

Patología en la edificación



10. PATOLOGÍA EN LA EDIFICACIÓN

Es bien conocido que desde el comienzo de la vida de un edificio se ven aparecer fisuras en alguna parte de él, incluso antes de acabar la construcción, cuya importancia la mayoría de las veces es escasa y cuyo origen es variado, casi siempre relacionado con el fraguado de morteros, hormigones, yesos y la humectación de los mismos.



Imagen 428. Grietas y humedades

Tales señales, cuya incidencia fundamental es sobre el aspecto estético de lo construido, no son en principio preocupantes para el técnico si éste comprueba que la estructura ha sido correctamente concebida y ejecutada, es decir, si el estado de equilibrio de las piezas y elementos que componen el edificio así como sus enlaces mutuos y conexión con el terreno garantizan la seguridad del conjunto.

Sin embargo, hay otros síntomas que dan a entender, incluso al profano, que el problema que muestran con su presencia puede ser trascendente, bien por su forma, por su emplazamiento, por su amplitud o por la velocidad de aparición del fenómeno.

Tantos unas como otras son muestra evidente de un proceso que conduce al deterioro del edificio. En el caso de las primeras, aún cuando no tengan una importancia inicial, su falta de tratamiento puede conducir a situaciones que son la génesis de un envejecimiento prematuro. En cuanto a las citadas en segundo lugar, ya se ha indicado que constituyen el indicio de algún problema más o menos grave y que habrá de ser estudiado para evaluar su alcance real.

10.1. CAUSAS

Las causas generadoras de una potencial intervención en edificaciones de los cuerpos pueden ser de múltiples orígenes, pudiendo agruparlos en dos grandes grupos:

10.1.1. FACTORES INTERNOS (VINCULADOS AL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA PROPIA EDIFICACIÓN)

- Fallos de proyecto.
- Fallos de ejecución.
- Materiales de mala calidad.
- Reformas en el edificio. Como construcciones posteriores a la existente, originan lesiones, a corto o largo plazo.
- Envejecimiento.
- Fallos inherentes al mal uso o mala conservación del edificio.

10.1.2. FACTORES EXTERNOS

Asociados a agentes ajenos y frecuentemente accidentales de la edificación. Se caracterizan porque en muchas ocasiones

dejan secuelas no visibles que pueden derivar en una situación de ruina total repentina. En función de su origen, distinguiremos factores antrópicos y naturales:

- **Antrópicos (generados por el hombre):**
 - Agotamiento estático del terreno.
 - Alteración volumétrica del terreno por la humedad o excavaciones subterráneas (Ej: Metro y galerías de servicio).
 - Alteración de las condiciones de contorno:
 - Demolición de edificios colindantes.
 - Excavaciones próximas a cimientos o descargas.
 - Sobrecargas diferenciales del terreno, etc.
 - Etc.
- **Naturales:**
 - Incendios estructurales.
 - Seísmos.
 - Explosiones.
 - Inundaciones y aguas subterráneas (socavones).
 - Etc.

10.2. TIPOS DE PATOLOGÍAS

10.2.1. PATOLOGÍAS POR CAUSAS CONSTRUCTIVAS

En el origen de las lesiones no debidas a causas accidentales, intervienen tres factores que siempre están presentes, bien actuando de forma aislada o en conjunto, y con los que hay que contar como punto de partida en todo proceso de evaluación de la patología de un edificio:

- a) **El agua**, ya sea de lluvia, embebida en el terreno, en fugas de canalizaciones o en corrientes subterráneas.
- b) **El terreno**, por su variable capacidad de respuesta a lo largo del tiempo y ante la influencia del agua.
- c) **Las características de los elementos constructivos** que componen el edificio: geometría, rigidez, materiales empleados, etc.

La primera de las patologías se estudiará de manera independiente, mientras que la segunda y tercera aparecen siempre tan íntimamente unidas que se analizarán de manera conjunta.

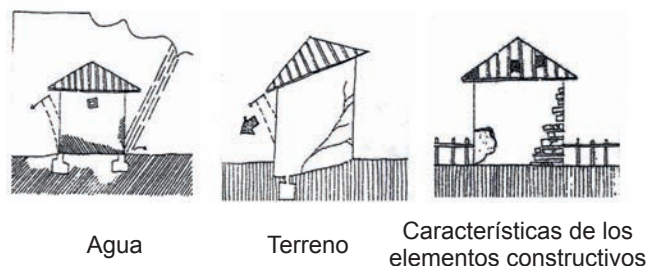


Imagen 429. Patologías por causas constructivas

a) Agua

Definición: dentro del conjunto de patologías que pueden afectar a un edificio, un apartado importante es el relacionado con las "humedades", entendidas éstas como la existencia no

deseada en los materiales o en los elementos constructivos de un contenido de agua superior al correspondiente al de equilibrio hídrico con su entorno.

Los materiales tienden a establecer de forma natural el **equilibrio hídrico** con el ambiente o los materiales que les rodea. Este equilibrio se alcanza mediante los mecanismos de intercambio (captación o cesión) de agua:

- Relacionados con el agua líquida: succión, absorción.
- Relacionados con el vapor de agua: adsorción, difusión o evaporación.

Al margen de la afección a la salubridad de la edificación, las humedades influirán claramente en la durabilidad de elementos constructivos y estructuras (corrosión, disgregación, pudrición, etc.). Por ello, independientemente de si la humedad es la causa o el resultado de una lesión, todas ellas desencadenan o favorecen el desarrollo de diversos procesos patológicos.

Tipos de humedades:

Según su origen:

- Humedades de origen natural:
 - Procedentes del terreno: capilar o freática.
 - Ambientales: filtración o condensación.
- Humedades de origen antrópico:
 - De obra.
 - Accidentales: Rotura de instalaciones.

I. Humedades de origen natural

I.1. Procedentes del terreno

- **Humedad capilar:** agua procedente del terreno donde se asienta la edificación, que al tratar de equilibrarse con el medio ambiente, asciende por la red de capilares de los muros y tabiques de sótanos y plantas bajas en contacto con el suelo. La altura, tamaño y forma de la humedad dependerá de la naturaleza del material (porcentaje de capilares) y de la presión atmosférica. Suele generarse en edificaciones de cierta antigüedad, existiendo una proporción directa entre vejez y efectos de la humedad, lo que se produce a causa de la porosidad de los materiales.
- **Humedad freática:** humedad asociada a un cambio de las características hidráulicas del terreno (ej: lluvias intensas), provocando una elevación del nivel freático, provocando serias humedades en el interior de las edificaciones que no hubiesen considerado una adecuada impermeabilización.

Las humedades capilares y freáticas, se distinguen en que mientras las segundas afectan fundamentalmente a elementos constructivos situados en el cerramiento de la edificación de plantas bajo rasante. Las humedades capilares afectan a elementos constructivos en contacto con el terreno, ya sea sobre o bajo rasante y tanto en los cerramientos exteriores, como interiores de ésta.



Capilar

Freática

Filtración

Condensación

Imagen 430. Humedades de origen natural

I.2. Ambientales

- **Humedad de filtración:** humedad resultante de la absorción del agua proveniente de fenómenos meteorológicos (lluvia o nieve), al penetrar por los paños ciegos o juntas de los cerramientos exteriores (cubiertas, fachadas, terrazas, arranques de muros, puntos de encuentros de distintos materiales, etc.). Se difunden también por capilaridad, pero en este caso descienden por gravedad por los muros, desde la parte alta del edificio.
- **Humedad de condensación:** humedades generadas por el cambio de estado de parte del vapor de agua contenido en el aire, que se encuentra o se genera sobre las superficies interiores (condensación superficial) o dentro (condensación intersticial) de los paramentos del recinto o edificio.

Para cada humedad ambiental, hay una temperatura de condensación (punto de rocío). Por ello, bien por un incremento de la humedad de vapor de agua del ambiente (y por tanto de la temperatura de rocío) o bien por un descenso de la temperatura, se producirá la condensación en los puntos más fríos, generalmente en ventanas, juntas y cámaras de aire de los cerramientos externos.

II. Humedades de origen antrópico

- **De obra:** el agua es utilizada intensamente durante la fase de obra, para la ejecución de distintos elementos constructivos. Por ello, una vez finalizado su uso, su excedente debe evaporarse hasta alcanzar la humedad de equilibrio, pudiendo suponer periodos más o menos prolongados según la naturaleza del elemento constructivo.
- **Accidentales:** Humedades producidas por el fallo o rotura de algún conducto de agua de calefacción, saneamiento o uso sanitario, embutidos en muros, tabiques, falsos techos, enterrados, etc. Si dichas

humedades puntuales no se reparan, el agua penetrará en el cerramiento y será absorbido por la fábrica (ej., de ladrillo), los que por capilaridad lo extenderán al resto de la edificación. En muchos casos, al ir enterradas estas instalaciones, impiden la observación directa de su estado de conservación, dificultando el mantenimiento y potencial reparación.



