

# AISLACIÓN SÍSMICA Y DISIPACIÓN

## ANTECEDENTES

Durante la última década el concepto de aislación sísmica ha comenzado a ser considerado seriamente como una alternativa en el diseño sismorresistente de estructuras, especialmente en aquellos casos en que se busca un mejor desempeño sísmico para las estructuras y sus contenidos. El excelente desempeño que las estructuras aisladas han tenido durante los sismos de Northridge (Los Angeles, 1994) y Kobe (Kobe, 1995), avalan las bondades de esta alternativa en cuanto a aumentar considerablemente el nivel de seguridad para las personas y la operabilidad de la estructura después de un sismo.

Actualmente, los conceptos de aislación sísmica se enseñan como parte del currículo de Ingeniería Civil en la mayoría de las Universidades mundialmente reconocidas, innumerables investigaciones se han desarrollado para demostrar la eficiencia de la aislación sísmica como una técnica sismorresistente, y numerosos dispositivos de aislación están comercialmente disponibles para su implementación en la práctica. Consecuentemente, se ha desarrollado una creciente necesidad de suplementar los códigos sísmicos actualmente vigentes con requerimientos específicos para estructuras aisladas. Esta necesidad es compartida por los organismos encargados de la construcción y el público en general, quienes requieren que esta tecnología sea implementada adecuadamente, y por los ingenieros proyectistas, los que requieren un estándar mínimo para el diseño y construcción de estructuras con esta tecnología.

Los primeros esfuerzos en la dirección de un código para el diseño de estructuras aisladas sísmicamente fue publicado por el SEAOC (Structural Engineering Association of California) el año 1986 en el documento "Tentative Seismic Isolation Design Requirements". Reconociendo la necesidad de lograr un documento que represente una opinión consensuada, el comité sismológico del SEAOC primero desarrolló los requerimientos de diseño "General Requirements for the Design and Construction of Seismic Isolated Structures" que fueron publicados en el apéndice 1L del "Blue Book" del SEAOC (Asociación de Ingenieros Estructurales de California) en 1990. Estos mismos requerimientos fueron publicados posteriormente como un apéndice no obligatorio del Capítulo 23 del UBC en el año 1991. El comité sismológico del SEAOC y ICBO (International Conference of Building Officials) han revisado este documento periódicamente desde entonces y versiones posteriores de estos requerimientos se pueden encontrar en el "Blue Book" del SEAOC del año 1996, y en el código UBC del año 1997. Por otra parte, el Consejo de Seguridad Sísmica para Edificios encomendó la incorporación de requerimientos para el diseño de estructuras con aislación sísmica y disipación de energía en los requerimientos de NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) del año 1994. Estos requerimientos fueron modificados en la versión del año 1997 en que los tres documentos NEHRP/UBC/SEAOC fueron compatibilizados.

## **FILOSOFÍA DE LOS REQUERIMIENTOS DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS AISLADAS**

Es condición esencial de una estructura aislada el que su desempeño objetivo no solo involucre la protección de la vida durante un sismo severo sino también la reducción del daño de la estructura y sus contenidos. De esta forma, los requerimientos de diseño que se presentan en este documento son una combinación de ambos objetivos: protección a la vida y reducción del daño.

Como punto de partida, estos requerimientos definen dos niveles sísmicos: un nivel sísmico de diseño (SDI) y un nivel sísmico máximo posible (SMP). El sismo de diseño coincide con el nivel utilizado comúnmente en el diseño de estructuras convencionales consistente con una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años. Por otra parte, el sismo máximo posible corresponde al máximo nivel de movimiento del suelo que puede ocurrir dentro del marco geológico conocido y ha sido definido como el nivel que tiene una probabilidad de excedencia de un 10% en un período de 100 años.

