

Juan C. de la Llera

Ingeniero Civil, M.Sc., Ph. D. UC Berkley
 Jefe Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica
 Pontificia Universidad Católica de Chile

Mario Alvarez S.

Ingeniero Civil, M.Sc. UC
 Investigador
 Pontificia Universidad Católica de Chile

Carl Lüders S.

Ingeniero Civil, Diplom Ingenieur T.H., Darmstadt, Alemania
 Profesor
 Pontificia Universidad Católica de Chile

Norma de Aislamiento Sísmico: Sismos bajo Control

La norma "NCh2745-2003 Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica", declarada oficial en noviembre del 2003, transforma a nuestro país en uno de los primeros del mundo en contar con una regulación de este tipo. Aquí se presenta la filosofía de diseño que sustenta dicha norma y el impacto que su uso tendrá en la construcción sismorresistente del país.

El documento original de trabajo fue una traducción literal del capítulo 16 del código Uniform Building Code de 1997, al que se le agregaron diversos aspectos novedosos y apropiados a la realidad sísmica nacional, en particular, en lo que dice relación con la definición de la sollicitación sísmica, los factores de reducción de respuesta, y un comentario que pretende servir de apoyo a la labor de los profesionales que la usen. Como toda norma, ya hay diversos aspectos de ella que pueden ser mejorados, y se espera que evolucione rápidamente.

Para aquellos lectores no familiarizados con el concepto de aislamiento sísmico, esta técnica busca, idealmente, independizar horizontalmente a la estructura del movimiento del suelo de fundación, reduciendo así su daño durante un temblor, y localizando la deformación relativa entre el suelo y la estructura en dispositivos especialmente diseñados denominados aisladores sísmicos. En una estructura aislada (Figura 1) se distinguen tres componentes: la subestructura, esto es, lo que se encuentra por debajo del sistema de aislamiento, la interfaz de aislamiento, y la superestructura. Aún cuando es intuitivo colocar la interfaz de aislamiento al nivel de fundación del edificio, no es imprescindible que así sea.

Entre las ventajas más llamativas del concepto de aislamiento sísmico está reducir sustancialmente: (i) el daño estructural, (ii) el daño a los contenidos, (iii) el riesgo de detener la operación de la estructura, (iv) la incertidumbre en el comportamiento sísmico debido a la variabilidad en las propiedades de la estructura, (v) las restricciones estructurales sobre la arquitectura de la superestructura, (vi) las limitantes estructurales sobre nuevas técnicas constructivas y materiales, y (vii) la percepción y miedo de los usuarios durante un sismo.

El aislamiento sísmico está intrínsecamente vinculado al desarrollo de edificios y construcciones más seguras que tengan un desempeño controlado y predecible durante un sismo severo. El sistema de aislamiento permite que este problema no sea una sollicitación que necesariamente controle y restrinja al diseño de la superestructura, de igual forma que el funcionamiento del sistema ABS de un automóvil no requiere de un conductor habilidoso para no derrapar en el frenado en curva. De la misma manera, la mejor solución que la ingeniería sísmica nacional puede entregar a la sociedad es minimizar el problema sísmico o el impacto que éste tiene sobre nuestras estructuras.

Por limitaciones de espacio sería im-

posible describir el contenido de la norma NCh.2745. Consecuentemente, la discusión se centrará en tres aspectos esenciales: respuesta de estructuras aisladas versus estructuras convencionales, soluciones y dispositivos disponibles, costos y aspectos constructivos.