De obra

Accidentales

Imagen 431. Humedades de origen antrópico

b) Terreno y calidad de los elementos constructivos

Al margen de la influencia del agua en las patologías edificatorias, la combinación de los factores asociados al terreno y a la calidad constructiva del edificio generarán el grupo de patologías más amplio e importante en la edificación.

La base del problema se reduce, en esquema, a una variación sustancial del reparto de cargas y tensiones por alguna de las dos causas anteriores, bien a lo largo del tiempo o bien de forma más o menos precipitada.

Esta variación en la distribución de cargas produce desequilibrios en el conjunto, que si el resto de elementos constructivos no son capaces de absorber, llevan progresivamente al colapso del sistema estructural.

Según el tipo de esfuerzo tensional o movimiento provocado en la edificación, podemos distinguir las cinco **tipologías** de patologías más comunes:

- Adaptación o encaje.
- Cedimiento o hundimiento.
- Aplastamiento.
- Rotación.
- Movimiento del terreno.

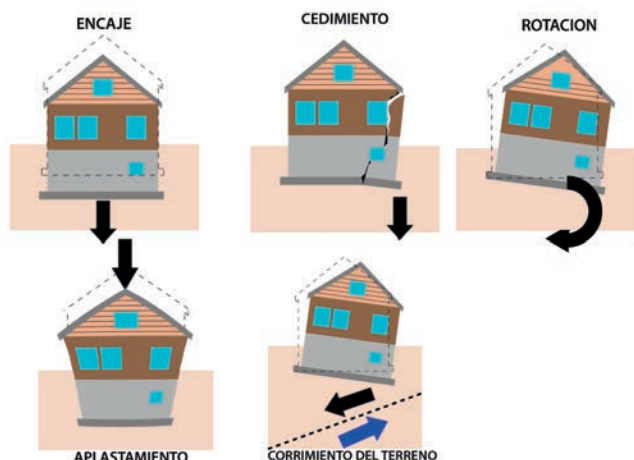


Imagen 432. Patologías comunes

I. Adaptación o encaje

Definición: las lesiones por encaje son aquellas generadas en la edificación tras el proceso de construcción inicial o de rehabilitación, motivado por alguna de las siguientes.

Causas:

- Acoplamiento de macizos o asiento relativo entre los materiales que los componen.
- Adaptación del plano de asiento tras finalización de la construcción.

Tipologías: en relación a las dos causas descritas, distinguiremos las siguientes tipologías de lesiones por adaptación:

- **Lesiones por encaje:** asentamiento relativo entre los materiales que componen un mismo elemento constructivo, los dos casos más frecuentes son:
 - Muros de carga: gruesos excesivos de mortero, en muros de fábrica.
 - Rehabilitaciones: incorrecta conexión en rehabilitaciones entre elementos antiguos y nuevos.
- **Lesiones por asiento inicial de terreno** (adaptación del plano de asiento): Adaptación de terrenos blandos tras finalización de la obra, por la sobrecarga propiciada por el nuevo edificio o incremento de estas durante su vida útil.



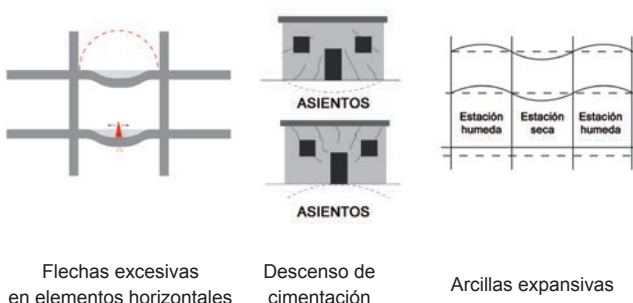
Gruesos excesivos
mortero

Ampliación muro, con incorrecta conexión

Imagen 433. Lesiones por asiento inicial del terreno

II. Cedimiento o hundimiento

Definición: las lesiones por cedimiento son aquellas generadas en la edificación tras el proceso de construcción inicial o de rehabilitación, motivado por alguna de las siguientes causas.



Flechas excesivas
en elementos horizontales

Descenso de
cimentación

Arcillas expansivas

Imagen 434. Lesiones por cedimiento o hundimiento

Causas:

- Aparición de flechas excesivas en elementos horizontales sobre los que apoya uno vertical. Los elementos a los que afecta son:
 - Vigas: Fallo por flexión, cortante o torsión.
 - Forjados: Fallo por flexión o punzonamiento
- Descenso de la cimentación por hundimiento o deformación excesiva del terreno, debido a:
 - Mala elección del terreno de cimentación.
 - Fallos de proyecto: en la elección del plano de asiento o el cálculo de la cimentación.
 - Fallos en la ejecución de la obra.
 - Cambios imprevisibles en las características del suelo, como la rotura de un colector o la excavación de vaciados cercanos.
 - Aumento de las cargas de servicio del edificio.
- Suelos expansivos / arcillas expansivas

Definición: terrenos de base arcillosa ricos en montmorillonita y vermiculita, que experimentan cambios de volumen según las variaciones de su grado de humedad, sufriendo retracciones por desecación e hinchamientos por adición de agua.

Comportamiento: un terreno expansivo en continua humedad no resulta en parte peligroso, si no que su peligrosidad se hace patente cuando le falte agua. Es decir, la expansividad y las retracciones son debidas a la absorción y evaporación de agua.

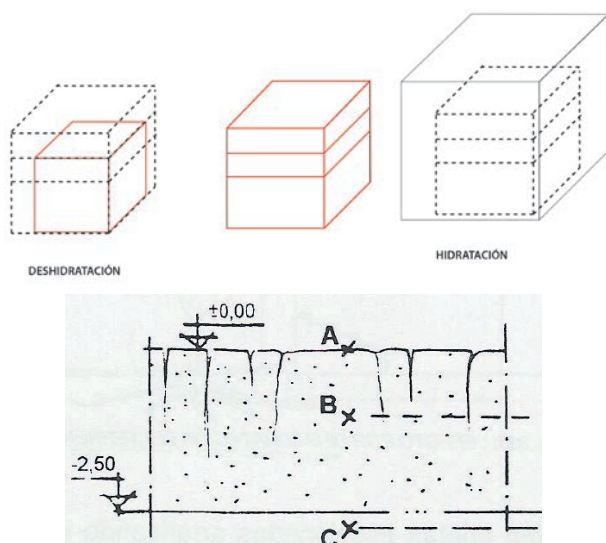


Imagen 435. Suelos expansivos/arcillas expansivas

Por ello:

- La expansividad se manifiesta con mayor intensidad en la capa más alta, ya que el terreno está sujeto a cambios bruscos de humedad.
- A medida que se desciende de estratos, la expansividad disminuye debido a la humedad constante, hasta alcanzar la profundidad a la que la humedad es constante. En España la cota normal media de los terrenos, en la que se un grado de humedad uniforme a lo largo del año es de -2,50 m.

- En virtud de lo anterior puede decirse que no existe en general dentro de nuestro país problemas con las arcillas expansivas relativas al plano de asiento, por debajo de -2,50 m.

Cuando la carga es inferior a la presión de hinchamiento y se construye en época seca, al llegar la época de lluvia se hincha y eleva la edificación, apareciendo grietas que se reducen al llegar de nuevo la época de sequía. Sin embargo, el terreno nunca llegará a alcanzar el estado inicial de sequedad por estar cubierto por la edificación.

Si el movimiento diferencial entre el centro de la edificación y el borde es importante, puede producirse la ruina de la edificación.

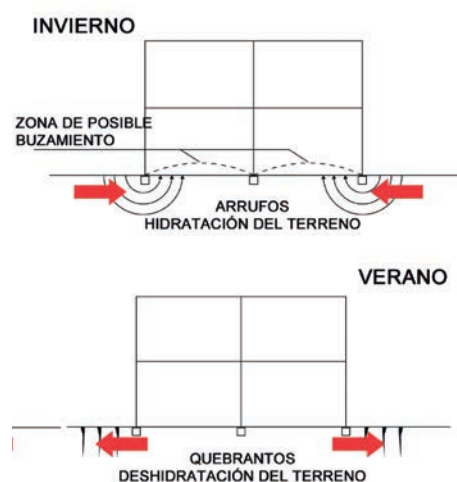


Imagen 436. Comportamiento de un suelo expansivo

III. Aplastamiento:

Definición: reducción de los materiales a partículas de mínimas dimensiones, perdiendo totalmente su cohesión y propiedades mecánicas. Las lesiones por aplastamiento son las debidas a la rotura por exceso de la compresión admisible, fundamentalmente de elementos estructurales verticales. La sobrecarga de los elementos indicados, da lugar a la reducción de los materiales a partículas de mínimas dimensiones, perdiendo totalmente su cohesión y propiedades mecánicas.

