resista casi cualquier seísmo, se proyecta especialmente para ello. Por ejemplo, es necesario que los hospitales sigan en pie después de un terremoto.

Podemos decir que un edificio es antisísmico, si está diseñado para soportar fuertes temblores de tierra. Como ya hemos comentado, los esfuerzos más problemáticos a los que se ven sometidas las construcciones durante un terremoto, son los momentos y cortantes en los pilares, debidos a oscilaciones horizontales. Los esfuerzos torsores sobre el edificio, se manifestarán, al fin y al cabo, como momento y cortantes sobre cada uno de los pilares que forma el mismo.

Para que una edificación soporte un sismo, se tienen que cumplir dos premisas:

La primera de ellas es que su período propio de vibración se aleje del sismo. Esto se consigue variando la rigidez de la estructura, por norma general aumentándola, pues así se disminuye el periodo de vibración del mismo.

Al aumentar la rigidez del conjunto, el período de vibración disminuye, y viceversa, por lo que, en general, se intenta aumentar la rigidez del edificio, disminuyendo su período propio de vibración, alejándolo de los períodos de vibración altos, normalmente mucho más dañinos para el edificio.

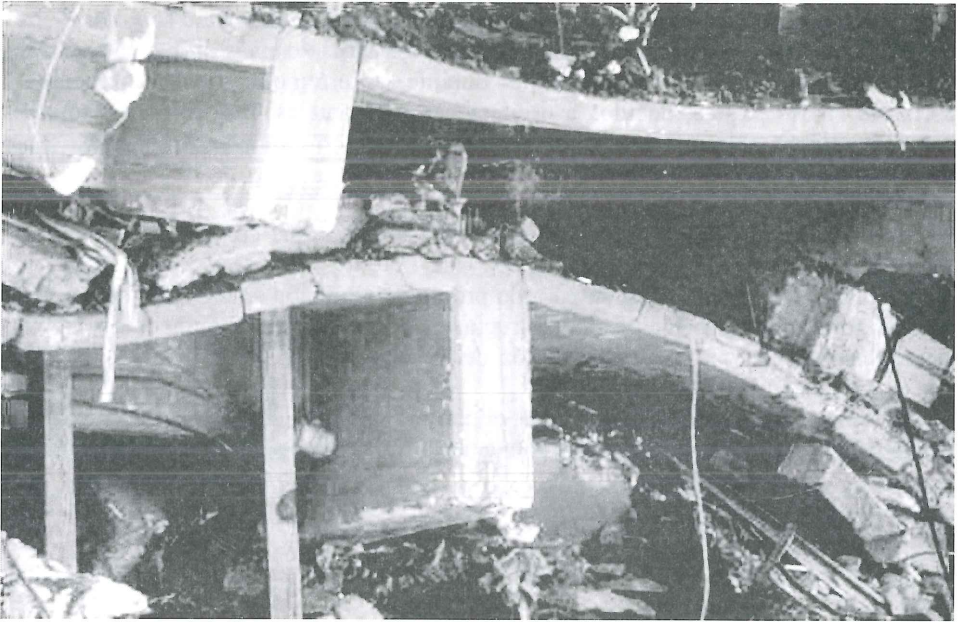
Los edificios altos tienen ya de por sí períodos de vibración largos, lo que dificulta la resistencia de los mismos en caso de Terremoto.

La segunda premisa que debe cumplir un edificio para soportar un seísmo, es que su estructura sea poco frágil, es decir que sea dúctil, admitiendo deformaciones sin colapsar. Eso implica que según va cediendo el material, incluso rompiéndose en parte, debe mantener características resistentes, por ejemplo, en una viga de hormigón armado agrietada, justo en esa sección donde ya no es resistente el hormigón a tracción, (pues tiene una grieta), si que lo es el acero, mientras que, el hormigón sigue aguantando a compresión, a pesar de estar agrietado. En ese caso se dice que una vez agotada la capacidad resistente del material de forma elástica, sigue teniendo resistencia plástica.

