

# **DAÑOS PRODUCIDOS POR TERREMOTOS**

**Mercedes Feriche Fernández-Castany**

*Instituto Andaluz de Geofísica y  
Prevención de Desastres Sísmicos*



## INTRODUCCIÓN

Las construcciones son los elementos vulnerables más importantes ya que los daños sufridos por ellas repercuten directamente en las víctimas que pueda ocasionar un sismo. Con el fin de determinar los daños que pueden producir los futuros terremotos, es necesario conocer los distintos tipos de estructuras y su comportamiento ante los diferentes movimientos del suelo. Con relación a los datos obtenidos, se podrán mejorar los tipos constructivos y hacer más estrictos los controles de calidad en obras de reciente construcción.

La utilización de diseños antisísmicos en obras aumenta considerablemente el coste de construcción, y por ello, en muchos casos, se evita su aplicación. Sin embargo, el costo por diseño antisísmico es un porcentaje muy bajo (inferior al coste de muchos elementos ornamentales) salvo el caso de estructuras especiales. El respeto de la normativa sismorresistente deberá ser riguroso para evitar daños mayores.

Cuando se produce un terremoto, los daños en las construcciones están relacionados con los tipos de los elementos constructivos, materiales empleados, modo de ejecución, subsuelo, topografía, etc... Este último factor desempeña un papel muy importante a la hora de considerar el emplazamiento de una obra en zonas sísmicas, ya que, según las características fisiográficas de cada zona, las ondas sísmicas variarán su comportamiento. Esto es especialmente importante cuando existen materiales sueltos o de baja coherencia, y extremadamente peligroso cuando concurren los tres factores siguientes: gradiente topográfico alto,

materiales inconsolidados y alto contenido en agua. Además, en las cuencas sedimentarias, como se ha visto en el tema anterior, se producen fenómenos de amplificación y se incrementan la amplitud y la duración del movimiento.

Las ondas sísmicas afectan a las estructuras en función de diferentes características:

*\*Ondas de baja frecuencia:* hacen que los edificios altos entren en resonancia, afectando en menor grado a los bajos.

*\*Ondas de alta frecuencia:* afectan sobre todo a las casas bajas y en menor grado a las grandes estructuras.

*\*Período propio del terreno.*

*\*Período fundamental de la estructura.*

*\*El mayor daño se produce en terreno blando y menos en terreno duro.*

*\*Los edificios altos sufren más daños que los bajos en suelos blandos y de gran potencia.*

## **TIPOLOGIA DE CONSTRUCCIONES EN EL SUR DE ESPAÑA Y SU COMPORTAMIENTO ANTE SACUDIDAS SÍSMICAS**

Las tipologías de construcción en Andalucía han ido evolucionando en el tiempo en función de los materiales empleados. Así, la tipología de construcción más antigua utilizada como vivienda está realizada con materiales precarios (muros de carga de adobe, tapial o mampostería con forjados de madera o de bóvedas de piedra y cubiertas de madera) y es la que se ha venido empleando hasta principios de siglo. La aparición del hormigón (aproximadamente en el año 1935) da lugar a una tipología reacia a dejar de lado el uso de muros de carga, que combina el uso de pórticos de hormigón con muros perimetrales de carga de fábrica de ladrillo, empleado hasta los años 60, en los que se generaliza el uso del hormigón armado. Las construcciones realizadas en esta época suelen ser muy regulares en planta y distribuciones simétricas. Los pórticos están constituidos por vigas de gran canto (descolgadas) utilizando mucho hormigón y poco armado. En los años 1975-80, se comienza a emplear un hormigón armado más flexible (poco hormigón y mucho armado) y estructuras esbeltas constituidas a base de pórticos con pilares esbeltos y vigas planas embutidas en los forjados o losas reticulares reforzadas en las zonas de encuentro con los pilares (capiteles). En este tipo de construcción domina la asimetría en planta y en altura.

## **TIPOS DE ESTRUCTURAS**

Los sistemas estructurales más comunes que existen en la Comunidad Autónoma Andaluza pueden clasificarse (en función de su grado de vulnerabilidad) en alguno de los tipos siguientes:

### **Tipo 1. (Muros de Carga)**

Estructuras a base de muros de carga de mampostería de piedra, ladrillo, adobe o tapial de gran espesor, con sistemas de forjados a base de vigas de madera y bóveda catalana de ladrillos o tablones de madera, o con arcos y bóvedas de piedra. Cimentación constituida por zapata corrida al pie del muro hecha, bien de rellenos, o bien del mismo material del muro.

### **Tipo 2. (Muros de carga con refuerzos)**

Estructuras con muros de carga de fábrica de ladrillo o bloques huecos de hormigón reforzadas con elementos perimetrales de hormigón armado y con sistemas de forjado de hormigón armado hecho in situ o prefabricado. Cimentación constituida por zapata corrida al pie del muro hecha, bien de hormigón armado o bien del mismo material del muro.

### **Tipo 2-3. (Muros de carga y pórticos de hormigón)**

Estructuras con muros de carga perimetrales de fábrica de ladrillo y pórticos de hormigón armado interiores. Sistemas de forjado con viguetas de acero o de hormigón pretensado apoyadas en los pórticos de hormigón. Cimentación constituida por zapata corrida al pie del muro de carga (del mismo material del muro) y dados de hormigón al pie de los pilares que constituyen los pórticos.

### **Tipo 3. (Forjado unidireccional)**

Esqueleto estructural, a base de marcos rígidos formados por pilares y vigas de hormigón armado o de acero estructural, con sistemas de forjado de hormigón armado constituido por viguetas y bobedillas, de 20 a 25 cm de espesor, apoyados en las vigas de los pórticos y reforzados en puntos críticos con vigas secundarias (brochales). Cimentación constituida a base de hormigón armado realizada en función de las características del terreno y de la carga del edificio: zapatas aisladas zunchadas, losas o pilotes.

#### **Tipo 4.(Forjado bidireccional)**

Esqueleto estructural con pilares de hormigón armado o acero estructural y sistemas de forjado a base de losas de espesor constante (usualmente entre 25 y 45 cm), aligeradas en ciertas zonas para definir nervaduras y ábacos o capiteles, que forman marcos “equivalentes” con los pilares. Cimentación constituida a base de hormigón armado realizada en función de las características del terreno y de la carga del edificio: zapatas aisladas zunchadas, losas o pilotes.