Respuesta de Estructuras Aisladas versus Estructuras Convencionales

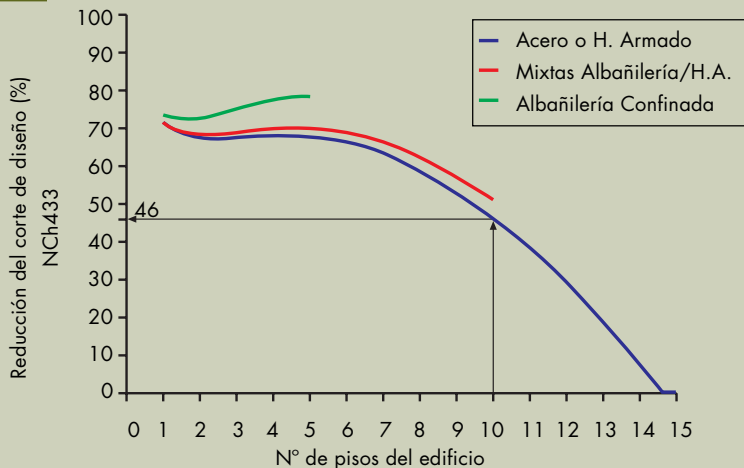
La Figura 2 muestra un resultado de interés para las empresas de ingeniería y la industria de la construcción. En ella se presenta el porcentaje de reducción del corte basal de diseño que se obtendría en una estructura convencional, calculado según la norma NCh.433, y si se considerara la misma estructura aislada sísmicamente (según NCh.2745). La solución es válida para las 3 zonas sísmicas del país y se presenta para estructuras de H.A., acero, albañilería confinada y mixta de albañilería/H.A. de hasta 15 pisos que estén fundadas sobre suelo tipo II. Por ejemplo, para una estructura de 10 pisos de muros de hormigón armado, ubicada en cualquier lugar del país sobre un suelo tipo II (firme), es posible diseñar la estructura aislada con el 64% de los esfuerzos (reducción del 46%) con que debe diseñarse la estructura convencional equivalente. Esto necesariamente redundará en una disminución del costo directo de la estructura, cuya magnitud dependerá, entre otros, de factores arquitectónicos. *Es claro que el mínimo costo directo de una estructura en un país sísmico es el costo de la estructura que resulta utilizando el corte mínimo de la norma NCh.433.*

En la comparación anterior, el factor de reducción (R) al diseñar la estructura convencional según la NCh.433 resultó ser igual a 7.2. Esto implica comportamiento inelástico importante (daño) durante un sismo severo, a diferencia de la estructura aislada en que las fuerzas de diseño pueden ser considerablemente más bajas, lo que implicará que ésta se comporte esencialmente en el rango elástico (sin daño). La estructura convencional deberá ser capaz de disipar energía consistente con el factor de reducción escogido en su dise-

Figura 1. Corte esquemático de la Clínica UC San Carlos construida durante el 2001, que está aislada sísmicamente por 52 aisladores elastoméricos.

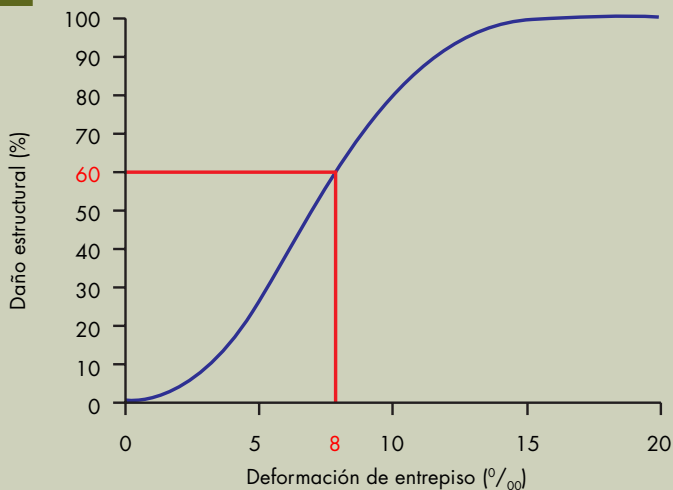


Figura 2



■ Reducción del corte de diseño (NCh433) en estructuras convencionales al incorporar aislamiento sísmico. Curvas calculadas para estructuras de acero, H.A., mixtas albañilería/H.A. y albañilería confinada fundadas sobre suelo tipo II.

Figura 3



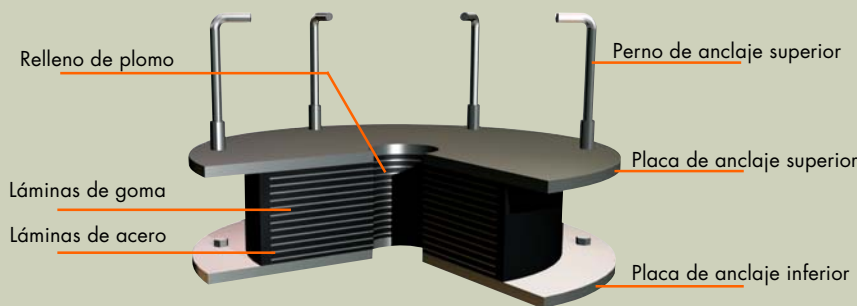
■ Curva de vulnerabilidad para una estructura de muros de hormigón armado calibrada a partir de lo ocurrido en Viña del Mar en el terremoto del 3 de marzo de 1985.

