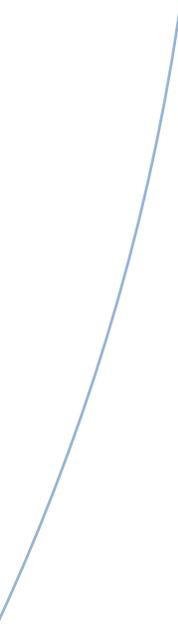




**INTRODUCCIÓN AL USO  
DE AISLADORES  
Y DISIPADORES  
EN ESTRUCTURAS**

**INGENIERÍA SÍSMICA**





# **INTRODUCCIÓN AL USO DE AISLADORES Y DISIPADORES EN ESTRUCTURAS**

**Carlos Genatios  
Marianela Lafuente**

Caracas, Noviembre de 2016

**Título:****INTRODUCCIÓN AL USO DE AISLADORES Y DISIPADORES EN ESTRUCTURAS**

Serie GeóPOLIS

Ingeniería Sísmica

**Depósito legal:**

DC2016001598

**ISBN:**

978-980-422-056-2

**Editor CAF-Banco de Desarrollo de América Latina**

Esta serie es coordinada por la Vicepresidencia de Infraestructura de CAF-Banco de Desarrollo de América Latina

Antonio Juan Sosa, Vicepresidente Ejecutivo de Infraestructura

Sandra Conde, Directora de Análisis y Programación Sectorial

Jesús Suniaga, Ejecutivo Principal, coordinador del Programa GeóPOLIS

**Autor(es):**

Carlos Genatios

Marianela Lafuente, consultora coordinadora del componente de ingeniería sísmica

**Edición:**

Paolo Maragno

**Diseño gráfico:**

Marisa Almiñana M.

**Corrección de textos:**

Marianela Lafuente y Carlos Genatios

**Diagramación:**

Paolo Maragno

Las ideas y planteamientos contenidos en la presente edición son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no comprometen la posición oficial de CAF-Banco de Desarrollo de América Latina.

La versión digital de este documento se encuentra en: [scioteca.caf.com](http://scioteca.caf.com)

© 2016 Corporación Andina de Fomento

Todos los derechos reservados

## ÍNDICE GENERAL

PRESENTACION .....	9
RESUMEN .....	9
1 Introducción .....	15
1.1 Disminuir la vulnerabilidad e incrementar la resiliencia para la reducción de riesgos de desastres .....	17
1.2 Aisladores sísmicos ¿Una innovación en la ingeniería sismorresistente? .....	21
1.3 Objetivos del presente trabajo .....	27
2 Uso de dispositivos de aislamiento sísmico y de disipación de energía para el control de la respuesta sísmica de estructuras .....	29
2.1 Objetivos del uso de los aisladores sísmicos y de los disipadores de energía .....	31
2.2 Disipación de energía en el comportamiento sísmico de estructuras .....	37
2.2.1 Sistemas pasivos .....	40
2.2.2 Sistemas activos de control de respuesta .....	41
2.2.3 Sistemas semi-activos de fluido controlable .....	43
3 Aislamiento sísmico .....	45
3.1 Aisladores sísmicos: ¿Por qué funcionan y son efectivos? Concentración del daño y readecuación estructural .....	49
3.2 Tipos de aisladores sísmicos. Elementos típicos .....	55
3.3 Ventajas y desventajas del uso de aisladores sísmicos .....	59
4 Métodos de análisis simplificado .....	65
4.1 Sistemas de un grado de libertad. Flexibilización de la estructura .....	67
4.2 Ejemplo de 1 gdl: caso desfavorable de uso de aisladores sísmicos .....	77
4.3 Ejemplo de varios grados de libertad .....	80
4.4 Comentario sobre los resultados obtenidos de los análisis de los modelos simplificados .....	88
5 Normativas sobre el uso de aisladores sísmicos .....	91
5.1 Uso general e implantación de normas en E.E.U.U. .....	93
5.2 Normativa para el uso de aisladores en Europa: Eurocode .....	95
5.3 Uso y consideraciones en normas vigentes en la región latinoamericana .....	96
6 Procedimientos de diseño .....	99
6.1 Diseño de estructuras con sistemas de control de respuesta sísmica .....	101
6.2 Procedimientos de ensayos de aisladores .....	106
6.2.1 Cargas verticales máximas y mínimas .....	109
7 Sistemas pasivos de control basados en disipación de energía .....	111
7.1 Cómo funcionan: Efectos del amortiguamiento viscoso en la respuesta sísmica .....	113
7.2 Definición de Sistema Viscoso Equivalente .....	116
7.3 Disipadores histeréticos metálicos .....	118