Estos niveles de riesgo, que son consistentes con la tendencia mundial en los códigos de aislación sísmica, son distintos a los utilizados en la actual norma chilena NCh433 Of 96 lo que será reflejado a través de un espectro de diseño que difiere del contenido en dicha norma. El nuevo espectro deberá reflejar además un nivel de seguridad superior para el sistema de aislación debido a que su falla compromete necesariamente la estabilidad vertical de la estructura completa.

Para el diseño de estructuras aisladas se requiere que el sistema de aislación sea capaz de sostener sin falla las deformaciones y cargas correspondientes al SMP. Análogamente, cualquier sistema que cruce la interfaz de aislación debe ser diseñado para acomodar el desplazamiento correspondiente al SMP.

Estas recomendaciones buscan además que la superestructura permanezca esencialmente elástica durante el sismo de diseño, a diferencia de los requerimientos para estructuras con base fija que buscan alcanzar solo un nivel de protección razonable para fallas estructurales mayores y pérdida de vidas, sin preocuparse en limitar el daño o mantener las funciones de la estructura. La filosofía actual sismorresistente establece que las “fuerzas laterales de diseño” sean, por ejemplo, un octavo de las fuerzas reales que ocurrirían en el edificio si este permaneciera elástico durante el sismo. La seguridad a la vida se provee entonces a través de requerir que el sistema tenga una ductilidad adecuada para lograr esa reducción, y permanezca estable bajo la carga gravitacional sin daño masivo o falla para desplazamientos que exceden con creces el límite de fluencia del sistema. Sin embargo, en un evento mayor, daño a elementos estructurales, componentes no estructurales, y contenidos, son muy probables en una estructura convencional.

Para una estructura convencional, su sobrevivencia para el SMP no se verifica explícitamente, y se maneja implícitamente a través de mayor ductilidad a conseguir mediante el apropiado detallamiento de los elementos. Por el contrario, en estructuras aisladas la verificación del desempeño de la estructura para el SMP debe realizarse analítica y experimentalmente. El criterio detrás de esta verificación es proveer evidencia que en el

peor escenario sísmico posible, la estructura aislada es al menos tan segura como la estructura convencional. El diseño explícito del sistema de aislación y el ensayo de aisladores para el SMP es necesario actualmente debido a que aún no existe suficiente evidencia práctica como para permitir un criterio menos conservador. Es importante notar que los aisladores friccionales o elastoméricos convencionales utilizados permiten alcanzar sin mayor dificultad el nivel de diseño correspondiente al SMP.



Fig. 1 Primer Hospital Aislado en Sudamérica (Centro San Carlos, de la Universidad Católica)

De acuerdo con los requerimientos indicados en esta proposición, el diseño de una estructura cumple con los siguientes objetivos de desempeño:

- (1) Resistir sismos pequeños y moderados sin daño en elementos estructurales, componentes no estructurales, y contenidos del edificio.
- (2) Resistir sismos severos sin que exista: (a) falla del sistema de aislación, (b) daño significativo a los elementos estructurales, (c) daño masivo a elementos no estructurales, (d) interrupción de la operabilidad de la estructura.

Para cumplir con estos objetivos, los requerimientos propuestos limitan la respuesta inelástica de la superestructura a una fracción menor de lo que se permite para edificios convencionales. Consecuentemente, el desplazamiento lateral de una estructura durante un sismo debe ocurrir en la interfaz de aislación y no en la superestructura. En un edificio convencional sin aislación, la estructura vibra como consecuencia del movimiento del suelo

(Figura 3). Si esta vibración excede un cierto nivel, se produce daño en la estructura y sus contenidos. Por el contrario, en el edificio aislado los aisladores acomodan la deformación impuesta por el sismo, reduciendo el movimiento que se traspasa hacia la estructura.

