

Las obras de Ingeniería en las regiones expuestas a terremotos

En todos los territorios que, limitando septentrionalmente el Mediterráneo, corresponden a formaciones montañosas terciarias del grupo alpino, hay muchas zonas de marcada sismicidad. Así ocurre en la Península ibérica, que, aun cuando no ha sufrido en los tiempos históricos más terremotos catastróficos que el de Lisboa en el año 1755, por excepción alejado de las formaciones terciarias alpinas, y el que tuvo su epicentro cerca de Alhama de Granada, iniciado el 25 de diciembre de 1884, contiene, sin embargo, varias regiones en las que se han sentido temblores de suficiente consideración, para que deban tenerse presentes sus posibles efectos en las obras de ingeniería que en ellas se ejecuten.

Importancia de los fenómenos sísmicos en la Península ibérica

En la notable monografía del Sr. Rey Pastor citada en la bibliografía que figura al final de esta nota ¹ se mencionan varios sismos ibéricos modernos, entre los que se encuentran los siguientes, que se han agrupado por regiones:

1.º A la región de Lisboa corresponde el antes citado, ocurrido en 1755. Es el más desastroso que ha sufrido la Península en los tiempos históricos, asignándosele en la escala sísmica Forel-Mercalli-Cancani el grado superior XII, para el cual ningún edificio ni obra humana queda en pie. Entre los más modernos se halla el de epicentro hacia Ribatejo, del 23 de abril de 1909, con grados del VIII al X, que se propagó por España a lo largo del Tajo, aunque con conmociones poco violentas. El grado VIII sísmico se caracteriza por derrumbarse los vallados de piedra, chimeneas y torres de construcción corriente y rajarse los edificios con producción de hundimientos parciales. El X corresponde a la destrucción de los edificios de construcción ordinaria, quedando resentidos muchos de entramado metálico o de hormigón armado y sufriendo grandes desperfectos los muros, diques y puentes; tuércense los carriles, rompense las cañerías de agua y gas, agriétase el asfalto de calles y plazas, deshácense los adoquinados y se agrietan los terrenos, en los que se producen corrimientos. También deben mencionarse el ocurrido en 1761 en Beja, del grado VIII, y el de 28 de febrero de 1926 con epicentro en Evora y del grado VII, grado que corresponde a terremotos también muy fuertes, pues agrietan algunos edificios y hacen caer chimeneas de construcción mediana.

2.º En la región Noreste se halla la zona pirenaica en la que ocurrió el 10 de julio de 1923 un terremoto con epicentro hacia Martes (canal de Berdun, Huesca), del grado VIII, y la zona del litoral catalán a la que corresponde el que se produjo el 12 de marzo de 1927, con el grado VII y epicentros en Campins y Montany.

3.º La región Sureste, que comprende Alicante, Murcia, Almería y Granada, es la más castigada de todas las españolas. En ella figuran el del 10 de septiembre de 1919, con epicentro hacia Jacarilla (Murcia) y grado VIII, y el de 28 de noviembre de 1916, con epicentro hacia Salinas (Alicante) y grado VII. Además corresponde a esta región el catastrófico, ya citado, de 25 de diciembre de 1884, con zona epicentral muy extensa cerca de Alhama de Granada, del grado X, y en el que hubo unos 400 muertos, 1 500 heridos de gravedad, 4 000 casas destruidas y 13 000 seriamente averiadas.

Por lo que antecede se ve que las mencionadas regiones de nuestro país deben incluirse entre aquellas en las cuales los efectos producidos por terremotos aconsejan que se tomen prudentes precauciones cuando en ellas hayan de construirse ciertas obras de ingeniería, habiendo también otras en las que se sienten algunas veces fenómenos sísmicos.

Características sísmicas que conviene tener presentes

El Comité Imperial de Investigaciones relativas a los terremotos del Japón funciona desde hace más de treinta años, y de sus importantes trabajos han tomado los ingenieros Summers y Briske la mayor parte de los datos que figuran en sus monografías, que se citan en la bibliografía inserta al final de esta nota, completados con el resultado de sus estudios y observaciones personales, referentes principalmente al gran terremoto ocurrido en aquellas Islas el 1.º de septiembre de 1923, durante el cual ambos estaban en ellas. En las referidas monografías, especialmente en la de Briske, se encontrarán detalles respecto a lo que se dice a continuación, que en gran parte está basado en ellas y en la más moderna de Dewell.