ño. ¿Qué daño es esperable para un factor de reducción $R=7$ en una estructura convencional?. A modo de ejemplo, consideremos el mismo edificio anterior, pensando en que se diseñó según la NCh.433

y que la deformación de entrepiso de diseño resultó igual a 0.002 veces la altura de piso h (deformación límite que acepta la NCh.433). Para dicho edificio, con $R=7$, resulta una ductilidad requerida $\mu \approx 4$.



Figura 4



■ Aislador elastomérico con corazón de plomo.

Conservadoramente, la deformación de entrepiso real durante el sismo de diseño será aproximadamente igual a la ductilidad (μ) $4 \times 0.002h$, es decir 0.8% de la altura de piso. La Figura 3 muestra la curva de vulnerabilidad, es decir el porcentaje de daño para un determinado nivel de deformación de entrepiso, de un edificio de muros de hormigón armado calibrada a partir de lo ocurrido en Viña del Mar en el terremoto del 3 de marzo de 1985. En este caso, el nivel de daño esperado para una deformación de 0.8% es de 60%, aproximadamente. Si la estructura costara 5 UF/m², el daño estructural esperado para un sismo similar al de la norma NCh.433 sería de 3 UF/m². Este costo no existe en la estructura aislada ya que se comporta esencialmente en rango elástico (ductilidad global demandada $\mu \approx 1.3$).

Otro aspecto relevante es la protección de los contenidos en los edificios aislados. Debido a la gran variabilidad entre estructuras, el costo de daño en contenidos es tradicionalmente supuesto por aseguradoras y reaseguradoras internacionales como proporcional al daño estructural. Por simplicidad y conservadoramente asumamos que los contenidos de la estructura tienen un valor de 10 UF/m² y que su nivel de daño es al menos el mismo porcentaje que el daño estructural (en general es mucho mayor), el costo esperado es entonces de 6 UF/m², aproximadamente. La experiencia sísmica en estructuras aisladas durante los terremotos de Northridge (1994) y Kobe (1995), y las significativas reducciones (6 a 9 veces) de aceleración medidas

en estructuras aisladas en relación a estructuras convencionales, avalan que el daño en contenidos y en elementos no estructurales es despreciable.

Soluciones y Dispositivos Disponibles

Los dispositivos de aislamiento sísmico que cubre la nueva norma NCh.2745 incluyen aisladores elastoméricos con y sin corazón de plomo, aisladores friccionales y deslizadores, y cualquier otro sistema de aislamiento que sea capaz de deformarse lo requerido por el espectro de desplazamiento propuesto, que provea a la estructura de una capacidad restitutiva, que permita lograr el alargamiento del período propio de vibración lateral de la estructura a una zona de baja potencia sísmica, y que provea rigidez vertical importante para evitar el "cabecero" de la estructura frente a estos movimientos. En su comentario, la NCh.2745 entrega información adicional y aclaratoria a los requisitos contenidos en las cláusulas y además se describen en detalle la definición y cálculo de propiedades para los distintos sistemas.

Solo a modo de ejemplo, la Figura 4 muestra un aislador elastomérico con corazón de plomo. Este aislador está constituido por un conjunto de láminas de goma natural y acero intercaladas y vulcanizadas entre sí. El aislador posee una baja rigidez lateral, entre 0.8 t/cm y 3 ton/cm habitualmente, y una gran rigidez vertical que es del orden de 1000 veces mayor. La distorsión máxima en corte que alcanzan estos

elastómeros es del orden de 5, lo que implica que el aislador podría deformarse lateralmente en hasta 5 veces la altura de goma utilizada. Por supuesto, razones de estabilidad y factores de seguridad adicionales obligan en general seleccionar una distorsión angular máxima para el diseño igual a 2. Se utilizan además en el diseño tensiones verticales máximas de 120 kg/cm² para condiciones de cargas de largo plazo.

La confiabilidad de los dispositivos fabricados por empresas certificadas nacionales y extranjeras es extraordinariamente alta. A diferencia de los apoyos de elastómeros sintéticos que presentan deformaciones últimas menores, los aisladores de goma natural poseen en general gran deformabilidad, capacidad de disipación, y repetitividad de su comportamiento en ciclos sucesivos. Por ejemplo, en el Laboratorio de Control de Vibraciones de la UC (Figura 5) se han ensayado a la fecha más de 350 aisladores de goma natural, la mayoría de procedencia nacional, pero también extranjeros, sin registrarse nunca el colapso de un aislador aún en condiciones extremas de carga. La adherencia goma-metal es de tal calidad, que la goma se desgarraría antes de que falle en la interfaz vulcanizada. Ensayos de envejecimiento acelerado han demostrado que la goma natural protegida que se utiliza en los aisladores experimenta cambios de rigidez inferiores al 10% en 50 años.