#### **Tipos 5 y 6. (Pórticos reforzados)**

Estructuras similares a los tipos 3 y 4 en las que, además de los marcos rígidos, se emplean elementos de refuerzo constituidos por diagonales de hormigón o acero en algunas crujías o por muros de rigidez de fábrica de ladrillo o de hormigón armado; en algunos casos los muros forman núcleos rígidos alrededor de zonas de servicios, como elevadores, escaleras, baños, etc. Cimentación constituida a base de hormigón armado realizada en función de las características del terreno y de la carga del edificio: zapatas aisladas zunchadas, losas o pilotes.

#### **Tipo 7. (Perfiles metálicos)**

Estructuras costituidas a base de pórticos metálicos con forjados de viguetas metálicas y bovedillas. Dentro de este tipo hay que considerar un subtipo: construcciones industriales de diseño especial, normalmente de esqueleto estructural de acero con pilares muy esbeltos y grandes luces entre ellos. Cimentación constituida a base de hormigón armado realizada en función de las características del terreno y de la carga del edificio: zapatas aisladas zunchadas, losas o pilotes.

El primer tipo de estructuras (fig. 1) se encuentra en construcciones antiguas; los muros llegan a tener espesores superiores a 50 cm y alturas entre forjados relativamente grandes. Suelen estar bastante deterioradas, sobre todo los forjados, por falta de mantenimiento adecuado, con vigas a veces en mal estado (apolilladas o podridas) y rellenos de tierra importantes en pisos y techos. Además, suelen tener grietas en muros y pisos provocados por hundimientos diferenciales o por sismos anteriores.

El segundo tipo de estructuras (fig. 2) es la versión moderna de la anterior; los muros suelen ser mucho más delgados, con espesor máximo de unos 28 cm, que en ocasiones cuentan con dalas y castillos de hormigón armado que confinan a la fábrica y mejoran su comportamiento. En este tipo de construcción no se alcanzan alturas importantes. Normalmente se emplea en vivienda unifamiliar o multifamiliar, con gran densidad de muros continuos en toda la altura.

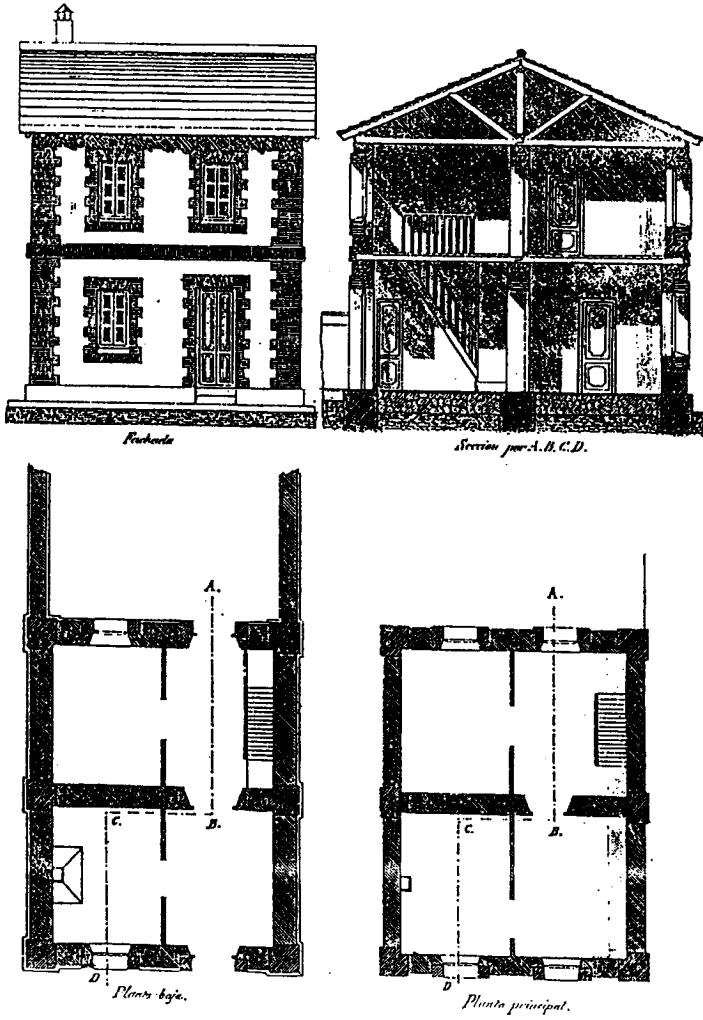


Fig. 1. Estructura tipo I

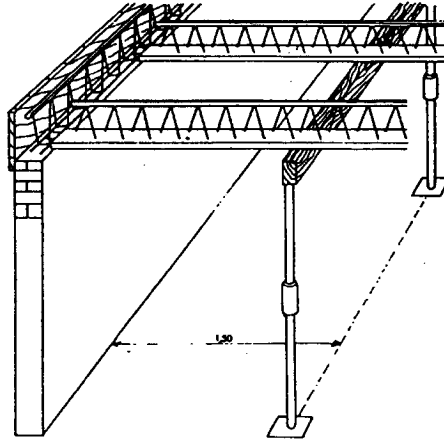


Fig. 2. Estructura tipo 2

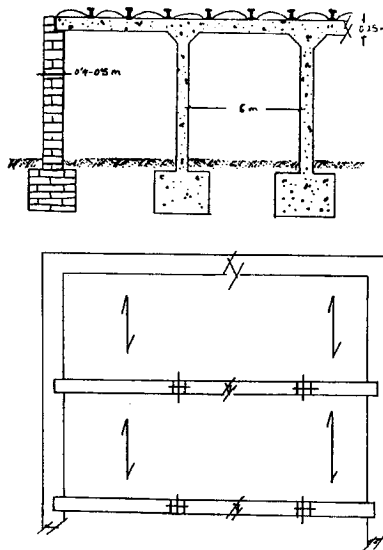


Fig. 3. Estructura de transición tipo 2-3



El tipo 2-3 (fig. 3) se emplea en viviendas u oficinas. Es muy común en el casco antiguo de Granada, aunque se conocen casos iguales en Sevilla. Los muros de carga perimetrales suelen tener un espesor de 40-50 cm y sobre ellos descansan las vigas de hormigón de los pórticos centrales del edificio (este apoyo, en ocasiones es de un par de centímetros). Las luces entre pilares suelen ser muy pequeñas, van desde 1,5 m hasta 6 m. Los forjados, constituidos por viguetas metálicas o prefabricadas de hormigón se apoyan directamente sobre los pórticos. Este tipo de construcción es muy problemática debido a la falta de apoyo y de unión entre muros, pórticos y forjados, agravado por los diferentes tipos de cimentación que utilizan y por la apertura de huecos en los muros de carga.