Cuando haya que construir obras en comarcas para las que sea prudente tener en cuenta los movimientos sísmicos del terreno, convendrá darse cuenta de la fuerza correspondiente al movimiento oscilatorio del suelo, con la que deba contarse en los cálculos de estabilidad de aquéllas. Los procedimientos con-

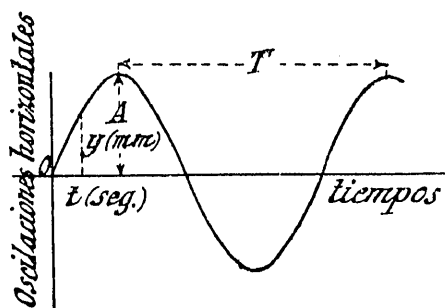


Fig. 1.ª

ducentes al expresado fin no permiten llegar más que a primeras aproximaciones. Entre ellos es lo más satisfactorio partir de buenos sísmogramas registra-

¹ Figurará en el próximo número de esta REVISTA.

dores de los movimientos horizontales del terreno, tomados en las inmediaciones o, mejor, en la localidad que interesa. En dichos sismogramas se podrán apreciar (fig. 1.^a) los segundos T (en los sismos destructores japoneses de 1 a 1,5) que median entre los dos puntos consecutivos, más altos o más bajos, correspondientes a la parte donde la amplitud $2A$ sea máxima, debiendo advertir que, como los sismógrafos suelen estar sobre rocas o terrenos firmes, las amplitudes serán mayores en las obras, cuando estén ubicadas en terrenos sueltos. El sismograma estará formado por ondulaciones con períodos y amplitudes muy distintas, pero podrá asimilarse a una serie de curvas senoidales. Se tiene para una de ellas

$$y = A \operatorname{sen} 2\pi \cdot \frac{t}{T}$$

y la aceleración correspondiente será

$$\alpha = \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot A \operatorname{sen} 2\pi \cdot \frac{t}{T}$$

cuyo mayor valor, o sea cuando $\operatorname{sen} 2\pi \cdot \frac{t}{T} = 1$ es

$$\alpha_{\max} = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot A$$

Por ejemplo, si resulta del sismograma

$$T = 1 \text{ seg y } A = 50 \text{ mm}$$

se tendrá

$$\alpha_{\max} = \frac{4\pi^2}{1} \cdot 50 \approx 2\,000 \text{ mm/seg}^2$$

La componente horizontal de la fuerza ejercida por el movimiento oscilatorio sísmico sobre una estructura de peso P , puesto que la fuerza es igual a la masa por la aceleración que la imprime, será

$$F = \frac{P}{g} \cdot \alpha = P \cdot \frac{\alpha}{g}$$

El cociente $\frac{\alpha}{g}$ se llama *grado* o *coeficiente de sismicidad*, y se designa por varios sismólogos por la letra K . Siguiendo con el ejemplo numérico anterior, si

$$\alpha_{\max} = 2\,000 \text{ mm/seg}^2$$

el valor de K será

$$K = \frac{2\,000}{9\,800} \approx \frac{1}{5}$$

y el máximo de la fuerza F debida al movimiento oscilatorio horizontal del terreno,

$$F = \frac{1}{5} P$$

siendo P el peso de la estructura.

Cuando no se dispone de un sismograma puede tenerse una idea del valor de α_{\max} por el siguiente procedimiento: se buscan entre los objetos derribados por el terremoto lápidas, columnas y otros estrechos, altos y no empotrados en su base, que antes de caer conservaban vertical su mayor dimensión a (fig. 2.^a). Bajo la acción de la fuerza F correspondiente a α_{\max} caerán aquellos objetos si

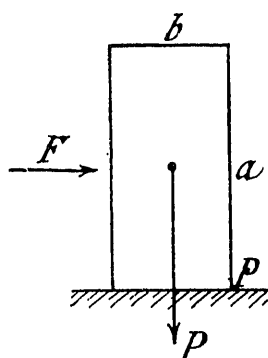


Fig. 2.^a

$$Fa \geq Pb$$

o sea, puesto que

$$F = P \cdot \frac{\alpha}{g}$$

cuando

$$a \cdot \frac{\alpha}{g} \geq b$$

de donde

$$\alpha \geq g \cdot \frac{b}{a}$$

Tomando estos datos para varios objetos derribados puede hallarse el mayor valor de a y, por consiguiente, el de F . Pero los errores que pueden cometerse son, a veces, considerables, por lo que este procedimiento tiene que aplicarse con mucha cautela.

