

REFUERZO SISMICO DE ESTRUCTURAS

Franz Sauter F.
Ingeniero Consultor
Franz Sauter & Asociados S.A.

RESUMEN

El refuerzo sísmico de una estructura puede ser necesario cuando la obra ha sufrido daños a causa de un terremoto o si se determina que un edificio es vulnerable a sufrir daños severos o colapso. Obras esenciales deben seguir prestando servicios después de una catástrofe, por lo tanto, deben resistir sismos destructivos sin sufrir daños secundarios significativos que puedan poner en peligro su funcionamiento; un estudio de vulnerabilidad sísmica puede concluir en la necesidad de refuerzo estructural. Se describen los diferentes métodos para el refuerzo de edificios, tendientes a mejorar su comportamiento sísmico y se resalta la bondad de los muros estructurales como elementos de refuerzo, pues introducen mayor rigidez, reducen los desplazamientos laterales y la cuantía de los daños. Se comentan las reglas de estructuración, se dan ejemplos de refuerzo sísmico de edificios y se presentan detalles de anclajes, conexiones, y continuidad del refuerzo.

INTRODUCCION

La reparación de elementos y sistemas estructurales dañados conlleva frecuentemente, pero no necesariamente, el refuerzo de la estructura. Por otro lado, obras no dañadas requieren a veces ser reforzadas para adicionar capacidad resistente o para hacerlas cumplir con los requisitos de las normas de diseño vigentes. Para claridad conviene definir los dos términos mencionados anteriormente: reparación y refuerzo.

Reparación - la reparación de un sistema o de un elemento estructural dañado significa devolverlo a su estado original, sin necesidad de agregarle resistencia adicional.

Refuerzo - el refuerzo de un sistema o de un elemento estructural conlleva una modificación tendiente a adicionarle mayor capacidad resistente para mejorar su comportamiento.

La reparación se hace obligatoria cuando se presentan daños en una obra. Los daños en una estructura de concreto reforzado pueden ocurrir por distintas causas:

- * incendio
- * terremoto
- * corrosión del acero

- * deterioro del concreto por causas ambientales y sustancias químicas
- * impacto de vehículos
- * sobrecarga excesiva
- * fisuras y deflexiones debidas a diseño deficiente

Así, los daños en estructuras y elementos de concreto se deben a variadas causas. A su vez, existen múltiples métodos y tecnologías para la reparación de estructuras y de elementos de concreto dañados, que dependen de la causa del daño. Existen equipos y accesorios especiales para demoler, romper, cortar y perforar el concreto, y para soldar y empalmar el acero de refuerzo; asimismo se han desarrollado aditivos químicos, componentes epóxicos y morteros de baja retracción para sustituir el concreto dañado, para inyectar fisuras en el concreto y para rellenar zonas de anclaje y perforaciones. Las técnicas de reparación van desde lo simple a lo sofisticado; el campo es muy vasto y no puede ser tratado dentro del contexto de este trabajo.

Una estructura u obra dañada, no necesariamente tiene que ser reforzada; con sólo repararla y devolverla a su estado original puede cumplir con la función para la que fué destinada. El refuerzo estructural, en cambio, es necesario cuando:

- a) la estructura dañada requiere, además de la reparación, un refuerzo para proporcionarle mayor resistencia y para adecuarla a las nuevas necesidades,
- b) la estructura no dañada requiere mayor capacidad para resistir cargas superiores a las contempladas en el diseño,
- c) la estructura no cumple con los requisitos de las normas de construcción o con el código sísmico y es vulnerable a sufrir daños o colapso.

El refuerzo de una estructura tiene, pues, diferentes propósitos; según el caso el enfoque y la técnica que se aplique variarán. De los aspectos mencionados: reparación y refuerzo, el presente trabajo trata únicamente el refuerzo estructural; se limita, además, al caso específico del refuerzo sísmico de estructuras en concreto reforzado, por ser tema de actualidad.