7.4	Disipadores Viscoelásticos .....	121
7.5	Disipadores de fluidos viscosos.....	123
7.6	Disipadores de fricción.....	124
7.7	Disipadores basados en materiales con memoria de forma (SMA).....	125
7.8	Amortiguadores de masas sintonizadas .....	126
7.9	Ventajas y desventajas del uso de disipadores de respuesta sísmica.....	127
8	Ejemplos de uso de aisladores y de disipadores de energía.....	129
8.1	Readecuación sísmica de un edificio en San Francisco, Estados Unidos.....	131
8.2	Edificio Izazaga, Torre Mayor y otros casos en Ciudad de México.....	134
8.3	Aeropuerto Jorge Chávez y otras estructuras en Lima .....	139
8.4	Puente Amolanas en Chile.....	140
8.5	Casos de estructuras con aislamiento sísmico en Chile.....	141
8.6	Edificio Pietrasanta en Venezuela .....	144
8.7	Sistema de protección sísmica en viaducto ferroviario en Venezuela.....	147
8.8	Algunos casos de estructuras aisladas en Estados Unidos.....	150
8.9	Uso de aisladores para edificaciones de bajo costo e interés social .....	155
9	Algunas consideraciones económicas.....	157
	Bibliografía.....	163
	ANEXO 1 .....	173
	Cálculos matemáticos para la obtención de los resultados para el modelo de 5 pisos, sin y con aisladores sísmicos.....	175
	CURRICULUM VITAE DE LOS AUTORES .....	183

## Índice de Tablas

Tabla 4-1:	Valores de períodos y porcentajes de amortiguamiento crítico para las dos estructuras (los amortiguamientos han sido tomados de la Fuente: Chopra, 2001).....	83
Tabla 4-2:	Autovectores en coordenadas absolutas Estructura sin aisladores sísmicos.....	83
Tabla 4-3:	Autovectores en coordenadas absolutas. Estructura con aisladores sísmicos.....	84
Tabla 4-4:	Pseudoaceleraciones y cortantes modales, estructuras de 5 gdl: sin aisladores y sobre aisladores.....	87
Tabla 6-1:	Factores de modificación de respuesta por amortiguamiento (UBC).....	103
Tabla 7-1:	Ventajas y desventajas del uso de dispositivos de disipación de energía.....	128
Tabla 8-1:	Estructuras con aislamiento sísmico en Chile. (fuente: Almazán J.L., 2010)..	142

## Índice de Cuadros y Figuras

Figura 1-1:	Países en desarrollo en “trampas de resiliencia”, ubicados en zonas de mayor vulnerabilidad. (Fuente: Corrales, Miquilena, 2010). .....	18
Figura 1-2:	Daños en Haití por el terremoto de 2010. (Autor: UN Photo/Logan Abassi United Nations Development Programme). .....	19

