

REFUERZO DE ESTRUCTURAS

EVOLUCION DE LAS MATERIALES Y TECNOLOGIAS DISPONIBLES



Han aparecido nuevas tecnologías, materiales y maquinarias que facilitan la ejecución de la realización de las reparaciones y refuerzos, reduciendo sus costos, mejorando su calidad e incrementando su confiabilidad. En tanto, los métodos de análisis actualmente disponibles, especialmente el análisis de elementos finitos no lineal, permiten modelar la estructura y sus singularidades con gran exactitud y un alto grado de confiabilidad.

En los últimos años, ha aparecido una gran cantidad de nuevos materiales, maquinarias, métodos de construcción y de análisis que permiten realizar la reparación y el refuerzo de estructuras dañadas o sub-dimensionadas en forma más certera, simple y efectiva. En lo referente a materiales, se trata principalmente de refuerzos con fibra de carbono; resinas epóxicas; anclajes mecánicos y químicos; barras de acero soldables; cables de acero de alta resistencia; grouts de alta resistencia, gran fluidez y baja retracción; hormigones auto compactantes; shotcrete, etc. En tanto, en el ámbito de las maquinarias, destacan gatos servo-controlados de gran capacidad; grúas y plumas de alto alcance; máquinas perforadoras livianas de gran eficiencia, bombas de hormigón, etc. Estos nuevos materiales y maquinarias facilitan la ejecución de la realización de las reparaciones y refuerzos, reduciendo sus costos, mejorando su cali-

dad e incrementando su confiabilidad. En tanto, los métodos de análisis actualmente disponibles, especialmente el análisis de elementos finitos no lineal, permiten modelar la estructura y sus singularidades con gran exactitud y un alto grado de confiabilidad. Desde el punto de vista sísmico, existe además la posibilidad de rehabilitar edificios sub-dimensionados mediante la incorporación de disipadores de entrespiso, masas sintonizadas e incluso mediante la incorporación de un sistema de aislación sísmica bajo la estructura. Las dos primeras técnicas se aplicaron en varios edificios que presentaron daños menores durante el terremoto de 2010. La reparación de la Basílica del Salvador (en Santiago) contempla la eventual incorporación de un sistema de aislación basal, siendo uno de los casos más interesantes que se está estudiando actualmente en nuestro país.

Relación básica para el diseño de estructuras

El diseño de estructuras debe cumplir siempre con la siguiente relación básica:

$$R > F.S. * S(1)$$

donde: R = Resistencia de la estructura
F.S. = Factor de seguridad
S = Solicitación (demanda)

En el caso de solicitaciones gravitacionales, el valor de S es un dato que no se puede alterar y la estructura debe tener la resistencia (R) necesaria para cubrir dicha solicitación amplificada por el coeficiente de seguridad que establecen las normas de diseño vigentes. En el caso sísmico en que la excitación no es una fuerza que actúa sobre la estructura, sino que el resultado de las fuerzas de inercia que se generan al someter la base de la estructura al movimiento sísmico, es posible cumplir con la relación indicada en la ecuación (1) modificando la solici-

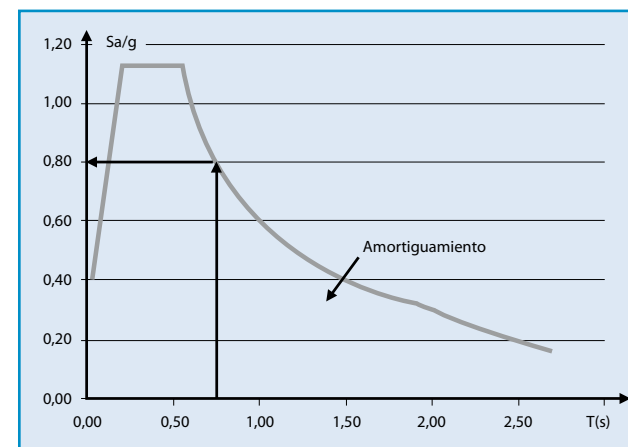


Figura 1 Espectro de aceleraciones para Zona sísmica 2, Suelo tipo B y 5% de amortiguamiento de la estructura