El tipo 3, o pórticos de hormigón armado, con vigas semidescolgadas unidas rigidamente a los pilares (fig. 4), se ha empleado para edificios de hasta 40 niveles en acero y un poco más bajos en hormigón reforzado. Las luces entre pilares y el tamaño de éstos dependen del material empleado y del uso del edificio. En edificios destinados exclusivamente a vivienda, las luces máximas requeridas suelen ser del orden de 5 a 6 m; sin embargo, cuando algunos niveles en estos edificios se destinan a estacionamiento, las luces suelen ser mayores (para que los vehículos puedan realizar maniobras). En edificios de oficinas o de comercios también suelen usarse luces de 7 a 8 m que en ocasiones pueden llegar hasta los 10 ó 12 m. Los períodos de oscilación de estas estructuras dependen del número de pisos y de las rigideces relativas de los pilares y vigas; normalmente son del orden de 0.1 a 0.15 veces el número de pisos, por lo que en edificios de 15 pisos el periodo fundamental de vibrar puede estar cercano a 2 segundos, así que hay que tener en cuenta la respuesta dinámica. En este tipo de edificios de comportamiento bastante elástico son fundamentales dos cuestiones: un diseño estructural continuo y regular y una cuidada ejecución, ya que de lo contrario, estas estructuras contendrían elementos con sobrecargas no consideradas suficientemente (sobre todo ante excitación dinámica) que los convertiría en vulnerables a las sacudidas sísmicas.

El tipo 4 de construcción, a base de pilares y losas aligeradas (fig. 5) con espesores de 25 a 45 cm, se popularizó mucho debido a la mayor facilidad de construcción (sobre todo por su mayor rapidez), aunque su costo es superior al del tipo 3, pues requiere mayor cantidad de armadura en el forjado; se ha usado en edificios hasta de unos 20 pisos de altura. Lo reducido del espesor del sistema de forjado conduce también a menor rigidez lateral, lo que hace que los edificios construidos con ese sistema se deformen más y tengan períodos más largos que los de vigas semidescolgadas para el mismo número de pisos y claros entre

pilares. Presentan también el problema de que su comportamiento en el intervalo inelástico es menos dúctil y se requiere un detalle especial de los armados para lograr un comportamiento satisfactorio. Son más vulnerables ante sacudidas sísmicas fuertes que el tipo 3, lo que se ha comprobado en México, no sólo en el sismo del 19 de septiembre de 1985, sino también en otros anteriores, como el de marzo de 1979. Su gran deformabilidad lateral propicia que se dañen fácilmente los muros divisorios no estructurales, que es difícil construir con la holgura necesaria para evitar su colaboración durante sismos intensos; también, debido a su gran elasticidad, conduce a que se golpeen fuertemente con edificios vecinos y a que el efecto  $P - \Delta^1$  sea significativo.

En los tipos 5 y 6 se reducen considerablemente los problemas de deformaciones excesivas antes mencionados, debido a la mayor rigidez que se logra por la colaboración de los muros o elementos de refuerzo (fig. 6). El análisis del sistema estructural se complica por la manera diferente en que se deforman los marcos sin reforzar y los marcos reforzados, ya que al estar conectados en cada nivel por diafragmas rígidos, tienen que deformarse igual, lo que causa problemas de acumulación de esfuerzos, que se complican por el hecho de que las deformaciones se producen en tres dimensiones y no en planos aislados como se idealiza comunmente en el diseño. En el terremoto de México de 1985 muchos edificios de apartamentos con estructura tipo 6, de 10 a 15 niveles tuvieron daños menores debido a la presencia de muros de hormigón en las zonas de elevadores y escaleras, o en las colindancias, colocados simétricamente.

En el tipo 7, al abusarse generalmente de las luces entre pilares y al frecuente cambio de uso, hay que hacer especial hincapié en el diseño. Los defectos más comunes son: falta de refuerzos en muros, falta de tirantes entre pilares, distribución de rigideces, reformas por cambios de uso, etc.

### **Clasificación de las construcciones según la escala de intensidad sísmica MSK**

La escala de intensidades usada en Europa (MSK) hace una clasificación de las construcciones englobando las tipologías anteriormente descritas en tres grandes grupos:

**Tipo A:** Con muros de mampostería en seco o con barro, de adobes o de tapial.

---

1. El efecto  $P - \Delta$  es el momento en las bases de los pilares (producto de la carga vertical por el desplazamiento lateral). Este efecto no es significativo en estructuras rígidas y muy importante en estructuras flexibles

**Tipo B:** Con muros de fábrica de ladrillo, de bloques de mortero, de mampostería con mortero, de sillarejo, de sillería y entramados de madera.

**Tipo C:** Con estructura metálica o de hormigón armado.

**Clasificación de las construcciones de acuerdo con el uso a que se destinan (según el nuevo proyecto de Norma de Construcción Sismorresistente, 1992)**

**Construcciones de importancia moderada:** Se incluyen en ese concepto, las construcciones sin probabilidad razonable de que su destrucción pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio primario u ocasionar daños económicos a terceros.

**Construcciones ordinarias:** Son aquellas cuya destrucción puede ocasionar víctimas, interrumpir un servicio necesario para la colectividad, o producir importantes pérdidas económicas, sin que en ningún caso se trate de un servicio imprescindible ni pueda dar lugar a efectos catastróficos.