Al objeto de estudiar de pormenorizadamente las causas que provocan las lesiones por aplastamiento, es necesario distinguir en su desarrollo, tres fases diferenciadas:

- Fase 1: Disgregación de morteros.
 - Exceso de carga.
 - Morteros defectuosos.
 - Empleo de materiales de derribo en su ejecución.
 - Factores climáticos adversos.
 - Vejez.
- Fase 2: Rotura de los materiales pétreos o cerámicos.
 - Rotura simultánea o posterior a la disgregación del mortero.
 - Rotura sin anterior disgregación de los morteros.
 - Deficiencias en la estructura mural.
 - Cochura insuficiente de los materiales.

- Fase 3: Aplastamiento.

En la práctica, la tercera fase nunca se llega a producir, sino que los efectos generados son los relacionados con las fases anteriormente descritas: disgregación de los morteros y rotura de los materiales acompañada o no de aquella. Sin embargo, En el caso de que sí llegase a producirse, el fenómeno del derrumbamiento sería instantáneo y la ruina del edificio fulminante.



Imagen 437. Aplastamiento

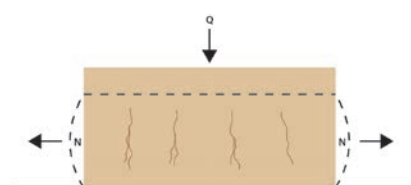


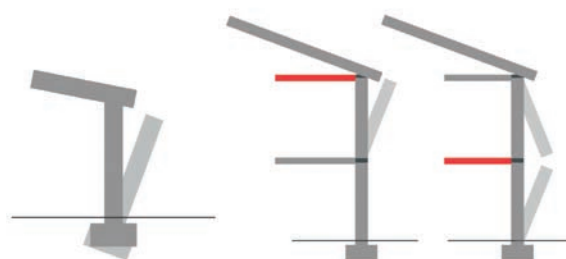
Imagen 438. Aplastamiento (esquema)

IV. Rotación

Definición: se entiende por rotación, a la desviación de los elementos constructivos respecto a su plano vertical en el que fueron construidos, medida mediante el ángulo denominado “ángulo de rotación”, denominándose interna o externa en función de la dirección del movimiento.

- Rotación interna: pierde la verticalidad hacia dentro (interior de la edificación).
- Rotación externa: pierde la verticalidad hacia fuera (exterior de la edificación)

Causas: las rotaciones tienen su origen fundamentalmente en dos causas de naturaleza diferenciada:



Rotación por cedimiento del plano asiento

Rotación por empujes laterales

Imagen 439. Lesiones por rotación

- **Deslizamiento / Cedimiento del plano de asiento:** puede darse el caso de que un muro desplome (girando) a causa de un cedimiento del plano de asiento, que lo desliga de sus entregas a muros contiguos, provocando su caída por simple gravedad. En este caso se producen también grietas en los paramentos perpendiculares

al afectado, pero con trazado opuesto a las producidas por empujes.

- **Empujes laterales:** la rotura o inexistencia del arriostamiento de elementos horizontales o inclinados en la edificación, es frecuentemente origen de empujes laterales y estos de potenciales rotaciones. Dichos empujes serán debidos a:

- Cerchas, cuchillos y armaduras, sometidas a fuertes esfuerzos oblicuos (viento en cubierta).
- Arcos o bóvedas cuando no están atirantados.
- Dilatación de elementos estructurales.
- Acciones laterales producidas por terraplenes, desplazamientos del terreno, aguas subterráneas, arcillas expansivas, excavaciones próximas, etc.

V. Movimiento del terreno

Definimos empujes del terreno a las solicitaciones generadas por los distintos estratos del terreno debidas a dos causas básicas:

- Movimiento de ladera.
- Fenómenos de subsidencia y colapsos.



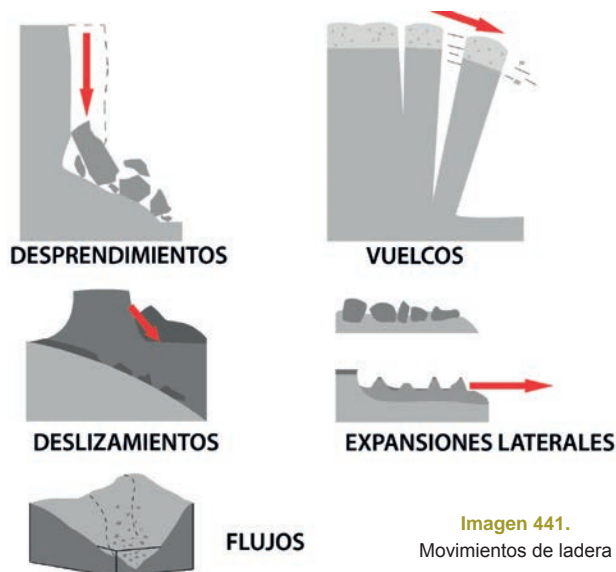
Imagen 440. Lesiones por movimientos del terreno

- **Movimientos de ladera:**

Desplazamiento de un estrato superior del terreno en estado seco, sobre otro en estado fluido, generándose una superficie de rotura entre ambos.

Tipologías:

- **Desprendimientos:** despegue de una masa de roca de una pared con alto grado de inclinación. Ángulo $>76^\circ$.
- **Vuelcos:** rotación hacia delante y hacia el exterior de suelo o roca con eje bajo su centro de gravedad. Ángulo $45-76^\circ$.
- **Deslizamientos y rodaduras:** desplazamiento de masa o suelo de roca sobre una o más superficie de rotura. Es característica de terrenos con inclinación $A < 45^\circ$
- **Expansiones laterales:** extensiones laterales del material que conforma el suelo o roca.
- **Flujos:** se asimila a un fluido viscoso, no conservando la masa movida su forma en el movimiento descendente. A medida que el material incorpora agua, pierde cohesión y discurre por una pendiente con mayor inclinación. Existen varias tipologías (golpes de arena y limo, avalanchas, etc.).



- **Subsidencias y colapsos:** hundimientos del terreno tanto de origen natural como inducidos por la actividad humana, distinguiendo las siguientes tipologías
 - Subsistencia: hundimiento lento y progresivo del terreno, generalmente asociada a una variación lenta del contenido de agua de los estratos blandos superficiales.

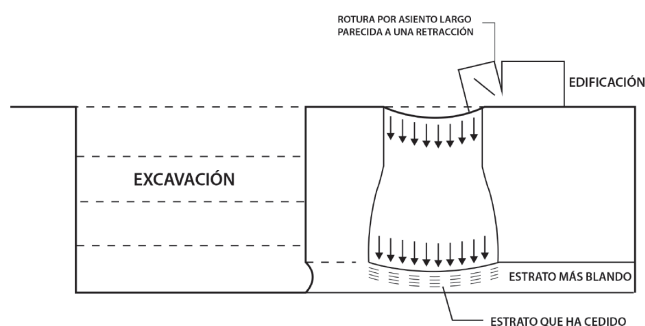


Imagen 442. Subsistencia en un terreno

- Colapso: hundimiento brusco y rápido del terreno por desaparición compactación repentina de un estrato inferior.



Imagen 443. Colapso

10.2.2. PATOLOGÍAS POR CAUSAS ACCIDENTALES - INCENDIO

Los daños y lesiones en las edificaciones debidas a los incendios estarán condicionados en gran media por los elementos y materiales constructivos empleados, en función de las propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego de estos, así como por el comportamiento al fuego de los elementos estructurales, que estará condicionado por:

1. Según modelo estático/esquemas estructurales:
 - Estructuras isostáticas / predeterminadas
 - Estructuras hiperestáticas / indeterminadas
2. Según materiales:
 - Acero
 - Hormigón
 - Fábrica
 - Madera
3. Según tipología constructiva

Los daños estarán condicionados también por el efecto que sobre la propagación del incendio provocará la utilización de elementos de protección contra el fuego:

- Sistemas de protección estructural (recubrimiento con paneles ignífugos, pinturas intumescentes, protección sólida, morteros, etc.)
- Sistemas complementarios (estructuras externas, recubrimientos con albañilerías, pantallas, relleno de perfiles tubulares huecos, etc.)
- Sistemas de protección contra la propagación de incendios en instalaciones (cortafuegos lineales en bandejas de cables, almohadillas intumescentes, sistemas de placas, collarines intumescentes, protección de conductos de ventilación, etc.)