Los objetivos de desempeño establecidos arriba exceden considerablemente a aquellos de estructuras convencionales en sismos moderados y severos. Es importante recalcar que incluso a través de reforzar considerablemente las estructuras convencionales no es posible alcanzar los objetivos de desempeño de una estructura aislada, debido a que el aumento de resistencia de la estructura convencional conlleva una rigidización estructural, lo que induce que se desarrollen niveles de aceleración que impiden controlar el daño en contenidos e instalaciones, y por ende, mantener la funcionalidad. Tal fue el caso del Hospital Sylmar, durante el sismo de Northridge en el año 1994, en que la estructura no experimentó daño, pero el contenido sufrió tal deterioro que el hospital estuvo fuera de servicio por tres meses.



Fig. 2 Construcción del Edificio San Agustín de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica

## **PROYECTOS DE EDIFICACIÓN CON AISLACIÓN SÍSMICA EN CHILE**

A la fecha existen cuatro edificios con aislación sísmica en Santiago, un bloque del conjunto habitacional Comunidad Andalucía, en la calle Lord Cochrane, diseñado y construido entre los años 1991 y 1992 dentro del marco de un estudio de la Universidad de

Chile, el centro médico San Carlos de Apoquindo de la Universidad Católica de Chile construido durante el año 2000, y los edificios contiguos San Agustín (2002) y Hernán Briones (2003) de la Escuela de Ingeniería en el Campus San Joaquín de la Universidad Católica.

El primero de ellos es un edificio de vivienda social estructurado en base a muros de hormigón armado en su primer piso y de albañilería confinada en los otros tres, con 240 m<sup>2</sup> distribuidos en 4 plantas y que cuenta con 6 aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento. El segundo, es un edificio de aproximadamente 8000 m<sup>2</sup> distribuidos en seis pisos, y estructurado en base a marcos dúctiles de hormigón armado. El edificio se encuentra aislado al nivel de cielo del subterráneo con 52 aisladores de alto amortiguamiento, 22 de los cuales cuentan con corazón de plomo. El tercero es un nuevo edificio de cinco pisos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Chile que cuenta con 42 aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento y 14 aisladores friccionales. El edificio, de una planta de 6000 m<sup>2</sup> aproximadamente, está estructurado en base a un sistema dual de muros de hormigón armado y marcos gravitacionales. El sistema de aislación se ubica en este caso directamente sobre las fundaciones. Por último, el cuarto que es contiguo al tercero ampliándolo en 1900 m<sup>2</sup>, fue construido con posterioridad, con una estructuración similar. Los últimos tres edificios fueron diseñados en base al código de aislación sísmica UBC 1997 en zona sísmica máxima y verificados para una familia de sismos chilenos. Los aisladores de todos estos edificios fueron fabricados en Chile por la empresa VULCO S.A.

