

# LA INGENIERÍA ANTISÍSMICA

## FILOSOFÍA DE DISEÑO SÍSMICO

Expresada en forma resumida, la filosofía de diseño aceptada por prácticamente todos los países sísmicos del mundo establece, por una parte, que los edificios deben diseñarse de modo que no sufran daños de ninguna especie durante los eventos sísmicos que ocurren frecuentemente, esto es, varias veces durante el período de vida útil (50 a 70 años) del edificio. Pero por otra parte, establece que las estructuras pueden sufrir daños, e incluso tener que demolerse con posterioridad al sismo, ante la eventualidad del sismo más severo que se puede esperar en un determinado lugar, siempre y cuando se garantice que la estructura no colapsará durante la ocurrencia de este sismo severo. La justificación de esta filosofía radica en el elevado costo que significaría diseñar las estructuras para impedir la ocurrencia de daños durante el sismo de gran severidad, unido al hecho de la muy baja probabilidad de ocurrencia de tal evento sísmico. Esta filosofía, de aplicarse adecuadamente en un determinado país, garantiza la preservación de las vidas humanas frente a cualquiera circunstancia, junto con optimizar el uso de los recursos económicos de la sociedad.

El diseño sismorresistente de las construcciones se realiza en los diferentes países de acuerdo a un conjunto de disposiciones que reciben el nombre de “normas”, las cuales son redactadas por los profesionales que entienden del tema. Las normas de los diferentes países son semejantes en sus principios aun cuando guardan diferencias entre ellas según sean las características particulares de la práctica sismorresistente y de construcción en dicho país. No obstante lo anterior, la experiencia mundial durante los últimos 20 años en este campo establece que el comportamiento de las estructuras frente a sismos de gran severidad ha sido bastante desastroso en varios de estos países, con un gran número de edificios colapsados. Esta experiencia indica que no basta con tener una buena norma para asegurar que los edificios se comporten sísmicamente de acuerdo a la filosofía de diseño enunciada anteriormente. También es indispensable que la conciencia sísmica se extienda e incorpore a la práctica de la arquitectura, que define en gran medida el sistema estructural que tendrán los edificios, y que se controle el proceso constructivo y de mantención de las estructuras de los edificios, además de controlar que el diseño sismorresistente se ejecute de acuerdo a las normas.

Sin embargo, el problema es más serio aun, ya que a la dificultad de satisfacer los requisitos recién enunciados, se agrega el hecho del desconocimiento que la sismología tiene del evento más severo que puede ocurrir en un determinado lugar. En otras palabras, no se puede predecir con precisión este sismo de gran severidad y, en consecuencia, no se puede garantizar absolutamente que las estructuras no colapsarán durante dicho evento sísmico. Para lograr esto es necesario modificar la filosofía de diseño sismorresistente, y que la sociedad acepte el aumento de costo que ello implicaría.

## **DESARROLLOS IMPORTANTES DE LA ESPECIALIDAD Y SU EFECTO EN CHILE**

1928	Sismo de Talca. El Gobierno de Chile envía proyecto de ley para reglamentar el diseño sísmico de las construcciones y la forma de aprobar los proyectos de edificación.
1935	Empieza a regir la Ordenanza General de Construcciones y Urbanización.
1940	Se obtiene el primer registro de aceleraciones de un evento sísmico severo en El Centro, California.
1955-60	Se desarrolla el concepto de Espectro de Respuesta Sísmica (USA).
1955-60	Se desarrolla el Método de los Elementos Finitos (USA), cuya aplicación fue motivada por el desarrollo de los computadores digitales.
1956	Se efectúa la Primera Conferencia Mundial de Ingeniería Antisísmica, en San Francisco, California.
1959	Se establece una comisión en INDITECNOR (posteriormente Instituto Nacional de Normalización), para elaborar una norma de Diseño Antisísmico.
1963	Se desarrollan las Primeras Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, en Santiago.
1969	Se realiza la Cuarta Conferencia Mundial en Ingeniería Antisísmica en Santiago.
1972	Se oficializa la primera versión de la norma NCh 433 Diseño Sísmico de Edificios.
1985	Se obtienen en Chile los primeros registros de un evento sísmico de gran severidad.
1986	Comienza el desarrollo de la técnica de aislación sísmica para el diseño sismorresistente de estructuras.
2003	Se oficializa la primera versión de la norma NCh 2369, Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones (Industriales).
2003	Se oficializa la primera versión de la norma NCh 2745, Análisis y Diseño Sísmico de Edificios con Aislación Sísmica.