10.2.3. PATOLOGÍAS POR CAUSAS ACCIDENTALES – SISMO

La corteza terrestre es un puzzle compuesto por siete placas tectónicas renovadas de forma continua en las dorsales oceánicas y fundiéndose en las zonas de subducción.

Las placas se suelen mover entre 2 y 20 cm al año, presentando en la zona en contacto entre ellas una limitación del movimiento o lo que es lo mismo:

- Acumulación de tensión y liberación de la energía mediante un gran terremoto, acompañada de un desplazamiento brusco (placas con movimiento divergente o deslizante).
- Afloramiento del material magmático (placas con movimiento convergente).

Definición: un **terremoto** (del latín: *terra* 'tierra' y *motus* 'movimiento'), también llamado **seísmo** o **sismo** (del griego σεισμός: 'temblor' o 'temblor de tierra'), es un fenómeno de sacudida brusco y pasajero de la corteza terrestre producido por la liberación de energía acumulada en forma de ondas sísmicas.

El punto de origen de un terremoto en el interior de la Tierra, se denomina **hipocentro**. Mientras que el **epicentro** es el punto de la superficie terrestre directamente sobre el hipocentro.

a) Causas

- Los terremotos más comunes se producen por la ruptura de fallas geológicas.
- Otras causas secundarias: fricción en el borde de placas tectónicas, procesos volcánicos o incluso ser producidos por el ser humano al realizar pruebas de detonaciones nucleares subterráneas.

Dependiendo de su intensidad y origen, un terremoto puede causar desplazamientos de la corteza terrestre, corrimientos de tierras, tsunamis o actividad volcánica. Para la medición de la energía liberada por un terremoto se emplean diversas escalas entre las que la Richter es la más conocida y utilizada en los medios de comunicación.

En el caso particular de que el foco del sismo se localice bajo el mar, se producirá un tsunami o maremoto, que se caracterizará por:

- Gran movimiento vertical rápido.
- Desplazamiento de gran masa de agua.
- Olas de grandes dimensiones.

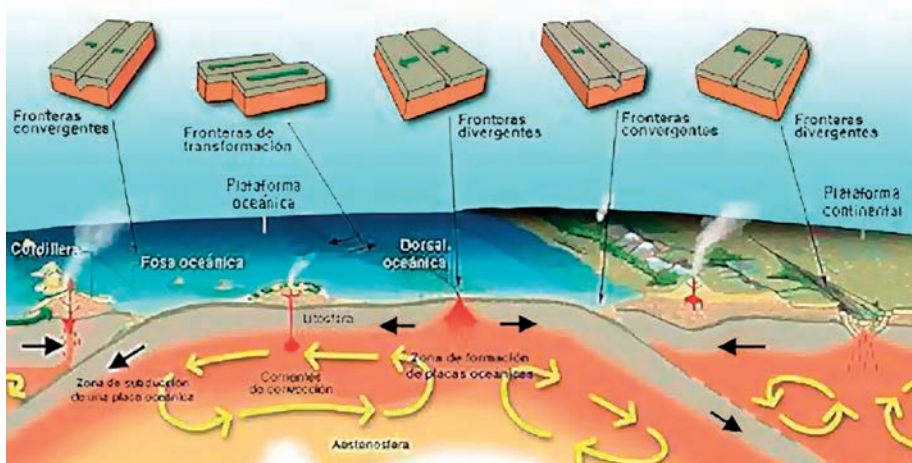


Imagen 461. Corteza terrestre. Sismos

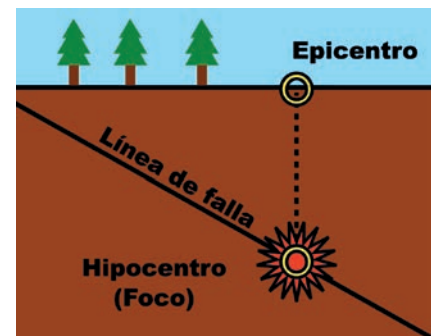


Imagen 463. Esquema terremoto

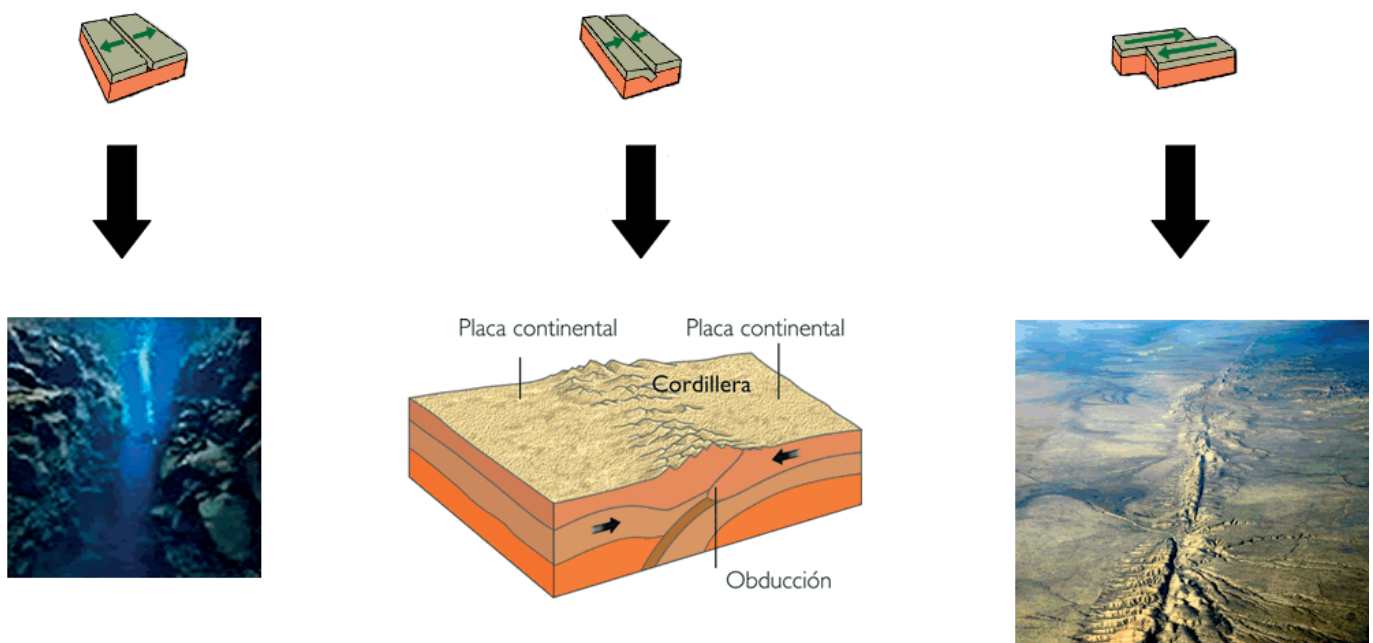


Imagen 462. Corteza terrestre. Movimientos

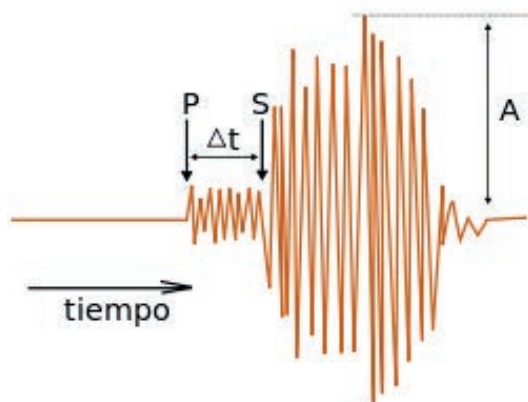
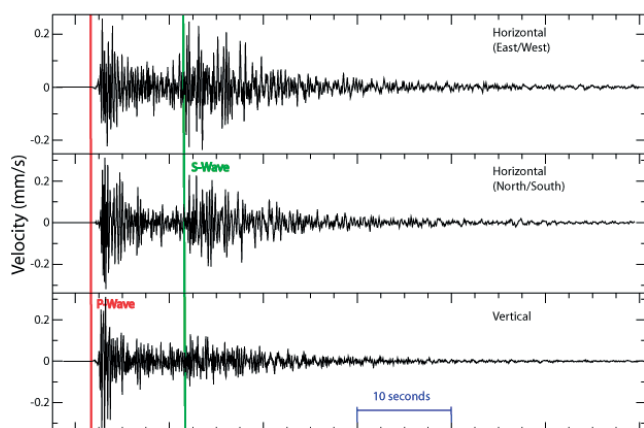


Imagen 464. Gráfico terremoto

b) Transmisión

La transmisión de la energía del sismo tiene lugar a través de ondas (**ondas sísmicas**, ondas elásticas similares a las del sonido) propagadas tanto en el interior de la Tierra como en su superficie. Se distinguen las siguientes modalidades de ondas:

I. Ondas interiores

- **Longitudinales o Primarias (P)**: ondas propagadas en el mismo sentido que la vibración de las partículas, mediante compresiones y refracciones de las rocas, a velocidades de 8 a 12 km/s. Circulan por el interior de la Tierra, donde atraviesan líquidos y sólidos. Son las primeras que registran los aparatos de medición o sismógrafos. De ahí su nombre 'P'.
- **Transversales o Secundarias (S)**: ondas propagadas perpendicularmente al sentido de vibración de las partículas, mediante cizalladura, a velocidades entre 4 y 8 km/s. Atraviesan únicamente sólidos y en los sismógrafos se registran en segundo lugar.

