Edificios Sismorresistentes

Artículo 1. El Salvador y su sismicidad

La cantidad de volcanes que atraviesa el área Centroamericana, y en particular, El Salvador nos recuerda que estamos situados en el Anillo de Fuego del Pacífico. Así como somos vulnerables a las erupciones volcánicas, lo somos mucho más los sismos. Lo anterior se debe a que vivimos en el borde de una placa tectónica, la Placa del Caribe, la cual fuerza a la Placa de Cocos a pandearse y deslizarse debajo de El Salvador, a similar velocidad del crecimiento de nuestras uñas, unos 7 cms. por año (Figura 1). El movimiento no es suave y en ocasiones el deslizamiento se atora y va creando esfuerzos. Tales esfuerzos y, la energía resultante, se liberan con una ruptura violenta y súbita de las rocas, causando un sismo. La Figura 2 muestra el tamaño y la ubicación de sismos recientes en las vecindades de El Salvador.

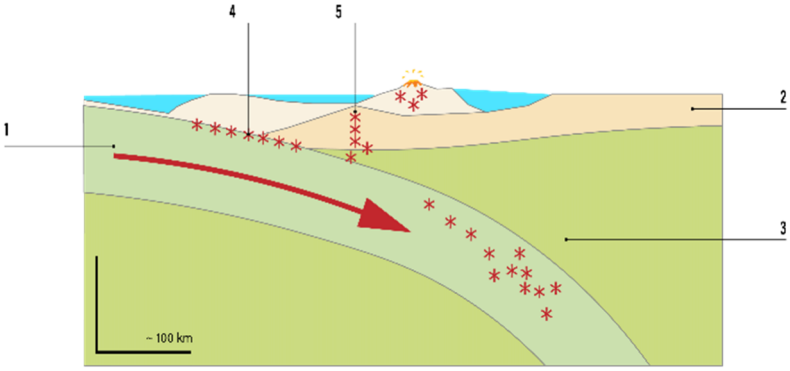


Figura 1. Una sección de Centro América en donde se muestra la Placa de Cocos (1) deslizándose debajo de Centro América y la Placa del Caribe (2) hacia el Manto (3). Sismos (4) se generan por este movimiento, pero también hay sismos pocos profundos que coinciden con la cadena volcánica y son de origen tectónico, en vez de volcánico. (5).

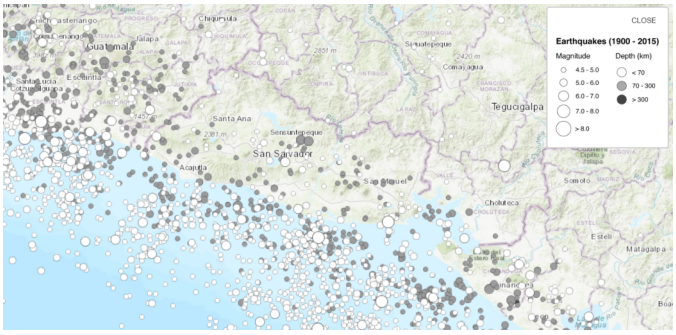


Figura 2. Sismos recientes en la zona de El Salvador (USGS). Los sismos están agrupados de acuerdo a sus magnitudes.

Mientras que varios sismos grandes se producen en la zona de interacción entre las placas del Cocos y del Caribe, en otras regiones, tales como a lo largo de la cadena volcánica, la cual atraviesa El Salvador de este a oeste, ocurren sismos locales de pequeña y mediana magnitud; sin embargo, éstos son más destructivos debido a que coinciden con los centros poblacionales. Estos eventos son de origen tectónico, en vez de volcánico y se producen en una serie de fallas geológicas locales (Figura 3). Debido al efecto de estas dos fuentes productoras de sismos, subducción y fallamiento local, el país puede sufrir un sismo severo, o una secuencia sísmica, una vez por década en promedio (Lopez et.al., 2004).

Durante un sismo el piso se mueve en varias direcciones en forma aleatoria y rápidamente. El movimiento durante un terremoto puede causar tanta inestabilidad que uno no se puede mantener en pie. El terreno mismo puede verse afectado por estas vibraciones, causando deslizamientos y licuefacción que es cuando el suelo se vuelve lodo. Sin embargo, usualmente las edificaciones en las que vivimos y trabajamos sufren la peor parte.

Figure 3. Fallas geológicas locales activas identificadas por el MARN. (Mixco, 2020)

Las edificaciones vibran de lado a lado durante un sismo. Las partes más altas, o los niveles más elevados, de un edificio se mueven más que los niveles inferiores a medida que se distorsionan durante la sacudida (Figure 4). Esto, pone enorme presión en la estructura que soporta a los edificios, tales como las columnas, vigas y paredes. Es un efecto similar a que te pares y pongas los pies en el piso y un amigo te empuja por detrás. Tu cabeza y hombros se moverán más que tus rodillas y chimpinillas. Los músculos en tus pies harán el mayor trabajo por evitar que te caigas. Esto es similar a lo que un edificio experimenta durante un sismo. Las columnas de concreto reforzado y las paredes de mampostería son los más vulnerables. Si se dañan, el edificio podría colapsar. Nosotros, nuestras familias y amigos y otras personas podrían estar entre las víctimas.

Figura 4. Vivienda durante un sismo fuerte.

Afortunadamente, es sencillo y no muy caro diseñar y construir edificios sismorresistentes. ¡El daño en los edificios es evitable y puede ser impedido! Los siguientes artículos en esta serie explican como hacer eso en más detalle. Para que los nuevos edificios en El Salvador, y otros países, sean seguros y que no experimenten daños serios durante un terremoto pasa por mejorar las prácticas actuales de construcción y por aplicar principios bien conocidos de sismorresistencia. De esta manera nos mantendremos seguros a nosotros, a nuestras familias y a otros durante un sismo severo.

Como sabemos El Salvador es una región sísmicamente muy activa, por lo que la posibilidad que un terremoto dañe a tu edificio es relativamente grande. Más grande, por ejemplo, que tengas un accidente de tráfico grave. Los edificios sismorresistentes son posibles de diseñar y construir, pero necesitan un poco más de cuidado para hacerlos.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros ante los sismos. Tales artículos están orientados para potenciales propietarios de casas nuevas, edificaciones más grandes y otros involucrados con la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos serán traducidos y el contenido podría ser modificado por expertos locales para ajustarse a las condiciones locales.

References:

López, M., Bommer, J.J., and Pinho, R., 2004, Seismic hazard assessments, seismic design codes, and earthquake engineering in El Salvador, *in* Rose, W.I., Bommer, J.J., López, D.L., Carr, M.J., and Major, J.J., eds., Natural hazards in El Salvador: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 375, pp. 301-320.

Mixco, L., 2020, Evaluación probabilística de amenaza sísmica de El Salvador, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Renovables (MARN). Proyecto "Plan de Acción para la Implementación del Índice de Gobernabilidad y Política Pública para la Gestión de Riesgo de Desastres" ES-T1267, BID. 142 p.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 2. Evitando problemas de suelo y fundaciones durante los terremotos

Idealmente, a cada uno de nosotros nos gustaría que nuestra casa o el edificio en el que vivimos estuviera cimentado en roca sólida. Si ese fuera el caso, eliminaríamos varios escenarios de fallas potenciales del suelo que pudieran afectar nuestra edificación. Durante un terremoto, el suelo puede comportarse no solo de maneras extrañas, sino que peligrosas para los edificios.

Tal vez, la amenaza más obvia es la de laderas pronunciadas, las cuales son susceptible a producir caída de roca y deslizamientos de tierra, que pueden destruir edificaciones individuales y, en algunos casos, enteras comunidades. Usualmente, soluciones de tipo ingenieril pueden utilizarse para prevenir que estos problemas ocurran. Por ejemplo, los drenajes superficiales pueden evitar que el agua lluvia ablande los suelos de deslizamientos potenciales los cuales durante un terremoto se podrían activar. La estabilización activa de una ladera por medio de la perforación de huecos y la subsecuente instalación de anclajes en el terreno para evitar un deslizamiento involucra un mayor nivel de intervención e inversión. (Figura 1).

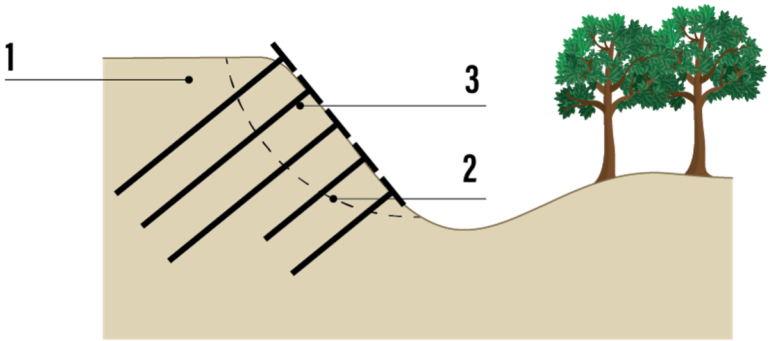


Figura 1. Una sección a través de una ladera inestable (1). Una ladera con una potencial cuña superficial de deslizamiento (2) se puede evitar que se active insertando anclajes de aceros (3) perforados y concreteados dentro de la pendiente.

Sorprendentemente, un serio problema potencial que pudiera ser inducido por un sismo puede esconderse aun en sitios planos. Esto ocurre, especialmente, en lugares en los que el subsuelo presenta arenas sueltas con un nivel freático cercano a la superficie. Las vibraciones producidas por el terremoto combinan la arena y el agua en una mezcla de lodo líquido, por lo tanto, a este fenómeno se le da el término de "licuefacción". Así, las edificaciones cimentadas sobre este, nuevo, material fluido se hunden en él, lo que produce que se inclinen o fallen completamente (Figura 2). Busca en internet bajo el término "licuefacción de edificios" para que veras muchas imágenes. En casos extremos, como durante los sismos del 13 de enero y 13 de febrero de 2001, hubo muchos casos de este tipo, afectando comunidades, carreteras, ríos y puentes.

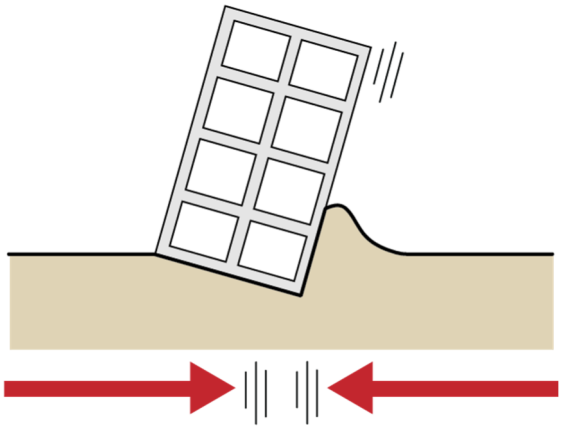


Figura 2. La vibración del terremoto causa que algunos suelos pierdan resistencia y se licuen, produciendo que los edificios se inclinen.

Estas amenazas potenciales, involucrando la combinación suelo-sismos, es un recordatorio de la necesidad de hacer investigaciones de suelo en el pre-diseño y la construcción. Por lo anterior, se recomienda ejecutar las pruebas de suelo. Pruebas simples para edificios pequeños, pero más extensas para proyectos más grandes. Los ingenieros civiles necesitan los resultados de estas pruebas para cerciorarse que los suelos serán capaces de soportar el peso del edificio. Las pruebas, generalmente, involucran perforar debajo de la superficie para verificar el tipo de suelos que hay (Figura 3). Las muestras así obtenidas se testean en un laboratorio. Especialmente para las edificaciones grandes, los clientes deberán incluir a un ingeniero geotécnico que se ocupe de las pruebas, interpretación de los resultados y recomendar los respectivos criterios de diseño. En sitios ubicados en laderas o susceptibles a licuefacción, los ingenieros geotécnicos pueden sugerir medidas para mitigar los potenciales problemas que puedan comprometer la seguridad del edificio.

Figure 3. Una perforadora para tomar muestras de suelo que serán ensayadas en un laboratorio de suelos.

Es muy importante para los propietarios de las edificaciones que lleven a cabo investigaciones del suelo durante la fase de diseño y antes de la construcción; particularmente, en áreas con suelos blandos.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros ante los sismos. Tales artículos están orientados para potenciales propietarios de casas nuevas, edificaciones más grandes y otros involucrados con la industria de la construcción. Los artículos han sido escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/) patrocinada por el

Earthquake Engineering Research Institute (https://www.eeri.org/) y la International Association of Earthquake Engineering (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos serán traducidos y el contenido podría ser modificado por expertos locales para ajustarse a las condiciones locales.

Referencias:

Charleson, A. W., 2008. *Seismic design for architects: outwitting the quake*. Oxford, Elsevier. Chapter 7, pp. 113-123.

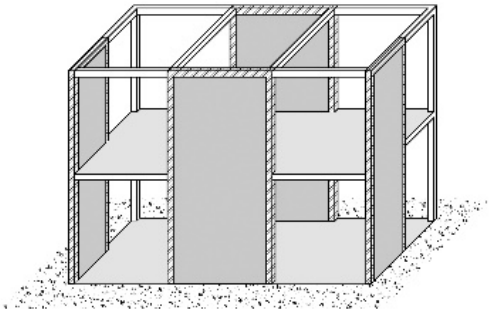
Moller, E., 2016. Demonstrate liquefaction: shaky sediments. Exploratorium Teacher Institute. https://www.youtube.com/watch?v=Kkgt-cPjBwA (accessed 8 May 2020).

Murty, C. V. R., 2005. Earthquake Tip 30: What is important in foundations of earthquake-resistant Buildings? IITK-BMTPC "Learning earthquake design and construction", NICEE, India. http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip30.pdf (accessed 5 May 2020).

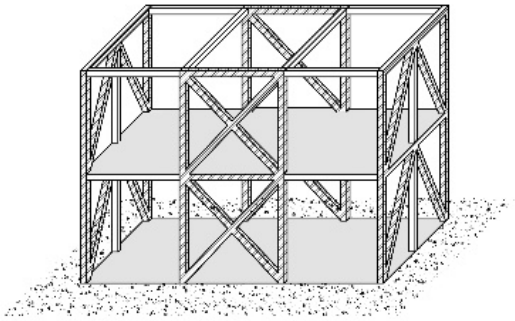
Edificios Sismorresistentes

Artículo 3. Tres sistemas estructurales que resisten terremotos

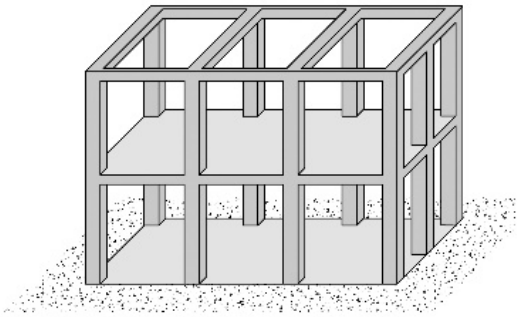
Los edificios de cualquier ciudad son diversos. Algunos son de poca altura, mientras que otros son muy altos, algunos son compactos y otros enormes, como un centro comercial. A pesar de que los edificios parecen radicalmente diferentes, solo hay tres sistemas estructurales comunes que pueden resistir los terremotos. Los tres sistemas son paredes de corte, o paredes estructurales; marcos arriostrados; y marcos resistentes a momento, como se muestra en la Figura 1.



(a) Paredes de corte



(b) Marcos arriostrados



(c) Marcos resistentes a momento

Figura 1. Los tres sistemas estructurales comunes en orden de su fuerza y capacidad para resistir terremotos (de mayor a menor).

Cuando los arquitectos e ingenieros civiles diseñan un nuevo edificio, eligen uno de los tres sistemas para resistir las fuerzas sísmicas. A veces, se eligen dos sistemas para resistir las sacudidas en el edificio, uno en cada dirección (Figura 2). Siempre que uno de los tres sistemas proporcione resistencia a lo ancho y a lo largo del edificio, el edificio puede resistir temblores desde cualquier dirección.

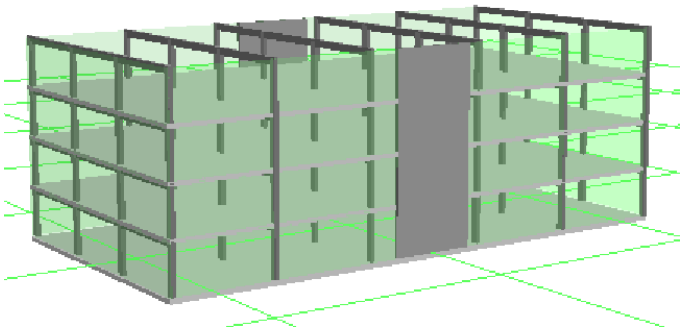


Figura 2. Seis marcos resistentes a momento, cada uno de los tres claros, resisten temblores a lo ancho del edificio, y dos paredes estructurales resisten los sismos en la dirección larga del edificio. (No se muestra la losa del techo).

Cada sistema es vertical y debe elevarse por todo la altura del edificio desde los cimientos hasta el techo. El número de paredes, marcos arriostrados o marcos resistentes a momento requeridos dependen del riesgo sísmico de una ciudad, el tamaño del edificio y su importancia para la comunidad.

Los marcos resistentes a momento son un sistema popular (Figura 3). Sus columnas y vigas resisten los movimientos sísmicos al estar fuertemente conectadas (consulte el Artículo 6). Los marcos ofrecen la mayor libertad para planificar espacios interiores y proporcionar ventanas. Desafortunadamente, los marcos resistentes a momento suelen ser más flexibles en los terremotos que los otros dos sistemas. Se balancean más de un lado a otro y son más propensos a sufrir daños. También son más difíciles de diseñar y construir correctamente, y son sensibles a los errores de construcción. En cuanto a sus materiales de construcción, suelen estar edificados de hormigón armado o acero estructural. Los marcos de madera se pueden utilizar para edificios de poca altura.

Figura 3. Los dos marcos resistentes a momento, de cuatro claros cada uno, resisten las fuerzas sísmicas que actúan a lo largo del edificio. Es de esperar que marcos similares estén en el otro lado del edificio.

Los marcos arriostrados contienen miembros diagonales que forman triángulos con las vigas y columnas (Figura 4). Se fabrican a partir de miembros de acero y se encuentran más comúnmente en construcciones de poca altura, como almacenes. La calidad de la soldadura puede ser una debilidad en las conexiones de acero a menos que haya una excelente garantía de calidad, y los arriostramientos de acero pueden doblarse bajo grandes fuerzas.

Figura 4. Los marcos de acero resisten las fuerzas sísmicas que actúan a lo ancho del edificio. Los marcos de acero resistentes a momento proporcionan resistencia a lo largo del edificio.

Las paredes de corte o paredes estructurales son potencialmente el sistema estructural más fuerte contra la sacudida sísmica (Figura 5). A nivel internacional, tienen el mejor historial. Entre mayor número de paredes y entre más largas éstas sean, más fuerte será el edificio. Esto significa menos movimientos de ida y venida en las sacudidas, las cuales son las que causan daños en el edificio. El hormigón armado es el material más común para paredes estructurales de gran altura. Los muros de mampostería confinados (consulte el Artículo 4) son adecuados para edificios de poca altura. En algunos países propensos a terremotos, como Estados Unidos o Nueva Zelanda, la construcción de madera de poca altura se basa en paredes estructurales de plywood o placas de yeso para resistir los terremotos. Los productos de madera diseñados de manera ingenieril, como la madera contralaminada, también están siendo empleados para su uso como muros de corte en edificios de mediana altura.

Figura 5. Un muro estructural de hormigón armado resiste las fuerzas que actúan a lo largo del edificio. Debe haber otra pared al otro lado del edificio.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros ante los sismos. Tales artículos están orientados para potenciales propietarios de casas nuevas, edificaciones más grandes y otros involucrados con la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica

(http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos serán traducidos y el contenido podría ser modificado por expertos locales para ajustarse a las condiciones locales.