PROPOSITO DEL REFUERZO SISMICO

El refuerzo sísmico de una estructura puede ser necesario u obligatorio cuando se dan las siguientes causas:

- * La estructura ha sufrido daños durante un terremoto y requiere reparación; como requisito para otorgar el permiso de reparación, las autoridades obligan a que la obra reparada cumpla con los requerimientos del código sísmico, lo cual implica el refuerzo de ciertos elementos.

* El propietario de un inmueble, preocupado por la posibilidad de daños y colapso, solicita voluntariamente un estudio de vulnerabilidad sísmica que concluye con la necesidad de refuerzo estructural.

* Edificios muy frecuentados, con gran concentración de personas, tales como auditorios, teatros, cines, centros educativos, y edificios públicos, merecen ser revisados y eventualmente reforzados para evitar el colapso, una medida tendiente a proteger la vida humana.

* Obras de vital importancia, que deben seguir prestando servicios después de una emergencia o catástrofe, p.ej. hospitales, centrales de bomberos, plantas generadoras de electricidad y centrales telefónicas deben ser objeto de revisión estructural para determinar su capacidad para resistir un sismo destructivo sin sufrir daños secundarios significativos que puedan poner en peligro su funcionamiento; un estudio de vulnerabilidad sísmica puede indicar la necesidad de refuerzo estructural.

* Obras cuya falla puede poner en peligro la seguridad pública, p.ej. centrales de energía nuclear, plantas de químicos tóxicos, y represas cuya rotura puede causar la destrucción de poblados aguas abajo del embalse, deben ser objeto de estudio y de eventual refuerzo estructural.

FILOSOFIA DEL DISEÑO SISMORRESISTENTE

Cabe recordar la filosofía del diseño sismorresistente, plasmada en la mayoría de los códigos sísmicos vigentes:

- # resistir sismos pequeños y muy frecuentes sin daño,
- # resistir sismos de intensidad moderada, que pueden ocurrir varias veces durante la vida útil de la obra, sin sufrir daño estructural, admitiéndose daños secundarios moderados,
- # resistir sismos de alta intensidad, que ocurren con menor frecuencia, sin sufrir colapso, admitiéndose algún daño estructural y daños secundarios mayores.

Resumido, el objetivo prioritario de los códigos sísmicos es evitar el colapso (Fig.1) y proteger la vida humana; en sismos destructivos se admiten daños a elementos secundarios, paredes (Fig.2), acabados arquitectónicos, e instalaciones electromecánicas, no excluyéndose los daños estructurales.

Para edificios de uso común esta filosofía pareciera ser satisfactoria, no obstante, para obras esenciales es inadecuada. Los hospitales, las centrales de bomberos, las plantas de energía eléctrica, las centrales de comunicaciones, y obras



Fig.1 Colapso edificio de 11 pisos, Hospital Benito Juárez; México D.F., terremoto 1985.



Fig.2 Daños secundarios severos en edificio habitacional, San Salvador, terremoto 1965.

similares deben seguir prestando servicios después de una catástrofe. En obras de vital importancia evitar el colapso no es suficiente garantía de que podrán continuar en operación después de un terremoto. Daños cuantiosos en paredes, ventanas, cielos suspendidos, revestimientos (Fig.3), equipos e instalaciones, pueden sacar el edificio fuera de servicio; en estas obras es requisito evitar el daño estructural y reducir los daños secundarios que ponen en peligro el funcionamiento de la obra.

El terremoto de México 1985 sacó fuera de operación los tres principales hospitales del Distrito Federal. El Hospital Benito Juárez de once pisos sufrió colapso total (Fig.1); aproximadamente 1,500 personas perecieron. El edificio de Gineco-Obstetricia del Hospital General, de 7 pisos, sufrió también colapso. En el Hospital del Instituto Mexicano Seguridad Social, un conjunto de varios edificios altos, sólo dos secciones menores sufrieron colapso; no obstante, todos los restantes edificios debieron ser declarados inhabitables debido a los severos daños estructurales y secundarios (Fig.3). En el terremoto de San Salvador del año 1986, se repitió la historia. Tres de los principales hospitales fueron evacuados debido a colapso parcial y a cuantiosos daños secundarios. Los servicios médicos de emergencia debieron ser atendidos en tiendas de campaña improvisadas

El terremoto de México D.F. 1985 causó el colapso del edificio de comunicaciones internacionales y daños a centrales telefónicas; el país quedó aislado del mundo después del siniestro. En San Salvador el terremoto de 1986 causó daños severos a equipos de telefonía y 36,000 líneas telefónicas salieron fuera de servicio.