II. Ondas superficiales

Ondas resultantes de la interacción de las P y las S, con velocidad menor que dichos modelos (entre 2,7 y 3 km/s), pero con mayor amplitud y duración, por lo que presentan un carácter mucho más destructivo que éstas.

Distinguimos dos modelos de ondas superficiales:

- Ondas Rayleigh: trayectoria elíptica retrógrada.
- Ondas Love: similares a las ondas S, pero en la superficie terrestre (perpendiculares a la dirección de propagación de la superficie).

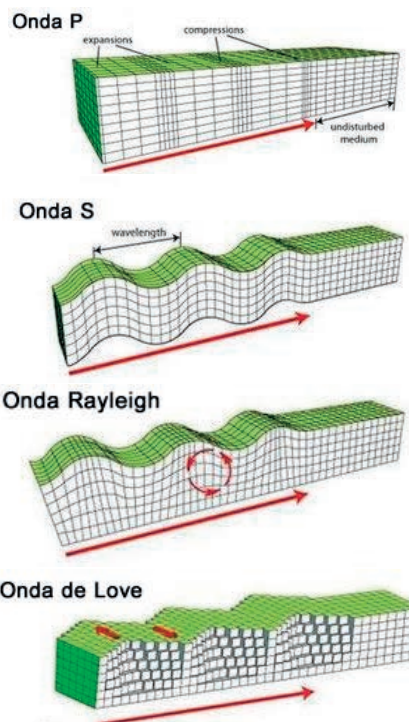


Imagen 465. Ondas superficiales

c) Factores de influencia

Los **factores** que influirán sobre la dinámica y efectos de un sismo son:

I. Factores primarios

- Magnitud:
 - Para su medición, se utilizan los sismógrafos, aparatos cuyo funcionamiento se basa en el principio físico de la inercia.
 - Las escalas más valoradas para su cuantificación serán la Escala Richter (escala de magnitudes) y la MSK (escala de intensidades).
- Profundidad del hipocentro.
- Tipos de suelo: modifica las características de las sacudidas; los factores que condicionan el movimiento del terreno son:
 - Dureza
 - Grosor
 - Agua
- Tipología constructiva de las edificaciones: muchas no resisten ante los movimientos laterales.

II. Factores secundarios

- Cimentaciones: adecuación del modelo de cimentación a la tipología y pendiente del terreno.
- Separación entre edificios: su carencia genera el fenómeno aplauso.
- Fuego: rotura de las conducciones de gas y cortocircuitos eléctricos.

d) Escalas de medición

I. Richter

- Evalúa la energía liberada en cada terremoto, de acuerdo a registros sismográficos.
- Se expresa en números decimales.
- Crece de forma exponencial: cada punto de incremento puede significar un aumento de energía diez veces mayor o más. Una magnitud 4 no es el doble de 2, sino 100 veces mayor.
- Es efectiva para terremotos hasta 400 km de profundidad.
- Para la cuantificación de la energía liberada, se han de conjugar los registros obtenidos por los sismógrafos ubicados en distintos puntos (distintas amplitudes de onda); este proceso puede llevar varios días.

II. MSK

- Escala de intensidad macrosísmica usada para evaluar la fuerza de los movimientos de la Tierra, basándose en los efectos destructivos en las construcciones humanas, el cambio de aspecto del terreno, así como en el grado de afectación entre la población.
- Se expresa en números romanos (I-XII), para evitar el uso de decimales.
- Es proporcional: el grado IV presenta el doble de intensidad que el grado II.
- Supuso la base para la Escala Macrosísmica Europea (EMS).

e) Mecanismos de propagación

El sismo impone movimientos y aceleraciones de dos órdenes y resultados claramente diferenciados:

I. Movimientos verticales

- No son muy problemáticos.
- Edificio concebido para soportar cargas verticales, constituyendo la acción del sismo una sobrecarga adicional.
- Edificio muy rígido en desplazamiento vertical (no resonancia vertical).

II. Movimientos horizontales

- Son graves o muy graves.
- Elementos diseñados para soportar esfuerzos eminentemente verticales se ven sometidos a esfuerzos oblicuos (peso vertical + oscilación horizontal), por lo que el edificio tiende a deformarse lateralmente.

- La estructura tiende a recuperar su forma, consecuencia de la elasticidad de los materiales. Las construcciones oscilan alrededor de su posición de equilibrio.

En teoría, una estructura totalmente rígida se movería de forma sincronizada con el sismo. En realidad, la estructura oscila, deformándose a partir de su posición inicial:

- Si sobrepasa el límite elástico del material, bien entra en régimen plástico (deformación sin recuperación) bien en respuesta frágil (rotura).
- Los materiales de construcción más seguros (sismológicamente), son los más elásticos, como la madera.

f) Efectos del sismo

I. Sobre el terreno

Los mayores efectos del sismo se manifestarán en terrenos:

- Poco firmes.
- Saturados con agua.
- Blandos.
- Con zonas deslizantes.
- **Desplazamiento de las tierras:** se produce cuando un estrato de tierras se desliza sobre uno inferior, facilitado por factores como la saturación de agua y la pendiente.



Imagen 466. Desplazamiento de tierras

- **Licuefacción del terreno:** fenómeno por el cual el terreno se comporta y fluye como un líquido pesado:
 - 1) Las vibraciones sísmicas causan la salida de agua y fango a la superficie.
 - 2) Se produce una compactación de los granos de arena, con disminución de su volumen.
 - 3) Se generan asentamientos o deslizamientos, con pérdida de la resistencia de los estratos.



Imagen 467. Licuación del terreno

Tabla 26. Escala MSK

Magnitud*	Número de terremotos	Probable Max. MSK	Radio afectado (Km)	Área afectada (Km ²)	Efectos del terremoto
3-6	50.000	IV – VII	100	38.000	A menudo se siente. Daños leves o ligeros en edificios.
6-7	100	VII – VIII	200	125.000	Daños severos en áreas pobladas.
7-7,7	15	IX – X	400	500.000	Terremoto mayor. Graves daños.
>7,7	2	XI - XII	800	2.000.000	Gran terremoto. Destrucción total a comunidades cercanas.

* Los terremotos según escala Richter menor de 3,5 generalmente no se sienten.

Dicho proceso es característico en terrenos blandos y saturados de agua, rellenos o suelos granulares flojos, con capacidad para disminuir su volumen y con el resultado último del comportamiento del terreno como un material líquido.