Referencias:

Marco arriostrado. Glosario para la taxonomía GEM. Modelo Global de Terremotos. https://taxonomy.openquake.org/terms/braced-frame-lfbr.

Charleson, A. W. , 2008. *Seismic design for architects – outwitting the quake*. Elsevier: Oxford. Capítulo 4 “Vertical structure”, págs. 63-91.

Marco resistente a momento. Glosario para la taxonomía GEM. Modelo Global de Terremotos. https://taxonomy.openquake.org/terms/moment-frame-lfm.

Murty, C. V. R. , 2005. *How do earthquakes affect reinforced concrete buildings – Earthquake Tip 17*. IITK-BMTPC "Learning earthquake design and construction", NICEE, India. http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip17.pdf (accessed 5 May 2020).

Murty, C. V. R. , 2005. Why are buildings with shear walls preferred in seismic regions?– Earthquake Tip 23. IITK-BMTPC "Learning earthquake design and construction", NICEE, India. http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip17.pdf (accessed 5 May 2020).

Pared. Glosario para la taxonomía GEM. Modelo Global de Terremotos. https://taxonomy.openquake.org/index.php/terms/wall-lwal.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 4. ¿Por qué los muros son los mejores elementos estructurales desde el punto de vista de sismorresistencia?

Como se mencionó en el Artículo 3, las paredes son uno de los tres sistemas comúnmente utilizados en los edificios para resistir las sacudidas sísmicas. Los muros son, potencialmente, el más fuerte de los tres sistemas, el menos flexible y el menos susceptible a los errores de construcción. También tienen un muy buen historial de desempeño sísmico basado en observaciones internacionales de edificios dañados por terremotos (Figura 1). Aunque las paredes estructurales no son tan frecuentes en edificios de mediana a gran altura en comparación con los marcos de momento, los marcos son mucho más propensos a daños. Por ejemplo, por esta razón, muchos de los edificios en Chile están construidos usando muros estructurales en lugar de marcos formados por columnas y vigas. Las paredes han funcionado bien en los grandes terremotos recientes.

Figura 11. Un edificio dañado por un sismo. La resistencia y rigidez de las largas paredes de mampostería de color blanco han evitado daños. Un sistema estructural más flexible en la dirección transversal, al de las paredes, ha producido un mayor movimiento y daño a la fachada frontal, la cual está cubierta temporalmente con láminas de plywood.

Las paredes, por lo tanto, son los mejores elementos estructurales para resistir los terremotos. Pero la elección del material de la pared depende de la altura del edificio. En edificios de poca altura, como casas de uno y dos pisos, los muros de mampostería confinada (Artículo 7) son los más adecuados, considerando los aspectos de construcción y el costo (Figura 2). Las dimensiones de las columnas y vigas de confinamiento, hechas de hormigón armado, en esas edificaciones son más pequeñas que para edificios similares que utilizan marcos resistentes a momento (Artículo 6). Como se señaló anteriormente, los muros reducen los movimientos de ida y venida en las sacudidas. Como resultado, éstas y otros elementos del edificio, como las particiones, sufren menos daños durante la sacudida de un terremoto. Sin embargo, las paredes restringen la planificación interior y la luz natural más que los marcos. Los costos de sus cimientos también pueden ser mayores. Siendo esas sus principales desventajas.

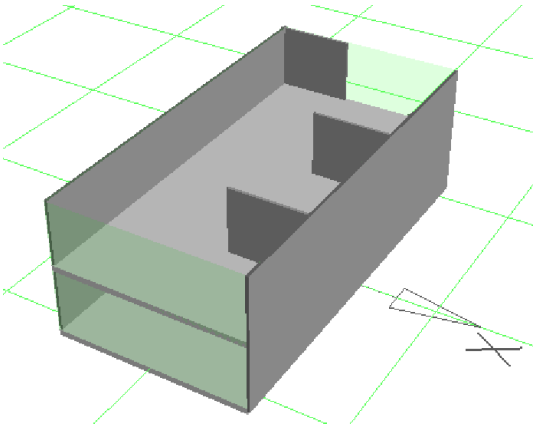


Figura 2. Una casa de dos pisos con paredes de mampostería confinada y losa de techo de concreto (no mostrada). Dos largos muros perimetrales resisten el sismo en la dirección longitudinal del edificio. Tres paredes más cortas resisten el sismo lateral (dirección X). No se muestran las columnas ni las paredes divisorias.2

Los muros de hormigón armado son comunes en edificios más altos de otros países afectados por terremotos. Estas paredes se elevan continuamente desde cimientos fuertes, con o sin pilotes y sin grandes aberturas en los pisos inferiores, hasta el techo (Figura 3). Cada losa de piso de concreto, así como el techo, necesita una fuerte conexión con las paredes.

Figura 3. Un edificio en construcción. La mayoría de las fuerzas sísmicas en ambas direcciones son resistidas por muros estructurales de hormigón armado. En este caso, también hay cierto aporte, desde el punto de vista estructural, por un marco de momento de acero perimetral.3

Para estar seguros, las paredes estructurales deben tener suficiente espesor y suficiente longitud horizontal. Si el espesor de las paredes es pequeño, sus extremos se doblan y se dañan durante un terremoto. Si, por otra parte, son demasiado altas y estrechas (esbeltas), las paredes se vuelven muy débiles y flexibles, y los edificios pueden balancearse demasiado (Figura 4) y causar daños excesivos. Para edificios de mampostería de poca altura, el número de paredes requeridas para soportar los sismos en ambas direcciones, las longitudes y espesores de pared pueden ser encontrados en los manuales o guías de construcción, tales como el de Meli (2011). El detallado apropiado y la cantidad del acero de refuerzo en la construcción de una pared también son importantes factores para garantizar la seguridad ante un terremoto (Carlevaro, 2018). Para edificios más altos, las paredes estructurales deben ser diseñadas por ingenieros civiles calificados.

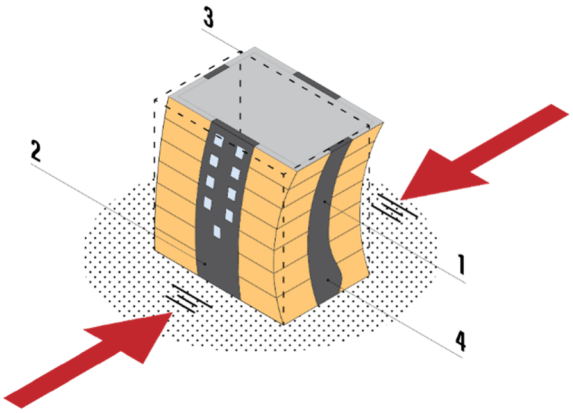


Figura 4. Durante un terremoto, dos esbeltos muros (1) resisten el temblor lateral, pero permiten demasiado movimiento. Además, se doblan en su base. Dos paredes más largas (2) restringen el movimiento en la otra dirección. La posición original del edificio se denota por el contorno punteado (3) y (4) muestra el pandeo de la pared en su base porque es demasiado delgada.4

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros ante los sismos. Tales artículos están orientados para potenciales propietarios de casas nuevas, edificaciones más grandes y otros involucrados con la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos serán traducidos y el contenido podría ser modificado por expertos locales para ajustarse a las condiciones locales

Referencias:

Carlevaro, N., Roux-Fouillet, G., y Schacher, T. , 2018. Guide book for building earthquake-resistant houses in confined masonry. Guide book for technical training for earthquake-resistant construction of one to two-storey buildings in confined masonry. Swiss Agency for Development and Cooperation Humanitarian Aid and Earthquake Engineering Research Institute. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2018/11/Guide-book-for-building-eq-re-houses-in-cm_version-1806.pdf (consultado en diciembre de 2019).

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier. Capítulo 5, págs. 66-76.

Meli, R. , Brzev, S. , Astroza, M., Boen, T., et al., 2011. Seismic design guide for low-rise confined masonry buildings. EERI y IAEE. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/08/ConfinedMasonryDesignGuide82011.pdf (consultado en abril de 2020).

Murty, C. V. R. , 2005. *Why are buildings with shear walls preferred in seismic regions?– Earthquake Tip 23*. IITK-BMTPC "Learning earthquake design and construction", NICEE, India. http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip17.pdf (consultado el 5 de mayo de 2020).

Edificios Sismorresistentes

Artículo 5. ¿Son útiles las paredes en los edificios durante los sismos?

Todas las casas y edificios tienen paredes. Las paredes nos protegen y nos proveen refugio. La mayoría de las paredes en las viviendas formales en El Salvador están construidas con ladrillos o bloques, luego se repellan y pintan. Las paredes generalmente se encuentran alrededor del perímetro de un edificio, pero también hay otras que están dentro. Las paredes crean los espacios que utilizamos y las aberturas, para puertas y ventanas, hacen que los espacios sean habitables. Las paredes también sostienen el techo.

Como cualquier persona, las paredes de mampostería tienen fortalezas y debilidades. De hecho, un muro tiene dos áreas de fortaleza y una debilidad grave. Primero, una pared es fuerte para soportar el peso de la construcción sobre ella. También es fuerte cuando resiste una fuerza horizontal paralela a su longitud, por ejemplo, durante un terremoto. Esto es especialmente cierto si el ladrillo de la pared se ha colocado primero, y solo entonces se cuelan los nervios y soleras de mortero armado. Este tipo seguro de construcción, ampliamente utilizado en El Salvador, se llama mampostería confinada. Los miembros verticales y horizontales de mortero armado confinan los ladrillos, evitando que se caigan, y generalmente unen todo (Figuras 1 y 2). Es de acotar que las paredes de ladrillo sin refuerzo son inseguras durante los terremotos.

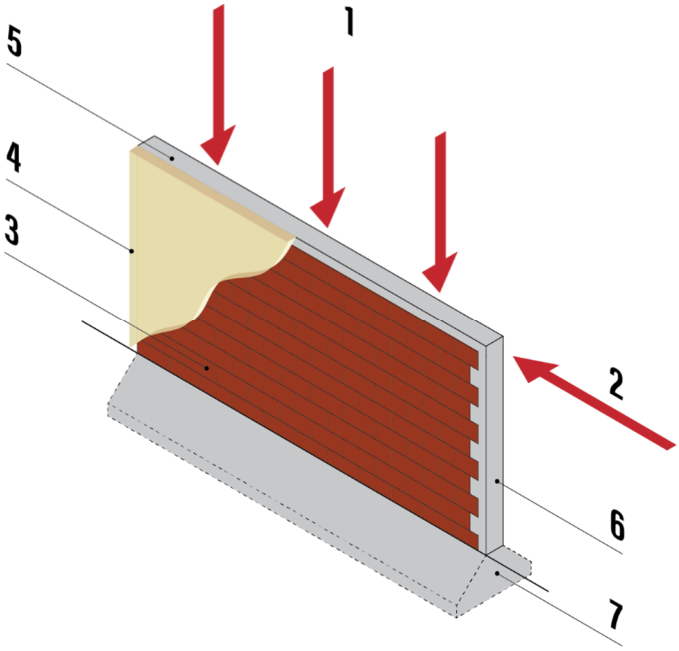


Figura 1. Una pared es fuerte para resistir las fuerzas hacia abajo (1) y las fuerzas horizontales (de terremotos) (2) paralelas a su longitud. Las unidades de mampostería o ladrillos (3) están repelladas (4) y soportadas por una fundación (7). La mampostería está confinada por soleras (5) y nervios (6).

Figura 2. Una casa de mampostería confinada en construcción.

¿Cuál es la debilidad de las paredes? Cuando una pared es delgada y no tiene apoyo de paredes laterales o un piso o techo, es muy débil contra el movimiento del sismo que se produce en ángulo recto respecto a su longitud (Figura 3). Recuerde lo difícil que es construir un modelo de casa jugando a las cartas. Una tarjeta vertical (pared) se cae a menos que esté detenida por una o dos tarjetas en ángulo recto con ella. ¡Pruébalo tú mismo!

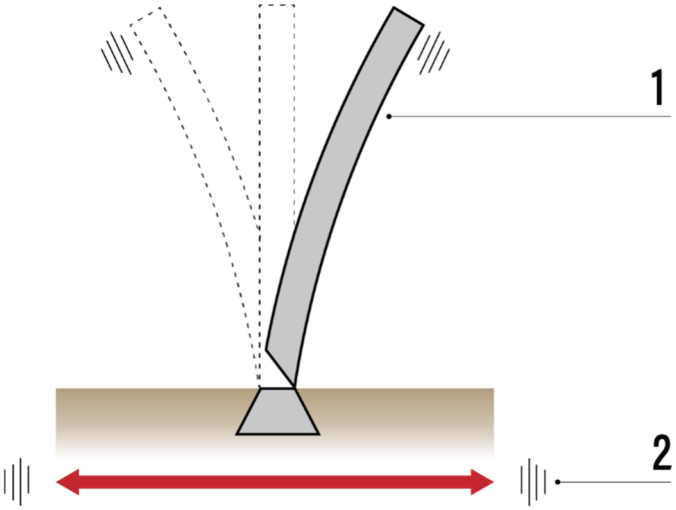


Figura 3. Una pared que se muestra en sección transversal (1) es muy débil contra las fuerzas laterales de la sacudida sísmica (2).

Cada pared necesita soporte lateral para superar su debilidad, mientras que simultáneamente soporta otras paredes. En un edificio real superamos la debilidad de una pared contra las fuerzas laterales de los terremotos (y el viento) por otras paredes en ángulo recto y por las soleras. La solera de coronamiento que corre a lo largo de la parte superior de una pared vulnerable se ata a soleras similares que corren a lo largo de las paredes que están orientadas en ángulo recto a ella (Figura 4). A menos que una pared esté conectada a otras paredes en ángulo recto, probablemente colapsará en un terremoto. Los nervios dentro de la mayoría de las paredes de la casa y que se muestran en la Figura 1 son demasiado débiles por sí solos para proporcionar soporte lateral a las paredes.

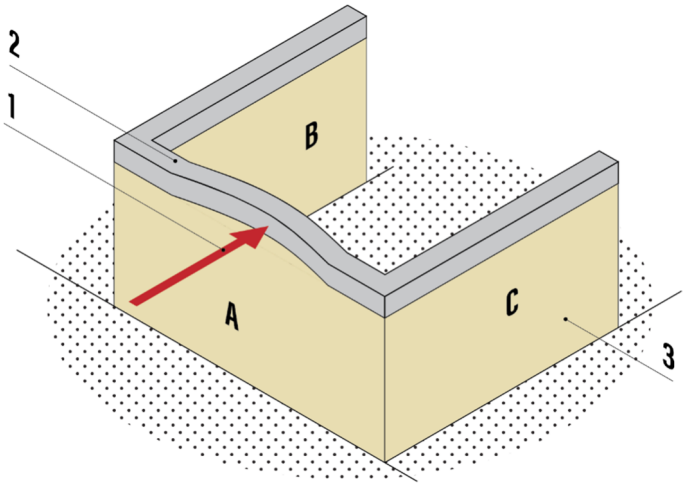


Figura 4. Parte de una casa sin techo. La pared A que experimenta una fuerza lateral a causa de un sismo (1) está soportada principalmente por la solera de coronamiento (2) que conecta la parte superior de la pared A con las paredes B y C (3).

En edificios más grandes con columnas y vigas de concreto reforzado, las paredes no soportan el peso del edificio. Sin embargo, las paredes todavía necesitan algún apoyo para evitar que caigan lateralmente dentro o fuera de un edificio durante un terremoto.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros ante los sismos. Tales artículos están orientados para potenciales propietarios de casas nuevas, edificaciones más grandes y otros involucrados con la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos serán traducidos y el contenido podría ser modificado por expertos locales para ajustarse a las condiciones locales.

Referencias:

Carlevaro, N., Roux-Fouillet, G., y Schacher, T. , 2018. Guide book for building earthquake-resistant houses in confined masonry. *Guide book for technical training for earthquake-resistant construction of one to two-storey buildings in confined masonry*. Swiss Agency for Development and Cooperation Humanitarian Aid and Earthquake Engineering Research Institute. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2018/11/Guide-book-for-building-eq-re-houses-in-cm_version-1806.pdf (consultado en diciembre 2019).

Edificios Sismorresistentes

Artículo 6. ¿Cómo trabajan los edificios con columnas y vigas de concreto reforzado en los sismos?

Mientras los edificios de baja altura -como las viviendas de uno o dos niveles- usualmente dependen de paredes de mampostería o de entramados madera para soportar los efectos de los movimientos sísmicos, muchos edificios de mayor altura dependen de marcos de columnas y vigas de concreto reforzado que soportan a las losas de piso. Tales marcos pueden ser construidos, también, con elementos de acero. Estos elementos estructurales verticales y horizontales trabajan en conjunto para soportar el peso del edificio y para resistir la sacudida horizontal del sismo.

¡La mejor forma de apreciar un marco de concreto y cómo este resiste sismos es verlo descubierto! Es decir, ver la estructura del edificio expuesta antes de que las paredes exteriores e interiores hayan sido construidas (Figura 1). Así, sólo cuatro componentes son visibles: el techo, las losas de entrepiso, las columnas y las vigas. Comparadas con los muros que son relativamente largos horizontalmente, las columnas son muy esbeltas. Estas son los miembros estructurales más críticos en un edificio. Ellas soportan el peso entero del edificio. Durante los sismos las columnas requieren flexionarse y desplazarse hacia los lados sin romperse mientras soportan fuerzas horizontales (Figura 2).

Figura 1. Estos dos edificios soportan sismos a partir de la resistencia de sus columnas y vigas. Las paredes y cerramientos aún están por ser construidos.

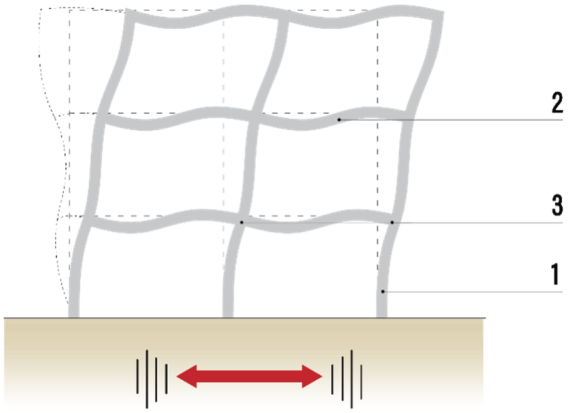


Figura 2. El marco de columna (1) y viga (2) de la edificación se mueve lateralmente durante un sismo. Note que ambas, la columna y la viga, se flexionan. Ellas están conectadas mediante uniones rígidas en la región donde se cruzan (3).

Sin embargo, las columnas no pueden hacer esto por si solas. Necesitan la ayuda de las vigas. Las vigas tienen un mayor peralte que el de las losas de piso que soportan y están rígidamente conectadas con las columnas. Un armado especial de acero de refuerzo embebido dentro del concreto es requerido en esas regiones de unión. Una unión rígida columna-viga significa que, cuando la columna se flexiona, la viga también se flexiona. Esto hace que el edificio sea más resistente globalmente, mucho menos flexible o blando, y menos proclive al daño.

A partir de que las columnas son los elementos estructurales más críticos, deben ser protegidas. Si las columnas se llegaran a dañar seriamente el edificio entero estaría en riesgo de colapso. Los ingenieros usan dos estrategias para proteger a las columnas. Primero, las columnas deben ser grandes y resistentes. Las columnas esbeltas simplemente se flexionan y rompen durante el movimiento de un terremoto, así que las columnas deben ser de tamaño considerable. Además de ser suficientemente grandes, las columnas necesitan bastante acero de refuerzo vertical y estribos horizontales distribuidos en toda su altura (Figura 3). Los estribos evitan que las columnas se rompan cuando estas se flexionan lateralmente. Las columnas deben ser considerablemente más anchas y gruesas que cualquiera de las paredes de mampostería que rematan en ellas. Deben ser dimensionadas de acuerdo con cálculos de ingeniería.

Figura 3. El refuerzo de la columna es visible antes de que el concreto sea colocado. El refuerzo consiste en barras verticales que resisten la flexión, y estribos horizontales que impiden que el concreto de la columna se desintegre y desaloje.