En el hormigón, esto se consigue haciendo que gran parte del mismo trabaje con mucha menos tensión que la que podría soportar, ya que, en ese caso, al comenzar la fisura (romperse) entran en acción otras zonas (rotura plástica). Para ello, en el hormigón son más interesantes las vigas de canto, que las vigas planas. Las vigas de canto, son, por lo general, menos económicas que las planas, pues en ellas se utiliza más hormigón. En España se construye mucho con vigas planas, esto no suele dar problemas, porque España no es un país con actividad sísmica importante, pero en caso se acontecer un seísmo, estas vigas no son muy adecuadas.

La segunda medida que se debe aplicar en edificios de hormigón, es la colocación de varios muros pantalla repartidos por todo el edificio, en dos direcciones perpendiculares, lo que dota al edificio de una gran rigidez, pues éstos se comportan como pilares con una sección enorme, que no permiten la deformación del mismo según su lado largo. Colocándolos perpendicularmente, no permiten la deformación del edificio en ninguna dirección, siendo éste muy rígido. A veces se colocan otros elementos rigidizantes, como cruces de San Andrés, que pueden utilizarse tanto en construcciones de acero como de hormigón, y que son más ligeras que los muros pantalla.

En acero, la ductilidad se consigue con perfiles poco óptimos, en forma que la rotura del mismo implicase que entrasen a trabajar nuevas secciones, así pues, no es



Este edificio ha colapsado totalmente, pero sus vigas de canto ni siquiera están agrietadas. Obsérvese como el hormigón de los solados se ha curvado plásticamente adaptándose a su nueva forma, en algunas zonas agrietándose, pero todavía resistiendo.

muy adecuado el uso de perfiles óptimos como los IPE o HEB, ya que, al igual que en las construcciones de hormigón, los elementos calculados estrictamente son económicamente muy adecuados, pues se aprovecha resistentemente todo el material, pero, en caso de esfuerzos excesivos, no hay materia adicional para los mismos. Si se colocan otros perfiles menos óptimos, o éstos mismos, reforzados con platabandas, al menos en las zonas más conflictivas, en los extremos del pilar, y en los nudos de la estructura, al sobrepasar la resistencia del perfil entrarían en juego nuevas secciones (las de las platabandas) produciendo una rotura dúctil, en la que el perfil sigue resistiendo mientras se rompe.

Un bloque, teórico, completamente rígido, se movería de forma sincronizada con el estímulo. En la realidad, el edificio oscila, deformándose a partir de su posición inicial. Si se sobrepasa el límite elástico de alguno de los materiales, puede entrar en régimen de deformación plástico, y deformarse sin tender a recuperar su forma, o, si éste responde frágilmente, romperse. Desde este punto de vista, los materiales de construcción más seguros, sísmicamente hablando, son los elásticos, y coherentes, como por ejemplo la madera y el hormigón armado.

8. PREDICCIÓN DE SEÍSMOS

Uno de los problemas, que los científicos están estudiando con más interés desde los años 80, es la predicción de los terremotos.

Por una parte, sería conveniente poder evaluar el riesgo de producirse terremotos en un sitio determinado, es decir saber cuál es la probabilidad de que haya un sismo

en un lugar concreto, y, por la otra, sería muy beneficioso conocer la fecha y la hora del mismo, antes de que éste tuviese lugar.

8.1. Lugares sísmicamente peligrosos. Teoría de Tectónica de placas

La primera parte del problema se está resolviendo con ayuda de los estudios sobre la mecánica que origina los terremotos, cuya naturaleza y situación está ligada a la tectónica global de las placas. Según la teoría de la tectónica global de placas, la corteza terrestre está formada por un mosaico de siete placas o zonas rígidas gigantes: América del Norte y del Sur, Eurasia, Pacífico, África, Indo-Australia y Antártida, más un cierto número de placas más pequeñas como la del Caribe o la del África Oriental, y de unas plaquitas como las dos que componen España. Una separada de Francia por los Pirineos al Norte y otra al Sur limitada por la línea que, empezando por Huelva, sigue por el Norte del Valle del Guadalquivir, y llega a separar las provincias de Valencia y Alicante; la otra comprende todo el resto de España al Sur de esta última línea.