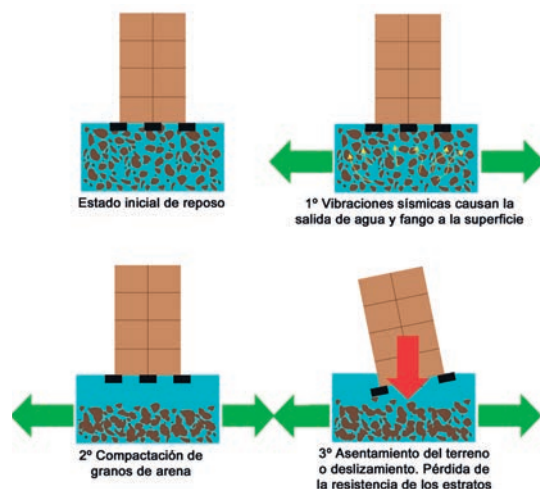


Imagen 468. Asentamientos o desplazamientos

Para una mejor comprensión del proceso, lo analizaremos a una doble escala:

- **Análisis a nivel microscópico:** el proceso de la licuefacción del terreno se asocia a suelos saturados, en los que el agua ejerce una presión sobre las partículas del suelo. Previamente al terremoto, dicha presión es relativamente baja; sin embargo, la sacudida sísmica puede llegar a incrementarla hasta el punto de propiciar su distanciamiento y el desplazamiento libre entre unas y otras (el terreno se transforma en un suelo no cohesivo = arenas). Al moverse libremente las partículas, los materiales más densos se decantan al fondo (granos), mientras que los más ligeros (lodos y agua) se elevan hacia la parte superior.
- **Análisis a nivel macroscópico:** un edificio en estado inicial de reposo, en el caso de padecer un sismo, sufrirá tres procesos consecutivos:
 - 1) Las vibraciones sísmicas causan la salida de agua y fango a la superficie.
 - 2) Se produce una compactación de los granos de arena, con disminución de su volumen.
 - 3) Se generan asentamientos, deslizamientos o vuelcos, con pérdida de la resistencia de los estratos.

II. Sobre las edificaciones

De manera análoga al análisis anteriormente realizado para los elementos estructurales, para el estudio de los efectos del sismo en las edificaciones, atenderemos a los factores que las caracterizan:

- a) Geometría del conjunto de la estructura.
- b) Rigidez del elemento constructivo/edificio.
- c) Materiales de construcción: acero, hormigón, fábrica, madera, composición de varios materiales, etc.



Imagen 469. Efectos de sismo sobre edificaciones

II.1. Geometría

A la hora de caracterizar el comportamiento de la geometría de una edificación frente a un sismo, resultará fundamental atender a los conceptos de:

- **Centro de masas:** distribución de las masas de la edificación, con especial atención a las discontinuidades de rigidez y resistencia en la estructura principal.
- **Simetría y regularidad:** en edificaciones no simétricas o en simétricas con gran variación de masas entre sus direcciones principales, el centro de masas y el de torsión no coincidirán, generando una deformación diferencial entre las distintas partes del conjunto. Para evitar dicho fenómeno, en el diseño deberá prestarse especial atención a las cajas de escalera.
- **Retranqueos:** la simetría y regularidad en planta deberá hacerse extensiva a toda su altura, debiendo evitarse los retranqueos de fachada.

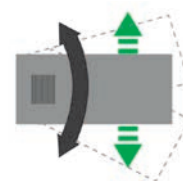


Imagen 470. Centro de masas



Imagen 471. Simetría y regularidad

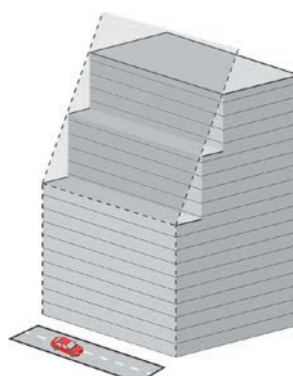


Imagen 472. Retranqueos

II.2. Rigidez

De manera análoga a la distribución de masas, las variaciones de rigidez darán lugar a puntos de potencial fallo, identificándose los siguientes fenómenos estandarizados:

- **Efecto pilar corto:** se produce en una estructura cuando un elemento superficial (muro), coarta la posibilidad de deformación del pilar en parte de su longitud. Esta coacción genera la concentración de tensiones adicionales en parte de su longitud, no previstas en el cálculo.

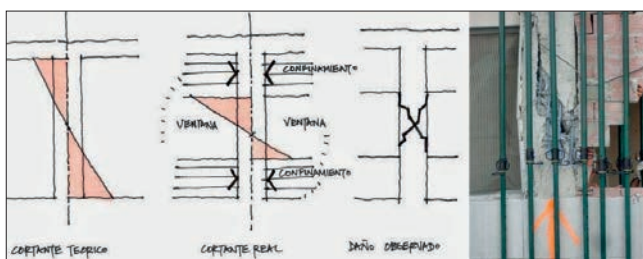


Imagen 473. Rigidez

Existen dos casos típicos:

- Plantas bajas con ventanas corridas.
- Semisótanos con pilares que están parcialmente embutidos en los muros de sótano salvo en su parte superior (con ventanas para iluminar y ventilar).

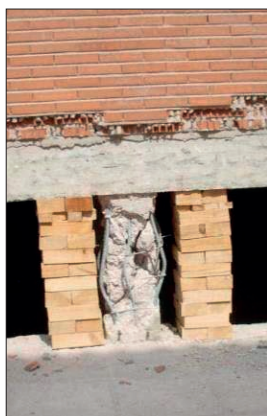


Imagen 474. Rigidez planta baja

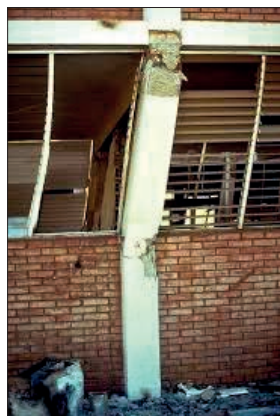


Imagen 475. Rigidez semisótanos con pilares

- **Efecto piso blando:** generado en edificios con distribución de particiones interiores similares en todas sus plantas, excepto en una de ellas que es diáfana.

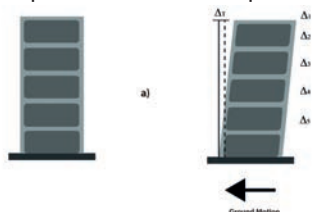


Imagen 476. Edificación plantas uniformes

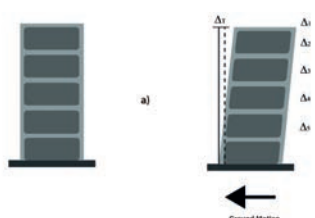


Imagen 477. Edificación planta baja diáfana

Las particiones interiores pueden llegar a entrar en carga durante el terremoto, colaborando en su estructura para resistir sus efectos sin haber sido calculado para ello; absorbiendo más o menos fuerza en función de su rigidez. El caso más sensible para el conjunto de la edificación es cuando la planta diáfana es la planta baja.

Los pilares de planta baja pasan de estar empotrados en su base y su coronación, a funcionar como doblemente articulados. El presente efecto se puede solucionar de forma directa con cruces de San Andrés.

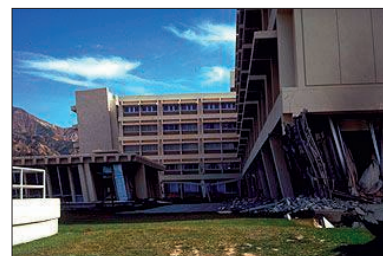


Imagen 478. Ejemplos de pilares en planta baja

- **Fenómeno aplauso:** Se produce en edificaciones adosadas de diferentes alturas. En caso de generarse un sismo, el edificio de menor tamaño tendrá el desplazamiento impedido, por lo que generará fuertes cortantes y cizallamiento de pilares en el edificio alto, llegando en caso extremo a producir el fallo de la estructura en pisos intermedios (en la zona de contacto entre ambas edificaciones).

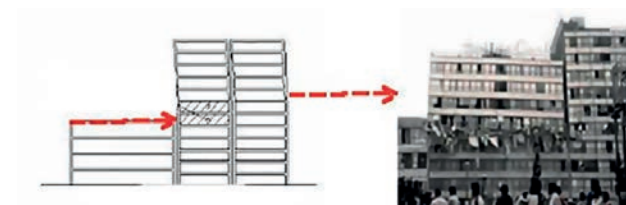
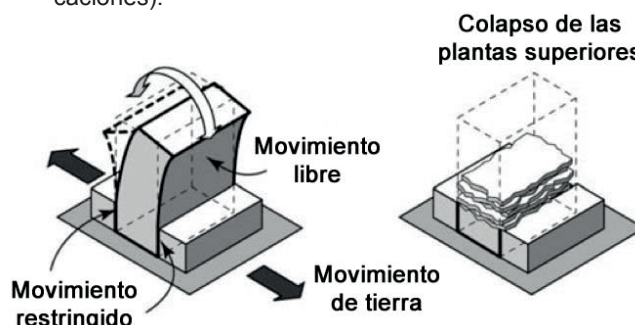


Imagen 479. Fenómeno aplauso

- **Resonancia o sincronismo:** los efectos del sismo pueden incrementarse debido a la resonancia. Un movimiento sísmico de baja intensidad y larga duración (más expuesto a entrar en resonancia) es en ocasiones más peligroso que otro de intensidad alta y corta duración:

- El edificio tenderá a oscilar según sus propias frecuencias: si coinciden frecuencia de edificio – movimiento sísmico, se produce el incremento de la aceleración en cada periodo, bien dando lugar a la destrucción total o parcial del edificio, bien disipando la energía mediante el rozamiento interno de los materiales.
- La resonancia es directamente proporcional a la altura de las edificaciones: A mayor altura, los efectos serán mayores.
- Las características vibratorias pueden cambiar al partir elementos del edificio: pérdida de rigidez y de frecuencia de resonancia.