La segunda estrategia para proteger a las columnas es diseñarlas para que sean más resistentes que las vigas. Esto significa que durante el movimiento fuerte de un sismo las vigas -intencionalmente más débiles- se sacrifiquen, pero sin sufrir un daño crítico, y en el proceso se protege a las columnas.

Estas dos estrategias significan que un marco estructural sismorresistente usualmente posee columnas relativamente grandes, vigas ligeramente menores y uniones viga-columna rígidas.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros ante los sismos. Tales artículos están orientados para potenciales propietarios de casas nuevas, edificaciones más grandes y otros involucrados con la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos serán traducidos y el contenido podría ser modificado por expertos locales para ajustarse a las condiciones locales.

Referencias:

Murty, C. V. R., et al., 2006. At risk: the seismic performance of RC frame buildings with masonry infill walls. California, World Housing Encyclopedia. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/05/RCFrame_Tutorial_English_Murty.pdf (consultado el 8 June 2020).

Edificios Sismorresistentes

Artículo 7. Los fundamentos de los edificios de mampostería sismorresistes

El artículo 5 proporcionaba información básica sobre las paredes de mampostería, los elementos estructurales sismorresistentes más comunes en las viviendas en El Salvador. Se discutió cómo las paredes son fuertes en la dirección longitudinal pero vulnerables a los movimientos laterales. Los muros de mampostería, utilizando materiales de buena calidad, deben construirse como paredes de mampostería confinada. Esto significa que cada panel de ladrillo debe estar confinado por nervios de mortero armado, en cada extremo, y rematada por una solera, también de mortero armado. La solera coronamiento se cuela a nivel del alero, para el caso de viviendas de un nivel, y junto con la losa, a la altura de piso, en caso de viviendas de dos niveles.

Entonces, ¿cómo colocamos estas paredes en un edificio, por ejemplo, en una casa de dos pisos? En primer lugar, debemos recordar que las paredes son para proteger el edificio contra terremotos. Entonces necesitamos aplicar los siguientes cuatro fundamentos:

1. Cada casa necesita un mínimo de dos paredes fuertes paralelas a la longitud del edificio y dos paredes fuertes en la otra dirección. La sacudida por los sismos proviene de todas direcciones, por lo que cada edificio necesita resistencia hacia todos los lados (Figura 1). Aunque todas las paredes de mampostería deben ser de mampostería confinada, las paredes fuertes no deben tener grandes aberturas que las debiliten y que eviten que se formen fuerzas diagonales dentro de ellas (Figura 2). Además, el grosor de mampostería más el repello debe ser adecuada para la altura de la pared y, finalmente, cada pared fuerte debe ser más larga que la mitad de la altura del piso. Consulte Meli (2011) y otros para obtener información más detallada.

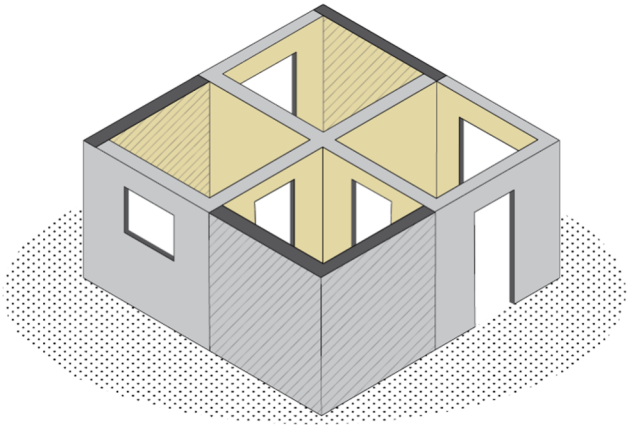


Figura 1. En esta sencilla casa, las dos paredes fuertes (mostradas sombreadas y sin grandes aberturas) resisten la sacudida del terremoto en ambas direcciones.

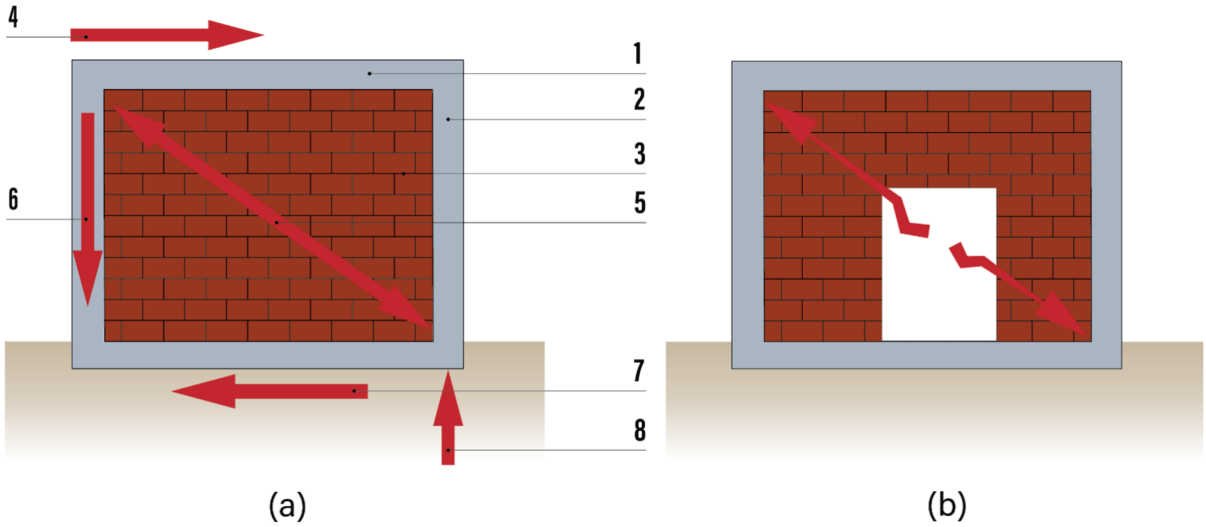


Figura 2. Un muro fuerte de mampostería confinada en donde se muestra la solera (1), los nervios (2) y la mampostería en sí (3). Cuando ocurre un terremoto (4) es resistido por la compresión diagonal en la pared (5) y la tensión en uno de los nervios (6). La fuerza sísmica horizontal es resistida por el suelo (7) y también la fuerza vertical es resistida por el suelo (8). En (b) la pared tiene una abertura que evita la formación de las líneas diagonales de fuerza debilitando mucho la pared.

2. Las paredes fuertes deben distribuirse regularmente por todo el edificio en ambas direcciones (Figura 3). Las paredes que corren en la misma dirección ubicadas bien separadas entre ellas evitan que el edificio se tuerza durante un terremoto. Es de vital importancia tener suficientes paredes, en términos de longitud y grosor, en cada dirección. Lo que es "suficiente" depende del tamaño del edificio y la calidad de los ladrillos o bloques.

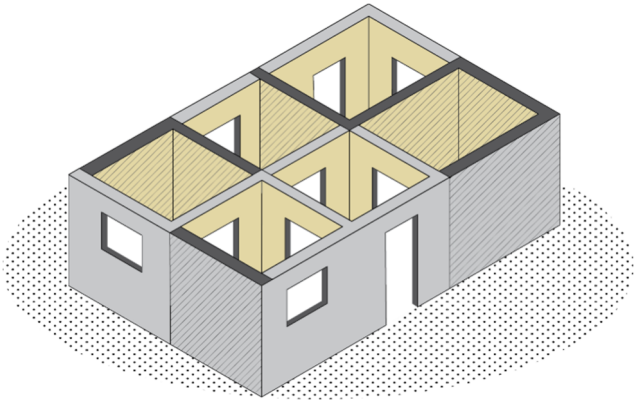


Figura 3. Los muros fuertes están bien distribuidos por todo el edificio. Cuatro paredes fuertes resisten el temblor a lo ancho de la casa y tres resisten temblores a lo largo de ella. Todas las paredes deben estar unidas entre sí por soleras (no se muestran).

3. Las soleras de coronamiento deben unir la parte superior de las paredes. Las soleras no solo confinan los paneles de mampostería, sino que también atan los elementos de construcción para evitar que se separen.
4. Las paredes fuertes de cualquier edificio deben ser verticales y continuas desde los cimientos hasta la solera de coronamiento a nivel del techo. Esto significa, por ejemplo, que, en una casa de dos pisos, una pared fuerte en el piso superior debe estar directamente sobre una pared fuerte similar a nivel inferior.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros ante los sismos. Tales artículos están orientados para potenciales propietarios de casas nuevas, edificaciones más grandes y otros involucrados con la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de

Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos serán traducidos y el contenido podría ser modificado por expertos locales para ajustarse a las condiciones locales.

Referencias:

Boen, T., et al., 2009. Buku saku Persysaratan pokok rumah yang lebih aman. PU y JICA. https://www.jica.go.jp/indonesia/indonesian/office/topics/pdf/buku_saku_0.pdf (consultado el 11 de abril de 2020).

Carlevaro, N., Roux-Fouillet, G., y Schacher, T. , 2018. Guide book for building earthquake-resistant houses in confined masonry. Swiss Agency for Development and Cooperation Humanitarian Aid and EERI. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2018/11/Guide-book-for-building-eq-re-houses-in-cm_version-1806.pdf (consultado en diciembre de 2019).

Meli, R. , Brzev, S. , Astroza, M., Boen, T., et al., 2011. Seismic design guide for low-rise confined masonry buildings. EERI y IAEE. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/08/ConfinedMasonryDesignGuide82011.pdf (consultado en abril de 2020).

Departamento de Obras Públicas, 2016. Izin mendirikan bangunan Gedung, Nº 05/PRT/M/2016. http://ciptakarya.pu.go.id/pbl/index.php/preview/55/permen-pupr-no-05-tahun-2016-tentang-izin-mendirikan-bangunan-gedung (consultado el 11 de abril de 2020).

Para obtener más información detallada gratuita y descargable, visite https://confinedmasonry.org/.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 8. Sujetando las partes de un edificio para que resista un sismo

Los edificios constan de muchas partes diferentes. Algunas partes, como pisos, techo, columnas, vigas y paredes son elementos de la estructura principal. Otros, como las paredes divisorias, las paredes de revestimiento y las escaleras no soportan carga. Son necesarios para hacer que el edificio sea habitable, pero el edificio no se derrumbaría sin ellos.

Durante un terremoto, el edificio, y todas sus partes, se sacuden fuertemente. Las sacudidas más dañinas son los movimientos horizontales de ida y venida en direcciones aleatorias. El movimiento que producen los sismos tiene el potencial de sacudir un edificio hasta hacerlo pedazos. Si no se diseña y construye adecuadamente, un edificio puede romperse en muchos pedazos y colapsar. Este horrible escenario se ha observado después de los terremotos en muchos países.

Es posible prevenir daños tan graves. Lo que se requiere es unir partes de la estructura principal a cada nivel de piso y a nivel del techo. Los elementos verticales, como las paredes, también deben sujetarse en cada nivel mediante vigas o soleras de amarre, que generalmente están hechas de concreto armado. Esta técnica es similar a amarrar cinchos o lazos fuertes alrededor de cada nivel de un edificio para evitar que sus elementos se abulten y se despedacen durante el movimiento del terremoto (Figura 1).

Figura 1. Un edificio dañado durante un terremoto se puede mantener unido a nivel del piso y el techo mediante vigas o soleras de amarre que funcionen como cinchos fuertes.

Afortunadamente, cuando los pisos de un edificio son de concreto armado, generalmente son suficientes para sujetar el edificio en esos niveles. Por supuesto, el propósito principal de un piso es crear una superficie para caminar y almacenar cosas. Pero cuando se produce una sacudida horizontal, el piso sujeta al edificio en ese nivel (Figura 2). Un piso obliga a los elementos a moverse en conjunto, como un todo, y evita que las partes se suelten y se caigan el edificio. Puede que ni siquiera sea necesario agregar acero de refuerzo adicional a una losa de concreto para lograr esta acción de unión.

Figura 2. Los pisos de concreto armado de este edificio atan las vigas y las columnas y obligan a todos estos elementos a moverse juntos horizontalmente durante un sismo.

Es más difícil unir un nivel de un edificio donde no hay piso o losa de techo, o donde las paredes de mampostería se usan junto con pisos de madera. En estos casos, las vigas de amarre, o coronamiento, hacen el trabajo (Figura 3). Crean una estructura horizontal dentro y alrededor del perímetro de un edificio para unir todo. Evitan que las paredes y las columnas se sacudan unas contra las otras o lejos unas de otras. Evitan, además, que partes del techo se salgan de sus apoyos y se caigan. Una estructura de vigas anulares es más flexible que una losa de concreto, pero ha demostrado funcionar como ese cincho perimetral imaginario.

Figura 3. Solo las columnas no evitan que las paredes de un edificio se caigan. El anillo a nivel del techo o las vigas o soleras de amarre o coronamiento pueden sujetar los elementos del edificio. (Tomado de la Guide book for building earthquake resistant houses in confined masonry (World Housing Encyclopedia, 2018).

En resumen, cada nivel de un edificio, desde los cimientos hasta el nivel de techo, debe estar fuertemente unido. Se requieren losas de piso, losa de techo o vigas o soleras de anillo o coronamiento.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros ante los sismos. Tales artículos están orientados para potenciales propietarios de casas nuevas, edificaciones más grandes y otros involucrados con la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos serán traducidos y el contenido podría ser modificado por expertos locales para ajustarse a las condiciones locales.

Referencias:

Bothara, J., y Brzev, S., 2011. A Tutorial: Improving the Seismic Performance of Stone Masonry Buildings. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, U.S.A., Publication WHE-2011-01, 78 pp. www.world-housing.net/tutorials/stone-tutorials (Consultado el 10 de julio de 2020).

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects – outwitting the quake. Elsevier: Oxford. Capítulo 4 " Horizontal structure ", págs. 49 a 61.

Murty, C. V. R., 2005. Why are horizontal bands necessary in masonry buildings – Earthquake Tip 14. IITK-BMTPC "Learning earthquake design and construction", NICEE, India. http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip14.pdf (Consultado el 5 de mayo de 2020).

Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE, 2018. Guidebook for building earthquake-resistant houses in confined masonry. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2018/11/Guide-book-for-building-eq-re-houses-in-cm_version-1806.pdf (Consultado el 5 de mayo de 2020).

Edificios Sismorresistentes

Artículo 9. Sabiduría local y seguridad de los edificios ante los sismos

En algunas regiones en el Mundo, como por ejemplo Indonesia, las observaciones posteriores al terremoto a veces revelan que los edificios tradicionales son más seguros que los edificios más nuevos. Los edificios tradicionales incorporan la sabiduría local en la elección de los materiales, sus formas, sistemas estructurales y conexiones entre los miembros estructurales.

La pregunta que los diseñadores y constructores contemporáneos debemos hacernos es la siguiente: ¿Cuáles son los principios derivados de la sabiduría local que debemos reintroducir en los nuevos edificios para mejorar la seguridad sísmica? Antes de responder a esta pregunta, debemos recordar las características de la construcción tradicional relevantes para su desempeño en terremotos. Brevemente, la construcción tradicional suele presentar:

- estructura de madera o bambú para pisos, techos y paredes;
- construcción ligera, posiblemente con la excepción de un techo de tejas;
- conexiones relativamente flexibles entre columnas y vigas; y
- Conexiones flexibles o intencionalmente débiles entre un edificio y sus cimientos.

Los edificios que incorporan la sabiduría local son, por lo tanto, ligeros y flexibles. Se balancean considerablemente de un lado a otro durante un terremoto. Además, si están débilmente conectados a sus cimientos, tales edificios pueden considerarse parcialmente aislados de las vibraciones del suelo cuando tiembla. De acuerdo con la práctica actual de diseño de terremotos, estas características pueden ser deseables. Por ejemplo, debido a que las fuerzas sísmicas que ocurren en un edificio son proporcionales a su peso, los materiales de construcción deben ser lo más livianos posible. Un edificio más ligero es más seguro que un edificio pesado similar.

La flexibilidad puede ser ventajosa a menos que un edificio esté ubicado en un suelo blando. Pero una desventaja de la flexibilidad es un mayor movimiento lateral durante un terremoto (Figuras 1 y 2). Esto significa más daño. En general, debe evitarse la flexibilidad. Las conexiones flexibles a los cimientos pueden ser ventajosas para reducir las fuerzas sísmicas, pero solo si se les impide a los edificios caerse de sus cimientos. El moderno sistema de aislamiento basal (artículo 23) que se recomienda para edificios importantes como hospitales incorpora flexibilidad lateral a nivel de cimentación.

Figura 1. Un edificio muy flexible durante la sacudida horizontal. Los materiales y métodos de construcción tradicionales se incorporan a un nuevo edificio tradicional indonesio.

Figura 2. La construcción tradicional en otra región de Indonesia da como resultado otro tipo de edificio que es flexible.

Desafortunadamente, las oportunidades para incorporar la sabiduría local en los nuevos edificios son muy limitadas. La razón principal es que, en comparación con el pasado, los edificios modernos son tan diferentes. Para empezar, la mayoría de los edificios nuevos utilizan materiales pesados, como mampostería y concreto armado (Figura 3). Los edificios también están diseñados para ser menos flexibles, con el fin de reducir los movimientos, daños y costos de reparación. Y finalmente, es difícil y costoso hacer que las conexiones entre un edificio y sus cimientos sean flexibles.

Figura 3. Construcción pesada convencional con concreto armado y mampostería, en este caso, es una edificación de mampostería confinada.

En teoría, algunos principios sugeridos por la sabiduría local pueden mejorar la seguridad contra terremotos, pero debido a cómo los edificios de hoy se construyen de manera tan diferente, la mayoría de los principios no se pueden aplicar directamente. La única excepción es construir con materiales más ligeros, en lugar de más pesados.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros ante los sismos. Tales artículos están orientados para potenciales propietarios de casas nuevas, edificaciones más grandes y otros involucrados con la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica

(http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos serán traducidos y el contenido podría ser modificado por expertos locales para ajustarse a las condiciones locales.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 10. Paredes de relleno y cómo éstas afectan a los edificios durante los terremotos

Las paredes de relleno son las paredes de mampostería que cubren el área entre columna y columna y por debajo de las vigas. Estas son construidas después de que las vigas y columnas de concreto han sido fundidas o coladas. Las paredes de relleno son comunes en edificios cuya resistencia a los terremotos se basa en marcos estructurales formados por vigas y columnas. Los marcos de concreto reforzado que contienen paredes de relleno pueden parecer similares a la construcción de mampostería confinada (Artículo 7), pero estos son dos sistemas completamente diferentes.

Las paredes de relleno son construidas con unidades de mampostería de arcilla o concreto (ladrillos/blocks) colocadas con mortero de cemento o cemento y cal. Aún si tuvieran pequeñas ventanas, las paredes de relleno son usualmente más rígidas y resistentes contra el movimiento horizontal de los sismos que la estructura principal. En algunos casos las paredes de relleno reducen el daño de los terremotos, pero a menudo lo empeoran.

Cuando un marco de vigas y columnas se enfrenta a la sacudida de un sismo, todos sus elementos se flexionan y la estructura se mueve lateralmente (Figura 1a). Sin embargo, si las aberturas del marco se rellenan, ese relleno restringe la flexión de las columnas y las vigas. Esa pared de relleno experimenta grandes fuerzas de compresión diagonal. También se forman grietas diagonales. Las fuerzas de compresión aplican presión sobre los extremos superiores e inferiores de las columnas, usualmente causando daño en esas áreas (Figura 1b). Las grietas diagonales aumentan la vulnerabilidad de las paredes de relleno con relación al movimiento perpendicular a la pared. Partes o, aún, paredes enteras pueden caer de los edificios (Figura 2). Para obtener más información haga una búsqueda de imágenes en línea sobre “masonry infill earthquake damage”.