Figura 1-3: Huracán Matthew afecta Haití (4/10/2016). La presencia del enorme huracán va desde el norte de Venezuela hasta las Bahamas y la península de la Florida, y oculta totalmente la Española. ....	20
Figura 1-4: Tumba de Ciro el Grande, un caso de aislamiento sísmico en la antigüedad....	22
Figura 1-5: Capas de piedra cortadas y sin mortero para permitir deslizamiento en tumba de Ciro. (Fuente: Bayraktar, A. et al., 2012). ....	22
Figura 1-6: El Partenón es una estructura fundada en capas de piedras sin mortero, que ha podido soportar los embates de numerosos terremotos. ....	23
Figura 1-7: Excavaciones de ruinas en la costa del mar de Azov. (Fuente: Скампецкий - Own work, CC BY 3.0). ....	24
Figura 1-8: Obelisco Dikilitash, traído de Egipto a Constantinopla (Estambul). (Fuente: Gryffindor - Yükleyenin kendi çalışması, Kamu Malı).....	25
Figura 1-9: Obelisco Dikilitash, base del obelisco. ....	25
Figura 1-10: Fundación de madera que genera aislamiento sísmico. (Fuente: Khoshsima, et al., 2009).....	26
Figura 1-11: Aislamiento sísmico compuesto por troncos de madera entre la columna y la arcada. Casbah de Argel.....	27
Figura 2-1: Hospital que presentó daños no estructurales que impidieron su funcionamiento inmediato, luego del terremoto de Chile de 2010. (Fuente: EERI, 2010). ....	33
Figura 2-2: San Francisco, afectada por el terremoto del 28 de mayo de 1906 . ....	34
Figura 2-3: Incendio en San Francisco luego del terremoto del 28 de mayo de 1906 . ....	35
Figura 2-4: Incendio en la ciudad de Marounochi luego del Gran Terremoto de Kanto, Japón, del 1 de Septiembre de 1923 . ....	36
Figura 2-5: Ciclos de histéresis: Comportamiento lineal y no lineal. (Adaptado de: Oviedo et al, 2006, Figura 2, pag 108).....	39
Figura 2-6: Sistemas pasivos de control de respuesta. (Elaboración propia). ....	41
Figura 2-7: Sistemas de control activo. (Elaboración propia). ....	42
Figura 2-8: Sistemas semi-activos de protección sísmica. (Elaboración propia). ....	43
Figura 3-1: Las placas tectónicas (Fuente: USGS).....	47
Figura 3-2: Vista aérea de la falla de San Andrés. Recorre 1286 km en el estado de California de Estados Unidos y es una de las fallas más estudiadas del mundo. (Fotografía: Leohotens). ....	48
Figura 3-3: Hipocentro y epicentro de un terremoto (Fuente: Laboratorio de Ingeniería Sísmica del Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica).....	49
Figura 3-4: Aislador sísmico de goma. (Fuente: Kelly, 2013). ....	50
Figura 3-5: (a) edificación sin aislamiento sísmico y (b) edificación con aislamiento sísmico. (Elaboración propia). ....	51
Figura 3-6: Disminución de la aceleración espectral por incorporación del aislador sísmico. (Adaptada de: Barmo et al. 2015, figura 2(A), open access).....	52

Figura 3-7: Comparación de la aceleración espectral a la cual es sometida una estructura con y sin aislamiento sísmico: (a) Sistema sin aisladores – Alta demanda sísmica; (b) Sistema con aisladores – Baja demanda sísmica. Espectro de norma de Ecuador NEC-2011. (Fuente: Lara, O, 2015).	53
Figura 3-8: Aislador sísmico (Fuente: Lara, O, 2015).	56
Figura 3-9: Aislador de capas de goma y acero y núcleo de plomo.	56
Figura 3-10: Esquema de aislador con planchas. (Elaboración propia).	58
Figura 3-11: Aislador con planchas curvas. (Fuente: Barro et. al., 2015, Figure 4).	58
Figura 3-12: Edificación en Java, Indonesia, construida con el plano de aislamiento sobre el terreno. (Fuente: Kelly, J. 2013).	62
Figura 3-13: Espacio para el movimiento libre de los aisladores y acceso para revisión.	63
Figura 3-14: Tuberías y dispositivos flexibles para permitir los movimientos propios de los edificios con aislamiento sísmico. (Fuente: Kelly, J. 2013).	63
Figura 4-1: a) Sistema sin aisladores, b) Con aisladores. (Elaboración propia).	68
Figura 4-2: a) Sistema sin aisladores y mecanismo de disipación, b) Sistema con aisladores y mecanismo de disipación. (Elaboración propia).	68
Figura 4-3: Movimientos para la estructura sin aisladores: a) estructura, b) desplazamiento absoluto de la estructura y c) desplazamiento relativo a la base. (Elaboración propia).	69
Figura 4-4: Diagrama de cuerpo libre. (Elaboración propia).	69
Figura 4-5: Sistema de 1 dgl sobre aisladores, desplazamientos absolutos y relativos respecto a la base. (Elaboración propia).	70
Figura 4-6: Diagramas de cuerpo libre de la estructura sobre aisladores sísmicos. (Elaboración propia).	71
Figura 4-7: Características del sistema de un grado de libertad. (Elaboración propia).	72
Figura 4-8: Modos de vibración del sistema de 1gdl sobre aisladores. (Elaboración propia).	75
Figura 4-9: Espectro de aceleraciones. (Elaboración propia).	75
Figura 4-10: Fuerzas resultantes por modo en coordenadas relativas. (Elaboración propia).	77
Figura 4-11: Estructura rígida de 1gdl sin aisladores. (Elaboración propia).	78
Figura 4-12: Formas modales estructura rígida de 1gdl sobre aisladores. (Elaboración propia).	79
Figura 4-13: Espectro de aceleraciones en el que se muestra que la estructura rígida incrementa las aceleraciones al colocarle aisladores. (Elaboración propia).	79
Figura 4-14: Estructura de 5 gdl sin aisladores. (Elaboración propia).	80
Figura 4-15: Desplazamientos relativos de la estructura de 5gdl. (Elaboración propia).	81
Figura 4-16: Estructura de 5 gdl sobre aisladores. (Elaboración propia).	82
Figura 4-17: Formas modales de estructura de 5gdl, sin aisladores. (Elaboración propia).	84