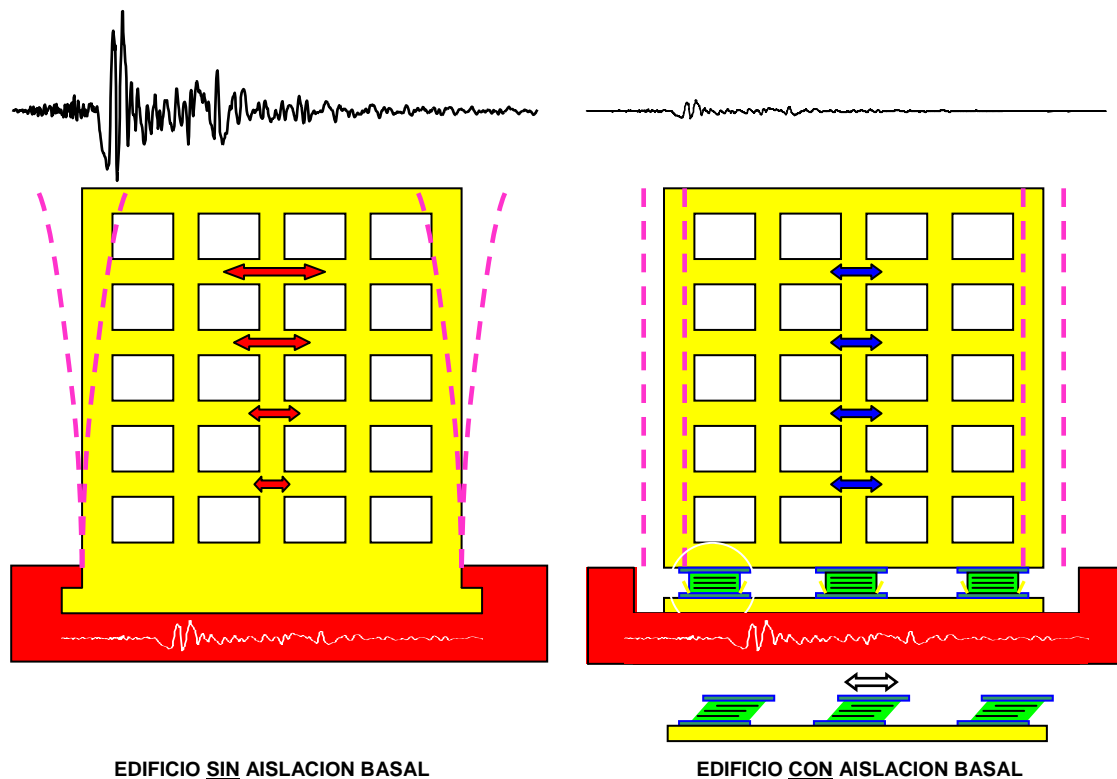


Fig. 3 Comparación de la Respuesta de un Edificio Sin Aislación Basal y uno Con Aislación Basal

Durante el año 2004 comenzó la construcción del Hospital Militar que contará con 162 aisladores sísmicos elastoméricos, algunos de ellos con corazón de plomo. Este será uno de los edificios aislados más grandes del mundo y utilizará aisladores de diámetro 90 cm.

Los antecedentes mundiales muestran que con posterioridad a los terremotos de Northridge y Kobe, el uso de la aislación sísmica en el mundo ha crecido considerablemente. Por ejemplo, las estadísticas en Japón muestran que el año 1998 se construyeron más de 700 edificios con aislación sísmica, entre los que se incluyen 35 hospitales, 18 edificios gubernamentales y 304 edificios de viviendas.

Los sistemas de aislación más utilizados en el mundo actualmente son los aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDR) y alto amortiguamiento (HDR), los aisladores elastoméricos con corazón de plomo (LRB), el aislador de péndulo friccional (FPS), y los deslizadores teflón-acero (PTFE).



Fig. 4 Aislador del Edificio San Agustín

Cada proyecto tiene sus propios factores que motivan el uso de sistemas de aislación y posee diferentes objetivos de desempeño. El primer paso esencial en el desarrollo del proyecto es definir el criterio de diseño en base a los objetivos del propietario en lo que respecta a la funcionalidad de la estructura, daño y protección de la inversión, preservación histórica de la estructura, riesgo a las personas, y economía en la construcción. Para aquellos propietarios que desean una alta prioridad a la funcionalidad, protección de los

contenidos, e inversión, requieren un criterio de diseño más estricto que aquellos que buscan un nivel de desempeño de protección a la vida únicamente. En cualquier caso, es el propietario el que debe estar consciente del nivel de riesgo que se desea asumir en el diseño.

## **PREGUNTAS FRECUENTES SOBRE AISLACIÓN SÍSMICA**

### **1. ¿Qué se entiende por aislación sísmica?**

Aislación sísmica es una técnica de diseño sismorresistente que busca reducir la energía que entra a una estructura durante un sismo a través de colocar dispositivos muy flexibles horizontalmente (aisladores) entre las fundaciones de un edificio o puente, y la estructura arriba de ellos. El efecto que se busca es que el suelo se mueva y la estructura permanezca esencialmente quieta.