Los códigos sísmicos en general reconocen que obras esenciales deben tener mayor capacidad para resistir sismos que obras de uso común, así clasifican los edificios según el uso. A las obras esenciales, Grupo A, se les asignan mayores cargas laterales afectando el coeficiente sísmico por un factor multiplicador que varía, según el código, entre 1.20 y 1.30. Este enfoque no es acertado ni efectivo, y no garantiza que se van a reducir los daños secundarios. En una estructura a base de pórticos, aumentar el coeficiente sísmico por un factor de 1.20 a 1.30 tiene un magro resultado: incrementar la cantidad de acero en un 20% a 30%. Sin embargo, esta medida no va a modificar el comportamiento sísmico del edificio. Una obra concebida como una estructura flexible, lo seguirá siendo por más varillas de refuerzo que se adicionen a los elementos resistentes. En obras esenciales es preciso modificar el sistema estructural, limitar los desplazamientos laterales y reducir los daños secundarios.

Estas consideraciones han quedado plasmadas, a sugerencia del autor, en la nueva versión del Código Sísmico de Costa Rica 1986. El coeficiente sísmico se determina a partir de la aceleración máxima del terreno (A_{max}), obtenida de los mapas de iso-



Fig.3 Daños secundarios significativos en edificio de 9 pisos. Hospital del Instituto Mexicano de Seguridad Social, México D.F., terremoto 1985.

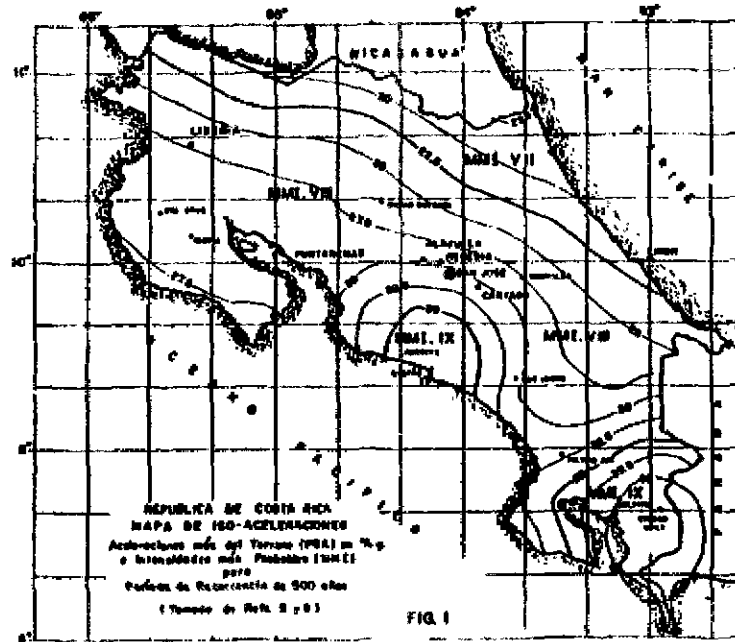


Fig.4 Mapa de isoaceleraciones para el territorio de Costa Rica e intensidades máximas probables.

aceleración (Fig.4), multiplicado por el factor de amplificación dinámica FAD y un factor reductor R (Tabla I). En lugar de recurrir a un factor multiplicador, a las edificaciones del Grupo A, obras esenciales, se le asigna una vida útil de 100 años, a las del Grupo B una vida útil de 50 años. La probabilidad de excedencia de los valores de intensidad se limita a 0.20 para las obras del Grupo A; para obras comunes, Grupo B, se admite una probabilidad mayor de 0.40. Los períodos de retorno correspondientes, son de 500 y 100 años respectivamente.