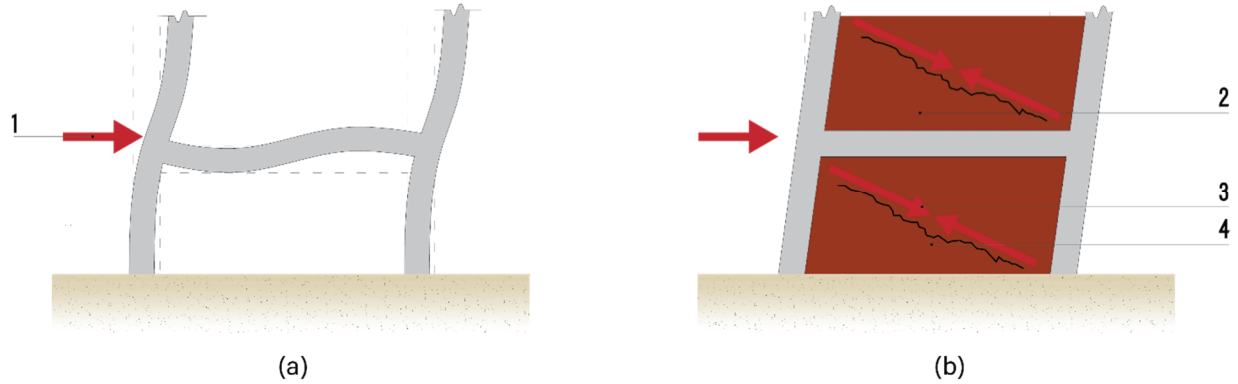


Figura 1. (a) Elevación de un marco de vigas y columnas con sus espacios vacíos que se está flexionando hacia los lados en un sismo (1). (b) muestra cómo la pared de relleno (2) evita la flexión, generándose un puntal en diagonal a compresión (3) y agrietamiento diagonal (4).

Figura 2. Paredes de relleno dañadas por un sismo, algunas de las cuales han caído hacia afuera del edificio.

Las paredes de relleno pueden mejorar la seguridad contra sismos de un edificio, pero solamente si las siguientes condiciones se cumplen. Las paredes de relleno que actúan a lo largo del edificio deben estar simétricamente colocadas en planta, y deben ser continuas desde el primero hasta el último nivel. También, éstas deben estar reforzadas contra la sacudida perpendicular a su plano, como se indica posteriormente. Estos mismos requerimientos deben ser aplicados para paredes de relleno colocadas a lo ancho del edificio. Finalmente, las columnas y vigas, así como las mismas paredes de relleno, necesitan estar diseñadas por ingenieros civiles calificados.

Cuando esas condiciones no se cumplen, las paredes de relleno se dañan y causan daños serios a las columnas colindantes. Las alternativas para su diseño sismorresistente son limitadas. Por mucho, la mejor alternativa es substituir el relleno de mampostería por un material incombustible, de peso ligero y más flexible, como los tableros de yeso. Alternativamente, se pueden usar cortinas de vidrio entre las paredes de relleno y las columnas, proveídas con holguras alrededor de todos los paneles de vidrio. Las pérdidas de vida y daños a la estructura principal son así prevenidos. Donde se requieren paredes sólidas, otra alternativa es separar las paredes de relleno de las vigas y columnas circundantes usando pequeñas juntas de separación que se llenan con un material compresible (Figura 3). Las juntas de separación permiten que las vigas y columnas se flexionen. Sin embargo, refuerzos o soportes de metal son requeridos para estabilizar a las paredes con respecto al movimiento perpendicular. Otra alternativa es colocar las paredes enfrente o atrás de las columnas, permitiendo que las columnas y las vigas se flexionen (Figuras 4 y 5).

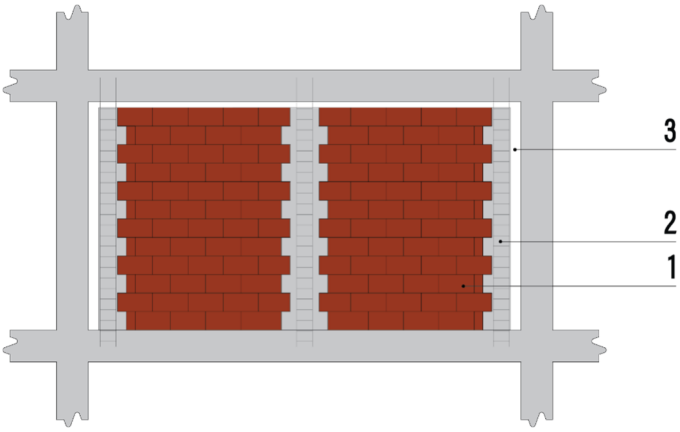


Figura 3. Una pared de relleno de mampostería (1), protegida contra el movimiento perpendicular a su plano mediante columnas intermedias (2) y separada de las columnas y vigas por pequeñas juntas de separación (3) posteriormente llenados con un material suave y recubiertas con tapajuntas.

Figura 4. Ejemplo de una columna intermedia usada para estabilizar una pared de mampostería (S. Brzev)

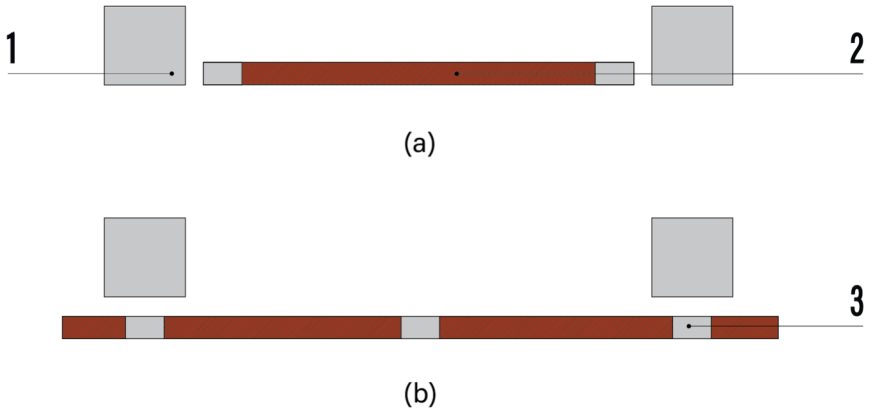


Figura 5. (a) Vista en planta de las columnas (1) a ambos lados de una pared de relleno (2) pero separadas de ésta, la cual tiene pequeñas columnas en sus extremos que le proveen estabilidad. En (b) la pared de mampostería con columnas estabilizantes (3) ha sido desplazada hacia un lado de las columnas estructurales con el propósito de no impedir que estas se flexionen.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros ante los sismos. Tales artículos están orientados para potenciales propietarios de casas nuevas, edificaciones más grandes y otros involucrados con la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos serán traducidos y el contenido podría ser modificado por expertos locales para ajustarse a las condiciones locales.

Referencias:

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, pp. 159-168.

Infilled frame. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model. https://taxonomy.openquake.org/terms/infilled-frame.

Murty, C. V. R., et al., 2006. At risk: the seismic performance of RC frame buildings with masonry infill walls. California, World Housing Encyclopedia. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/05/RCFrame_Tutorial_English_Murty.pdf (consultado el 8 June 2020).

Semnani, S. J., Rodgers, J. E., and Burton, H. V., 2014. Seismic Design Guidance for New Reinforced Concrete Framed Infill Buildings. Geohazards International. https://4649393f-bdef-4011-b1b6-9925d550a425.filesusr.com/ugd/08dab1_5710341c7b304eef9d79bfd50efe839a.pdf (consultado el 8 June 2020).

Edificios Sismorresistentes

Artículo 11. Una debilidad estructural frecuente que debe ser evitada: Piso blando.

Compare los dos edificios de la Figura 1. Las columnas y vigas de ambos edificios son lo suficientemente fuertes como para soportar su peso, la que es una fuerza hacia abajo. Pero ¿cómo se compara el comportamiento de los edificios cuando ocurren fuerzas laterales? Los vientos causan fuerzas laterales, pero las fuerzas más severas ocurren durante un terremoto cuando el suelo sacude los edificios de un lado a otro en todas las direcciones horizontales.

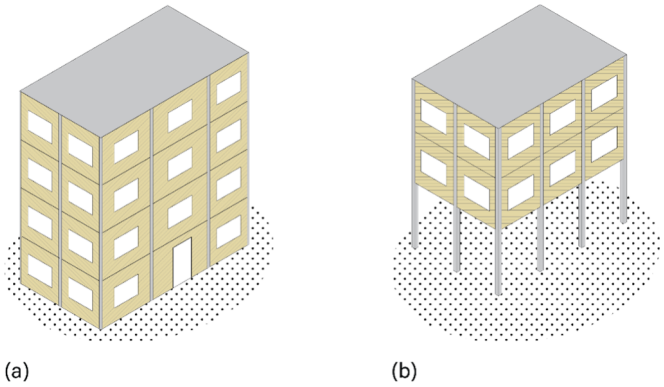


Figura 1. 1En el edificio (a) el relleno exterior e interior y las paredes divisorias están en cada piso, pero en (b) estas paredes están ausentes en la planta baja. La planta baja está abierta.

El primer edificio (Figura 1a) es relativamente fuerte contra las fuerzas horizontales. En cada piso, una combinación de columnas y vigas de hormigón armado, junto con paredes de relleno y divisorias, trabajan juntas para resistir las fuerzas sísmicas horizontales. Cada piso parece tener una resistencia similar. Sin embargo, en total contraste, el segundo edificio (Figura 1b) carece de paredes de refuerzo en la planta baja. Quizás este piso se utiliza como estacionamiento. Este nivel, entonces, es mucho más débil que los niveles superiores. Idealmente, el piso más bajo o los pisos inferiores de un edificio deberían ser más fuertes que los de arriba. Considere la forma del tronco de un árbol (Figura 2). La mayoría de los troncos son más fuertes a nivel del suelo porque es ahí donde los esfuerzos son más grandes durante los vientos más intensos. Los edificios deben seguir el mismo principio y ser más fuertes en el nivel inferior.

Figura 22. La mayoría de los troncos de los árboles son más fuertes a nivel del suelo.

Cuando el segundo edificio (Figura 1b) es sacudido por un terremoto, el daño ocurre en el área más débil. En este caso, se trata de las columnas de la planta baja (Figura 3). Las columnas se doblan hacia los lados y, en el proceso, se dañan. A menudo, la magnitud del daño produce que las columnas ya no pueden soportar el peso del edificio. Las columnas fallan y el edificio se derrumba. El piso más bajo se aplasta totalmente. Tal vez algunos pisos superiores también sufran el mismo daño. En este caso, la pérdida de vidas es inevitable.

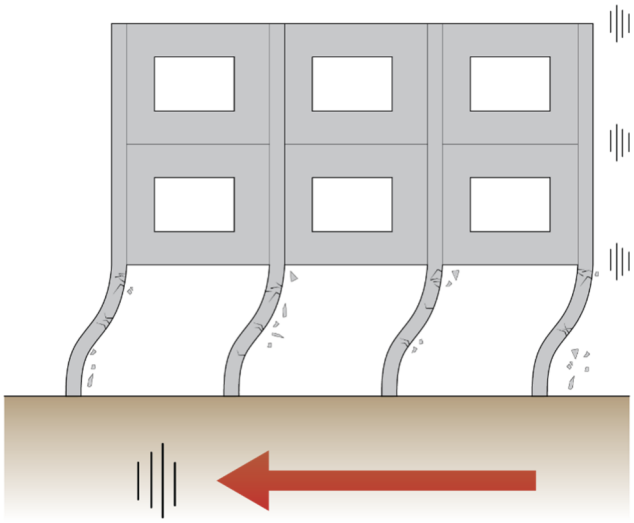


Figura 3. Las columnas en un piso blando se doblan excesivamente y sufren graves daños.3

Los pisos blandos o débiles casi siempre ocurren durante terremotos fuertes (Figura 4). Los lectores pueden buscar en Internet "edificios con piso blando" y encontrarán muchas otras imágenes. Sin embargo, la buena noticia es que este tipo de daño es prevenible. Siempre que los ingenieros y arquitectos sigan los códigos de diseño locales y las pautas de buenas prácticas durante el diseño y la construcción de nuevos edificios, el efecto de piso blando puede evitarse. Para obtener más información, consulte "Referencias".

Figura 4. Este edificio con piso blando perdió su planta baja durante un terremoto moderado (N. Vesho).4

¿Qué pasa con un edificio existente con un piso blando (Figura 5)? Es posible mejorar su rendimiento sísmico. Algunas ciudades de todo el mundo han comenzado programas de reforzamiento sísmico. Sin embargo, el proceso de reforzamiento puede implicar la inserción de nuevos sistemas estructurales, como marcos arriostrados o paredes estructurales. A menudo este proceso es difícil para el contratista e inconveniente para los ocupantes y puede ser costoso. Es preferible evitar pisos blandos en las nuevas construcciones mediante una buena colaboración entre el arquitecto y el ingeniero civil, y luego el cuidadoso diseño del ingeniero civil producirá poco o ningún costo adicional.

Figura 5. Un típico edificio de piso blando donde la planta baja es la más débil.5

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros ante los sismos. Tales artículos están orientados para potenciales propietarios de casas nuevas, edificaciones más grandes y otros involucrados con la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos serán traducidos y el contenido podría ser modificado por expertos locales para ajustarse a las condiciones locales.

Referencias:

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, págs. 144 y 148.

Murty, C. V. R., 2005. Why are Open-Ground Storey Buildings Vulnerable in Earthquakes? Earthquake Tip 21. IITK-BMTPC "Learning earthquake design and construction", NICEE, India. http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip17.pdf (consultado el 5 de mayo de 2020).

Soft Storey. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model. https://taxonomy.openquake.org/terms/soft-storey-sos#.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 12. Una debilidad estructural frecuente que debe ser evitada: Pared discontinua

Para los edificios que utilizan paredes para resistir la sacudida de los sismos, es de vital importancia que las paredes se eleven verticalmente desde los cimientos del edificio y continúen sin interrupciones hasta el nivel del techo. Este principio, de continuidad de las paredes, se aplica independientemente del material de construcción, ya sea hormigón armado o mampostería. También se aplica incluso si las paredes son paredes de relleno y no son elementos estructurales primarios. La resistencia y rigidez de las paredes de relleno significa que en gran medida actúan como miembros estructurales, aún si esto no es el propósito de los diseñadores.

Hay dos tipos principales de diseños de pared discontinuas. El primero es donde un sistema formado de columnas y vigas tiene todos menos un piso con paredes de relleno (Figura 1a). Por lo general, el piso abierto está en la planta baja. Lo más probable es que este arreglo conduzca al efecto de piso blando durante un sismo intenso. El peligro del efecto de piso blando se discute en el artículo anterior, Artículo 11, de esta serie.

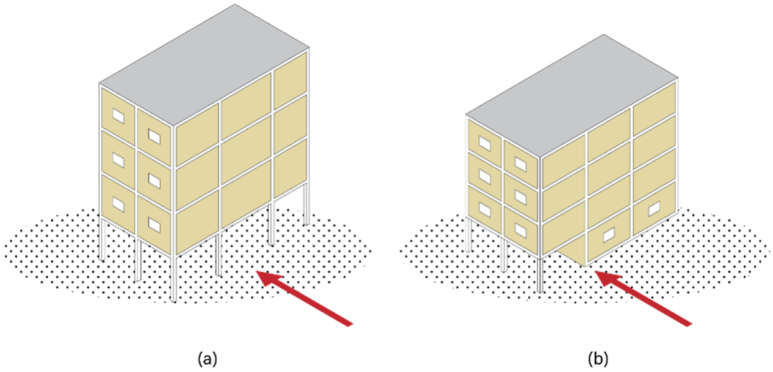


Figura 1. Dos tipos de paredes discontinuas. En (a) no hay rellenos en la planta baja, y en (b) la pared de relleno de la planta baja está desplazada en relación con la pared superior.1

El segundo tipo de paredes discontinuas ocurre cuando las paredes están desplazadas en planta (Figura 1b). Puede haber paredes de relleno en cada piso, pero a nivel del suelo la pared está desplazada hacia atrás en comparación con las paredes superiores. Por lo tanto, las paredes superiores se proyectan más allá de la pared más baja (Figura 2). Un desplazamiento crea una seria debilidad local en una pared, especialmente cuando trata de resistir las fuerzas sísmicas horizontales. Una pared desplazada es como un árbol torcido (Figura 3). Un fuerte viento probablemente romperá el árbol en la torcedura. A las fuerzas dentro de cualquier estructura no les gusta cambiar de dirección abruptamente. Entonces, ¿cómo superar este problema?

Figura 2. Edificios con paredes de relleno desplazadas se alinean en esta calle.2

Figura 3. Una torcedura en el tronco de un árbol introduce una debilidad local.3

El mejor enfoque es asegurarse de que una pared desplazada no sea estructural. Otros elementos estructurales dentro del edificio, como marcos de vigas y columnas, deben diseñarse para resistir las fuerzas sísmicas en la dirección paralela a la pared. En la etapa de diseño, la mampostería de cualquier pared desplazada propuesta debe reemplazarse por material liviano no combustible, como placas delgadas de cemento o cristal. Estos son demasiado débiles para actuar como elementos estructurales durante un terremoto. Alternativamente, separe cualquier muro de mampostería desplazado de su marco estructural para evitar que el muro funcione como estructura (véase el artículo 10).

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros contra los terremotos. Están destinados a propietarios potenciales de casas nuevas y edificios más grandes y otros involucrados en la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos se traducen y el contenido puede ser modificado por expertos locales para adaptarse a las condiciones locales.

Referencias:

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, pp. 151-1 53.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 13. Una debilidad estructural frecuente que debe ser evitada: Columna corta

Cuando le corresponde soportar el peso de un edificio, una columna larga o alta, especialmente si su sección transversal es pequeña, puede ser problemática. Es susceptible a pandearse. Sin embargo, desde la perspectiva del diseño sismorresistente de edificios, las columnas cortas pueden causar una debilidad estructural crítica. Aunque no es tan peligrosa como un piso débil, las columnas cortas se desempeñan muy pobremente durante un sismo.

Las columnas cortas son mayormente generadas cuando las paredes de relleno en un edificio de columnas y vigas tienen una altura parcial (Figuras 1 y 2). Un término alternativo y más preciso para "columna corta" es "columna cautiva". Esto es porque, durante un sismo y su correspondiente movimiento horizontal hacia uno y otro lado, la parte baja de la columna es mantenida cautiva por las paredes de relleno de altura parcial. Estas evitan que la columna se flexione hacia los lados como una columna normal lo hace. Así, todo el movimiento horizontal se da en la pequeña altura de la columna que no está restringida por la pared de relleno. ¡Este es el problema!

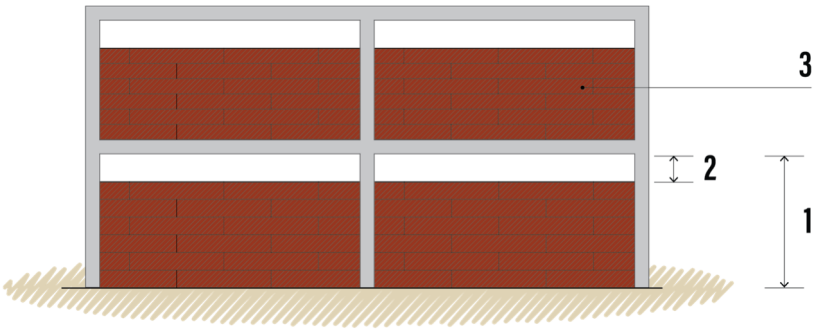


Figura 1. Elevación de un edificio con columnas cortas. En lugar de tener la capacidad de flexionarse a lo largo de toda su altura (1), la flexión es confinada a la altura de las ventanas (2) debido a la influencia de las paredes de relleno (3).

Figura 2. Columnas de altura normal han sido acortadas desde el punto de vista de resistencia a las fuerzas horizontales por paredes de relleno de altura parcial.