### **2. ¿Cuál es el objetivo de la aislación sísmica?**

Los objetivos principales son dos: (a) mayor seguridad sísmica de la estructura (y por ende de las personas) a través de la minimización o incluso eliminación de daños en ella, y (b) salvaguardar los contenidos de la estructura manteniendo el funcionamiento de ella después del sismo.

### **3. ¿Cuánto más segura es una estructura aislada sísmicamente?**

En general una estructura aislada es al menos 5 veces más segura que una estructura convencional fija al suelo. De hecho, los esfuerzos producidos por el sismo en la estructura con aislación sísmica son del orden de 10 veces más pequeños que los de una estructura análoga fija al suelo. Esta reducción de esfuerzos es la que implica que la estructura permanecerá sin daño incluso durante un sismo de grandes proporciones.

### **4. ¿En qué se diferencia esta nueva técnica del diseño actual de estructuras “antisísmicas”?**

El concepto de estructura antisísmica no es correcto porque cualquier edificio en Chile (y cualquier otro país sísmico) está diseñado por razones de costo para que sufra daño ante un sismo severo. La filosofía de diseño dice que no debe colapsar, pero puede quedar seriamente dañado. Para comprobar que los daños son extensos, y que además la seguridad no queda en realidad garantizada, basta observar lo ocurrido con los edificios de Los Angeles (Northridge, 1994), Japón (Kobe 1995), Turquía (1999), Grecia (1999), y Taiwán (1999). Un edificio convencional no compete en seguridad con uno aislado, y mucho menos en costo de siniestralidad.

### **5. ¿Existen edificios aislados de importancia en Chile ?**

Hay ya tres edificios mayores con aislación sísmica y uno en etapa de proyecto. El primero es el Centro Médico de la Universidad Católica en Camino del Alba con San Carlos de Apoquindo (8000 m<sup>2</sup>). El segundo el Edificio San Agustín de la Escuela de

Ingeniería, en el Campus San Joaquín de la Universidad Católica (6000 m<sup>2</sup>). Y el tercero es el Edificio Hernán Briones, contiguo al anterior, y también de la Escuela de Ingeniería (1900 m<sup>2</sup>). En etapa de construcción está el nuevo Hospital Militar de La Reina que contará con un muy importante y extenso sector (41000 m<sup>2</sup>) aislado sísmicamente. También hay puentes con aislación sísmica (p.ej., Rodelillo, Marga-Marga, Río Blanco).



Fig. 5 Ensayo de un Aislador en el Laboratorio de Dinámica Estructural de la Universidad Católica

**6. ¿Por qué no existen más edificio en Chile con aislamiento sísmica si la técnica es tan atractiva?**

La razón principal es un retraso en el desarrollo tecnológico. Edificios con aislamiento sísmica son comunes en países desarrollados y experimentaron un comportamiento muy exitoso durante los devastadores terremotos de Kobe y Northridge. Sólo en Japón se construyeron más de 80 hospitales y 400 edificios con aislamiento sísmica entre 1997 y 1998. Sin embargo, el diseño de estructuras con aislamiento sísmica requiere de profesionales capacitados en esta nueva técnica que está en proceso de transferencia a la práctica chilena. También incide el desconocimiento y el temor al cambio por parte de los potenciales usuarios.

## **7. ¿Dónde se fabrican los dispositivos de aislación?**

Existen numerosos proveedores de aisladores sísmicos en el mundo entre los que se encuentran Bridgestone (Japón), André (Inglaterra), Skellerup-Oiles (Nueva Zelanda), DIS (Estados Unidos), y VULCO (Chile).

## **8. ¿Cuál es el costo del sistema de aislamiento sísmica?**

El costo del sistema de aislamiento es típicamente del orden de 0.5 a 1.0 UF/m<sup>2</sup>, dependiendo de la solución adoptada. Este costo se compensa varias veces si en el análisis económico se considera que en la alternativa sin aislación la estructura, los elementos no estructurales (las terminaciones), y los contenidos, afrontarán elevados costos de reparación o sustitución cuando ocurra sismo de gran intensidad que con casi certeza van a experimentar. Es importante recordar que en los edificios el costo las terminaciones supera al de la estructura, y que en muchos casos el valor de los contenidos es muy superior al de la estructura. Por otra parte, el hecho que la estructura tenga esfuerzos 10 veces menores puede llegar a permitir ahorro en costos directos de construcción; lograrlo depende en gran medida de una coordinación oportuna entre la Arquitectura e Ingeniería del proyecto.