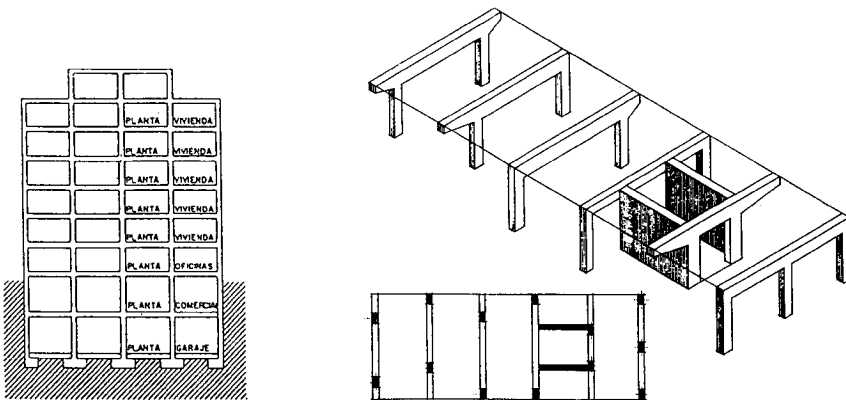


Figura 4. Estructura tipo 3. Distribución uniforme de masas en planta agrupando usos por planta

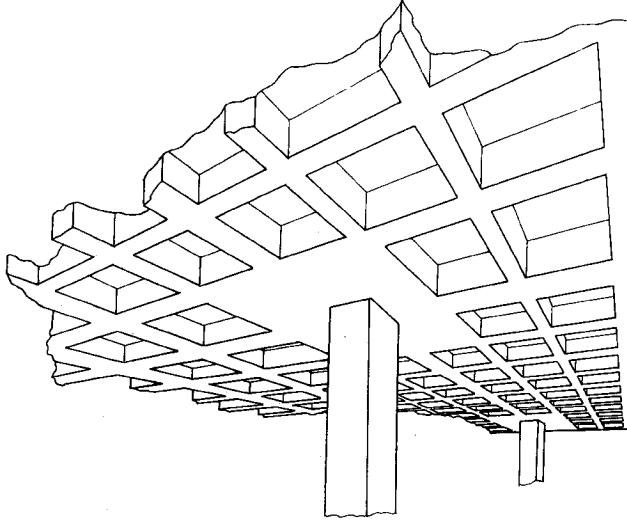


Figura 5. Estructura tipo 4.

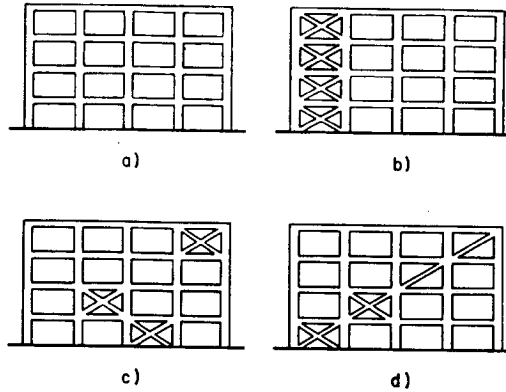


Figura 6. Estructuras tipos 5 y 6. Diferentes formas de refuerzo de marcos estructurales: a) Cuando no se diseña por sismo o cuando se diseña para temblores muy intensos. b) Para sismos moderados. c) y d) Para sismos moderados y fuertes. (Newmark y Rosenblueth, 1976)

***Construcciones de especial importancia:*** Son aquellas cuya destrucción por el terremoto, puede interrumpir un servicio imprescindible o aumentar los daños del sismo por efectos catastróficos. En este grupo se incluyen, al menos, las siguientes construcciones:

Edificios sanitarios, hospitales y clínicas.

Cuarteles de bomberos, policía y fuerzas armadas.

Construcciones que conserven patrimonio artístico o cultural de gran valor.

Depósitos de agua o gas para el abastecimiento de poblaciones; instalaciones de bombeo y arterias principales.

Centrales eléctricas y parques o centros de transformación y distribución.

Puentes y vías de acceso principales de los núcleos urbanos.

Instalaciones vitales de los aeropuertos.

Emisoras de radio y televisión, centrales telefónicas y telegráficas.

Edificaciones donde este previsto albergar los centros de organización y coordinación en caso de un terremoto destructivo.

Parque de maquinaria o almacenes que alojen instrumental o maquinaria imprescindible para la ayuda inmediata.

Grandes presas y sus instalaciones vitales.

Edificios donde existan acumuladas materias tóxicas, inflamables o explosivas.

Centrales nucleares y edificios donde se procesen materiales radioactivos.

Aquellos edificios que por su uso se clasificarían en el grupo 2º, pero cuya destrucción, a juicio de la autoridad que supervise el proyecto o intervenga en la concesión de licencia, pudiera afectar gravemente a alguno de los servicios señalados en el grupo 3º, o dar lugar a un gran número de víctimas.

## TIPOS DE DAÑOS MÁS COMUNES Y POSIBLES CAUSAS DE ELLOS.

### Daños en edificios

La intensidad macrosísmica indica el grado de daños para cada tipo de construcción en función de la intensidad del movimiento del suelo. La escala de intensidad MSK (que es la utilizada en Europa) hace la siguiente clasificación de daños:

**Daños ligeros:** Fisuras en los revestimientos, caída de pequeños trozos de revestimiento.

**Daños moderados:** Fisuras en los muros, caída de grandes trozos de revestimiento, caída de tejas, caída de pretilas, grietas en las chimeneas, e incluso derrumbamientos parciales en las mismas.

**Daños Graves:** Grietas en los muros, caída de chimeneas de fábrica o de otros elementos exteriores.

**Destrucción:** Brechas en los muros resistentes, derrumbamiento parcial, pérdida del enlace entre distintas partes de la construcción, destrucción de tabiques y muros de cerramiento.

**Colapso:** Ruina completa de la construcción.

En cuanto a planificación se refiere, es necesario tener en cuenta las pérdidas materiales en función de los diferentes grados de intensidad, lo que se refleja en las tablas I y II y el diagrama de la figura 7 (Mingo et al, 1992).

Los daños más fuertes provocados por los terremotos en las edificaciones dependen de los componentes estructurales y de los componentes no estructurales de la obra para un mismo lugar. Para lugares diferentes, aunque cercanos entre sí, puede haber daños diferentes en estructuras similares debido a los fenómenos de amplificación mencionados en temas anteriores. En realidad estos edificios se ven sometidos a sacudidas sísmicas diferentes que provienen del mismo terremoto.

Como ya se ha mencionado, las estructuras que más daños sufren son aquellas cuyos períodos de vibración se acercan a los dominantes en el movimiento del suelo ya que la acción dinámica se incrementa notablemente.