TABLA I - COEFICIENTE SISMICO
según Código Sísmico de Costa Rica

Código edición 1974: C = a Amax FAD
obras Grupo A: a = 1.20
obras Grupo B: a = 1.00

Código edición 1986: C = R Amax FAD
factor reducción: R = 0.80

Clase obra	Vida útil (años)	Probab. exceden.	Período retorno (años)	Amax (Zona Central)	C 1986 (estruct. tipo 3)	C 1974
Grupo A	100	0.20	500	0.310	0.298	0.216
Grupo B	50	0.40	100	0.185	0.178	0.180

En el Código Sísmico de Costa Rica 1986, el coeficiente sísmico C_a (Tabla I) para estructuras tipo (3) y Zona Central del país, se determina en 0.298 para edificaciones del Grupo A y en 0.178 para las del Grupo B; sea, a obras esenciales corresponde un incremento del coeficiente de más de 67% respecto a las del Grupo B. En la tabla se observa, que para edificios Grupo B el coeficiente sísmico C_a según el nuevo código (1986) no varía esencialmente respecto al de la edición anterior (1974); para las del Grupo A, en cambio, el incremento es significativo.

En edificaciones en las cuales se han adoptado sistemas estructurales con pórticos flexibles, un incremento del coeficiente sísmico de 67% redundará en un aumento sustancial de las dimensiones de los elementos y de la cuantía de acero, consecuentemente un incremento considerable en el costo de obra. Sin embargo, la intención del Código no es encarecer las obras, más bien tiende a obligar al diseñador a adoptar en obras esenciales sistemas estructurales que resistan las sollicitaciones sísmicas más eficientemente. Edificios que incorporan muros estructurales han demostrado mejor comportamiento sísmico y, debidamente estructurados, en ellos un incremento del coeficiente sísmico no conlleva un aumento significativo del costo.

COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS Y DAÑOS SECUNDARIOS

Los daños en una obra son proporcionales a los desplazamientos laterales de la estructura, y no necesariamente son función de la resistencia; la cuantía de los daños a consecuencia de un sismo dependen, por lo tanto, del sistema resistente que se adopte. Estructuras a base de pórticos de concreto reforzado y acero son sistemas flexibles y, ante sollicitaciones sísmicas, están sujetos a desplazamientos y daños secundarios mayores (Fig.2 y 3). Sistemas resistentes a base de muros estructurales, en cambio, son más rígidos y en ellos los desplazamientos laterales son menores; en dichos sistemas los daños secundarios tienden, por lo tanto, a ser menores según lo confirma la experiencia; además, son sistemas más eficientes para resistir las cargas sísmicas y en general muestran mejor comportamiento sísmico. La eficacia de los sistemas resistentes que incluyen muros estructurales, quedó demostrada en el terremoto de San Salvador en 1986. En el Hospital de Niños Benjamín Bloom dos secciones de tres pisos, a base de pórticos, sufrieron colapso (Fig.5); en cambio, la torre de encamados de 11 pisos, que incluía muros en el sistema resistente, no sufrió daño estructural y los daños secundarios fueron reducidos.

Por otro lado, la experiencia de recientes eventos destructivos ha demostrado que la filosofía enunciada en los códigos sísmicos: evitar el colapso (Fig.1) y proteger la vida humana, admitiendo en sismos de alta intensidad daños secundarios mayores (Fig.2), aun para obras Clase B, no es satisfactoria y merece una revisión. En el diseño sismorresistente se debe dar mayor consideración a la reducción de los daños secundarios, que pueden causar pérdidas económicas cuantiosas, hacer un edificio inservible y sacarlo fuera de funcionamiento (Fig.3). Recordemos que el costo de la estructura de un edificio representa en general un 30-35% del costo total de la obra; así, el costo de los elementos no-estructurales: paredes, acabados arquitectónicos, e instalaciones electromecánicas, asciende a un 65-70% del costo total. Las pérdidas derivadas de daños a elementos secundarios pueden alcanzar, por lo tanto, proporciones muy considerables.