Los desplazamientos relativos de unas y otras placas, son la causa de los terremotos al liberarse los esfuerzos de la fricción, que se produce en esos movimientos. La energía de estas fuerzas, se acumula a veces, durante algún tiempo en el que no se observa desplazamiento alguno. Cuando se desatan de pronto, porque los terrenos no soportan más presiones sin romperse, se originan los terremotos o movimientos sísmicos, que a su vez, dan lugar a ondas que se propagan por los diferentes terrenos de la corteza terrestre, haciendo vibrar todo lo que está situado sobre ella y produciendo la destrucción de los mismos, especialmente si se agrieta el terreno en el que se asientan, pero también si entran en resonancia con las oscilaciones de baja frecuencia. Otro fenómeno que suelen ocasionar esas vibraciones, es la licuación de las arcillas «vivas», que poseen una alta susceptibilidad, pudiendo colapsar un terraplén.

La situación de los bordes de las placas, que están en movimiento, se conoce por los estudios geológicos y geofísicos de la corteza terrestre, y además los datos históricos lo confirman.

Si observamos un mapa del Mundo, en el que se representan los puntos de la superficie, situados en la vertical de los focos sísmicos, es decir, sus epicentros, veremos que existen unas alineaciones que recorren el globo terráqueo, dividiéndolo en áreas, de diferentes superficies, coincidentes con las placas señaladas.

Así, se encuentra marcada una línea Norte-Sur en el borde oeste de toda América, otra se extiende de oeste a este desde las Azores hasta Grecia, prolongándose por Turquía, Irán, El Himalaya, Sumatra, Nueva Guinea y El Pacífico, uniendo un gran número de lugares, en los que históricamente han sucedido terremotos destructores. También, otra destacada línea de epicentros se encuentra en el borde occidental de la placa del Pacífico, desde las islas Kuriles hasta las Filipinas, pasando por Japón, donde se producen muy a menudo seísmos con gran número de víctimas y cuantiosos daños.

Igualmente, es muy conocida y estudiada la falla de San Andrés, que pasa por San Francisco, produciendo un desgarre con el desplazamiento de la península de Baja California hacia el Norte, creando en todas las zonas próximas, una serie de

fallas secundarias, y una gran inestabilidad, principalmente en Los Angeles y sus alrededores.

La cartografía en la que se representa la acumulación de datos de sismicidad, marca alineaciones que coinciden con los bordes de las placas que se han mencionado.

8.2. Predicción del momento en que se producirá un sismo

La segunda parte del problema, sobre: ¿cuando se producirá el terremoto? es aún más difícil de precisar. No obstante, algunas observaciones físicas muy precisas van mostrando cada día con más certeza y con una cierta antelación los fenómenos que anteceden al movimiento brusco de un sismo.

Uno de los métodos que más se está usando en la predicción de terremotos, se basa en la observación de pequeños movimientos del terreno, que suceden antes del mismo. Para ello se utilizan aparatos de gran precisión, llamados inclinómetros, que miden pequeñas variaciones en la horizontalidad del terreno. Otros aprecian los más mínimos desplazamientos de puntos bases o hitos fijados en el suelo, por medio de rayos láser o con extensómetros.

Los movimientos del magma, bajo la corteza terrestre, pueden producir pequeños desplazamientos sobre el terreno dando lugar momentáneamente a leves terremotos. Esos cambios de lugar del magma se manifiestan con variaciones gravimétricas medibles, pero también, con modificaciones en las características magnéticas de las rocas del subsuelo sometidas a diferentes presiones. Estos valores se pueden registrar con un magnetómetro, previniendo las repercusiones de esas presiones que pueden causar sismos.