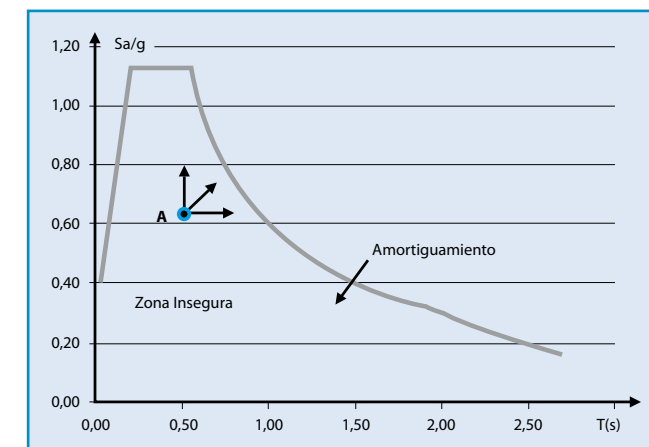


Figura 2 Formas en que se puede rehabilitar una estructura sísmicamente dañada o sísmicamente insegura

tación (S). Es precisamente eso lo que se hace con la aislación sísmica. En la reparación de estructuras que sufrieron daño sísmico, esto tiene gran importancia. Para ilustrarlo, basta con recordar que las solicitaciones sísmicas a que queda sometida una estructura se pueden representar con un espectro sísmico de aceleraciones como el que se muestra en la Figura 1.

El espectro de aceleraciones absolutas indicado en la Figura 1 corresponde al universo de estructuras que tienen un 5% de amortiguamiento viscoso equivalente, ubicadas en un determinado sitio, sometidas al sismo de diseño que especifica la Norma NCh 2745. El período propio de la estructura se muestra en el eje de las abscisas. El eje de ordenadas del gráfico muestra el esfuerzo de corte basal a que queda sometido el universo de estructuras con 5% de amortiguamiento, debido al sismo al que corresponde el espectro. Como ejemplo, se ilustra el caso de una estructura que tiene un período propio de 0,75 seg. Dicha estructura quedará sometida a un esfuerzo de corte basal igual al 80% del peso de la estructura (Sa = 0,8g).

En el caso de estructuras sísmicamente dañadas o subdimensionadas, se podrá dibujar el espectro que corresponde al grado de amortiguamiento de dicha estructura frente al tipo de sismos que se espera que puedan ocurrir en el lugar en que se encuentra emplazada

la estructura (dato que entregan las normas de diseño sísmico NCh 433 y NCh 2745). En la Figura 2, se puede dibujar el punto que corresponde a la estructura que se está analizando de acuerdo a su período propio principal y su resistencia sísmica reducida por el F.S. que se le desea otorgar (ej.: punto A del gráfico de la Figura 2). Para transformar dicha estructura en una estructura sísmicamente segura, será necesario que el punto A caiga en el área que queda sobre la curva del espectro (zona segura). Esto se puede lograr de varias maneras:

- a. Incrementando la resistencia de la estructura (flecha vertical).
- b. Incrementando la flexibilidad de la estructura (flecha horizontal).
- c. Una combinación de las medidas anteriores (flecha inclinada).
- d. Incrementando el amortiguamiento de la estructura (efecto que desplaza las curvas del espectro hacia abajo, facilitando así que la estructura alcance la zona segura).

De acuerdo a la posición del punto A, cabe mencionar que existen medidas más o menos efectivas para lograr la rehabilitación de la estructura. Reforzar la estructura, incrementando simultáneamente su rigidez puede resultar contraproducente, mientras que el reforzamiento de la estructura

otorgándole simultáneamente una mayor flexibilidad (lo que frecuentemente no es fácil de lograr mediante los procedimientos tradicionales de refuerzo) puede resultar conveniente. Por otro lado, flexibilizar la estructura sin incrementar su resistencia (lo que se logra con la aislación sísmica) puede resultar muy conveniente, especialmente en estructuras rígidas. Agregando además algún grado de amortiguamiento, como generalmente se hace con la aislación sísmica, la estructura sísmicamente segura se alcanza con mayor facilidad (ver Figura 2).