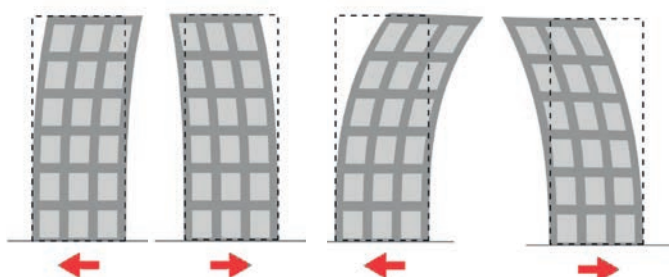


Imagen 480. Proceso de resonancia

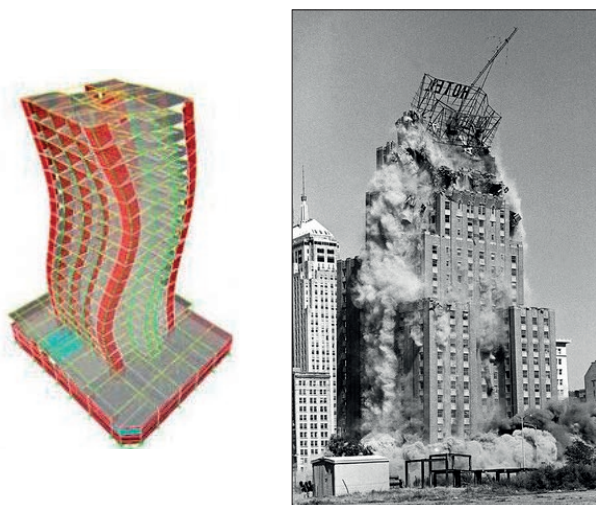


Imagen 481. Edificio en resonancia

- **Otros factores:** en caso de generarse un sismo, los anteriores parámetros sobre la rigidez de una edificación podrán verse afectados por los siguientes factores:
 - **Dirección de la sacudida:** comportamientos diferenciados en función de la dirección del esfuerzo sufrido por el sismo, identificándose una dirección fuerte (el plano del elemento constructivo es paralelo a la dirección del sismo) y una dirección débil, perpendicular a la dirección de la sacudida.
 - **Espesor:** directamente proporcional a la resistencia en la dirección débil. A mayor sección, mayor

resistencia en dicha dirección. De dicha afirmación se deduce que a igualdad de altura, menor resistencia cuanto menor sección.

- **Esfuerzos:** Esencialmente aparecerán esfuerzos de cortante (dirección fuerte) y de flexión (dirección débil).

II.3. Materiales de construcción

II.3.1. Adobe

Material muy pesado y con poca trabazón entre muros, cuyas juntas de mortero entre piezas de barro sin cocer (unos 2 cm), generan una unión muy frágil frente al sismo.

II.3.2. Tapial

Relleno de un encofrado con capas de tierra de 10-15 cm de espesor y compactación posterior. La ventaja respecto al adobe es que el tapial es construcción monolítica (mayor estabilidad). Las sacudidas horizontales perpendiculares al muro provocan su colapso. Sólo muros de gran espesor resisten cargas laterales sin elementos de estabilización adicionales. Las esquinas son muy vulnerables a los esfuerzos del sismo. Las esquinas achaflanadas son más convenientes.

II.3.3. Estructuras de fábrica

Si bien pudiese sospecharse un problema en la trabazón entre las piezas de fábrica y el mortero similar al adobe, el problema real se deberá a una mera cuestión geométrica (elementos constructivos de carácter plano, con dos dimensiones principales frente a un espesor despreciable), provocando una gran sensibilidad a los esfuerzos de cortante y de flexión.

Una buena solución constructiva para responder simultáneamente a ambos esfuerzos son las fábricas cofinadas (Ej: Fachadas en estructuras entramadas).

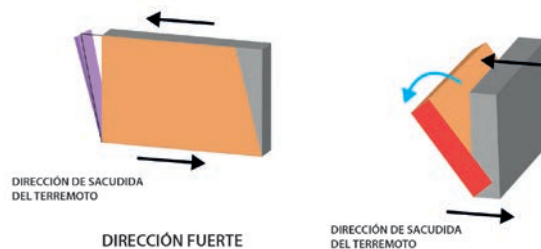


Imagen 482. Fábrica cofinada

Un caso particular de las estructuras de fábrica son los arcos y bóvedas (en cada caso habrá que diferenciar). Al ser una estructura lineal la primera y central la segunda, independientemente de la dirección de los esfuerzos generados por el sismo, las cúpulas tendrán un mejor comportamiento ante este, que las bóvedas.

II.3.4. Hormigón armado

Al constituir el hormigón un material con buena resistencia a compresión y despreciable a tracción, será un material con nula resistencia a las vibraciones de las ondas S, motivo por el que, en zonas de especial afección sísmica, sólo se utilizará hormigón armado en elementos estructurales dotados de una mayor cuantía de acero que la dispuesta en situaciones ordinarias.

Dado que el hormigón armado es un material compuesto, su comportamiento frente al sismo dependerá por tanto de los siguientes factores:

- Dosificaciones del hormigón.
- Cuantía de acero y disposición del mismo.
- Tipología del elemento constructivo ejecutado a base de HA.

Atendiendo al último parámetro, distinguiremos:

• Forjados HA:

Aspectos positivos:

- Los forjados de hormigón *in situ* conforman diafragmas rígidos que transmiten efectos sísmicos a muros resistentes en cada dirección (mejor comportamiento bajo fuerzas laterales sísmicas y en hundimientos diferenciales en zonas de terreno compresibles).
- Forjado prefabricado (viguetas), con capa reforzada con capa de compresión de acero (colabora en la formación del diafragma).
- Gran densidad de muros, continuos en toda la altura, suele aportar la rigidez suficiente para movimientos en dirección horizontal.

Aspectos negativos:

- Desmoronamiento inclinado de las vigas próximas a los extremos, debido a la tensión diagonal.

• Pilares HA:

Los situados en planta baja son los más afectados en un sismo (primero los de esquina, seguidos de los de fachada), ya que soportan todo el peso de la edificación y evitan su desplazamiento.

La parte más afectada de los pilares es la superior debido a la presencia de hormigón con menor resistencia: en esta área, durante el vibrado, se acumula árido fino y agua de amasado. El efecto se hace más patente cuanto más alto es el pilar.

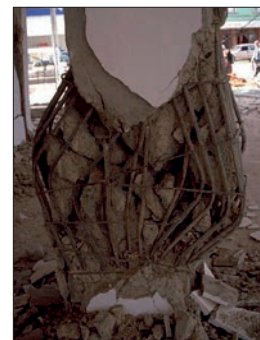
La repetida inversión de los esfuerzos del sismo generará el desprendimiento del hormigón y, acto seguido, el pandeo de las barras de armado, con el resultado último de colapso y desmoronamiento del elemento constructivo.



Forjado (diafragma rígido)



Fallo cabeza
(aplastamiento)



Fallo armaduras
(pandeo)

Imagen 484. Fallos en pilares



Lorca 2011



San Francisco 1906

Imagen 483. Ejemplos de estructuras de fábrica de arcos y bóvedas

II.3.5. Acero

Al ser el acero un material mucho más elástico que el hormigón armado, presentará mayor deformación potencial en los sismos, motivo por el cual el principal parámetro que condicionará su comportamiento será su rigidez y las uniones utilizadas para su consecución:

- **Estructuras soldadas:**

- Estructuras rígidas: resistente a momentos. El fallo suele materializarse en fractura en la unión rígida de columna y viga.
- Estructuras entramadas:
 - Pórticos arriostrados (triangulación incompleta): fallo en la soldadura de riostras a vigas/columnas.
 - Pórticos en celosía (triangulación completa): fallo por pandeo de los elementos diagonales.