Las mismas deformaciones previas al terremoto, producen una microfracturación, que afecta a la conductividad del terreno, puesto que, entonces, puede circular en esa zona más fácilmente el agua del subsuelo, variando su conductividad. Además, debido al desplazamiento, se generarán pequeñas corrientes telúricas medibles con un voltímetro de alta precisión, cuyos electrodos penetren en el suelo del área sísmica.

Las variaciones en la circulación de las aguas subterráneas se notan también porque dejan de manar algunas fuentes o aparecen nuevas, fluctúan los niveles de los pozos, llegando a secarse o convirtiéndose en artesianos. Algunas veces, cambia la temperatura y la hidroquímica de algunas aguas. En este último caso, es muy notable el aumento del desprendimiento de gas radón, que se libera de los poros de algunas rocas, pudiéndose detectar fácilmente con un contador Geiger, ya que éste gas es radiactivo.

8.3. El sismógrafo animal

Curiosamente, todos esos fenómenos físicos, que en conjunto producen perturbaciones en los campos magnéticos y eléctricos terrestres, medibles con aparatos de precisión, y quizás emisión de ultrasonidos, provocan cambios en los comportamientos de los animales.

En China, se han estudiado a fondo esas manifestaciones, ya que este grandioso país se encuentra en una subplaca en la que se producen con cierta frecuencia terremotos devastadores. En este país, han observado que las vacas, ovejas, mulos y caballos no quieren dejarse encerrar en los establos antes de ocurrir un sismo. Asimismo los cerdos no quieren comer; los perros ladran furiosamente; los patos no quieren nadar sobre la aguas y permanecen en las orillas de las charcas; las gallinas vuelan a las ramas de los árboles, o a los palos de los gallineros y cacarean fuertemente; los gatos corren nerviosamente de un lado para otro; los conejos levantan sus orejas y saltan en todas las direcciones; las abejas salen ruidosamente de sus colmenas; las palomas vuelan sin parar, y no vuelven a sus nidos; los peces, parecen enloquecer en sus peceras, y saltan por encima del agua.

La única dificultad, es que otras veces, los animales tienen también comportamientos extraños, siendo difícil discernir, aunque la observación simultánea del comportamiento de varias especies animales puede quizás ser una buena ayuda en este campo.

9. RED DE PREDICCIÓN DE SEÍSMOS

Para poder predecir un terremoto, es necesario tener una extensa, continua y precisa red de estaciones de observación: geodésica, para medir pequeños movimientos; geofísica para apreciar variaciones de la gravedad, resistividad, corrientes telúricas, magnetismo, ruidos débiles y radiometría; geoquímica, para observar variaciones en el quimismo del agua, o del aire; biológica para observar el comportamiento de los animales. Pero es fundamental, además, saber interpretar bien los datos recibidos, y contar después con un buen y entrenado servicio de protección civil, que permita evacuar la población amenazada en un momento dado. Otra medida previa muy importante, que actualmente se está teniendo en cuenta, es la de construir en esas áreas sísmicas edificios con las máximas condiciones de seguridad.

En general, los terremotos son difícilmente previsibles, si bien, en los países con más problemas sísmicos, (como puede ser Japón), la tecnología actual, permite, en algunos casos, dar aviso a la población, por radio, con tiempo suficiente para tomar medidas.

En Hai Cheng (China) el 4 de febrero de 1975 ocurrió un terremoto de grado 7,3 en el que se destruyeron todas las casas; pero sin embargo, no hubo víctimas, pues su predicción permitió evacuar a la población. No obstante el 28 de julio de 1976 en Taug Shan, también China, a 300 km. de Hai Cheng hubo un terremoto de grado 7,8 que no se logró predecir, y que produjo 850.000 muertos.

Indiscutiblemente, la vigilancia constante y precisa, es la mejor y la única protección ante los terremotos, seguida, por supuesto, de una rápida y acertada organización de la evacuación. en la que las comunicaciones juegan un importante papel.