Figura 4-18: Formas modales estructura 5gdl con aisladores sísmicos. (Elaboración propia).	85
Figura 4-19: Pseudoespectro de aceleración y valores de pseudoaceleración modal, edificio de base fija. (Adaptado de: Chopra, 2001).	85
Figura 4-20: Pseudoespectro de aceleración y valores de pseudoaceleración modal, edificio sobre aisladores sísmicos. (Adaptado de: Chopra, 2001).	86
Figura 6-1: Ensayo de aislador sísmico. (Fuente: Courtesy of Caltrans and NEES / Date=February 25, 2009).	110
Figura 7-1: Oscilación de sistemas de 1GDL con amortiguamiento viscoso inferior al crítico. $T_n=0.5$ segundos y desplazamiento inicial de 3 pulgadas. (Fuente: Hanson, Robert, D., 1993, Figure 1, pag. 321).	115
Figura 7-2: Disipador tipo ADAS. (Fuentes: arriba: Oviedo et al., 2006, figura 9, pag. 113; abajo: Aiken et al, 1993, figura 20, pag. 349).	119
Figura 7-3: Pórtico metálico con disipadores tipo ADAS ensayado en laboratorio. (Fuente: Aiken et al, 1993, figura 22, pag. 351).	119
Figura 7-4: Disipadores histeréticos metálicos a) Tipo TADAS b) Tipo panel. (Fuente: Oviedo et al., 2006).	120
Figura 7-5: Disipador tipo riostra metálica. (Fuente: Oviedo et al., 2006).	121
Figura 7-6: Modelo de estructura de concreto armado con disipadores tipo DSSD. (Fuente: Lobo et al., 1993, Fig. 3, pag. 426).	122
Figura 7-7: Disipadores viscoelásticos. (Fuente: Aiken et al, 1993, figuras 4 y 5, pag. 339).	123
Figura 7-8: Disipadores basados en fluidos viscoelásticos. (Fuente: Oviedo et al., 2006).	124
Figura 7-9: Disipador de Fricción tipo Pall. (Fuente: Aiken et al., 1993, figuras 15 y 16, pag. 346).	125
Figura 7-10: Fotografía de un AMS. (Fuente: Montanaro M.I, 2001).	126
Figura 8-1: Nuevos pórticos de refuerzo con riostras de acero y disipadores tipo ADAS para el edificio de San Francisco. (Fuente: Perry et al., 1993, figura 4a, pag. 567).	132
Figura 8-2: Efecto arquitectónico final en la edificación rehabilitada. (Fuente: Perry et al., 1993, figura 10, pag. 575).	133
Figura 8-3: Edificio Izazaga en Ciudad de México. (Fuente: Martínez-Romero E., 1993, figura 1, pag. 604).	135
Figura 8-4: Gráfica de Corte basal contra desplazamiento en el techo para una columna en el eje 1. (Fuente: Martínez-Romero E., 1993, figura 10, pag. 611).	135
Figura 8-5: Edificio corporativo de 3M, diseñado con dispositivos viscoelásticos. (Fuente: Tena-Colunga, 2003).	136
Figura 8-6: Edificio corporativo de 3M, diseñado con dispositivos viscoelásticos. (Fuente: Tena-Colunga, 2003).	137
Figura 8-7: Torre Mayor de Ciudad de México (Fuente: Tena-Colunga, 2003).	137