**Daños en el primer tipo de estructuras:** estas edificaciones son vulnerables por causa del deterioro, falta de amarre con la cimentación, falta de refuerzos, falta de rigidez, o por falta de diafragma horizontal. El problema más

frecuente al ser sometida a sacudidas sísmicas, es la falta de diafragmas rígidos al nivel de pisos o techos que repartan los efectos sísmicos a los muros orientados en cada dirección. Esto es especialmente grave cuando, por remodelaciones o cambio de destino, se eliminan algunos muros, para abrir vanos. En ocasiones también hay problemas por flexión perpendicular al plano de muros altos o por falta de unión adecuada entre los distintos muros. Cuando los muros de carga y la cubierta están bien trabados entre sí o reforzados con tirantes, son construcciones que aumentan su rigidez ante fuerzas laterales, con períodos de vibración cortos. El defecto clásico de muchas de las cimentaciones empleadas en este tipo de estructuras es la poca profundidad de los cimientos y la mala calidad de los materiales del cemento. Sin embargo, cuando la cubierta no está bien empotrada en los muros de carga o el empuje que ejerce sobre ellos no está contrarrestado, este tipo de construcción es sumamente vulnerable a los esfuerzos laterales, como ocurrió por ejemplo en el terremoto de Alhama del 25 de Diciembre de 1884 (fig. 8).

***Daños en el segundo tipo de estructuras:*** los sistemas de forjado de hormigón colado in situ, constituyen diafrámas horizontales suficientemente rígidos para transmitir los efectos sísmicos a los muros resistentes en cada dirección, lo que mejora notablemente el comportamiento tanto bajo fuerzas laterales debidas al sismo como bajo el efecto de hundimientos diferenciales en las zonas de terreno compresible; las alturas entre forjados son menores. En algunos casos, aunque el sistema de forjado sea prefabricado suele colocarse sobre él un firme, en ocasiones reforzado con malla de acero, que ayuda a formar el diafragma. La gran densidad de muros, continuos en toda la altura suele aportar la rigidez suficiente para movimientos en dirección horizontal y sus períodos son también relativamente cortos.

***Daños en estructuras tipo 2-3:*** Este tipo de estructura es muy vulnerable, incluso ante sacudidas pequeñas, debido a la no existencia de nudos entre los diferentes componentes de la estructura. Esto, además, se ve agravado por los diferentes modos de deformarse de cada uno de los materiales de dichos componentes y de los diferentes comportamientos de ambos tipos de cimentación.

***Daños en estructuras de hormigón:*** los fallos más comunes en sacudidas con  $\geq I$  IX son los siguientes:

a) Desmoronamiento inclinado de las vigas en la proximidad de sus extremos debido a tensión diagonal. En ocasiones aparecen dos grietas formando una cruz, como consecuencia de la inversión de esfuerzos.

**Tabla 1. Porcentajes de daño (en pérdidas) por terremoto en edificaciones en función de la intensidad**

Categoría de riesgo	Intensidad (MM)				
	VI	VII	VIII	IX	X
Viviendas y oficinas	0,40 %	1,7 %	6 %	17 %	42 %
Edificios Contenido	0,05 %	0,3 %	2 %	10 %	35 %
Comercios	0,8 %	3,5 %	11 %	27 %	60 %
Edificios	0,4 %	2,0 %	7 %	23 %	60 %
Industrias	0,1 %	0,7 %	3 %	11 %	30 %
Edificios	0,1 %	0,7 %	3 %	11 %	30 %
Contenido					
Pérdida de beneficios	0,5 %	2,5 %	20 %	50 %	80 %

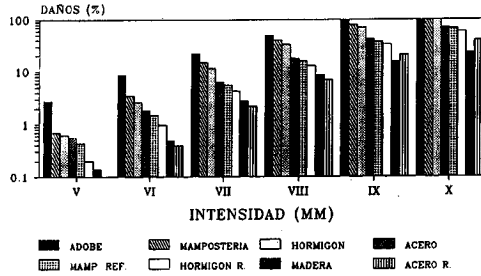
**Tabla 2. Porcentajes de daño (en pérdidas) por terremoto en edificaciones en función de la intensidad**

Categoría de riesgo	Intensidad (MM)				
	VI	VII	VIII	IX	X
Edificios	0,5 %	2,5 %	9 %	20 %	45 %
Contenido	0,2 %	1,3 %	5 %	17 %	45 %
Pérdida de beneficios	0,5 %	2,5 %	20 %	50 %	80 %

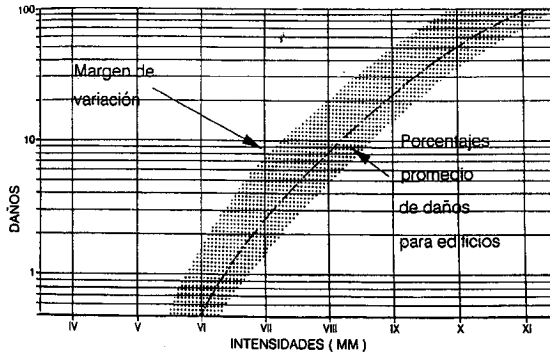
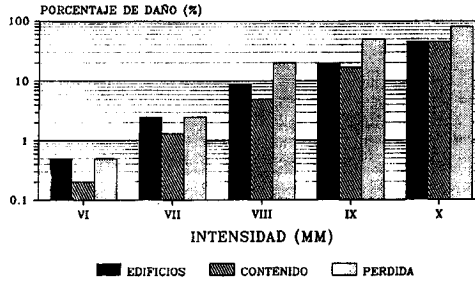


## Daños producidos por terremotos

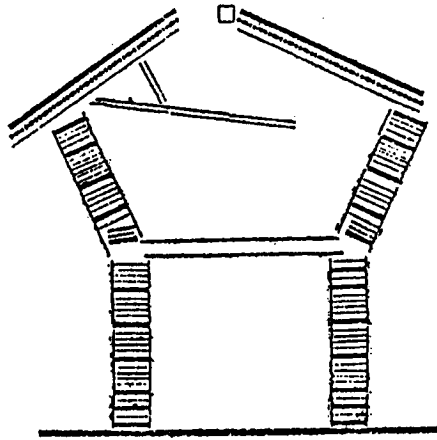
### DAÑOS PRODUCIDOS SEGUN MATERIAL



### RELACION PERDIDAS-INTENSIDAD



*Figura 7. Representación del margen de variación de porcentajes de daños por terremoto (Mingo et al, 1992).*