Las columnas normales que no están afectadas por paredes de relleno son capaces de flexionarse hacia los lados de manera flexible durante un sismo. En el proceso de flexionarse, las columnas desarrollan fisuras que no resultan peligrosas. Sin embargo, si una columna está parcialmente restringida por paredes de relleno, el movimiento que normalmente ocurriría a todo lo alto del piso en la columna se concentra en la "columna corta" arriba de la pared de relleno (Figura 3). No solamente tal movimiento horizontal sobre una distancia vertical corta causa daños estructurales severos, sino también una columna corta es demasiado rígida para flexionarse. En vez de eso, simplemente se rompe bajo una acción cortante. Se parte como una zanahoria. Se forman grietas diagonales en la columna y concreto triturado cae del área dañada (Figura 4). El edificio cae y, eventualmente, requiere ser demolido. Muchas imágenes de este tipo de daño pueden ser vistas en línea al buscar "efecto de columna corta".

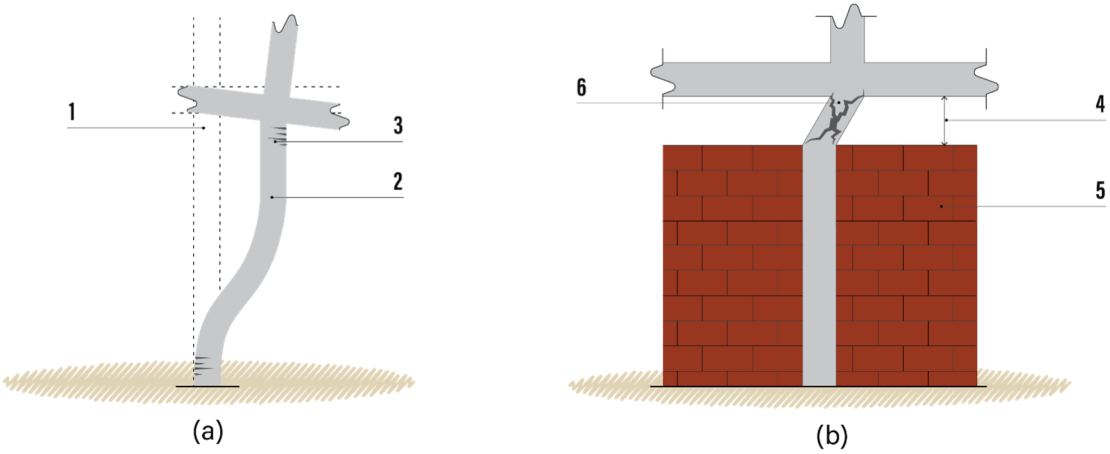


Figura 3. (a) Durante un sismo (1) una columna de altura normal se flexiona (2) al desplazarse horizontalmente. En este proceso la columna se fisura (3), pero aún se mantiene resistente. En (b) una ventana alta (4) y paredes de relleno de mampostería (5) causan serias fracturas diagonales en la columna corta que conducen a que la columna se desintegre.

Figura 4. Columnas cortas dañadas por un sismo.

Existen varios métodos para evitar las columnas cortas. En el primero, las longitudes de las ventanas son reducidas para que sus extremos queden bastante lejanos de la parte alta de las columnas. En segundo, las paredes de relleno se construyen con un material incombustible y liviano, como las tablas de yeso. Éste es muy débil para restringir la parte baja de la columna que entonces se puede flexionar normalmente. Finalmente, si paredes de relleno de mampostería son requeridas, entonces es necesario que estas estén físicamente separadas de las columnas mediante angostas juntas de separación verticales. Estas juntas de separación requieren de tratamientos para asegurar su impermeabilidad. Ganchos de acero son requeridos para estabilizar las paredes de relleno para que estas, durante la sacudida de un sismo, no caigan hacia afuera o hacia adentro del edificio (Figura 5).

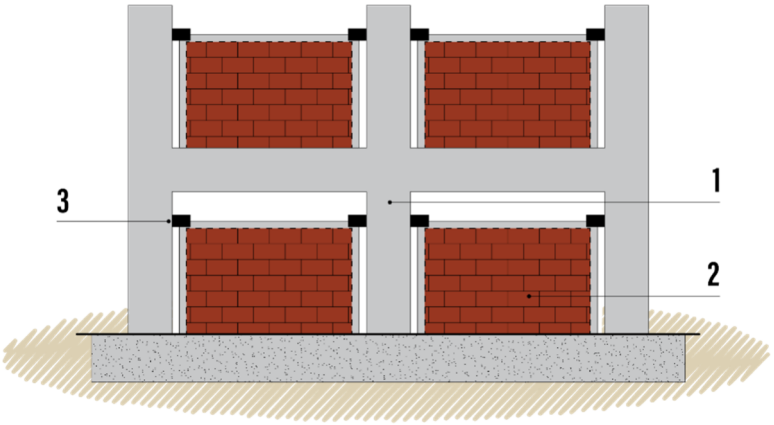


Figura 5. Marco de concreto reforzado con potenciales columnas cortas (1) y paredes de relleno de mampostería (2) confinadas con columnas y vigas de amarre en sus perímetros. Las paredes de relleno están separadas del marco mediante juntas de separación, pero están restringidas en sus esquinas superiores mediante ganchos de acero atornillados a las columnas (3). Los ganchos permiten el movimiento paralelo a las paredes entre estas y las columnas, pero previenen que las paredes caigan del edificio durante un sismo.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros ante los sismos. Tales artículos están orientados para potenciales propietarios de casas nuevas, edificaciones más grandes y otros involucrados con la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos serán traducidos y el contenido podría ser modificado por expertos locales para ajustarse a las condiciones locales.

Referencias:

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, pp. 148-151.

Murty, C. V. R., 2005. Why are Short Columns more Damaged During Earthquakes? Earthquake Tip 22. IITK-BMTPC “Learning earthquake design and construction”, NICEE, India. http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip17.pdf (accessed 5 May 2020).

Short Column. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model. https://taxonomy.openquake.org/terms/short-column-shc.

Video: Captive column by Cale Ash, Academy of Earthquake Safety. https://www.youtube.com/watch?v=kRG3XwOvzuo.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 14. Evitando que un edificio se tuerza durante un sismo

Hasta cierto punto, todos los edificios se retuercen durante un terremoto. Torcer significa que cuando miras hacia abajo desde la parte superior de un edificio, éste gira ligeramente. El terremoto no solo hará que los edificios se retuerzan, sino que la torsión se vuelve más severa si la estructura de un edificio no es simétrica en comparación con el área general del edificio (Figura 1a).

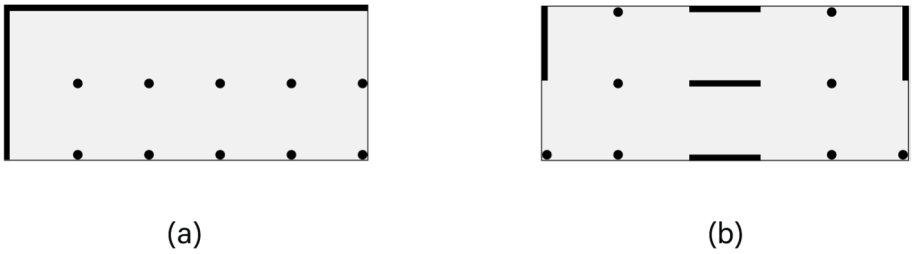


Figura 1. Planos de la planta baja de dos edificios. En (a) la fuerza sísmica en cada dirección será resistida por una pared en el lado del edificio que no es simétrica respecto al área del edificio. Este edificio se torcerá fuertemente durante un terremoto. En (b) las paredes en cada dirección están ubicadas simétricamente. La torsión será mínima.

Para entender el problema, pruebe este experimento. Usa tu cuerpo para apreciar lo que experimenta un edificio. Entonces, primero, párese erguido y extienda los brazos horizontalmente. Luego, gire la cabeza y los hombros, primero en una dirección y luego en la otra (Figura 2). Puedes sentir tu cuerpo retorciéndose y experimentando torsión.

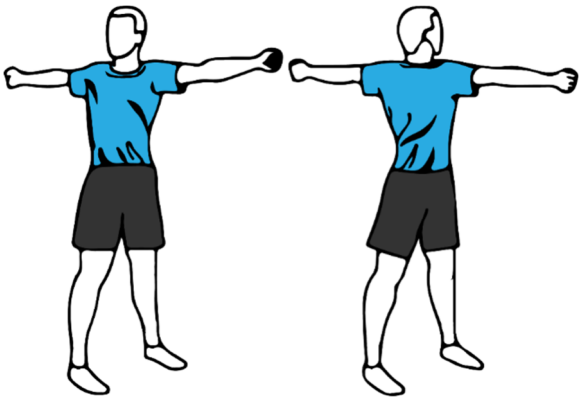


Figura 2. Torciendo tu cuerpo para experimentar el efecto de torsión.

Cuando giras tu cuerpo, notas que tanto se mueven tus manos en comparación con, digamos, tus oídos. A continuación, imagine que tu cuerpo es un núcleo estructural o una torre que soporta un edificio mucho más grande (Figura 3) cuya longitud se extiende hasta los extremos de sus dedos. Imagine varias columnas a lo largo de cada brazo que sostienen los pisos de tu "edificio". Ahora, cuando tú y tu edificio se tuercen, las columnas más alejadas del núcleo se mueven mucho hacia los lados. Y cuando se mueven lateralmente de forma excesiva, se dañan seriamente en el proceso y tal vez ya no sean capaces de soportar el peso del edificio.

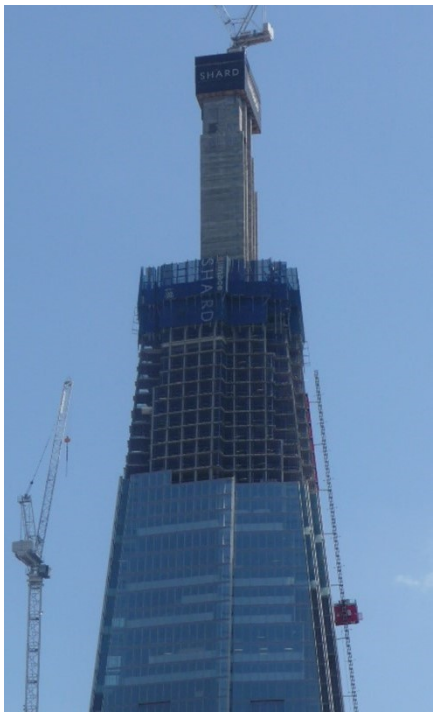


Figura 3. Un ejemplo de un núcleo de concreto reforzado en un edificio en construcción.

Los diseñadores estructurales, ingenieros civiles y arquitectos tienen dos formas de controlar la torsión y reducir el daño en las columnas. Primero, ubican los muros de carga u otra estructura vertical como lo son los marcos de columnas y vigas razonablemente simétricamente sobre el plano de planta (Figura 1b). En segundo lugar, en ambas direcciones horizontales, a lo largo y ancho de un edificio, proporcionan al menos dos elementos estructurales verticales fuertes bien separados entre sí. Si estos dos elementos están ubicados en el perímetro del edificio, en ambos extremos y en ambos lados, se vuelven más efectivos para controlar la torsión. Evitan el movimiento lateral excesivo de las columnas y los daños graves posteriores (Figura 4).

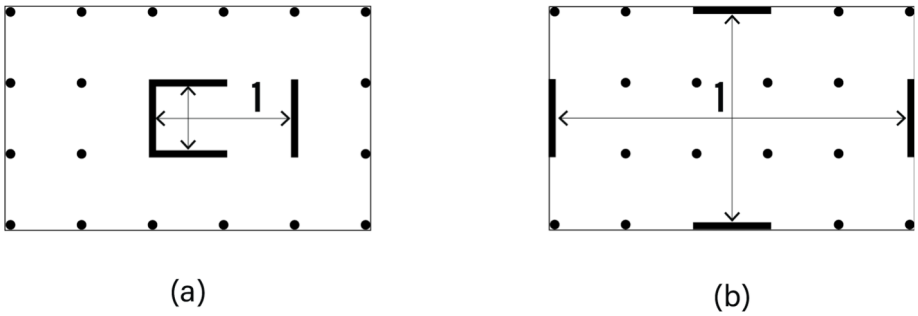


Figura 4. Planos de la planta baja de dos edificios. En (a) las fuerzas sísmicas en cada dirección, a lo largo y ancho del edificio, son resistidas por dos paredes ubicadas con cierta simetría. Las paredes están separadas (1) pero no por mucho. Sin embargo, en (b) las paredes que actúan en cada dirección tienen una separación máxima (1) y por lo tanto proporcionan el mejor control de la torsión.1

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros contra los terremotos. Están destinados a propietarios potenciales de casas nuevas y edificios más grandes y otros involucrados en la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos se traducen y el contenido puede ser modificado por expertos locales para adaptarse a las condiciones locales.

Referencias:

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, págs. 128 y 132.

Murty, C. V. R., 2005. How Buildings Twist During Earthquakes?: Earthquake Tip 7. IITK-BMTPC "Learning earthquake design and construction", NICEE, India. http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip07.pdf (consultado el 5 de mayo de 2020).

Torsion eccentricity. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model. https://taxonomy.openquake.org/terms/torsion-eccentricity-tor.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 15. ¿Por qué los edificios se golpean entre sí durante los sismos?

¿Alguna vez has viajado en transporte público lleno de gente, tal vez un autobús o un tren? Es posible que estés parado cerca de los demás pero sin tocarlos. Sin embargo, cuando el autobús cambia de velocidad o dirección, todos se mueven, lo que hace que te topes con el pasajero que está a tu lado.

Algo así sucede durante los terremotos. Cuando el suelo tiembla, los edificios amplifican el temblor. Pero los edificios no se sacuden juntos, o en fase. Cada edificio es diferente y se mueve de manera diferente durante un terremoto. Cada edificio tiene diferentes frecuencias de vibración a las que resuena. Los movimientos de ida y vuelta se intensifican de manera diferente para cada edificio, aumentando a lo largo de la altura de cada edificio.

Si los edificios se construyen demasiado juntos o uno contra el otro, cuando el suelo tiembla, cada edificio vibra de manera diferente. Los edificios golpean a sus vecinos, a veces causando graves daños (Figuras 1 y 2). Una búsqueda en línea de imágenes de "golpeteo de edificaciones por sismos", revela muchos casos de daños por este tipo de golpes durante varios terremotos en todo el mundo.

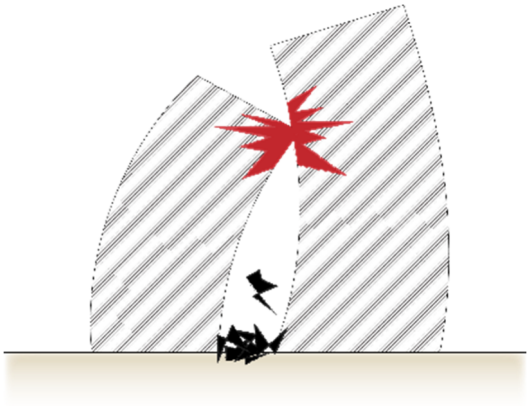


Figura 1. Dos edificios con una separación sísmica insuficientemente golpeándose entre sí durante un terremoto.1

Figura 2. Dos edificios se han golpeado entre sí resultando uno mucho más dañado que el otro.2

La solución para evitar este golpeteo entre edificios nuevos es sencilla: es construir más atrás de los límites de propiedad, excepto a lo largo de la fachada que da hacia la calle. Las separaciones en los lados y la parte posterior de su edificio deben ser lo suficientemente anchas para que durante un terremoto su edificio no se mueva más allá de su límite de propiedad y se estrelle contra los edificios de sus vecinos (Figura 3). Las disposiciones relacionadas a estas separaciones es una práctica estándar en muchas ciudades del mundo.

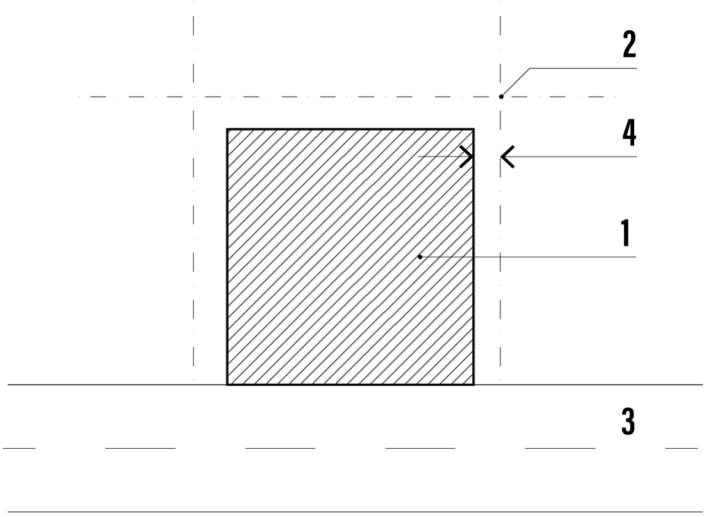


Figura 3. El plano de un edificio (1) dentro de sus límites (2) y en una calle (3). En tres lados, el edificio está construido detrás de los límites respetando el ancho de una separación sísmica (4).3

¿Qué tan amplias deben ser estas separaciones o juntas, generalmente denominadas "juntas de separación sísmica"? Depende de la altura del edificio y su flexibilidad. Para el edificio más flexible permitido por los códigos sísmicos, el límite es aproximadamente el 2% de la altura del edificio. Para un edificio de cuatro pisos, esto es de aproximadamente 240 mm. Una junta sísmica más reducida es factible si el ingeniero civil diseña un edificio más rígido; por ejemplo, con columnas y vigas más grandes, o paredes estructurales más largas. Cuando los edificios adyacentes están cerca, los huecos se cubren con tapajuntas flexibles (Figuras 4 y 5).

Figura 4. Dos edificios separados por una junta sísmica cubierta por un tapajuntas flexible4.

Figura 5. Un primer plano de la tapajunta que cubre la junta sísmica.5

Es muy difícil evitar los golpes entre edificios existentes que tienen espacios de separación estrechos o inexistentes durante un terremoto fuerte. Si los niveles de piso de los edificios adyacentes están a la misma altura, el golpeteo de las losas del piso entre sí es menos grave que cuando los pisos de los edificios adyacentes no están al mismo nivel. En este caso, las losas del piso de un edificio pueden dañar seriamente las columnas adyacentes del otro edificio. Una solución es proporcionar nuevas columnas como "respaldo" en caso de que las columnas exteriores y más vulnerables estén dañadas.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros contra los terremotos. Están destinados a propietarios potenciales de casas nuevas y edificios más grandes y otros involucrados en la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos se traducen y el contenido puede ser modificado por expertos locales para adaptarse a las condiciones locales.

Referencias:

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, págs. 137 y 139.

Pounding potential. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model. https://taxonomy.openquake.org/terms/pounding-potential-pop.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 16. Códigos y normas de construcción

El propósito de los códigos y normas de construcción es garantizar, en primer lugar, que su edificio sea seguro. En segundo lugar, que esté libre de defectos como deflexiones en vigas durante su vida útil, mientras que la utilización de los materiales sea de manera eficiente. Los códigos y estándares generalmente son producidos por equipos de expertos de universidades, ingenieros de la práctica, instituciones gubernamentales relacionadas con el ramo y contratistas. Los miembros de estos equipos se basan en su propia investigación y experiencia (Figura 1). Además, revisan las más recientes experiencias y desarrollos en la materia producidos en el extranjero. Cuando es pertinente a las condiciones locales, estas experiencias y desarrollos se incluyen en los códigos (o normas) nuevos o actualizados. Cuando se publica, un código representa las recomendaciones más avanzadas para que una construcción sea segura, duradera y económica.

Figura 1. Columnas y vigas de hormigón armado a escala real que se prueban en un laboratorio.1

Sin embargo, como todas las industrias, la industria de la construcción experimenta cambios. Constantemente se desarrollan nuevos materiales, nuevas técnicas de construcción y nuevos enfoques de diseño (Figura 2). El cambio y la innovación surgen de los contratistas e investigadores. Esto significa que los códigos deben actualizarse regularmente. Si no, conducen a edificios inseguros y antieconómicos.