## **9. ¿Qué ocurre con los ductos de instalaciones que cruzan el nivel de aislación?**

Existen numerosas soluciones de conexiones flexibles (muy sencillas y baratas tales como un doble codo) que permiten acomodar las deformaciones entre el suelo y el edificio. Soluciones de este tipo han sido implementadas en el Centro Médico San Carlos de la Universidad Católica y en los edificios San Agustín y Hernán Briones de la Escuela de Ingeniería, en el Campus San Joaquín.

## **10. ¿Cuál es la duración de los sistemas de aislación?**

Los aisladores están garantizados por una vida útil de 50 años mínimo. El diseño se hace proveyendo a los aisladores de una fijación que les permite ser fácilmente removidos y cambiados en cualquier momento sin interrumpir el funcionamiento del edificio.

## **11. ¿Cómo se verifica la calidad de los aisladores?**

Los aisladores son ensayados en forma dinámica uno a uno antes de ser colocados en el edificio. Estos ensayos son extraordinariamente exigentes y permiten garantizar las propiedades de rigidez y amortiguamiento de los aisladores.

## **BREVE RESUMEN HISTÓRICO DE LA AISLACIÓN SÍSMICA EN EL MUNDO**

- Era moderna comienza en Nueva Zelanda en 1970
- Primera aplicación en Japón es de 1982 (casa pequeña)
- Primera aplicación en EEUU es de 1985 (San Bernardino)
- Antes de 1995 existían 85 edificios aislados en Japón, 35 de los cuales eran de propiedad de constructoras, centros de investigación, o de fabricantes de aisladores

- Durante Kobe (1995), dos estructuras aisladas soportaron el movimiento sísmico sin problemas (Matsumura-Gumi, WJPSCC)
- Durante Northridge (1994), cinco estructuras fueron sometidas a movimientos significativos (p.e., USC, FCC)
- Primer edificio en Chile es en 1992 (Comunidad Andalucía)
- Posteriormente al terremoto de Kobe, el crecimiento de la aislación sísmica en Japón es abrupto; 20 edificios por mes
- Aproximadamente 600 edificios aislados en Japón para 1998
- Aproximadamente 40 edificios aislados en EEUU para 1998
- Promedio de altura de edificios aislados antes de 1995 era entre 4 y 5 pisos; actualmente es en promedio mayor a 8 pisos
- Primer hospital aislado sísmicamente en Chile, año 2000
- Nuevo Edificio de la Facultad de Ingeniería de la UC, año 2001
- Hospital Militar 2002
- Curso optativo en los currículum de Ingeniería de varias universidades en Chile, desde 1995

## **DISIPACIÓN DE ENERGÍA**

Todas las estructuras vibrantes disipan energía producto de esfuerzos internos, rozamiento, rotura, deformaciones plásticas, etc. Mientras mayor es la capacidad de disipación de energía, menor será la amplitud de las vibraciones. Algunas estructuras tienen muy poco amortiguamiento, por lo que experimentan grandes amplitudes de vibración incluso para sismos moderados. Los métodos que incrementan la capacidad de disipación de energía son muy efectivos para reducir la amplitud de la vibración.