10. QUÉ HACER EN CASO DE TERREMOTO

Los terremotos que tienen lugar en España, suelen ser de poca intensidad, por lo que, posiblemente ninguno de nosotros tengamos nunca que aplicar estas recomendaciones.

Sin duda, son los incendios el motivo que más perjudica a las construcciones en caso de terremoto. Suelen producirse como consecuencia de la caída de estufas, braseros, cocinas, etcétera.

Si se recibiese el aviso a tiempo, deben cerrarse los pasos de agua, gas y electricidad, tener una linterna a mano, y elementos de primeros auxilios; se debe aprender a manejarlos, y preferiblemente permanecer en grupo; vigilar los objetos pesados que puedan caerse, sobre todo aquellos que están en lugares altos, como lámparas o estanterías; sujetar los que puedan volcar, como los armarios. Una persona que se encuentre en un vehículo, o en la calle, debe buscar un lugar seguro, preferentemente una explanada sin elementos verticales cerca.

Una de las primeras reglas al producirse el terremoto, es la de no entrar ni salir de edificios, ni permanecer en el exterior cerca de ellos, pues es posible que caigan cascotes y/o vidrios. Si al iniciarse el terremoto no ha dado tiempo a abandonar el inmueble, se debe escoger dentro de él una habitación cerca de posibles salidas de emergencia, con un techo que no abarque demasiada área, y permanecer cerca de los pilares que parezcan más resistentes, cubriéndose la cabeza, por ejemplo, con los brazos. No se debe estar cerca de objetos frágiles como espejos o ventanas, ni de fuego, en chimeneas o cocinas, elementos eléctricos o televisión, (cuyo tubo podría implosionar). No se debe intentar salir del edificio hasta que el seísmo haya pasado, y ni siquiera en ese instante se deben utilizar los ascensores.

En caso de estar circulando en coche, éste puede proporcionar protección frente a la caída de pequeños objetos, pero debe reducirse la marcha (sin brusquedades innecesarias), preferiblemente parando en lugar que se considere seguro, a ser posible lejos de árboles, postes eléctricos, edificios, etcétera. No es un buen lugar un túnel, o bajo un puente, a pesar de la falsa sensación de seguridad que éste pueda dar.

Los servicios de las ciudades, incluso los primarios, como son el agua o las comunicaciones, pueden verse cortados, en caso de terremoto. En estas circunstancias, la ayuda de los radioaficionados es de gran utilidad.

11. BIBLIOGRAFÍA

- | | |
|---|---|
| ABC Cultural. 1994. Terremotos, España bajo la amenaza del «Big one». | Freeman and Co. 1978. Earth. |
| Barnes, C.W. 1934. Earth, Time and Life. | Gass, I. G. et al. 1971. Understanding The Earth. |
| Browitt, C.W.A. 1993. Predicción de terremotos y protección contra los mismos. Tierra y Tecnología. | Green, Norman B. 1980. Edificación, diseño y construcción sismorresistente. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona. |
| Control de vibraciones producidas por voladuras. Jornadas técnicas de Unión Española de Explosivos. | Kenneth, W. The earth dynamic systems.
National Geographic. Junio 1996. Vol 149. N 6. |
| Cordilleras, terremotos y volcanes. 1973 Editorial Salvat. | Observatori Fabra.1996. Reial academia de ciències i arts de Barcelona. |

- Olaechea Labayer, Juan B. 1980. Madrid y sus terremotos. Ayuntamiento de Madrid. Delegación de cultura. Artes gráficas municipales.
- Rathe, Jean P. 1972. Sismos y Volcanes. Oikos-tau, S.A.-ediciones. Vilassar de Mar (Barcelona).
- Robinson. 1982. Basic Physical Geology.
- Sanders, J.E. 1981. Principles of physical geology.
- Tazieff, H. 1962. Cuando la tierra tiembla. Siglo veintiuno editores S.A.
- Walker, Bryce. 1982, Editorial Planeta, S.A. Planeta Tierra.