Figura 2. Este edificio contiene ejemplos innovadores del uso de hormigón prefabricado.2

Los códigos establecen estándares para mejorar los procedimientos de construcción. Sus reglas deben seguirse por su propio bien, suponiendo que usted es el propietario u ocupante del edificio, y por el bien de la comunidad en general. El incumplimiento de ciertas normas causa graves consecuencias. Considere, por ejemplo, lo que podría suceder en una situación en la que no se sigan los estándares. Imagine que un médico lo examina cuando está enfermo. Si el médico toma atajos durante el examen para ahorrar tiempo, como no medir la presión arterial o solicitar una radiografía, el diagnóstico podría ser incorrecto. En ese caso, los medicamentos recetados serán ineficaces y su enfermedad empeorará. Los códigos y normas te protegen.

Seguir los códigos es más importante cuando las situaciones son complejas y el conocimiento personal y la experiencia son limitados. Diseñar y construir un edificio para resistir terremotos es un ejemplo. Casi ningún ingeniero civil, arquitecto y constructor ha presenciado personalmente lo que sucede con los edificios durante un gran terremoto: cómo los daños se van incrementando, durante el evento, hasta que finalmente se derrumban. Tampoco la mayoría de los profesionales de la construcción han observado personalmente las pruebas de laboratorio científicas de elementos de construcción, como columnas y vigas, que están sujetos a movimientos sísmicos experimentales. Los códigos compensan la falta de experiencia personal, conocimiento y sabiduría con respecto a los terremotos. Seguir los códigos es la única manera de una construcción segura.

Los códigos proporcionan orientación en todas las etapas del diseño y la construcción de edificios (Figura 3). Los ingenieros civiles y arquitectos deben cumplir con ciertos estándares durante las fases de diseño y construcción. Los constructores deben asegurarse de que los materiales y métodos de construcción también sigan los estándares. Seguir las normas es para su beneficio. Si se cometen errores o se toman atajos, es poco probable que su edificio sea seguro en caso de terremotos. Siempre se deben seguir los códigos y normas.

Figura 3. Los cimientos de un edificio en construcción. Los ingenieros han seguido los códigos para determinar la cantidad de acero de refuerzo y su ubicación correcta.3

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros contra los terremotos. Están destinados a propietarios potenciales de casas nuevas y edificios más grandes y otros involucrados en la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos se traducen y el contenido puede ser modificado por expertos locales para adaptarse a las condiciones locales.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 17. Qué buscar en las regulaciones de construcción

Las regulaciones de construcción (por ejemplo, códigos y estándares de construcción) son las reglas para la construcción. Nos protegen a nosotros y a los demás. Producen un entorno construido seguro y saludable. Están destinados a garantizar edificios seguros para vivir, trabajar, comprar y adorar. Las regulaciones reflejan que los edificios pueden diseñarse para ser seguros ante los terremotos y contienen reglas para lograr ese objetivo.

Entonces, ¿qué debemos esperar en las regulaciones de construcción? ¿Qué podría hacerlas más exitosas para lograr edificios seguros? Aquí hay cinco sugerencias:

1. **Reflejar nuestra situación y expectativas sociales:** Las regulaciones deben ser apropiadas para la sociedad en su conjunto, su situación cultural y económica y las expectativas de sus ciudadanos (Figura 1). Los niveles de las normas impuestas pueden no ser tan altos como los de los países de altos ingresos, pero, según lo acordado por una amplia gama de partes interesadas, las normas deben ser adecuadas a las condiciones locales tanto desde el punto de vista técnico y económico. También se necesitan códigos que aborden la práctica de construcción localmente prevalente en donde los profesionales no están involucrados, además la construcción tradicional, incluida la construcción incremental (Figura 2).

Figura 1. La gente espera vivir en edificios que son seguros ante los terremotos.1

Figura 22. Los códigos y su implementación son necesarios para mejorar la seguridad sísmica de este tipo de viviendas.

2. **Justas para todas las partes:** Es importante que las regulaciones sean justas para todos. No deben favorecer a ninguna parte fuera o dentro de la industria de la construcción, como los fabricantes de materiales de construcción que podrían beneficiarse de regulaciones específicas.
3. **Fáciles de acceder y claras de entender:** Las regulaciones de construcción deben ser de fácil acceso para el público y las partes interesadas en la industria de la construcción, como ingenieros civiles, arquitectos y constructores. También se requieren documentos accesibles con fines de formación y capacitación. Las regulaciones pueden estar disponibles en línea. También tienen que ser claras. Los lectores deben ser capaces de entender e interpretar los requisitos de las regulaciones. El objetivo es la apertura y la transparencia.
4. **Respuesta a las circunstancias cambiantes y la nueva información:** Aunque la industria de la construcción cambia más lentamente que algunas industrias, como las Tecnologías de Información, las regulaciones de construcción aún deben mantenerse actualizadas. De lo contrario, sofocan la innovación y reducen las oportunidades de prácticas de construcción más asequibles y eficientes. Además, las prácticas de construcción que investigaciones recientes consideran inseguras necesitan ser mejoradas. Las regulaciones de construcción deben reflejar el conocimiento actual, la capacidad técnica y la práctica de la industria de construcción (Figura 3).

Figura 3. Las regulaciones de construcción deben especificar formas seguras pero prácticas de usar nuevos materiales, como estos bloques livianos.3

5. **Son parte de procesos regulatorios más amplios:** Las regulaciones de construcción necesitan un respaldo legal y administrativo. La adopción de regulaciones requiere tanto educación como cumplimiento. La educación de todas las partes interesadas con respecto a los edificios sismorresistentes necesita aportes de los proveedores de educación en todos los niveles de la industria de la construcción, así como de las sociedades profesionales. Las instituciones relacionadas a la construcción pueden ayudar, pero su función principal es hacer cumplir las regulaciones de una manera rentable, eficiente y transparente.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros contra los terremotos. Están destinados a propietarios potenciales de casas nuevas y edificios más grandes y otros involucrados en la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos se traducen y el contenido puede ser modificado por expertos locales para adaptarse a las condiciones locales.

Referencias:

Hoover, C. A. y Greene, M. eds, 1996. Construction quality, Education, and Seismic Safety. EERI, Oakland, Estados Unidos, 68pp.

Moullier, T., 2015. Building regulation for resilience: managing risks for safer cities. Word Bank Group y GFDRR, Washington, EE.UU. 136 págs. https://www.preventionweb.net/publications/view/48493 (consultado el 23 de abril de 2020).

Edificios Sismorresistentes

Artículo 18. Qué esperar de un edificio diseñado de acuerdo con los códigos

Para que un edificio sea seguro ante los terremotos, debe diseñarse y construirse de acuerdo con los códigos locales. Si no, entonces el edificio podría ser severamente dañado o colapsar en un terremoto de moderado a grande. Sin embargo, incluso si un edificio cumple plenamente con los códigos de construcción, aún puede sufrir daños graves. Las razones que se explican a continuación disipan la creencia de que un edificio que cumple con el código no sufrirá ningún daño ante un evento sísmico.

La primera razón por la que un edificio que cumple con el código sufrirá daños en un gran terremoto es que los códigos establecen estándares mínimos. Si un edificio cumple con estos estándares, se considera seguro, pero definitivamente no saldrá sin ningún daño después de un terremoto. Los redactores de los códigos consideran que la sociedad no puede darse el lujo de apuntar demasiado alto cuando se proporciona protección contra los sismos. Por lo tanto, un edificio no está diseñado para el peor de los casos porque tal evento tiene una probabilidad muy baja de ocurrir durante la vida útil de un edificio. Más bien, un edificio está diseñado para un terremoto más pequeño que generalmente tiene un diez por ciento de probabilidades de ocurrir durante un período de cincuenta años. Por lo tanto, en la actualidad, los códigos tienen como objetivo principal salvar vidas y reducir las lesiones, en lugar de proteger el edificio en sí. Esto significa que durante un gran terremoto, un edificio que cumpla con el código no debe colapsar, sino que sufrirá daños graves que podrán o no repararse económicamente.

En segundo lugar, para reducir el costo adicional de construir edificios muy fuertes que no se dañen durante un terremoto, los códigos permiten a los ingenieros diseñar para una fracción de las fuerzas sísmicas probables. Esto significa que aunque el daño a las columnas, vigas y paredes es inevitable, por el contrario, están diseñados para no romperse y colapsar repentinamente. Los ingenieros hablan de diseñar "fusibles estructurales", especialmente en las vigas (Figura 1). Al igual que los fusibles en los circuitos eléctricos protegen a los componentes electrónicos sensibles, los fusibles estructurales en lugares no críticos, como al final de las vigas, protegen los miembros estructurales más críticos, como las columnas. Si las estructuras de los edificios se diseñasen para evitar daños, por lo general deberían ser hasta cinco veces más fuertes. Esto significa columnas y vigas que son considerablemente más grandes de lo habitual.

Figura 11. Un edificio en construcción con una columna a la izquierda y una viga de acero conectada a ella. Observe cómo la placa inferior (patín) de la viga cerca de la columna se ha reducido en tamaño. Esta zona ha sido

debilitada deliberadamente para que se produzca el "fusible estructural" en un gran terremoto. El acero en esta región se estirará, pero no se romperá.

Finalmente, un edificio que cumpla con el código sufrirá daños en el revestimiento y las paredes divisorias, así como en los objetos dentro de él, incluido el equipo mecánico. Durante un terremoto, los pisos y el techo tiemblan de un lado a otro. Estos movimientos dañan las paredes de ladrillo repellado a menos que las paredes hayan sido diseñadas con mucho cuidado, y también botan elementos al interior de la edificación como electrodomésticos y artículos pequeños (Figura 2).

Figura 2. Un ejemplo de un edificio dañado por un terremoto donde las paredes de relleno no han sido cuidadosamente diseñadas para soportar fuerzas y movimientos durante un terremoto.2

Los códigos tratan de lograr un equilibrio entre la probabilidad que ocurra un gran terremoto y el costo y otras implicaciones de diseñar para soportar ese evento. Los códigos especifican normas mínimas basadas en el tipo de edificio. Los hospitales deben diseñarse con un estándar más alto que los edificios de oficinas, por ejemplo. Dado que los códigos especifican estándares mínimos, un cliente puede solicitar que un edificio se diseñe para mejorar su desempeño. Esto podría implicar una estructura más fuerte y generalmente más grande, o incluir sistemas especiales resistentes a terremotos como el aislamiento basal (véase el artículo 23). Esta tecnología, que se ha incorporado en varios edificios en muchas regiones del mundo (Figuras 3 y 4), se utiliza cada vez más en edificios importantes, como hospitales. Es un poco más caro, pero es la única forma de garantizar que dichos edificios estén operativos inmediatamente después de un terremoto y evitar daños graves.

Figura 33. El Hotel Ibis, que es una estructura aislada basalmente, se ubica en Padang, Indonesia

Figura 4. Un aislador, formado de caucho circular que contiene muchas placas de acero delgadas, se encuentra entre la parte inferior de cada columna y sus cimientos para aislar el edificio de los movimientos sísmicos horizontales.4

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros contra los terremotos. Están destinados a propietarios potenciales de casas nuevas y edificios más grandes y otros involucrados en la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos se traducen y el contenido puede ser modificado por expertos locales para adaptarse a las condiciones locales.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 19. La importancia de los controles durante el diseño de edificios

La gente comete errores. La mayoría de los errores no tienen consecuencias graves, pero algunos sí. Los errores surgen de muchas fuentes. Pueden ser involuntarios, como por falta de cuidado o concentración, o tal vez debido a una falta de comprensión. Algunos errores son intencionales. Las personas toman atajos, no siguen planes o usan materiales inferiores para obtener ganancias financieras. En la industria de la construcción, los errores pueden costar vidas, especialmente durante un terremoto dañino. Un error cometido durante el proceso de diseño o durante la construcción puede no aparecer de inmediato. Pero ese defecto puede marcar la diferencia entre que un edificio permanezca en pie o se derrumbe durante un terremoto (Figura 1).

Figura 11. Un daño severo durante un terremoto podría ocurrir si faltan varias barras de refuerzo de este muro de concreto armado.

Algunas industrias, en un intento por reducir los errores y aumentar la seguridad, implementan un sistema de controles. Las aerolíneas son un buen ejemplo. Lea la descripción del trabajo de un copiloto y verá que la verificación es una parte importante del trabajo. Hay tantos aspectos de volar que necesitan ser revisados. Si se pierde un aspecto, digamos los requisitos de combustible, el resultado puede ser catastrófico. Las listas de verificación son una herramienta crucial para garantizar la seguridad.

A ninguno de nosotros nos gusta que otros revisen nuestro trabajo, pero este proceso es necesario, especialmente cuando los errores pueden ser peligrosos. El diseño y la construcción de edificios es una de esas áreas. Si bien es relativamente sencillo para un ingeniero civil diseñar un edificio para resistir las fuerzas ordinarias del día a día, es más difícil diseñar para los movimientos durante un gran terremoto. Se requiere un mayor nivel de conocimiento, comprensión y experiencia y los errores son más probables. Se necesita alguna forma de verificación, independiente del

diseñador original. Los cálculos, planes y especificaciones deben verificarse para garantizar que cumplan con los códigos y estándares locales (Figura 2).

Figura 2. Durante el diseño y la construcción, estos muros de hormigón armado fueron revisados por ingenieros para garantizar que el diseño estructural fuera sólido y que la construcción estuviera de acuerdo con los planes. 2

Pregúntele a su ingeniero civil qué verificaciones se han realizado. ¿El trabajo ha sido verificado independientemente por una persona calificada en la misma empresa, o incluso mejor, por un ingeniero en otra empresa? Si no, debería serlo, aunque Ud., como dueño de la obra, pagará por ello. Después de este proceso de revisión, los documentos de construcción están listos para solicitar el permiso de construcción. Incluso si la institución pública encargada en el ramo de construcción no realiza una verificación técnica de seguridad antes de emitir un permiso de construcción, puede estar razonablemente seguro que el edificio será sismorresistente siempre y cuando se cumplan los cálculos, planes y especificaciones del diseño en obra.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros contra los terremotos. Están destinados a propietarios potenciales de casas nuevas y edificios más grandes y otros involucrados en la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos se traducen y el contenido puede ser modificado por expertos locales para adaptarse a las condiciones locales.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 20. Importancia de los controles durante la construcción de los edificios

El artículo 19 describe la necesidad de una verificación independiente de los cálculos, planos y especificaciones de diseño antes de solicitar un permiso de construcción, y definitivamente antes de comenzar la construcción. Una verificación le da al cliente la confianza de que se han seguido los códigos y estándares locales y, por lo tanto, es más probable que el edificio sea seguro contra terremotos.

El siguiente desafío es establecer los controles durante la construcción. Como cualquiera de nosotros, los constructores cometen errores accidentales. Algunos también optan por no seguir los planes y especificaciones. Pueden omitir barras de refuerzo, doblarlas incorrectamente, usar muy poco cemento en concreto o usar ladrillos o bloques de mala calidad (Figura 1). Sin controles, incluso un edificio recién construido puede ser inseguro ante los terremotos. Hay muchos ejemplos de construcción muy pobre e insegura (Figura 2). Sin embargo, si un constructor sigue los planes y especificaciones, se espera que un edificio permanezca seguro durante el sismo para el que fue diseñado.

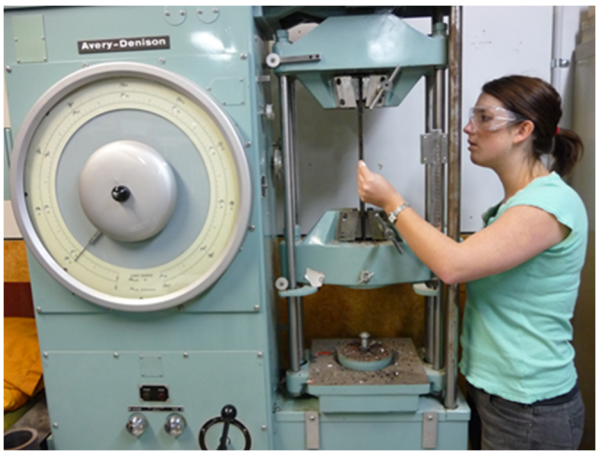


Figura 1. Se está probando una barra de refuerzo para verificar que cumpla con los estándares.1

Figura 2. El refuerzo de esta columna no cumple en varios aspectos con los códigos y normas locales. Durante un terremoto de moderado a grande, se dañará seriamente.2

La institución pública encargada en el ramo de construcción en su comunidad, región o país podría tener algunos requisitos para el aseguramiento de la calidad durante la construcción. Si es así, sígalos. Si no es así, solicite que el ingeniero civil que diseñó el edificio supervise u observe su construcción. Por lo general, esto significará visitar el sitio regularmente y especialmente antes de que se realicen actividades importantes (Figura 3). Por ejemplo, el acero de refuerzo en columnas debe revisarse antes de que el encofrado oculte las barras de refuerzo y se coloque el concreto. Pregúntele a su ingeniero qué recomienda para que al final del proyecto una declaración en el sentido de que la construcción siguió los planos y especificaciones pueda ser firmada.

Figura 3. Un ingeniero necesita visitar regularmente sitios de construcción como este para asegurarse de que la construcción esté de acuerdo con los planes y especificaciones.3

Algunas personas pueden tratar de ahorrar dinero al no ejecutar ningún proceso que les asegure la garantía de calidad de la construcción. En estos casos, los errores y cambios no autorizados no se detectarán. Los detalles que son vitales para la seguridad contra terremotos pueden construirse erróneamente o incluso no construirse en absoluto. ¿Por qué ponerse a sí mismo y a otros en riesgo durante un terremoto debido a una construcción deficiente? ¡No vale la pena!

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros contra los terremotos. Están destinados a propietarios potenciales de casas nuevas y edificios más grandes y

otros involucrados en la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos se traducen y el contenido puede ser modificado por expertos locales para adaptarse a las condiciones locales.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 21. Evitando daños a los componentes no estructurales

La mayoría de estos artículos se centran en garantizar que las estructuras de los edificios protejan a sus usuarios y habitantes durante los terremotos. El objetivo es evitar daños estructurales graves. Si se logra este objetivo, entonces se salvan vidas. También puede ser técnica y económicamente factible reparar la estructura después del terremoto. Pero ¿qué pasa con el daño al resto del edificio?

En términos de costo, la estructura principal representa un porcentaje modesto del costo total de un edificio. Por lo general, aproximadamente el 70% del costo de un edificio proviene de partes distintas de la estructura. Estos generalmente se conocen como "componentes no estructurales", como chimeneas, revestimientos de techos (por ejemplo, tejas), revestimientos, cristales y vidriería, particiones, techos, sistemas mecánicos y eléctricos, etc. Y no debemos olvidar el contenido del edificio, el cual puede ser muy costoso. No solo todos estos elementos no estructurales representan una gran inversión financiera, sino que, además, durante un terremoto, muchos son peligrosos.

Hay dos causas de daño a los componentes no estructurales. El primero se debe al movimiento horizontal lateral de la estructura. En segundo lugar, estos componentes o elementos son dañados por las aceleraciones del temblor del terremoto. Vea las imágenes buscando "daños en elementos y componentes no estructurales debido a sismos" en internet.

Es probable que los movimientos laterales que ocurren durante los terremotos dañen elementos como el revestimiento de mampostería y las paredes divisorias. Cuando un piso superior de un edificio se mueve horizontalmente más allá del piso inferior, esperamos daños a estos elementos (Figura 1). Después de todo, las paredes rígidas y frágiles son incompatibles con marcos estructurales relativamente flexibles. El daño a elementos como las paredes se puede reducir haciéndolas flexibles o separándolas de las columnas y el piso superior. Nótese que se require un cuidadoso detalle arquitectónico.