## **BREVE RESEÑA HISTÓRICA**

El desarrollo de esta especialidad en Chile ha seguido el camino trazado inicialmente en California, USA, y posteriormente en Japón y Nueva Zelanda. Los desarrollos importantes se inician en California en la década de los 50, con investigaciones que sentaron las bases del diseño sismorresistente, realizadas entre otros por los profesores Housner, Newmark y Clough, y por el destacado ingeniero J. A. Blume. El desarrollo de los computadores digitales permitió utilizar los registros de aceleraciones obtenidos durante eventos sísmicos severos, y los modelos de comportamiento sísmico de elementos estructurales obtenidos en laboratorios universitarios, para poder predecir en forma analítica la respuesta sísmica de estructuras reales. La ocurrencia de movimientos sísmicos severos a partir de los años 60 y el estudio de las causas de los daños producidos por ellos, produjo un gran desarrollo de esta especialidad en diversos países del mundo. Los sismos de Mayo de 1960 en el sur de Chile, y de Marzo de 1985 en la zona central, han dado origen a numerosas investigaciones en Chile, que han servido para adaptar a nuestra práctica nacional los descubrimientos logrados en los países sísmicos más desarrollados.

## **RESISTENCIA VS. DUCTILIDAD**

Existen dos conceptos de gran importancia en el diseño sismorresistente: la resistencia lateral y la ductilidad.

La resistencia lateral se refiere a la capacidad resistente horizontal que es capaz de desarrollar una estructura antes de colapsar.

La ductilidad refleja la capacidad de absorción y disipación de energía que una estructura puede ofrecer antes de colapsar. Las estructuras deben, de una u otra forma disipar la energía que el movimiento del suelo le logra traspasar durante un sismo. La forma más efectiva de llevar a cabo esta tarea durante sismos de gran severidad es deformándose lateralmente y experimentando deterioros locales del material en los que se convierte energía en calor. Por cierto estos deterioros implican daño interno. Si durante este proceso, no se alcanza a desarrollar la deformación horizontal que lleva la estructura a su colapso, ella sobrevivirá el evento sísmico; en caso contrario, colapsará. La deformación máxima que el sismo severo le demanda a una estructura se expresa a través de la ductilidad, que es el cociente entre la deformación máxima y una deformación horizontal de referencia (deformación de fluencia).

La experiencia sísmica indica que para tener un satisfactorio comportamiento sísmico, el diseño debe velar por que la estructura disponga de una alta resistencia lateral, si es que no ofrece un comportamiento dúctil, o de una ductilidad suficiente para la resistencia lateral con que ha sido diseñadas. En la medida que la estructura se diseña con mayor resistencia lateral, menor es la necesidad de ductilidad, y viceversa. Ambas características que intervienen en el diseño están relacionadas, y los colapsos que se producen están generalmente asociados a una deficiente provisión de ductilidad para la resistencia lateral que se ha considerado en el diseño.

La experiencia chilena, que hasta ahora ha diferido de la que se usa en la mayoría de los países del mundo, ha optado por proveer una alta resistencia y una baja o moderada ductilidad. Esta experiencia ha sido muy exitosa frente a eventos sísmicos severos, como el ocurrido en Marzo de 1985 en la zona central de Chile. Por el contrario, el método de proveer una alta ductilidad asociada a una baja o moderada resistencia lateral, como lo han preconizado en países como Nueva Zelandia y en USA, no parece estar dando resultados que sean consistentemente satisfactorios.