Antes de ocurrir el terremoto de 1923 se había adoptado en Japón, para los proyectos de edificios, el coeficiente de sismicidad $\frac{1}{10}$, que corresponde a un valor de

$$\alpha_{\max} = 1\,000 \text{ mm/seg}^2$$

pero después de aquel sismo parece algo deficiente. Antes de fijar, para los cálculos de resistencia, un coeficiente, habrá de considerarse la vida probable de la construcción, su costo y lo que pueden influir en éste los aumentos del coeficiente. Parece que

$K = \frac{1}{5}$ da amplia protección a los edificios que se construyen en la actualidad en aquellas Islas, donde los grandes sismos ocurren hacia cada sesenta años. Para las edificaciones de Tokio se adopta, sin embargo, según Dewell, el coeficiente $\frac{1}{10}$, que vendrá reducir para regiones menos sísmicas.

Aun cuando los terremotos producen también movimientos verticales, suelen ser de escasa importancia comparados con los horizontales, y, salvo en casos muy especiales, no merecen ser tenidos en cuenta para los cálculos de estabilidad.

El efecto debido al movimiento del terreno es equivalente, para los cálculos de resistencia, a suponerlo fijo y que la construcción estuviese solicitada por una fuerza, debida a su inercia, del valor F . Parece, a primera vista, que la fuerza F debiera suponerse aplicada a la parte alta de la estructura; pero en los casos más corrientes el período de oscilación del terreno es suficientemente grande para que aquélla pueda adquirir inicialmente casi la mis-

ma velocidad que el suelo, con lo cual, y en virtud de la inercia de la estructura, afirma el eminente sismólogo japonés Omori, basándose principalmente en numerosos experimentos en los que imitaba los efectos del terremoto por medio de una plataforma oscilante, que la fuerza F actúa como si estuviese aplicada en el centro de gravedad de la construcción. El efecto es, pues, en los casos corrientes, próximamente la mitad del correspondiente a la aplicación de la fuerza F en la parte alta; pero si el terremoto fuese tan violento que actuase casi a modo de una explosión, determinando vibraciones y oscilaciones del terreno de duración cortísima con respecto al período propio de las oscilaciones de la construcción, en la primera fase no adquiriría la estructura una velocidad comparable a la del terreno y habría que suponer a F en la parte más alta sobre el suelo. Determinadas así la fuerza resultante F y su punto de aplicación suelen calcularse sus efectos sobre las distintas partes de las estructuras, de un modo análogo al seguido para los de los fuertes vientos que pueden actuar sobre las construcciones. Este método de cálculo, aun cuando no parece que conduce a grandes errores, es inexacto y, para regiones muy sísmicas y construcciones de gran importancia, debe substituirse por otros más correctos, como los que propone el profesor japonés Naito, en un tratado relativo a edificios antisísmicos, mencionado por Dewell.

Cada estructura tiene un período de oscilación propio que depende principalmente de su configuración y del tamaño, naturaleza y enlaces de sus partes constituyentes. Si aquel período es mayor que el de las oscilaciones del movimiento sísmico, se compara la estructura, siguiendo a Omori, a una columna alta, y si es menor, a una columna corta. Las estructuras altas, como una torre de faro, chimenea de fábrica, etc., actúan a modo de péndulos invertidos y suelen romperse hacia los $2/3$ de su altura sobre el terreno; en las bajas, la tendencia a la rotura se manifiesta hacia la base. Los edificios con muchos pisos (rascacielos) modernamente construídos en Tokio corresponden, sin embargo, a la última categoría, y en ellos, como la planta baja es muy maciza y está tan sólidamente ligada a los cimientos que casi forma un cuerpo con ellos, las fracturas se producen en el piso encima de aquélla.

Los detalles de los cálculos de resistencia, con respecto a los terremotos, de las obras de ingeniería usuales, pueden verse en la extensa obra de Masciari-Genoese y en la muy útil y mucho más moderna de Briske, citadas al final de esta nota.

Ubicación y reglas generales para proyectar y construir obras

Ubicaciones.—Hay obras de ingeniería para las que no está muy obligada la ubicación, y cuando esto ocurre en las regiones expuestas a terremotos, debe procurarse escoger, si no hay otras razones de más peso que lo impidan, lugares donde los efectos perjudiciales de los sismos observados acusen que son nulos o de escasa importancia. En el Perú hay sitios de las regiones sísmicas, en los cuales no se han sentido nunca los terremotos, respecto a los que dicen los naturales «que las rocas hacen puente», y, por el contrario, hay en lugares céntricos de Tokio terrenos dedicados a jardines, por no ser prudente edificar en ellos, dada la violencia de las conmociones.