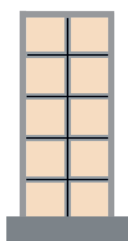


Imagen 485.
Estructuras
rígidas

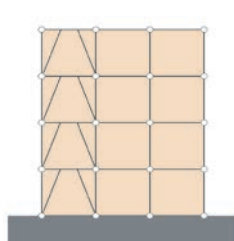


Imagen 486. Estructuras
arriostradas

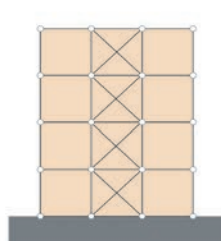
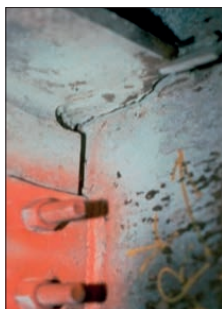
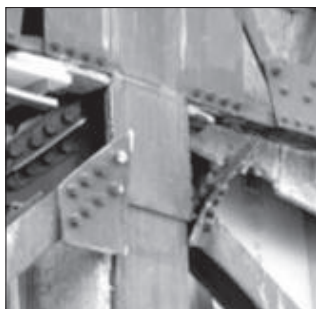


Imagen 487. Estructuras
en celosía



Fractura unión
columna-viga



Fallo soldadura
riostra-columna



Pandeo de elementos diagonales



Imagen 488. Estructuras entramadas

Tanto en pórticos arriostrados como en celosía, el resultado último de los fallos expuestos o colapso de la edificación se deberá al pandeo de los pilares.

- Estructuras atornilladas: los fallos de dichos nudos suelen producirse bien por fallo de los tornillos (cortante) o de las placas de conexión (desgarramiento o sección insuficiente).

II.3.6. Madera

Estructuras caracterizadas por su bajo peso, alta flexibilidad y por generar daños menos peligrosos con relación a otros materiales. Sin embargo, las estructuras de madera son tan populares como afectadas en todos los sismos debido a los siguientes factores:

- 1) Resistencia inadecuada de muros en primeros pisos debido a:
 - Garajes o espacios diáfanos muy amplios (locales comerciales), en planta baja.
 - Grandes aberturas (escaparates, portales de acceso, etc.).
- 2) Precaria conexión entre cimentación y soleras o entrepisos, lo que genera deslizamiento entre ambos.
- 3) Otros fallos:
 - Anclajes inadecuados de postizos o ampliaciones (posches).
 - Insectos xilófagos (termitas).
 - Reducción de sección útil por flejes y pudriciones.
 - Humedad.

10.2.4. PATOLOGÍAS POR CAUSAS ACCIDENTALES – IMPACTO

Definición: se entiende por riesgo de impacto el choque violento entre un cuerpo sobre una edificación, como resultado de la aplicación de una fuerza bruscamente.

a) Marco legal

Para su cuantificación, deberá atenderse a lo reflejado al respecto en el marco CTE DB SE AE. Dicho marco será de aplicación a los elementos resistentes que pueden quedar afectados por un potencial impacto, por lo que deberá dimensionarse teniendo en cuenta las posibles acciones debidas al mismo.

Sin embargo, sólo se considerarán las acciones debidas a impactos accidentales (tales como el impacto de un vehículo o la caída del contrapeso de un aparato elevador) mientras que quedarán excluidos los premeditados.



Imagen 489. Impacto de vehículos contra la estructura de la edificación

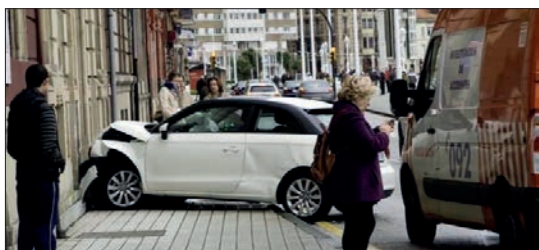
b) Factores

Las magnitudes y características de las acciones causadas por un impacto sobre una edificación dependerán, entre otros, de los siguientes factores:

- Masa.
- Velocidad del cuerpo impactante.
- Capacidad de deformación y de amortiguación, tanto del cuerpo como del elemento que impacta.

Sin lugar a dudas, el caso más probable de riesgo de impacto en la edificación es el **impacto de vehículos**, debiendo considerar las siguientes prescripciones al respecto:

- **Impacto exterior:** la acción del impacto de vehículos desde el exterior del edificio se considerará donde y cuando lo establezca la ordenanza municipal.
- **Impacto interior:** el impacto desde el interior debe considerarse en todas las zonas cuyo uso suponga la circulación de vehículos.
- **Valores de cálculo:** los valores de cálculo de las fuerzas estáticas equivalentes debidas al impacto de vehículos de hasta 30 kN de peso total, son de 50 kN en la dirección paralela a la vía y de 25 kN en la dirección perpendicular, no actuando simultáneamente.
- **Carretillas elevadoras:** en zonas en las que se prevea la circulación de carretillas elevadoras, el valor de cálculo de la fuerza estática equivalente debida a su impacto, será igual a cinco veces el peso máximo autorizado de la carretilla.
- **Otros vehículos:** cuando en las instrucciones de uso y mantenimiento del edificio se mencione otro tipo de vehículos, por ejemplo helicópteros, deberá definirse en el proyecto el valor característico y el modelo empleado para la acción correspondiente.



Impacto en dirección perpendicular a fachada



Impacto en dirección paralela a fachada



Zona previsible impacto de carretilla elevadora

Imagen 490. Impacto de vehículos

c) Riesgo de impacto asociado a intervenciones de los cuerpos de bomberos

Si bien el riesgo de impacto en la edificación no es el más frecuente al que se tienen que enfrentar los cuerpos de bomberos, en caso de generarse, es de tal magnitud que, según las características del cuerpo impactante y los elementos constructivos afectados, podrán llegar a generar el colapso inmediato de la edificación.

Para ilustrar el presente riesgo, se tomará como referencia el estudio pionero en la materia realizado por José Damián Soriano (Consortio Bomberos de Cuenca 112) y José Jacinto de Castro (SEPEI Albacete) sobre cerramientos prefabricados y su aplicación a naves industriales.

Aparentemente se podría pensar que un cerramiento realizado a base de elementos prefabricados de hormigón no forma parte de la estructura de un edificio. La realidad dista del enunciado anterior, ya que dichas tipologías de cerramientos, entre otros, se encargan tanto de la recepción y transmisión de esfuerzos generados por la carga de viento, como del arriostramiento de la estructura portante.

De acuerdo a dicho estudio, la evolución de los sistemas prefabricados de naves industriales ha sufrido una evolución en los últimos 15 años:

- Inicialmente los sistemas de cerramiento se montaban sistemáticamente encastrados en perfiles metálicos que propiciaban un doble efecto:
 - Anulación casi en su totalidad del pandeo de los perfiles metálicos.
 - Adicionalmente, desde la perspectiva de los servicios de bomberos, la estructura presentaba un óptimo comportamiento al fuego, dado que se reducía al mínimo la superficie expuesta al incendio.
- Sin embargo, actualmente, lejos de optimizar o desarrollar nuevas técnicas, es frecuente detectar una involución constructiva hacia sistemas a base de grapas de acero y tacos de sujeción, sin anclaje soldado ni fijación química y sin resistencia al fuego ni a la corrosión.



Imagen 491. Prefabricados encastrados en perfiles

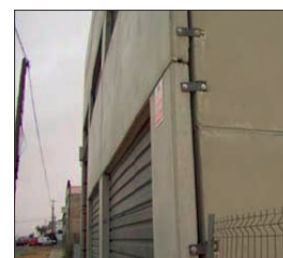


Imagen 492. Prefabricados anclados con grapas

En caso de emergencia, el comportamiento de dichos sistemas es demoledor:

- En caso de incendio: los problemas de estabilidad del acero de grapas y tacos, expuesto al fuego en el interior de la nave, desembocarán en un rápido colapso y rápido desplome de la fachada.
- En caso de impacto: un vehículo dentro de la nave que impacte sobre la fachada podría provocar el derrumbe inmediato de la misma.



Imagen 493. Impacto en nave prefabricada en construcción

En resumen:

- Las características de los sistemas de fijación y anclaje de una estructura de cualquier naturaleza, pero con mayor trascendencia los de los sistemas prefabricados, deberán estar diseñados y homologados, ante un potencial impacto que pueda condicionar su estabilidad.
- Dado el actual grado de tecnificación de los procesos constructivos, la sustitución de sistemas de fijación de paneles encastrados o anclajes homologados, por sistemas de grapas y tacos, es temeraria ante situaciones de emergencias y generadora de situaciones de inestabilidad en las edificaciones.
- Si bien no es recomendable el uso de grapas y tacos al interior de las naves, mayor repercusión tendrá el impacto en caso de que los anclajes se sitúen al exterior, debido a problemas de corrosión.