*Figura 8. Fallos en construcciones tipo I: terremoto de Alhama del 25 de Diciembre de 1884*

b) Desprendimiento y desmoronamiento del hormigón en la parte inferior de las vigas cerca de la unión con los pilares, como consecuencia del exceso de compresión por flexión y de pandeo del acero de refuerzo del lecho inferior de las vigas. En algunos casos se puede observar que existe el mismo tipo de daño en las partes superior e inferior de las vigas, causado por inversión de momentos flectores.

c) Deslizamiento o punzonamiento de los pilares en los capiteles de estructuras de losa plana aligerada (estructura tipo 4) provocado por tensión diagonal.

d) Agrietamiento inclinado de los pilares, provocado por tensión diagonal. En la mayoría de los casos estas grietas se orientan en dos direcciones y forman una cruz, por efecto de inversión de esfuerzos; en otros casos las grietas se orientan en una sola dirección, sobre todo en estructuras que sufren asentamientos diferenciales antes o durante el sismo.

e) Desprendimiento y desmoronamiento del hormigón de los pilares, así como pandeo del acero de refuerzo, como consecuencia de la repetida inversión de esfuerzos y las grandes deformaciones provocadas por el sismo.

f) Agrietamientos diagonales en cruz en muros de carga o de relleno provocados por tensión diagonal al haber un exceso de carga en ambos sentidos.

En el terremoto de México del 19 de Septiembre de 1985, el número de casos de fallos en pilares de los tipos d) y e) fue superior a lo que se esperaba, pues se consideraba que las especificaciones de las normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de hormigón del reglamento de 1976 conducían a estructuras con pilares fuertes y vigas o losas aligeradas débiles, logrando un comportamiento más dúctil. Fue evidente en muchos casos que no se alcanzó la ductilidad esperada; en algunos casos, por el sobrerrefuerzo de las vigas o losas, lo que evitó que se presentaran fallas tipo a) o b); en otros, por la colaboración inadecuada en el reparto de cargas de muros no estructurales que modificaron la concepción original de la estructura, lo que les produjo a esos muros fallos del tipo f). Es probable también que muchas de las fallas de pilares se hayan debido a la práctica de armarlas concentrando el refuerzo longitudinal en las esquinas, agrupándolo en paquetes y restringiendo su pandeo con estribos muy espaciados, práctica que permitían los reglamentos; el número tan elevado de ciclos de carga y descarga con altos niveles de esfuerzo puede haber deteriorado seriamente la adherencia entre los paquetes de varillas y el hormigón que los rodeaba, reduciéndose notablemente su capacidad de carga. En muchos casos, se observaron desprendimientos de hormigón a lo largo de las esquinas y tendencia a pandearse de los paquetes.

**Estructuras de acero:** En el terremoto de México(19-9-85) el número de estructuras de acero con daños resultó inferior al de estructuras de hormigón, porque usualmente el acero se emplea en edificios altos, cuyos períodos son mayores a los dominantes del terreno, por lo que no entraron en resonancia, con la excepción de un edificio de 21 niveles, cuyo periodo antes del sismo era exactamente de 2 segundos en una dirección. Hubo otros casos de estructuras de acero dañadas, de construcción relativamente antigua y cuyas conexiones eran insuficientes para garantizar un trabajo adecuado, combinadas con muros no estructurales muy rígidos.

Hubo varios casos de estructuras dañadas por sismos previos y reparadas empleando distintos criterios. En algunos se conservó el sistema estructural original a base de marcos rígidos, aumentando la sección de vigas y pilares y colocando más refuerzo, pero sin poder garantizar la continuidad en los nudos; en otros se modificó el sistema estructural original, adicionando muros de rigidez de hormigón reforzado, o bien elementos diagonales de refuerzo en varias crujeías; algunas de estas reparaciones fueron exitosas, soportando el sismo; en otras hubo daños nuevamente. Se están haciendo estudios detallados de algunos casos para conocer que sistema de reparación resulta más eficiente. Es probable que los que modifican drásticamente el sistema estructural original, adicionando

elementos de gran rigidez y cambiando sensiblemente el periodo con que oscilaba la estructura, resulten más eficientes, pues sacan a la estructura de una condición de máxima respuesta en sismos previos, por coincidencia de sus características dinámicas con las del suelo.

### **Factores que influyen en la cuantía de los daños**

Las características sísmicas de una región y el tipo de construcción base, son la causa principal de los daños producidos por los sismos pero existen otros factores que pueden agravar estos daños (fig. 9). Algunos de estos factores que influyen en la cuantía de los daños son los que a continuación se exponen.

Se pueden originar daños por fallos en la cimentación de los edificios, al perder el suelo y los pilotes de fricción capacidad de carga durante el sismo, provocando el colapso total o asentamientos o desplomes importantes. Los principales daños en la ciudad de San Francisco (terremoto del 17 de Octubre de 1989) se presentaron en la zona de suelo blando en el distrito de Marina, cuya causa principal fue la licuefacción del relleno hidráulico de limos y arenas, así como la amplificación de las ondas sísmicas.

En ocasiones los daños en pilares pueden ser provocados por golpes entre edificios vecinos, sobre todo cuando el nivel de las losas en uno y otro edificio es diferente.