Se ha comprobado que la amplitud y aceleración de las oscilaciones son mayores en los terrenos poco coherentes, como arcillas, margas, arenas, gravas, tobas volcánicas terrosas, rocas compactas profundamente alteradas, aluviones fluviolacustres, depósitos litorales, terraplenes, etc., que en las formaciones de rocas muy coherentes sin señales de disgregación. Entre éstas son preferibles las muy cristalinas y compactas, como granitos, gneis, esquistos primarios; siguen a estas rocas las calizas compactas y ciertas areniscas duras con bancos gruesos y sin ninguna o débil inclinación.

Deben evitarse los terrenos castigados durante pasados terremotos y también las líneas de contacto entre formaciones de distinta compacidad, pues en ellas las ondas sísmicas sufren fenómenos de interferencias y reflexiones y hay violentas sacudidas, todo lo que determina intensos e irregulares movimientos oscilatorios. Fenómenos análogos ocurren en las fracturas y fallas y donde los plegamientos se entrecruzan o cambian bruscamente de dirección. En los bordes de altiplanicies o en los de la parte superior de laderas de profundos valles u hoces y, en general, cuando el terreno esté privado de apoyos laterales, la relativa libertad que adquieren las ondulaciones sísmicas determinan grietas longitudinales irregularmente paralelas entre sí. Masciari-Genoese recomienda que en tales casos deben alejarse las obras de los bordes, por lo menos, una distancia igual a la profundidad hasta el terreno bajo. Si las obras están en el fondo de un valle hay que estudiar la estabilidad que pueden ofrecer sus laderas, y alejarse de ellas si son de temer probables desprendimientos. Cuando haya un terreno suelto sobre roca firme convendrá llevar todas las cimentaciones hasta ella; pero cuando la roca esté muy profunda, será preferible, en varios casos, constituir una solera continua de hormigón armado. No deben cimentarse obras como puentes, viaductos, etc., de suerte que unas pilas estén en una formación y otras en otra con distintas condiciones de compacidad, y hay que evitar también fallas en las zonas de cimientos, pues los citados inconvenientes dan por resultado falta de sincronismo en las oscilaciones del terreno, con evidente peligro para las obras que en él descansan. Se ha comprobado que las oscilaciones decrecen rápidamente al alejarse de la superficie, por lo que convendrá llevar los cimientos a bastante profundidad.

Edificios.—Son las construcciones cuya destrucción suele producir más funestas consecuencias y son por ello las que acaso mejor se han estudiado. Como dice el Padre Navarro Neumann, S. J., la primera obra realmente científica sobre arquitectura antisísmica es la que publicó en Manila, en el año 1881, el entonces comandante de Ingenieros D. Manuel Cortés y Agulló, con el título *Los terremotos y sus efectos en las edificaciones*, con motivo del ocurrido en aquella ciudad del 17 al 20 de julio de 1880. En dicha obra, favorablemente comentada por sismólogos extranjeros, decía que las casas en las regiones sujetas a terremotos ofrecían cierta semejanza con los barcos, pues ambos se apoyan sobre un elemento móvil que les transmite su movilidad, y deducía que debían construirse los edificios, como se hace con los barcos, de modo que constituyeran un conjunto indeformable.

De acuerdo con estas ideas, la Comisión italiana

que formuló las normas edilicias obligatorias para las regiones sísmicas de Italia, a raíz del terremoto de Calabria y Messina de 28 de diciembre de 1908, ordenó que las construcciones en las áreas sísmicas tuviesen un entramado de hormigón armado, hierro o madera, constituyendo un armazón desde los cimientos al techo que pudiera sostenerse por sí mismo y sólidamente unido a las estructuras horizontales de los suelos y terrazas.

La supraestructura debe estar íntimamente unida con los cimientos o con la plataforma de fundación, pues así se conseguirá que las sacudidas del suelo se transmitan con mayor uniformidad a todo el edificio. Según Dewell, el hormigón armado, cuando el edificio está bien proyectado y construido, da excelentes resultados si se trata de alturas moderadas, pero parece preferible el empleo de armazones de acero para estructuras bastante elevadas. En todo caso convendrá que la parte alta y cubiertas sean ligeras, para dejar el centro de gravedad tan bajo como sea posible.

Por la dirección en que han caído los muros, árboles, columnas, etc., puede deducirse si hay una dirección preferente para las oscilaciones mayores, en los terremotos de la región. En caso afirmativo convendrá que los edificios y demás construcciones presenten su mayor dimensión horizontal en la referida dirección.