Costos y Aspectos Constructivos

Como con cualquier tecnología, los primeros intentos de introducirla son siempre especiales y no exentos de dificultades. Los resultados indicados a continuación corresponden a la experiencia de los autores en la implementación de aislamiento elastomérico en dos estructuras en Chile (Clínica UC San Carlos y Edificio San Agustín de la Escuela de Ingeniería de la PUC). A precio de hoy, el costo de los aisladores elastoméricos en todos los casos resultó cercano a las 0.5 UF/m². A esto se le debe sumar el costo de

Figura 5



■ Ensayo de aislador.

anclajes y montaje que conservadoramente es de 0.25 UF/m^2 , el costo eventual de una losa adicional, aún cuando esta puede ser evitada al ubicar los aisladores en el cielo del subterráneo, y un costo menor de algunas conexiones flexibles (agua, gas, alcantarillado). Digamos que este costo es de 0.25 UF/m^2 adicionales. Así, en el peor caso, el costo adicional producto del sistema de aislamiento es de aproximadamente 1 UF/m^2 . ¿Es posible equiparar este costo adicional del sistema de aislamiento de forma de mantener el costo directo de la estructura completa?

Primero, del análisis conservador de daño realizado arriba, nos damos cuenta que el costo potencial en daño de estructura y contenidos supera el costo del sistema de aislamiento. Sin embargo, asumamos (aunque probablemente en forma incorrecta) que los usuarios de nuestros edificios no están dispuestos a pagar ni un peso más por seguridad sísmica en Chile porque nacieron después de 1985, o porque no tienen memoria sísmica. ¿Es todavía posible equiparar el costo del aislamiento con los ahorros en estructura?

Como los esfuerzos internos en la estructura son proporcionales al esfuerzo de corte de diseño, conservadoramente, al menos el ahorro en hormigón y acero de

muros debiera ser proporcional a la reducción de esfuerzos en los elementos responsables sísmicamente, mientras todo el resto se diseña igual que la estructura convencional (lo que no es necesario). Consideremos una estructura de muros de hormigón de 10 pisos, planta 1000 m^2 , peso sísmico 10.000 ton , y 2% de muros en planta en cada dirección. Utilizando aislamiento, vimos anteriormente que es posible reducir el corte de diseño en un 46% con lo cual se puede obtener un ahorro similar en la cantidad de muros, es decir, bastará con un 2.16% de muros en total. Esto implica un ahorro de 18.4 m^2 de muros en planta o 55 m^3 de hormigón armado por planta, aproximadamente. El ahorro considerando el costo del hormigón, acero, moldajes, mano de obra, gastos generales y utilidades es conservadoramente de 0.5 UF/m^2 para este caso. A esto se debe sumar el hecho de eliminar las juntas de expansión de la estructura cuyo costo es probablemente del orden de 0.2 UF/m^2 . Por otra parte, no se considera el potencial ahorro en fundaciones por disminución de corte sísmico, ni el menor confinamiento necesario para el hormigón en la estructura aislada debido a que responde elásticamente. En definitiva, una cota superior para el costo de aislamiento sísmico en una estruc-

tura es de $1-0.5-0.2=0.3 \text{ UF/m}^2$. El costo final resultante de las tres estructuras que ya cuentan con aislamiento sísmico en Chile varió entre 4.8 UF/m^2 y 5.5 UF/m^2 .

La industria de la construcción debe aprovechar la existencia de la nueva norma *NCh.2745*, que permite a los profesionales nacionales diseñar y construir estructuras con aislamiento sísmico. El producto final, el edificio, no sólo tendrá la posibilidad de sobrellevar exitosamente un sismo intenso y ser más seguro que la construcción convencional, sino que además permitirá que se mantenga operativo durante y después de un terremoto importante. Los mayores detractores del aislamiento sísmico han focalizado su crítica en el tema del costo. Esperamos que los valores mostrados desmitifiquen en alguna forma este tema. Ninguna opinión técnica fundada puede objetar hoy a nivel mundial las innumerables ventajas de las estructuras aisladas, lo cual queda respaldado por el violento desarrollo que ha tenido esta técnica en Estados Unidos y Japón. Establecida esta norma, es materia de voluntad de los emprendedores inmobiliarios y de la industria nacional de la construcción el permitir dar este gran paso en pro de la seguridad de nuestros edificios. **B**