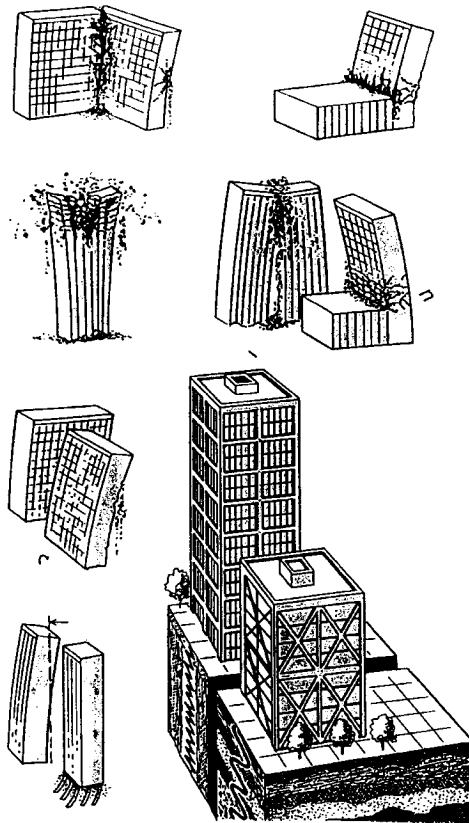


Figura 9. Efectos de los terremotos en edificios altos con diferentes formas (Bolt, 1981). (1) Edificio de dos alas en ángulo recto con diferentes movimientos que causan daño en la zona de conexión. (2) Edificio de diferentes alturas, lo que produce diferentes frecuencias de resonancia. (3) Las ondas ascienden en el edificio amplificando la sacudida en los últimos pisos. (4) Choque (pounding) entre edificios adyacentes debido a las diferentes fases del movimiento. (5) Influencia de alineamiento de estructuras en la dirección de propagación de las ondas en la oscilación del edificio. (6) Edificios flexibles en altura con diferente arquitectura: (a) el edificio permanece elástico, mientras que el suelo blando de (b) no es resistente a cizalla. (7) Par de edificios en diferentes suelos: (a) en roca dura que transmite ondas de alta frecuencia; (b) en suelo blando, el cual aumenta la resonancia de la onda y hace que se requiera un refuerzo especial de la estructura.

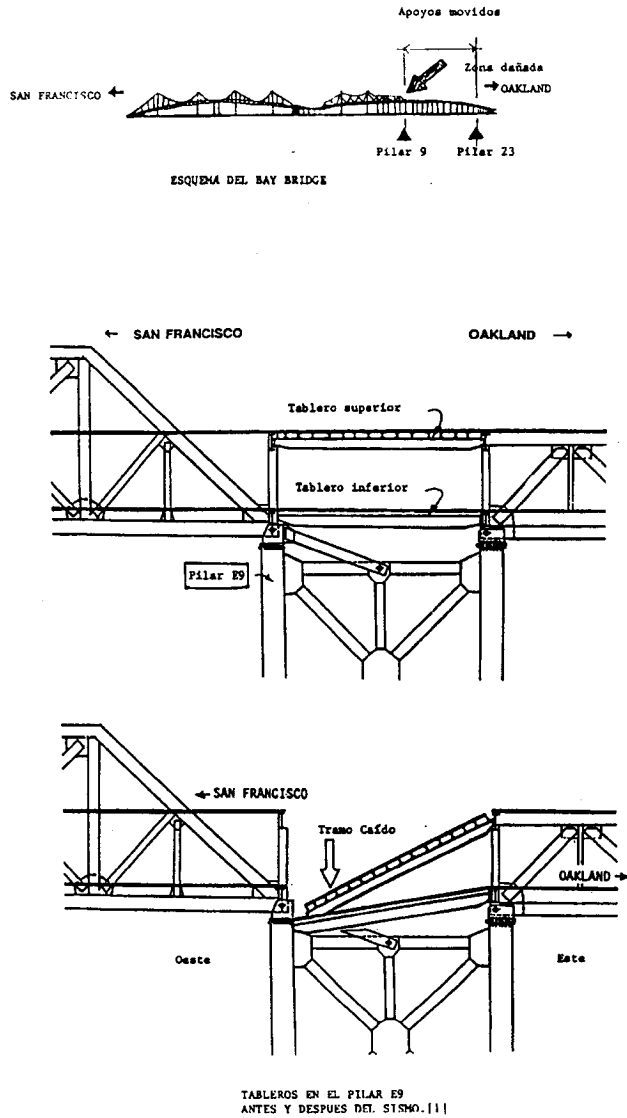


Figura 10. Esquema del posible modo de fallo del Bay Bridge

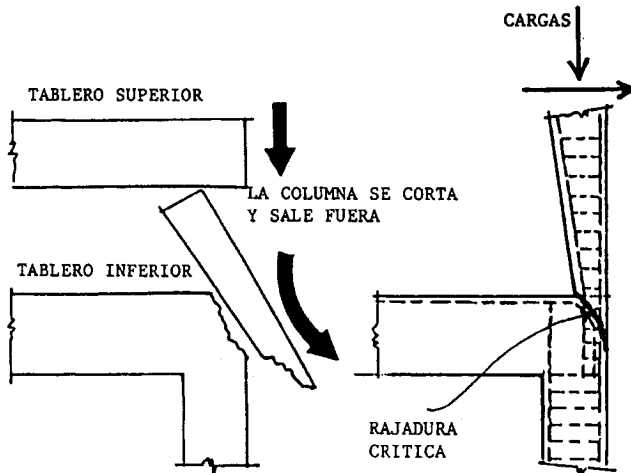
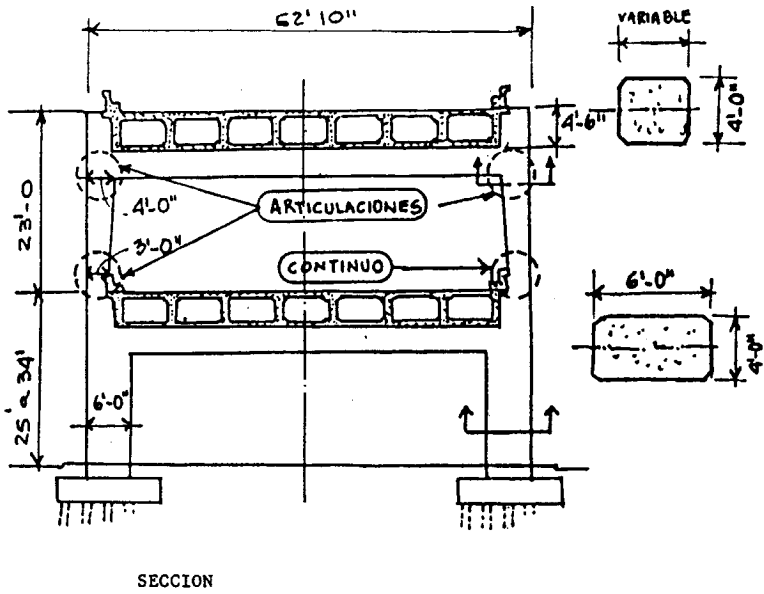


Figura 11. Esquema del posible modo de fallo del viaducto 880.

Cuando la separación entre edificios es insuficiente, las diferentes formas de deformación de los mismos, puede ocasionar un golpeteo de ambos.

También hay muchos casos de daños causados por sobrecargas excesivas, debidas a cambios de destino con respecto al proyecto original, a acumulación de cargas puntuales (archivos, sobre todo en oficinas públicas, o a acumulación de otros materiales). Esto, sumado a las deformaciones laterales excesivas de sistemas estructurales muy flexibles, del tipo 4 antes citado, puede provocar inestabilidad de conjunto y colapsos totales o parciales.