Refuerzo de fibras de carbono

El refuerzo de elementos de hormigón armado, acero y madera con fibra de carbono se utiliza desde hace más de 20 años en el mundo. Consiste en



pegar, con resina epóxica, tejidos o láminas de fibra de carbono a la superficie traccionada del elemento que se desea reparar o reforzar. Se pega a la estructura mediante resina epóxica. La fibra de carbono, tiene un comportamiento lineal elástico frágil. Su resistencia a tracción (del orden de 38.000 kg/cm²) es 9 veces superior a la fluencia del acero corriente de construcción (4.200 kg/cm²) y su módulo de elasticidad es similar a la del acero. Para el diseño de los refuerzos de fibra de carbono, se usa comúnmente la norma ACI 440-2R.

En Chile se han realizado refuerzos de estructuras de hormigón armado con fibra de carbono desde hace más de 15 años. Algunos ejemplos que personalmente conozco de cerca, que se hicieron con anterioridad del terremoto del 27 de febrero de 2010 y que se comportaron bien durante dicho evento, son entre otros, el refuerzo de una serie de vigas y columnas del Estadio Nacional; refuerzo de vigas y columnas del Edificio de Esso en Vitacura; refuerzo de escaleras del Nuevo Centro de Justicia; refuerzo de losas del Colegio San Benito; losas de la clínica San Carlos de Apoquindo, etc. El tablero del Puente Centenario (cruce de Av. Américo Vespucio sobre el

río Mapocho) se reforzó con láminas de fibra de carbono que se colocaron en ranuras que se hicieron en el recubrimiento de la losa del tablero.

Otros sistemas de refuerzo

En este aspecto, podemos mencionar las resinas epóxicas de baja viscosidad para la inyección de fisuras y recuperación del monolitismo de las estructuras de hormigón armado, para fijar los anclajes químicos, y para fijar tejidos y láminas de fibra de carbono de refuerzo.

También destacan los anclajes mecánicos y químicos para fijar elementos de refuerzo a la estructura existente; aceros soldables que se pueden fijar con facilidad a placas de anclaje; cables de acero de alta resistencia con anclajes de cono y cuñas que permiten anclar sus extremos en forma simple económica y efectiva; y grouts de alta resistencia, gran fluidez y baja retracción que permiten reponer con mucha facilidad y gran efectividad zonas de hormigón dañado.



Finalmente, también se cuentan hormigones auto-compactantes para rellenar zonas de difícil acceso y shotcrete para la reposición del hormigón de recubrimiento de muros, columnas, losas y vigas.

Reparación estructural post terremoto de 2010

Tras el terremoto de febrero de 2010 hubo diversas obras que fueron reparadas estructuralmente. La mayor parte de los refuerzos de edificios que se hizo con posterioridad del terremoto consistió en un recrecido de los muros dañados. En dichas reparaciones se usó siempre el anclaje químico de barras de refuerzo (barras principales y trabas). En muchos casos se utilizó hormigón autonivelante y grout de alta resistencia. En varios casos se usaron también refuerzos con fibra de carbono, principalmente en los muros.

Dos casos muy emblemáticos son el edificio Emerald y Torre C de Edificio el Parque. En ambos, además de reforzar los muros dañados, fue necesario izar (gatear) la estructura, ya que los edificios quedaron inclinados como consecuencia del terremoto del año 2010. ●

Ambito normativo

Las principales normas que existen actualmente en el mundo respecto a la evaluación del daño sísmico en estructuras y su reparación y refuerzo, son las siguientes:

- ASCE, 2003, Standard for the Seismic Evaluation of Buildings, ASCE 31-03, American Society of Structural Engineers, Reston, VA.
- ATC, 1996, The Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- FEMA, 2006, Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, FEMA 547. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA, 1998, Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Buildings, FEMA 306. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA, 1998, Repair of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Buildings, FEMA 308. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA, 1992, The NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings, FEMA 178. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- En Chile solamente existe el Anexo A de la norma NCh433.Of1996 "Diseño Sísmico de Edificios" que actualmente se encuentra en revisión.

Fuente: Carl Lüders, Socio Fundador de SIRVE y Profesor del Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica de la Escuela de Ingeniería de la PUC.