En terremotos recientes se han observado edificios modernos, diseñados de acuerdo con los requisitos del código sísmico, cuyos sistemas resistentes mostraron buen comportamiento y resistieron sismos destructivos con poco o ningún daño estructural; por lo tanto, han sido un éxito desde el punto de vista del ingeniero diseñador. No obstante, debido a la flexibilidad de la estructura, han sufrido cuantiosos daños en paredes de mampostería, acabados, cielos, ventanas, revestimientos (Fig.2 y 3) y en equipos e instalaciones, siendo un fracaso desde el punto de vista del propietario, cuyo inmueble ha quedado inhabitable; fracaso también para el asegurador que ha debido declararlo pérdida total. El ingeniero responsable del diseño difícilmente podrá justificar ante su cliente este fracaso, argumentando que basó el diseño en los enunciados de la

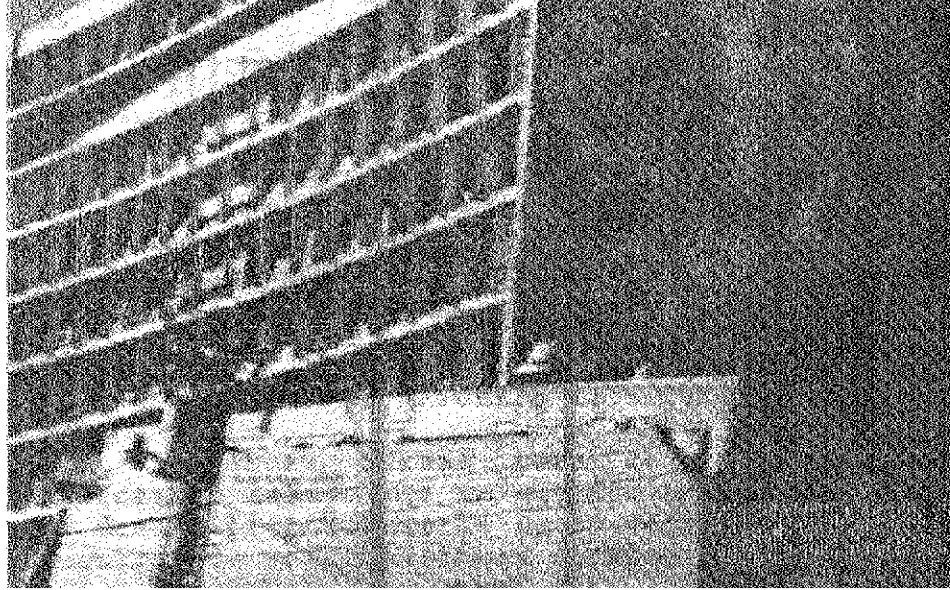
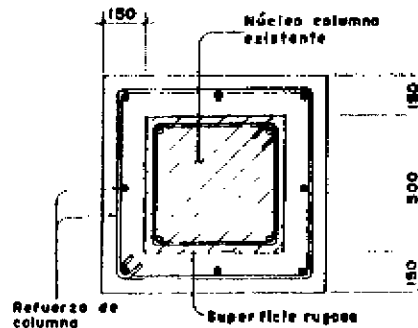
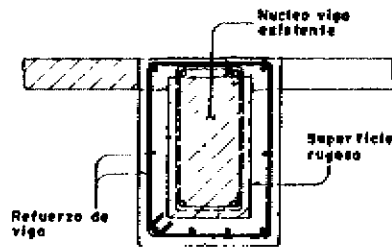


Fig.5 Hospital de Niños Benjamín Bloom, San Salvador. En primer plano colapso de dos secciones de tres pisos, en el fondo torre de encamados con sistema a base de muros estructurales sin daños significativos - Terremoto 1986.



REFUERZO DE COLUMNA



REFUERZO DE VIGA

Fig.6 Refuerzo de elementos de concreto reforzado mediante la ampliación de las secciones y adición de acero de refuerzo.