También puede haber problemas asociados a la configuración de los edificios, entendida no solo como la forma exterior de la construcción, sino también relacionada con la distribución de los elementos estructurales y no estructurales y de las cargas.

En particular, durante el terremoto de México del 19 Septiembre el número de edificios dañados ubicados en esquinas fue muy alto (el 42 %), seguramente debido a la colaboración de muros de colindancia que se habían considerado no estructurales, lo que provocó grandes excentricidades y torsiones acopladas con la translación.

La distribución irregular de elementos “no estructurales” en elevación, en edificios de apartamentos o de oficinas, con plantas inferiores libres para estacionamientos o comercios, puede provocar casos de colapso parcial (llamado normalmente “piso blando”). Asimismo las variaciones en el tamaño de las plantas en elevación, debido a escalonamientos, lo que conduce a cambios bruscos de masa y rigidez, pueden dar lugar a colapsos parciales; este problema se ha observado también en edificios que no tenían escalonamiento, pero en los que, debido a que estaban pegados a vecinos de menor altura en ambas colindancias, se propició un cambio brusco de rigidez, al recargarse el edificio alto en los bajos, en los niveles inferiores, sobresaliendo los superiores, que tuvieron serios daños. Si sólo existía edificio bajo de un solo lado, el efecto anterior fue todavía más grave, al golpearse los edificios, por oscilación en direcciones contrarias fuera de fase.

Los edificios con plantas de formas irregulares, como L, T o triangular, tienen en general mal comportamiento, provocado por las torsiones asociadas a excentricidades importantes.

Los daños en muros no estructurales, como se ha indicado anteriormente, es difícil desligarlos adecuadamente de la estructura para evitar su colaboración. En los casos en que estos muros estén uniforme y simétricamente colocados, seguramente contribuyan a evitar daños mayores a las estructuras. Sin embargo,



cuando han estado colocados desfavorablemente, como en los edificios en esquina o de plantas inferiores libres, han provocado daños mayores a los que hubieran ocurrido sin su colaboración.

## DAÑOS EN PUENTES Y VIADUCTOS

Las deformaciones que sufre el terreno como consecuencia de grandes sacudidas, pueden provocar daños en estructuras importantes causando problemas serios en el sistema vial. Además, si el gradiente topográfico es grande y la litología está constituida esencialmente por materiales sueltos, pueden producirse grandes deslizamientos (incluso en sacudidas no muy fuertes) que colapsen redes viales de vital importancia. Un ejemplo es el de la estructura ubicada en Oakland (fig.10), en una zona de suelo blando que, a causa del temblor del 17 de Octubre de 1989 en Loma Prieta, produjo el colapso de una sección de cerca de dos kilómetros, causando 41 muertos y muchos heridos. La estructura consistía en pórticos de hormigón armado de dos niveles, en donde las columnas del segundo nivel eran articuladas en la parte superior, siendo adicionalmente una de ellas articulada en la unión con el pórtico inferior. La falla se produjo por desplome del tablero superior al cortarse por falta de refuerzo la única columna continua con el pórtico inferior. Se sabía que esta estructura debía ser reforzada al igual que lo requieren otras partes que no colapsaron por estar sobre terreno más competente; actualmente, estas estructuras se encuentran en proceso de demolición, utilizándose parte de ellas para ensayos a fin de obtener mayor información complementaria al respecto.

Otros viaductos fueron dañados de manera importante encontrándose apuntalados con madera y/o perfiles de acero, debiendo decidirse sobre su reforzamiento o demolición. El diseño de estas estructuras es parecido al del viaducto anterior pero sin tener las articulaciones en la base de las columnas, mostrando igualmente escaso refuerzo de corte y/o confinamiento en las columnas. Estas estructuras se encuentran también sobre suelos que han amplificado los efectos sísmicos. En una carretera situada en el sur del área epicentral en la zona del río Struve Slough, colapsó el viaducto 880 Nimitz (fig. 11). El movimiento vertical originó que la losa del tablero fuese perforada por las columnas, con el consecuente colapso de la estructura. En esta zona se presentó también licuefacción de los depósitos del río.

## DAÑOS EN SERVICIOS VITALES

Debido al movimiento de terreno las líneas de agua y desagüe pueden verse dañadas, por lo que además de la ruptura de las tuberías en sí hay que tener en cuenta el corte del abastecimiento y los daños que pueden provocar en las zonas edificadas las inyecciones de agua en el suelo (fallos en cimentaciones, etc). Igualmente, pueden afectarse las líneas eléctricas lo que, junto a las líneas de agua y desagüe, a efectos de planificación es muy importante tener en cuenta, ya que hay que asegurar el restablecimiento del servicio lo mas rápidamente posible después de haber ocurrido un sismo. Los principales daños aparecen en las subestaciones, y en especial en los elementos con cerámica de los interruptores y de los transformadores.

Los sistemas de comunicación se pueden ver igualmente afectados; las líneas telefónicas reciben sobrecargas, dificultando las comunicaciones tanto locales como internacionales; igualmente la falta de energía eléctrica afecta a las comunicaciones al agotarse la capacidad de las baterías con las cuales están provistas algunas centrales, o por problemas operacionales de los grupos generadores.

En casos de existencia de gaseoductos el daño puede ser doblemente grave, ya que, aparte de la rotura de la tubería en sí hay que tener en cuenta las explosiones e incendios que se pueden originar. En el área de Marina (Terremoto de Loma Prieta del 17/10/89) se rompieron las tuberías de gas ocasionando incendios, los que fueron controlados en algunos casos sólo después de doce horas.

## REFERENCIAS

- BOLT, B.A.; (1981); "Terremotos". Ed. Reverté y Ed. Orbis. Barcelona. 295 pp.
- MINGO, L; PISONA,M.; BUSON, C.; (1992); "Estudio técnico asegurador de los riesgos de la naturaleza en España". Fundación Mapfre. Madrid. 148 pp.
- NEWMARK, N.M.; ROSENBLUETH, E.; (1976); "Fundamentos de ingeniería sísmica". Ed. Diana. México. 680 pp.
- NORMA DE CONSTRUCCION SISMORRESISTENTE; (1992); Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes. Instituto Geográfico nacional. Madrid. 157 pp.