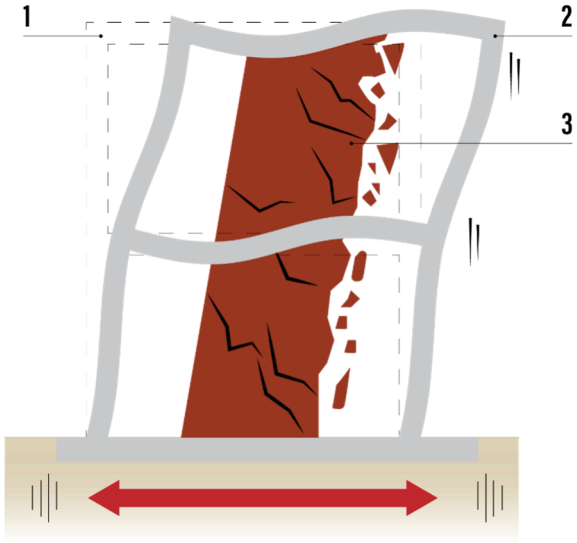


Figura 1. Un marco estructural antes (1) y durante un terremoto (2). Las particiones (3) unidas a los pisos por encima y por debajo se dañan por el movimiento horizontal debido al movimiento del marco.

La mayoría de los otros elementos no estructurales se dañan por las aceleraciones sísmicas. Las sacudidas intensas pueden romper elementos, sacudiéndolos y produciendo que se suelten de sus soportes lo que desencadena que se

caigan (Figuras 2-4). El equipo y contenido interno, del edificio, que no está fijado a la estructura principal se dispersa por todos lados, causando lesiones a sus ocupantes. La lección aprendida de los terremotos anteriores es que los elementos no estructurales deben estar restringidos. Todos los artículos, incluidos los tanques de agua y los equipos mecánicos y eléctricos, deben estar fijados (Figura 5). De lo contrario, durante el sismo se deslizarán y/o volcarán, a menudo causando mucho más daño del que ellos mismos sufren. Consulte el documento FEMA E-74 para ver ejemplos de métodos de sujeción típicos. Muchos métodos de sujeción de equipos son relativamente baratos y son una inversión inteligente para prevenir daños durante un terremoto.

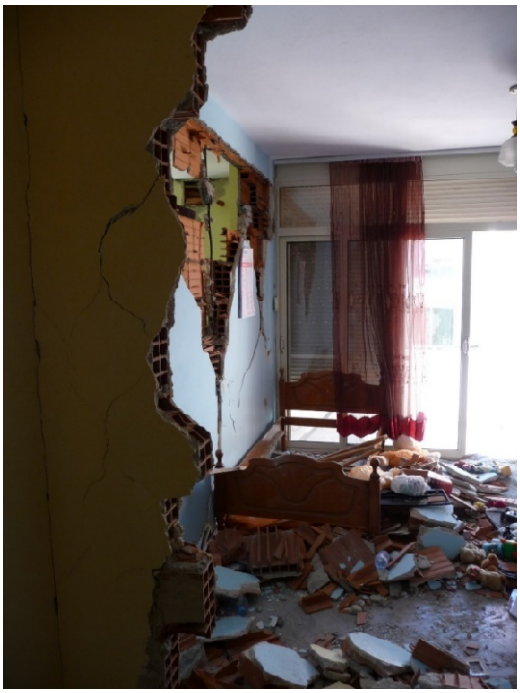


Figura 2. Las paredes dañadas por un terremoto representan un gran riesgo para la vida.

Figura 3. Una chimenea de ladrillo se ha roto a nivel del techo y se ha caído. La mayor parte de la chimenea restante está dañada (N. Allaf).

Figura 4. Un terremoto ha destruido la mayor parte del revestimiento de ladrillo y la vidriería de este edificio.

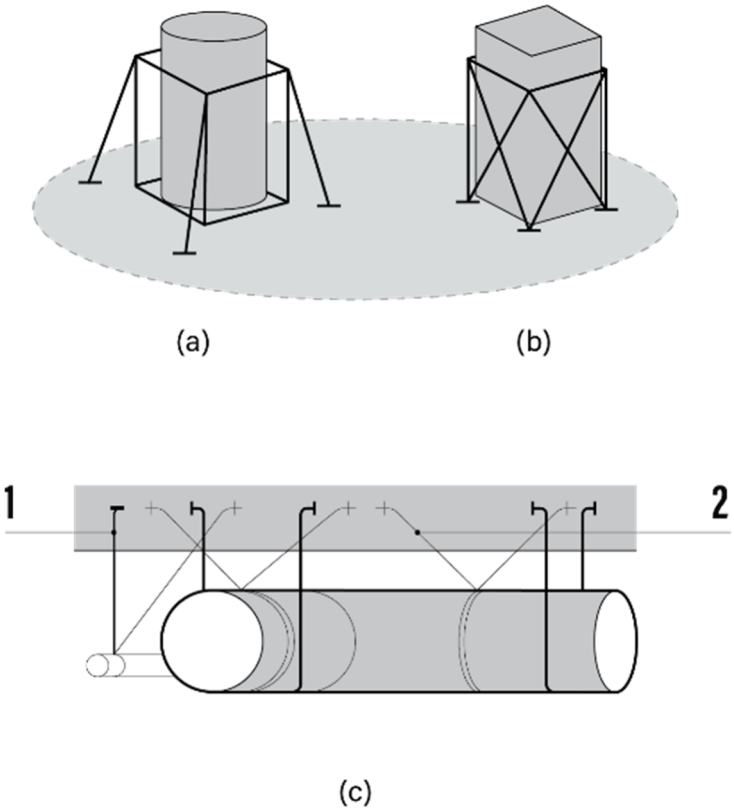


Figura 5. Los tanques (a) y el equipo mecánico (b) deben estar arriostrados contra los terremotos. Además, en (c) se refuerzan los sujetadores de las tubería (1) y los conductos (2).

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros contra los terremotos. Están destinados a propietarios potenciales de casas nuevas y edificios más grandes y otros involucrados en la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos se traducen y el contenido puede ser modificado por expertos locales para adaptarse a las condiciones locales.

Referencias:

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, págs. 173 a 186.

FEMA, 2012. Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage—A Practical Guide (FEMA E-74) https://www.fema.gov/media-library-data/1398197749343-db3ae43ef771e639c16636a48209926e/FEMA_E-74_Reducing_the_Risks_of_Nonstructural_Earthquake_Damage.pdf.

Murty, C. V. R., 2005. How can Non-structural Elements be protected against Earthquakes? Earthquake Tip 27. IITK-BMTPC "Learning earthquake design and construction", NICEE, India. http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip27.pdf (consultado el 5 de mayo de 2020).

Nonstructural. Mitigation Center. Earthquake Engineering Research Institute. https://mitigation.eeri.org/category/structures/non-structural-abc-testing.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 22. Reforzando los edificios contra terremotos

El reforzamiento es el proceso de mejorar el rendimiento sísmico de los edificios existentes que se consideran inseguros. Es más bien como la forma en que las personas con afecciones médicas graves se someten a una cirugía para prolongar sus vidas. De hecho, algunos proyectos de modernización han sido descritos como cirugía sísmica.

Hay muchas razones por las que los edificios se refuerzan en las regiones propensas a terremotos. En la mayoría de los casos, las regulaciones de construcción requieren acciones, como el reforzamiento, de edificios que han sido evaluados como peligrosos ante la ocurrencia de los terremotos. La intención es mejorar la resiliencia de las ciudades y comunidades disminuyendo el daño y el trauma después de un gran terremoto. El reforzamiento es una acción que podemos tomar para evitar un desastre futuro que involucre lesiones, pérdida de vidas y pérdida de viviendas y empleo. Por lo general, los edificios que son más valiosos para una comunidad, como hospitales y escuelas, se destinan primero a la modernización.

El primer paso en el viaje del reforzamiento de un edificio es la evaluación. Un ingeniero experimentado puede determinar rápidamente si un edificio tiene alguna debilidad grave. Un piso blando (véase el artículo 11) o paredes discontinuas (artículo 12), por ejemplo, podrían causar el colapso durante un terremoto. La edad del edificio da una indicación del estándar o código probable con el cual fue diseñado y construido. Por ejemplo, los primeros edificios de concreto reforzado diseñados para sobrevivir a sismos intensos se construyeron a partir de la década de 1980 en adelante. Los materiales de construcción son muy relevantes. Sobre la base de su bajo rendimiento en terremotos pasados, los edificios de mampostería no reforzada suelen ser los primeros que requieren ser reforzados.

Si una evaluación inicial muestra que se requiere reforzamiento, entonces se debe hacer una investigación y análisis de ingeniería más detallados. Demoliendo pequeñas áreas de los elementos que se necesitan inspeccionar se podrá observar si ciertos detalles cruciales del refuerzo son seguros (Figura 1).

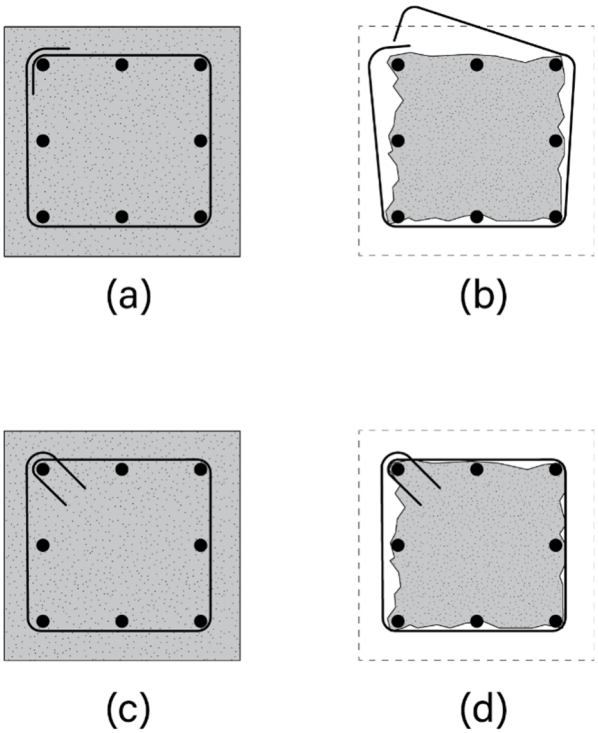


Figura 1. a) muestra una sección transversal de la columna en la que los estribos sólo tienen un doblez de 90 grados. Cuando la columna inevitablemente se daña durante un terremoto, el doblez simplemente se abre y el estribo es inútil (b). En (c) el estribo se ha doblado correctamente, tal como lo estipula el código, con un doblez a 135 grados. Cuando la columna se daña, el estribo sigue siendo efectivo (d).

Una pregunta importante que requiere discusión con las oficinas estatales de construcción es ¿cuál debería ser el nivel o estándar a usar para hacer el reforzamiento? ¿Debería el edificio ser llevado al nivel requerido de desempeño de un edificio nuevo, o es aceptable un nivel menor, pero con mayor riesgo que se produzcan daños? Dado el costo relativamente alto del reforzamiento, a menudo se hacen algunos compromisos. Todo este trabajo culmina en detallados planes y especificaciones de reforzamiento.

Las soluciones de reforzamiento varían mucho. Cada edificio debe ser tratado individualmente, al igual que los médicos tratan a los pacientes. Algunos edificios necesitan más intervenciones que otros. Tal vez nuevos elementos estructurales, como muros estructurales o refuerzos transversales, tanto a lo largo como a lo ancho del edificio (Figuras del 2 al 5). Otros, pueden necesitar nuevos elementos estructurales en una sola dirección. En otros edificios, puede ser suficiente reducir su peso eliminando y reemplazando las paredes de mampostería pesadas. A veces, la estructura existente no se puede mejorar y necesita ser reemplazada. Una búsqueda en línea de "reforzamiento de edificios ante terremotos" revela muchos ejemplos.

Figura 2. El reforzamiento sísmico de este edificio hospitalario incluyó dos nuevos muros estructurales y cimientos en cada extremo.

Figura 3. La construcción más robusta en la parte final de este edificio es un nuevo marco de concreto armado fusionado con la estructura existente para mejorar su rendimiento ante los terremotos.

Figura 4. Arriostramientos de acero se han insertado en este edificio como parte de su reforzamiento.

Figura 5. Un piso de madera de un edificio de mampostería se refuerza para resistir los terremotos mediante arriostramientos de acero debajo de el.

Finalmente, el reforzamiento suele ser un proceso costoso. En muchas situaciones es inasequible. Sin embargo, una solución relativamente barata está disponible para las casas de adobe (Vargas-Neumann 2011). Aunque puede que no haya otra opción que vivir y trabajar en edificios vulnerables por el momento, el camino a seguir es garantizar que los

nuevos edificios sean seguros. Luego, con el tiempo, el conglomerado de edificios se volverá gradualmente más seguro ante los sismos.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros contra los terremotos. Están destinados a propietarios potenciales de casas nuevas y edificios más grandes y otros involucrados en la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos se traducen y el contenido puede ser modificado por expertos locales para adaptarse a las condiciones locales.

Referencias:

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, págs. 187 a 205.

Retrofit. Mitigation Center. Earthquake Engineering Research Institute. https://mitigation.eeri.org/category/structures/retrofit-abc-testing.

Murty, C. V. R., et al., 2006. At risk: the seismic performance of RC frame buildings with masonry infill walls. California, World Housing Encyclopedia. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/05/RCFrame_Tutorial_English_Murty.pdf (consultado el 8 de junio de 2020).

Vargas-Neumann, J., et al., 2011. Building hygienic and earthquake-resistant adobe houses using geomesh reinforcement. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/06/Adobe-Geomesh-Arid_Tutorial_English_Blondet.pdf.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 23. Enfoques avanzados para la resiliencia sísmica de edificios

Los ingenieros civiles de todo el mundo aceptan que una de las premisas básicas en el diseño sismorresistente de edificios es construir cimientos sólidos para soportar la superestructura. Sin embargo, una ironía es que, si bien los cimientos fuertes evitan que los edificios se hundan o se derrumben durante un terremoto, simultáneamente transmiten la sacudida del suelo a la superestructura. Esto resulta en vibraciones más fuertes en los pisos superiores.

Un gran avance en este tema fue el aislamiento sísmico, un enfoque aplicado inicialmente en la década de 1960. En esta técnica, la superestructura de un edificio está en gran medida aislada de los efectos de las sacudidas del suelo. Esto generalmente se logra colocando cojinetes (o aisladores), flexibles contra el movimiento horizontal, entre los cimientos, en la base de un edificio, y la superestructura superior (Figuras 1 y 2). Por lo tanto, esta técnica se conoce comúnmente como aislamiento basal. Cuando el suelo tiembla, solo una fracción de las potenciales fuerzas sísmicas se transfiere a través de los cojinetes flexibles a la estructura superior. ¡Es como colocar la superestructura en baleros!

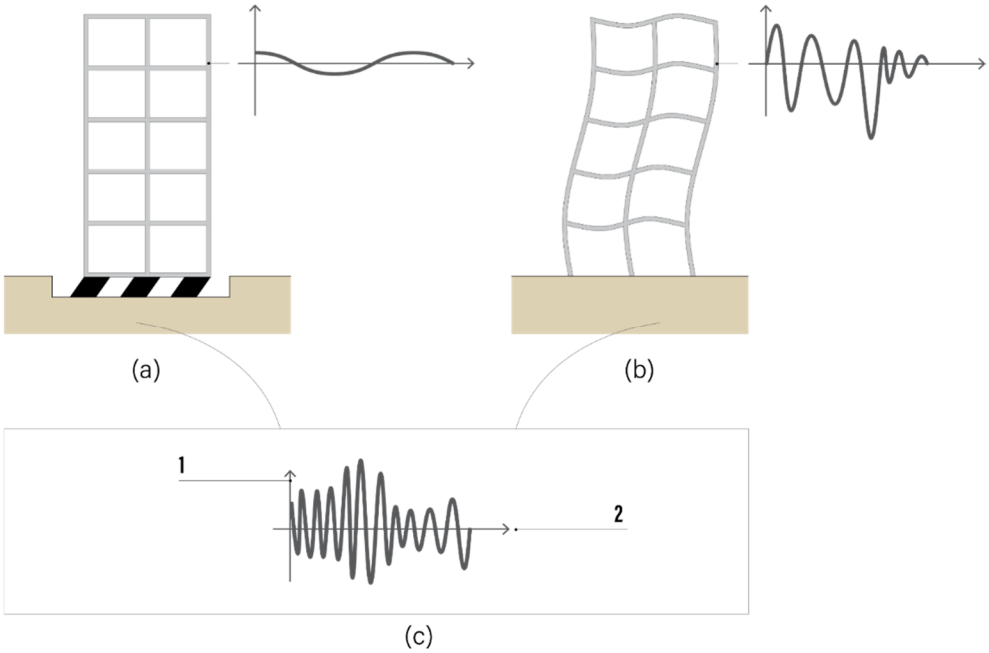


Figura 1. (a) Un edificio aislado en la base se mueve como una unidad arriba de sus cojinetes, mientras que (b) muestra cómo un edificio convencional se dobla en su altura. Ambos edificios sufren la acción un terremoto expresado por un registro sísmico (c) en donde el eje vertical (1) es aceleración y el eje horizontal (2) es tiempo. Observe cómo el temblor en (a) es menor y más suave que el de (b).

Figura 2. Dos aisladores negros y cilíndricos debajo de un edificio. Cada aislador está atornillado a una base de concreto unida a los cimientos y a la base de una columna del edificio.

Los primeros aisladores fueron construidos como grandes “emparedados” de hule y placas de acero, intercaladas. Más tarde, se insertó un cilindro de plomo para absorber parte de la energía del terremoto. Desde entonces, se han producido otros tipos de aisladores, como el sistema de péndulo de fricción. Funciona permitiendo el deslizamiento entre dos superficies lisas curvas. Estos dispositivos se pueden buscar en línea como "dispositivos de aislamiento sísmico".

El aislamiento sísmico es el estándar de oro en la resistencia ante los terremotos. Ofrece la mejor protección para la estructura, elementos no estructurales como particiones y revestimientos, y los contenidos dentro de la construcción. La mayoría de los hospitales nuevos en regiones sísmicas como Japón, California y Nueva Zelanda incorporan el aislamiento sísmico.

Sin embargo, también se están introduciendo otros enfoques para hacer que los edificios sean más seguros ante los terremotos. Por ejemplo, los dispositivos llamados amortiguadores se instalan por todo el edificio para reducir la intensidad de las vibraciones sísmicas. Los amortiguadores actúan como, y a veces parecen, amortiguadores de automóviles (Figura 3). Muy eficaces para amortiguar las vibraciones, a menudo se colocan en la parte superior o inferior de los arriostramentos diagonales (Figura 4). Un enfoque alternativo, donde todo el arriostramiento funciona tanto como un arriostramiento y un amortiguador, se conoce como un "arriostramiento restringido por pandeo" (Figura 5).

Figura 3. Un amortiguador para reducir los movimientos sísmicos.

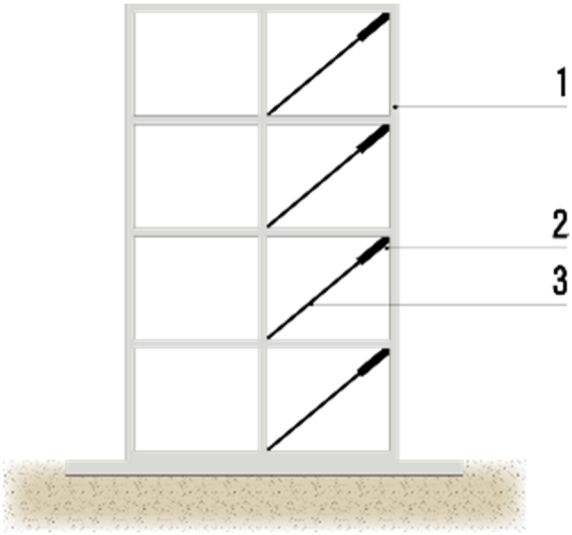


Figura 4. Un edificio de marcos formado por columnas y vigas (1) con amortiguadores (2) en la parte superior de los arriostramientos diagonales (3).

Figura 5. Dos arriostramientos con restricciones al pandeo resisten y amortiguan el movimiento en un terremoto.