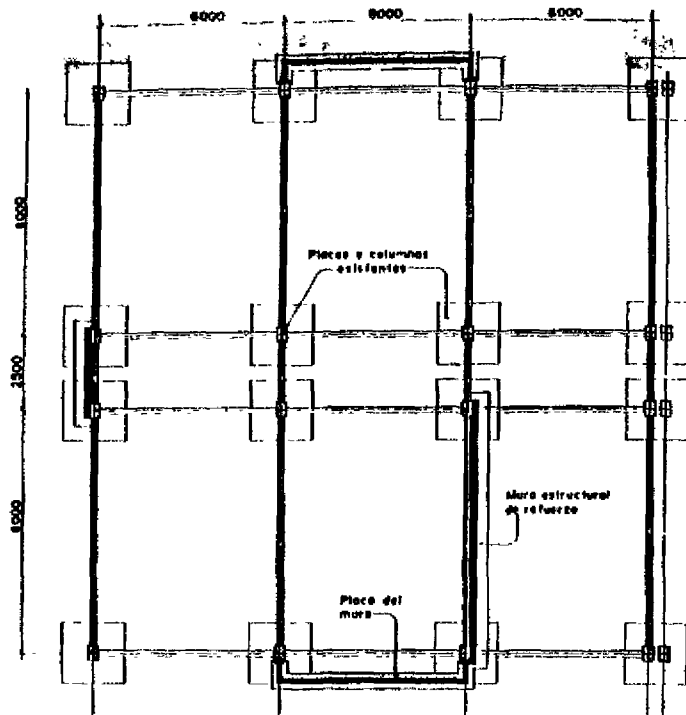


Fig.7 Refuerzo sísmico de edificio dañado por el sismo de abril 1983, mediante la inclusión de muros estructurales. Noviciado María Auxiliadora, San José, Costa Rica

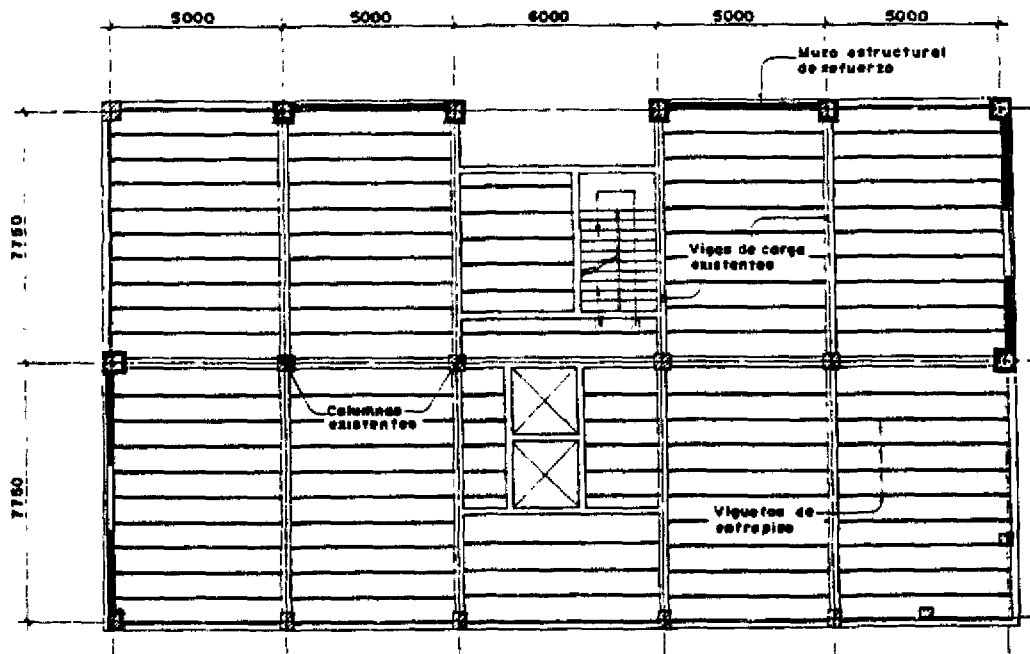


Fig.8 Refuerzo sísmico mediante la inclusión de muros estructurales, propuesto para el edificio oficinas Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo, San José, Costa Rica.