Los sistemas pasivos de disipación de energía abarcan distintos de materiales y dispositivos que mejoran el amortiguamiento, rigidez y resistencia de una estructura. Estos pueden ser usados tanto para la reducción de amenazas naturales, como para la rehabilitación de estructuras dañadas o con estructuras deficientes. En los últimos años, se han emprendido serios esfuerzos para convertir el concepto de disipación de energía, o amortiguamiento adicional, en una tecnología factible y un número considerable de estos dispositivos han sido instalados en estructuras a lo largo de todo el mundo. En general, todos se caracterizan por su capacidad de mejorar la disipación de energía de los sistemas estructurales en los cuales se instalan. Esto puede ser alcanzado ya sea por la conversión de energía cinética en calor, o por la transferencia de energía entre modos de vibración. El primer método incluye dispositivos que operan en base a principios tales como la fricción, fluencia de metales, transformaciones de fase en metales, deformaciones de sólidos viscoelásticos o fluidos. El segundo método incluye la incorporación de osciladores adicionales, los cuales actúan como absorbedores de vibraciones dinámicas.

## **ESTRUCTURAS INTELIGENTES**

Una de las más significativas innovaciones tecnológicas en el campo de la ingeniería estructural ha sido, sin duda, el desarrollo de las llamadas “estructuras inteligentes” (EI).

Aunque a simple vista son similares a la estructuras convencionales, las **EI** están dotadas de un sistema computacional que se encarga simultáneamente de monitorear los movimientos del edificio a través de un sistema de sensores, y de accionar, si es necesario, uno o varios dispositivos electro-mecánicos con el propósito de reducir tales movimientos al mínimo posible. La Figura 6 ilustra esquemáticamente este concepto.