En los edificios constituidos por elementos de elasticidad muy distinta y mal ligados entre sí, las oscilaciones transmitidas desde el suelo producen el efecto de un ariete destructor que desune las piezas del armazón, principalmente en las uniones de las vigas de los pisos con las paredes del edificio. Si además se trata de estructuras altas, como los rascacielos, y con masas pesadas hacia la parte superior, éstas hacen el efecto de péndulos invertidos que, al oscilar, determinan fuertes esfuerzos de cizalleo, cuya acción máxima se siente hacia los pisos segundo y tercero, siendo mucho menores en el primero (o sea la planta baja) y en los superiores al cuarto. Por todo ello, la altura de las edificaciones debe limitarse a 20 ó 24 m, con seis pisos a lo sumo.

Terminaremos lo relativo a edificios resumiendo lo manifestado por varios técnicos norteamericanos y japoneses con motivo del terremoto del año 1923, en las conclusiones siguientes:

1.^a Las fundaciones que constituían un suelo continuo de hormigón armado resistieron en casi todos los casos, por lo que se recomienda que todas las partes de los cimientos deben estar, por lo menos,

fuertemente arriostradas para que se comporten como un todo único. Conviene además que los cimientos se lleven a bastante profundidad.

2.^a En general los armazones de acero ofrecen gran resistencia, debiendo rellenarse sus huecos y hacerse los muros transversales y tabiques, de hormigón armado. Cuando los edificios no son altos, resulta satisfactorio construirlos de hormigón armado y para los pequeños dan también buen resultado armazones de madera, pues resisten bien en casas de tres pisos (a contar de la planta baja) con tejados ligeros. Deben proibirse los muros de fachada de sillería, mampostería o ladrillo. Las habitaciones de poca altura son siempre preferibles.

3.^a Los suelos y cubiertas serán tan ligeros como posible, salvo las vigas de suelos que constituyen arriostramientos, pues los demás elementos tenderán con su masa a destruir las uniones con muros y soportes, durante las oscilaciones del terremoto.

4.^a Los muros, vigas de arriostramiento y soportes verticales deben tener secciones adecuadas para transmitir los esfuerzos debidos al terremoto a toda la parte del edificio encima de ellos.

5.^a Los edificios deben tener una planta rectangular, huyendo de las en L, en U o análogas, y altura uniforme, es decir, sin torreones o partes destacadas. Evítense extensas áreas, como patios, salones, etc., sin muros ni tabiques, procurando que los muros y soportes dejen espacios no grandes.

6.^a En los muros y tabiques, así como en toda la obra, es de vital importancia la naturaleza y calidad de los materiales y la mano de obra. Los muros y tabiques de hormigón armado son los mejores, y debe emplearse exclusivamente este material en los pisos segundo y tercero; en los primero (bajo), cuarto y quinto cabe usar el ladrillo macizo, pero el hueco no es prudente emplearlo más que en los edificios altos a contar del sexto piso, pues se deshace en los más violentamente sacudidos.

7.^a En las cubiertas de teja, cada una de éstas debe estar directamente sujeta a la armadura para evitar su caída por deslizamiento al ocurrir el terremoto.

A consecuencia del terremoto de 1925 en Santa Bárbara (California) se incluyeron en las ordenanzas municipales de aquella ciudad norteamericana unas interesantes cláusulas desinadas a precaverse contra los efectos sísmicos en los edificios, que juntamente con las adoptadas por la municipalidad de Sacramento, figuran en el artículo, varias veces citado, de Dewell.

N. PUIG DE LA BELLACASA

El nivel de los aluviones y el de las avenidas

La Unión Geográfica Internacional, constituida después de la guerra europea y sostenida por una veintena de Estados (aun no los vencidos ni Rusia), reanudó los Congresos internacionales de Geografía con el del Cairo en junio de 1925. Este XI Congreso designó una «Comisión para estudiar las terrazas litorales y fluviales, con el fin de determinar la existencia de niveles constantes, si existen, y de fijar su sucesión, especialmente en las costas de Europa occidental y en la cuenca del Mediterráneo». La Comisión de Terrazas nombró presidente al delegado español D. Eduardo Hernández-Pacheco. Esta Comisión y la de Geografía física habían de llevar sus labores a un

Congreso especial de la Unión, celebrado el mes de julio último en Londres-Cambridge. En este Congreso, la Comisión de Terrazas, formada antes por delegados de España, Francia, Gran Bretaña, Italia y Yugoslavia, perdió este último, pero quedó reforzada con delegados de Bélgica, Checoslovaquia, Holanda, Polonia y Estados Unidos de Norteamérica, siendo confirmado en la presidencia el delegado de España.

Al Congreso de Londres-Cambridge asistieron profesores e ingenieros españoles con trabajos importantes sobre diversos temas, y nuestro Instituto Geográfico presentó, con general beneplácito, las ho-