## **NORMATIVA EXISTENTE**

El objetivo fundamental de una norma es estandarizar las metodologías y procedimientos, de modo que todos los usuarios de los productos de las normas dispongan de una garantía que ellos pueden ser usados en forma confiable. Las normas de diseño sísmico por las que se rige en la actualidad nuestro país, están en un nivel de desarrollo semejante al que ofrecen los países más avanzados en esta materia. Cuentan además con la ventaja de haber sido probadas por sismos severos, como el ocurrido en Marzo de 1985, y por otros sismos de menor severidad. Las normas son redactadas a través de un proceso de discusión y análisis administrado por el Instituto Nacional de Normalización, dependiente del Ministerio de Economía. En este proceso pueden participar todos los profesionales interesados en el tema específico de la norma, sus usuarios y los

proveedores de los materiales. Al término de su discusión las normas son oficializadas por la Contraloría General de la República, después de un informe favorable del Ministerio respectivo.

La norma que controla el diseño sísmico de los edificios es la NCh 433, que ha tenido versiones oficiales en 1972, 1993 y 1996. Cada una de estas versiones ha reflejado el avance mundial que se ha logrado respecto al comportamiento sísmico de los edificios. En esta norma se establecen los métodos de análisis para obtener los esfuerzos producidos por los sismos en los elementos estructurales de los edificios y se entregan las disposiciones para proceder al dimensionamiento de las estructuras resistentes. Esta norma pretende satisfacer los principios de la filosofía de diseño expuesta anteriormente. Entre sus características más relevantes están la zonificación sísmica del país, estableciendo que diferentes zonas del país presentan un peligro sísmico diferente, y la diferente importancia que pueden tener los edificios desde el punto de vista sísmico en atención al grado en que es prescindible en la emergencia que sucede a un sismo severo y a la cantidad de personas que se podrían ver afectadas por los daños que se produzcan en el edificio.

El uso de la norma NCh 433 no es suficiente para completar el diseño sísmico de las estructuras. Para proceder a la etapa de dimensionamiento de los elementos estructurales es imprescindible recurrir a las normas de diseño para el material específico de la estructura. En el caso del acero y el hormigón armado la norma NCh 433 establece que deben usarse las disposiciones de las normas estadounidenses redactadas por el Instituto Americano de la Construcción en Acero (AISC) y por el Instituto Americano del Hormigón (ACI), respectivamente. En el caso de las construcciones de albañilería, el dimensionamiento debe regirse por las normas chilenas NCh 1928, para el caso de la albañilería armada, y NCh 2123 para el caso de la albañilería confinada por pilares y cadenas de hormigón armado. Por último, en el caso de las construcciones de madera, deben usarse las disposiciones de la norma chilena NCh 1198.

Recientemente ha entrado en vigencia la norma NCh 2369 que regula el diseño sísmico de las estructuras e instalaciones industriales, materia que no está cubierta en la norma de edificios. Esta norma se basa en la experiencia predominantemente chilena que se ha obtenido del comportamiento de las estructuras y equipos industriales durante los sismos destructivos de 1960 en la zona de Concepción y Talcahuano, y de 1985 en la zona central del país. Una diferencia importante entre las normas NCh 2369 y 433, es la mayor seguridad sísmica que implican las disposiciones de la norma NCh 2369. Esto se debe a dos razones principales: la primera es la magnitud de las pérdidas económicas que pueden eventualmente producirse en una industria debido a la interrupción o suspensión del proceso productivo debido a los daños producidos por el sismo en la estructura o en los equipos; la segunda es el menor costo relativo de la estructura sismorresistente de una obra industrial en comparación con el costo de los equipos que alberga. Es interesante hacer notar que por ahora no se encuentran en el mundo normas sísmicas como esta, de tipo general, que se refieran específicamente a las instalaciones industriales.

Existen otros tipos de estructuras para las que no existen normas chilenas de diseño sísmico, como en los casos de puentes, puertos, embalses, túneles u otras obras de infraestructura. Tampoco existen normas de dimensionamiento para materiales o sistemas constructivos diferentes de los indicados anteriormente. En estos casos es importante que los dueños de estas obras exijan el uso de normas extranjeras en el caso que ellas existan, requieran un proceso de revisión acucioso tanto del proceso de diseño como del proceso constructivo, o se inclinen por el

uso de un material que tenga norma de dimensionamiento si ello es posible. La experiencia obtenida del comportamiento de estructuras en sismos pasados tanto en Chile como en el extranjero, ha enseñado que este punto es de gran relevancia práctica, ya que una parte importante de los daños se han concentrado en construcciones para las cuales no se utilizaron normas de diseño.