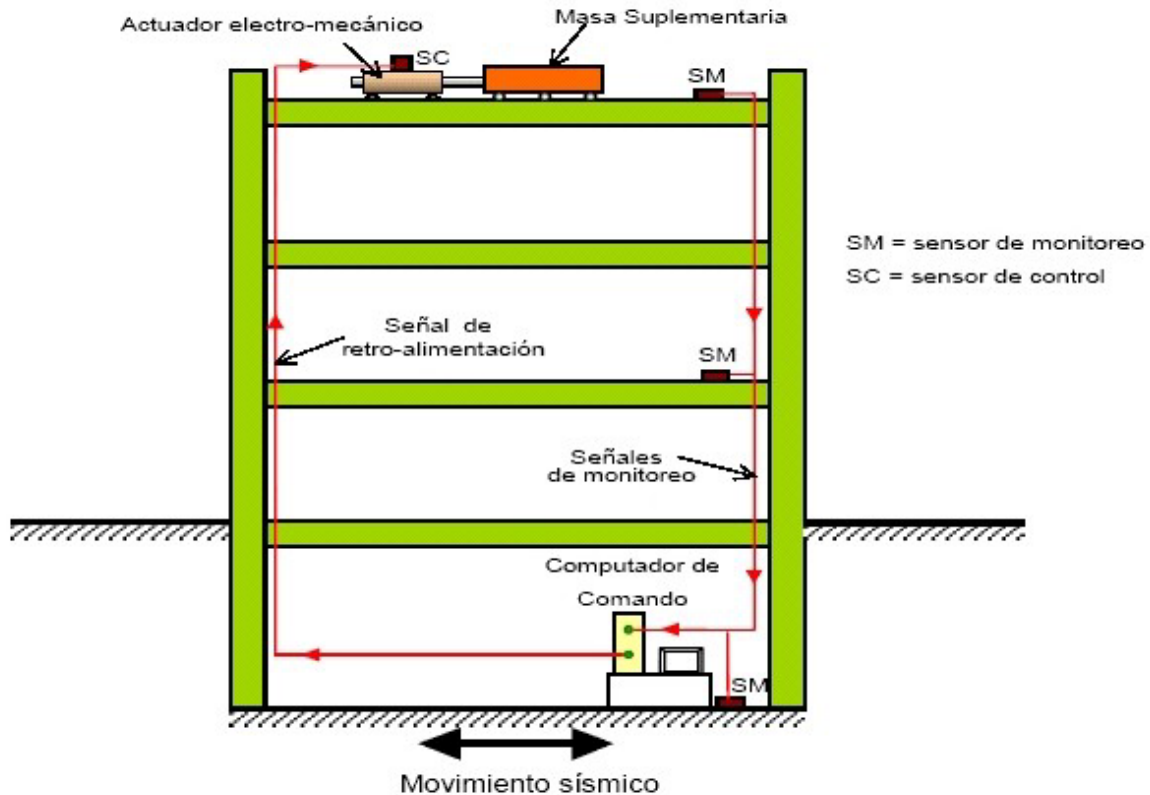


Fig. 6 Esquema de una Estructura Inteligente

La “inteligencia” del sistema radica, en primer lugar, en la ubicación estratégica de los dispositivos, y en segundo lugar, en conocer cuál es la intensidad de las fuerzas que éstos entregan a la estructura, como también el instante en que dichas fuerzas deben aplicarse, de modo de “contrarrestar” las fuerzas debidas al sismo.

Existe hoy en día una gran variedad de **EI**, cuya eficacia ha sido probada por numerosas investigaciones en todo el mundo. La gran mayoría de ellas se encuentran en Japón, donde existe un incentivo especial para que las empresas inviertan en el desarrollo de nuevas tecnologías. La Figura 7, muestra el amortiguador activo denominado HIDAX, recientemente desarrollado por la compañía japonesa Kajima Corporation, líder mundial en esta fascinante tecnología.

Es importante resaltar que si bien resulta poco atractivo actualmente usar los tipos más sofisticados de **EI** en Chile por razones de costo, no es menos cierto que algunos tipos muy simples pero muy eficientes de **EI** podrían ser hoy desarrolladas a un costo muy competitivo usando nuestra propia tecnología y conocimientos.

Es muy probable que en un futuro próximo, y gracias al constante abaratamiento de la tecnología, muchos de los edificios importantes que se construyan en el mundo sean **EI**. Seguramente, el mayor costo de tal “inteligencia” estará en el conocimiento experto que surge del trabajo mancomunado entre la investigación científica y la industria, lo cual constituye un gran desafío para la ingeniería y las universidades chilenas.

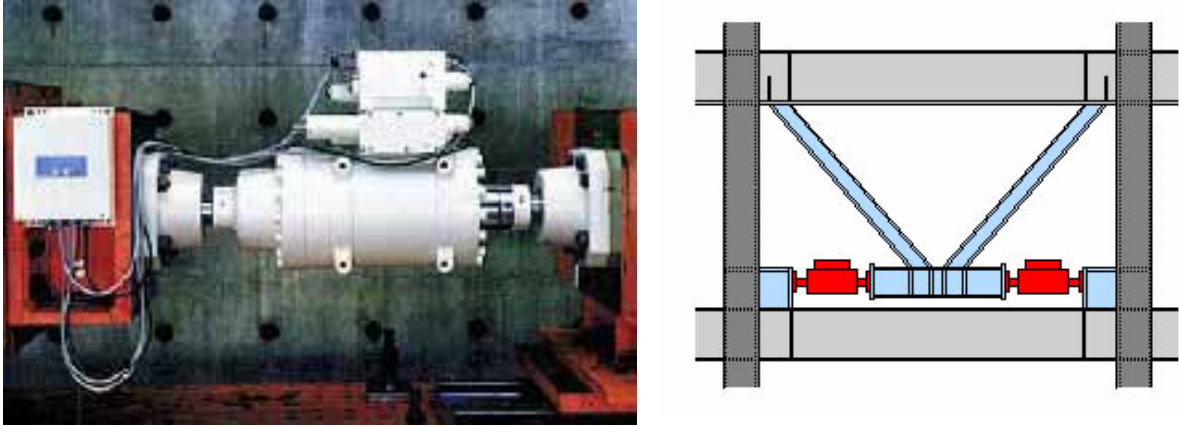


Fig. 7 El Amortiguador HIDAX y Esquema de Instalación en un Piso de un Marco Estructural