Otro nuevo enfoque conocido como diseño para evitar daños se está volviendo popular. Las estructuras convencionales como paredes y marcos que son capaces de resistir terremotos están diseñadas especialmente para que durante un terremoto sus miembros primarios no se dañen. Más bien, el daño estructural se confina a los dispositivos absorbedores de energía los cuales son reemplazables (Figuras 6 y 7).

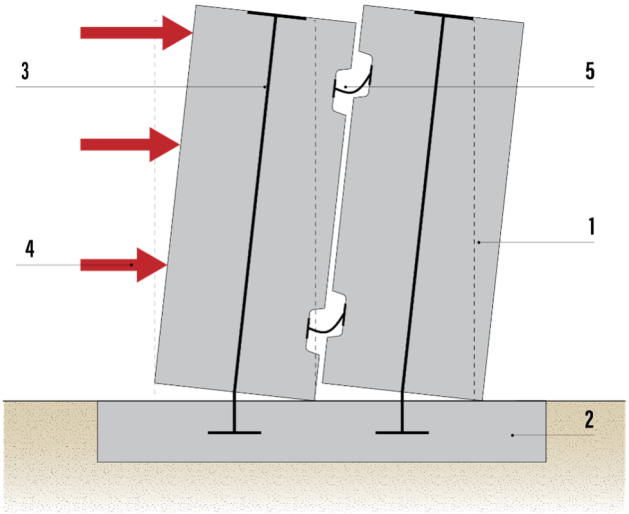


Figura 6. Dos muros de concreto uno al lado del otro (1) conectados a los cimientos (2) por tendones de acero (3) que se estiran durante los sismos (4). Las placas de acero (5) se deforman, absorbiendo energía y reduciendo la resonancia.

Figura 7. Un absorbedor de energía sísmica ubicado entre dos paredes oscilantes.

Todas las técnicas mencionadas anteriormente son mucho más sofisticadas que los enfoques convencionales de diseño y construcción. Por lo tanto, solo los ingenieros civiles más experimentados y competentes deben implementarlos.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros contra los terremotos. Están destinados a propietarios potenciales de casas nuevas y edificios más grandes y otros involucrados en la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/).

Si es necesario, los artículos se traducen y el contenido puede ser modificado por expertos locales para adaptarse a las condiciones locales.

Referencias:

Advanced Technologies Introduction. World Housing Encyclopedia, EERI. https://www.world-housing.net/major-construction-types/advanced-technologies-introduction.

BRANZ. Concrete structures: techniques and devices used to create a low-damage buildings using concrete. http://www.seismicresilience.org.nz/topics/superstructure/commercial-buildings/concrete-structures/ (consultado el 15 de junio de 2020).

Charleson, A. W., y Guisasola, A., 2017. Seismic isolation for architects. Londres, Routledge.

Equipped with base isolation and/or energy dissipation devices. Glossary for GEM Taxonomy. Global Earthquake Model. https://taxonomy.openquake.org/terms/equipped-with-base-isolation-and-or-energy-dissipation-devices-dbd.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 24. Planificación urbana y seguridad sísmica

En comparación con artículos anteriores, este artículo toma una perspectiva más amplia. Discute cómo la planificación urbana puede reducir el impacto destructivo de un terremoto en una región, ciudad o comunidad. Al igual que con las iniciativas de salud pública, tales como el suministro de agua potable y el saneamiento previenen la propagación de enfermedades, la planificación urbana puede reducir los efectos de un terremoto y facilitar la recuperación.

Los planificadores urbanos necesitan mapas de amenaza sísmica para guiar el desarrollo. Dichos mapas identifican la presencia de zonas de falla activas (áreas que deben ser evitadas, para su uso como desarrollos urbanos, a toda costa) así como áreas en donde probablemente se experimentarán mayores vibraciones debido a suelos blandos profundos (Figura 1). Estos mapas también indican áreas propensas a licuefacción, deslizamientos de tierra o desprendimientos de rocas durante un terremoto, y a inundaciones por tsunami. Con esta información, los planificadores urbanos pueden ubicar instalaciones esenciales, como estaciones de bomberos y hospitales en áreas seguras y evitar ubicar viviendas en áreas inseguras. Las áreas más peligrosas pueden ser designadas como parques. Una búsqueda en línea de "mapas de amenaza sísmica de ciudades" revelará muchos ejemplos de estos mapas de todo el mundo.

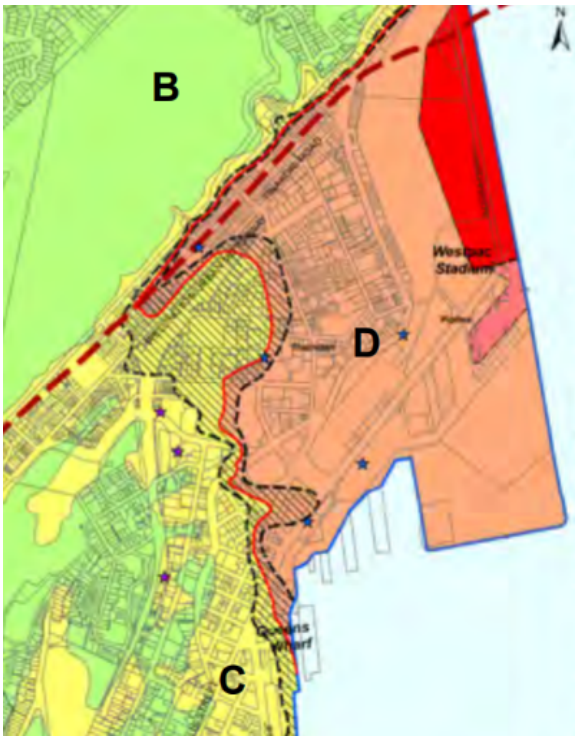


Figura 1. Un mapa de sacudida del terreno para una sección de Wellington, Nueva Zelanda. La zona B experimentará la sacudida menos intensa, seguido de C. D significa el área en donde se experimentará la peor sacudida, con su punto máximo en el área roja (Ayuntamiento de Wellington).

Otra herramienta útil para los planificadores es un mapa de vulnerabilidad sísmica. Allí se muestra la vulnerabilidad sísmica relativa del parque de edificios en un área determinada basada en levantamiento muestral de edificios y los análisis de ingeniería (Figura 2). Cuando se utiliza en conjunto con un mapa de amenaza sísmica, la distribución geográfica de los posibles daños causados por un terremoto puede producir información útil en el proceso de planificación. Por ejemplo, las autoridades de la ciudad podrían usar esta información para comprar filas de propiedades en las áreas más vulnerables con el fin de aumentar el ancho de las calles. Esto reduciría la congestión diaria, mejoraría

el acceso de los servicios de emergencia y proporcionaría cortafuegos más amplios en previsión de incendios posteriores al terremoto. O las autoridades podrían requerir y ayudar a los propietarios de edificios vulnerables a actualizarlos sísmicamente para proteger una estructura específica de importancia histórica antes de que se pierda en un gran terremoto.

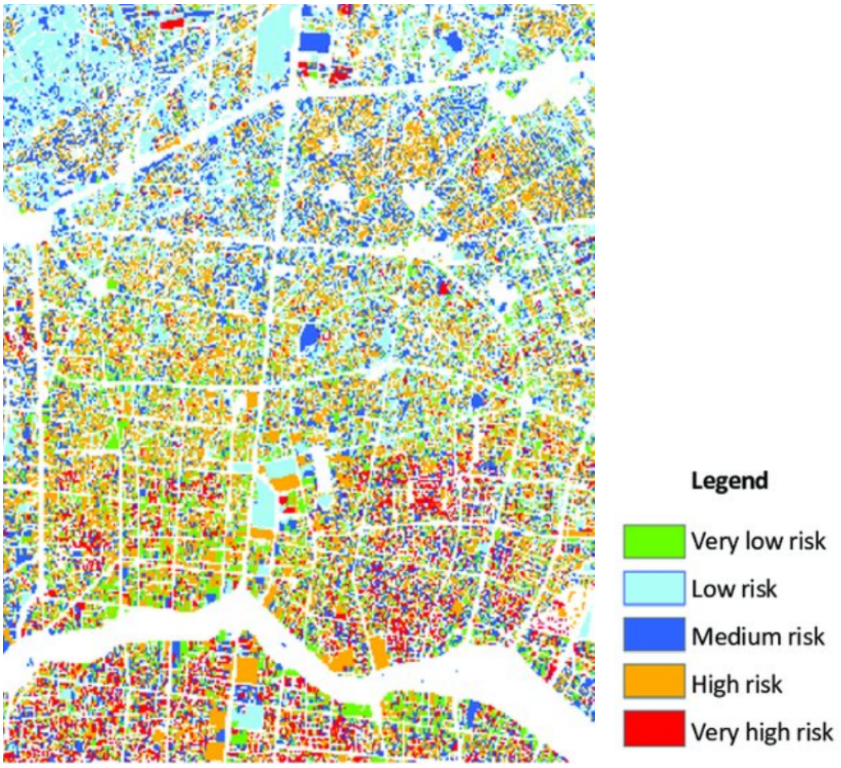


Figura 2. Un mapa de vulnerabilidad sísmica de una ciudad en donde se muestra el riesgo asociado con los tipos de edificios y otros factores (M. Tafti).

Los planificadores urbanos deben trabajar como parte de equipos interdisciplinarios en donde se incluyan a los ingenieros estructurales. Esto se debe a que en el pasado algunas ciudades han introducido regulaciones que conducen inadvertidamente a edificios que son menos seguros contra terremotos. Por ejemplo, los requisitos para aumentar el estacionamiento en la planta baja pueden dar lugar a edificios con pisos blandos (Artículo 11), y el permiso para permitir que los edificios se proyecten por encima de la acera hacia la calle puede conducir a paredes discontinuas (Artículo 12).

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros contra los terremotos. Están destinados a propietarios potenciales de casas nuevas y edificios más grandes y otros involucrados en la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos se traducen y el contenido puede ser modificado por expertos locales para adaptarse a las condiciones locales.

Referencias:

Charleson, A. W., 2008. Seismic design for architects: outwitting the quake. Oxford, Elsevier, pp. 233-242.

Edificios Sismorresistentes

Artículo 25. Tsunamis y edificios

El devastador terremoto del 26 de diciembre de 2004 en Sumatra, Indonesia y el tsunami del Océano Índico ha intensificado la conciencia de esta amenaza sísmica en los océanos. Grandes extensiones de costa alrededor de la Cuenca del Pacífico y en otros lugares están en riesgo de inundación por tsunami. La destrucción y pérdida de vidas causadas por tsunamis está bien documentada en las historias de decenas de aldeas y ciudades de todo el mundo. Un tsunami ejerce grandes fuerzas horizontales sobre cualquier superficie que bloquean su flujo. Los edificios de madera no ofrecen protección contra los tsunamis, y los edificios de piedra, ladrillo y hormigón pueden ser destruidos por flujos cuya lámina de agua sea de dos metros, dependiendo de la velocidad del agua.

El punto de partida para que los ingenieros, arquitectos y planificadores urbanos determinen el riesgo por tsunami es obtener un mapa de inundaciones del área de interés (Figura 1). Esta información puede estar incluida en un mapa de amenaza sísmica (artículo 24). Con una valoración de las incertezas y las suposiciones que afectan la exactitud de dicha información, medidas para la reducción de daños se pueden evaluar. El número de opciones parece limitarse a la construcción de muros o barreras contra tsunamis, la plantación de densas áreas de árboles bajos y la reubicación. Los japoneses han protegido los pueblos pesqueros con enormes muros de hormigón armado. Opción muy costosa con considerables impactos ambientales adversos, sin embargo, las paredes son mucho más efectivas que las densas plantaciones. Aunque las plantaciones absorben parte de la energía del tsunami, también aumentan el volumen de escombros transportados por el agua. En varios países se ha emprendido la reubicación de los asentamientos afectados por el tsunami.

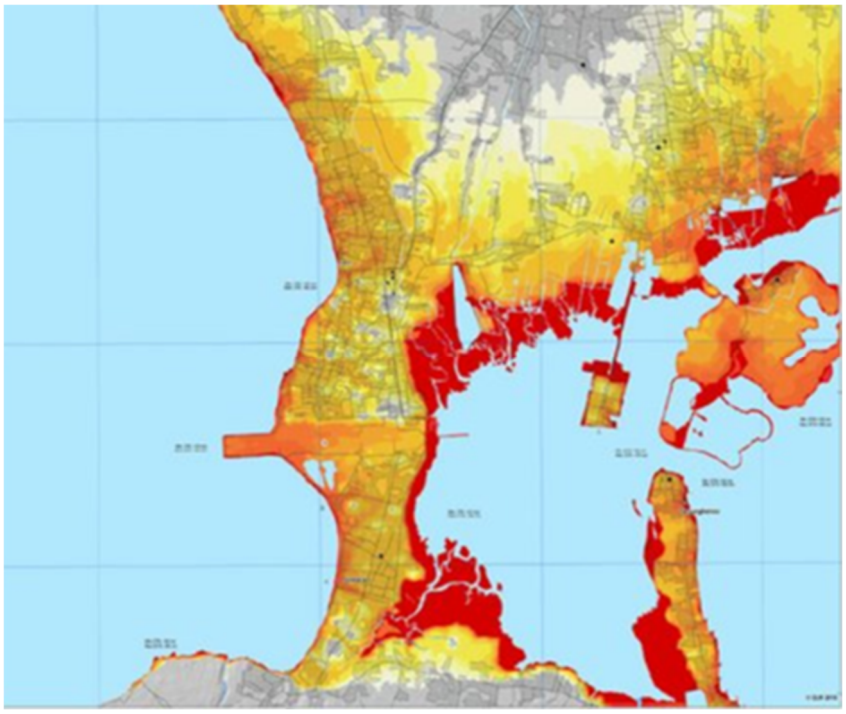


Figura 1. Un mapa típico de amenaza por tsunami, en este caso es Bali. Los colores más oscuros indican una mayor probabilidad de peligro (S. Wegscheider).

Los sistemas de alerta temprana de tsunamis y la identificación y suministro de rutas de evacuación también son métodos eficaces para reducir la pérdida de vidas (Figura 2). Pero en algunas áreas, el flujo del tsunami puede inundar tierras costeras bajas muchos kilómetros tierra adentro. Con períodos de advertencia de tan solo minutos, no hay

ningún lugar seguro para huir. Para muchas de estas personas "en riesgo", lo que se denomina "centros de evacuación vertical de tsunamis" son la única posibilidad de supervivencia (Figura 3).

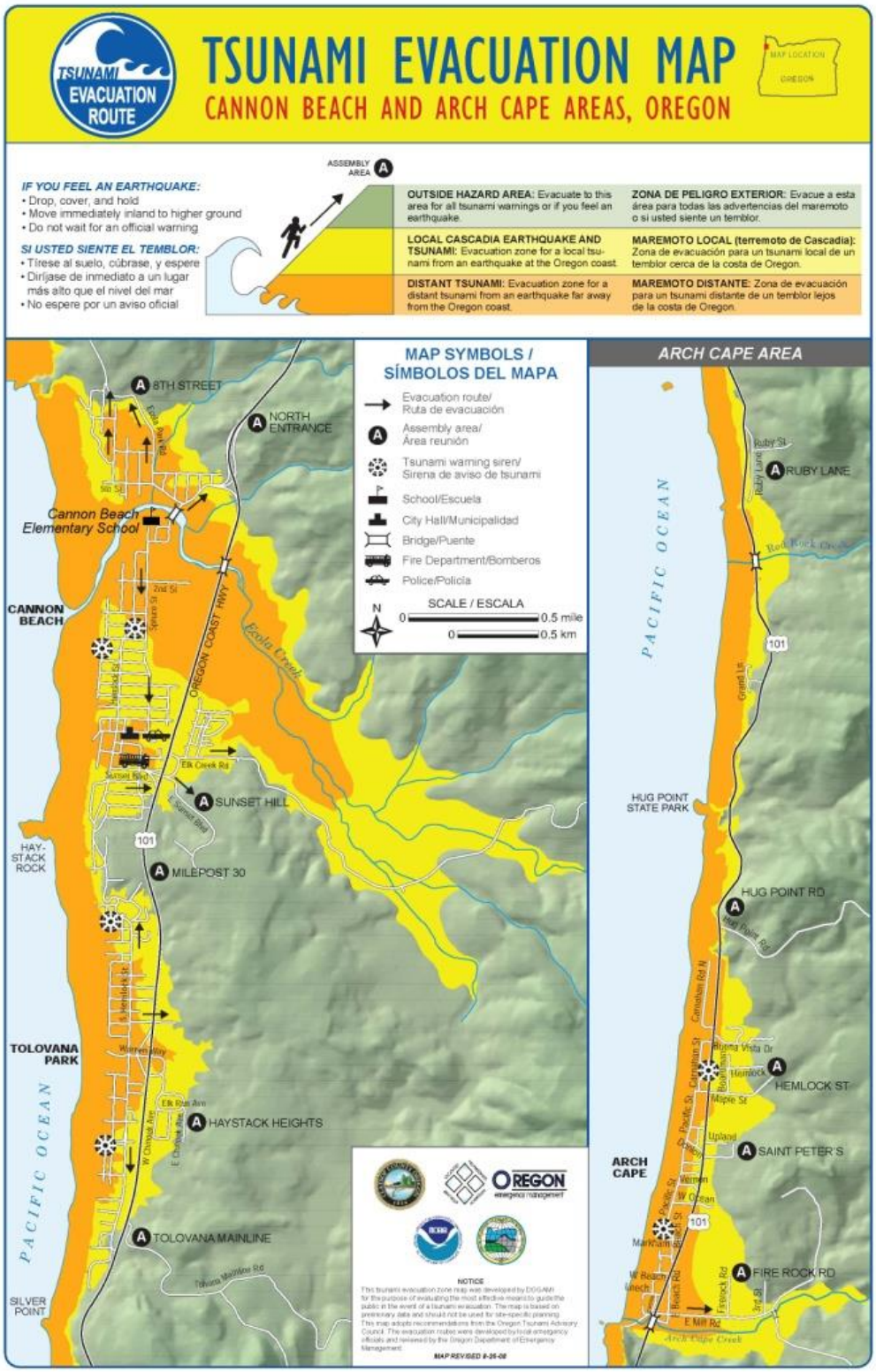


Figura 2. Un mapa típico de evacuación en caso de tsunamis (Universidad Estatal de Oregón).

Figura 3. Un centro privado de evacuación de tsunamis. La mayoría de los centros de evacuación son para las comunidades cercanas.

El requisito principal de un refugio contra tsunamis es acomodar a los evacuados por encima del nivel de inundación esperado. En lo que respecta a las propiedades de diseño estructural que debe poseer un refugio, primero debe diseñarse para resistir las fuerzas sísmicas de la sacudida del suelo. Esto significa que debe diseñarse con un estándar más alto de lo habitual. También debe cumplir con todos los requisitos del código para garantizar su seguridad sísmica. Luego se debe verificar que puede soportar las considerables presiones de agua más las fuerzas de impacto de los desechos transportados por el agua.

Respecto a esta serie de artículos:

Esta es una serie de artículos sobre terremotos, sus efectos en los edificios y cómo garantizar que los edificios sean seguros contra los terremotos. Están destinados a propietarios potenciales de casas nuevas y edificios más grandes y otros involucrados en la industria de la construcción. Los artículos están escritos por Andrew Charleson y sus colegas de la World Housing Encyclopedia (http://www.world-housing.net/), patrocinada por el Instituto de Investigación de Ingeniería Sísmica (https://www.eeri.org/) y la Asociación Internacional de Ingeniería Sísmica (http://www.iaee.or.jp/). Si es necesario, los artículos se traducen y el contenido puede ser modificado por expertos locales para adaptarse a las condiciones locales.

Referencias:

National Tsunami Hazard Mitigation Program, 2001. Designing for tsunamis: seven principles for planning and designing for tsunami hazards. https://nws.weather.gov/nthmp/documents/designingfortsunamis.pdf (consultado el 16 de junio de 2020).

Wegscheider, S, et al., 2011. Generating tsunami risk knowledge at community level as a base for planning and implementation of risk reduction strategies*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 11, 249–258.