Figura 8-8: Edificio Torre Mayor con disipadores Taylor (Foto cortesía de Enrique Martínez Romero, Tena-Colunga 2003).....	138
Figura 8-9: Torre Mayor de Ciudad de México. ....	138
Figura 8-10: Disipadores instalados en la Torre Mayor de Ciudad de México.....	139
Figura 8-11: Puente Amolanas en Chile.....	140
Figura 8-12: Disipadores Taylor en el puente Amolanas. ....	141
Figura 8-13: Muelle en Puerto Coronel. (Fuente: EERI, 2010, pag.16. Foto: E. Miranda). .....	143
Figura 8-14: Comunidad Andalucía. Edificio de mampostería aislado sísmicamente en Chile. (Fuente: Boroschek, R., 2012).....	144
Figura 8-15: Edificio con amortiguadores viscosos tipo Taylor en Venezuela. (Fuente: Morón A., 2009).....	145
Figura 8-16: Ubicación de los amortiguadores en planta. Se colocaron seis en cada planta. (Fuente: Morón A., 2009). ....	145
Figura 8-17: Tipo de amortiguador viscoso utilizado y estructura de soporte, llamadas “paletas estructurales”. (Fuente: Morón A., 2009).....	146
Figura 8-18: Estructura en construcción. Se observa la disposición vertical de los amortiguadores en las paletas estructurales. (Fuente: Morón A., 2009). ....	146
Figura 8-19: Viaducto Número 17 antes de la instalación de la vía férrea. (Fuente: Pérez Hernández R.J. et al, 2009, pag. 248). ....	147
Figura 8-20: Aparato de apoyo móvil unidireccional. Izquierda: tapa superior. Derecha: parte inferior mostrando los disipadores. (Fuente: Pérez Hernández R.J. et al, 2009, pag. 244).....	148
Figura 8-21: Lazo de histéresis idealizado de uno de los componentes disipadores de energía. (Fuente: Pérez Hernández R.J. et al, 2009, pag. 249). ....	149
Figura 8-22: <i>Foothill Communities Law and Justice Center</i> . ....	150
Figura 8-23: Sección transversal (eje menor) del edificio, con la ubicación de los acelerómetros 6,7,9 y 12. (Fuente: Marshall Lew et al., 1988, figura 4, pag. 797).....	151
Figura 8-24: Ayuntamiento de Los Angeles.....	153
Figura 8-25: Ayuntamiento de San Francisco en ruinas, destruido por el terremoto de 1906. .....	154
Figura 8-26: Ayuntamiento de San Francisco. ....	154
Figura 8-27: Esquema de aislamiento sísmico mediante uso de soportes de neopreno. (Fuente: Konstantinidis, D., Kelly, J., 2012).....	156



# Presentación y Resumen

## PRESENTACIÓN

La ocurrencia de eventos naturales en América Latina y el Caribe afecta a nuestras sociedades e incide en el desarrollo sostenible de nuestros pueblos. Haití y Chile sufrieron, en 2010, los embates de fuertes terremotos y respondieron, según su nivel de preparación, a las repercusiones que tales acontecimientos tuvieron en sus economías. En el caso de Haití, el valor total de los daños y pérdidas, ocasionados por el terremoto (vivienda, escuelas, hospitales, edificios, carreteras, puentes, aeropuertos), rondó el 120% de su PIB (año 2009). En el caso chileno, aunque con menor impacto en cuanto a daños de infraestructura y pérdidas humanas lamentables, fue necesaria la reconstrucción de un significativo número de viviendas, carreteras, aeropuertos y puentes, así como la reparación de estructuras estratégicas, hospitales y escuelas, lo cual representó cerca de un cuarto de su PIB.

Estos casos, con diferentes grados de preparación, nos muestran la necesidad de estar aún más capacitados para minimizar las pérdidas ocasionadas por los desastres naturales y disminuir el riesgo generado por la acción del hombre al modificar el territorio que habita. El reconocimiento de esta realidad es el punto de partida para el desarrollo de la resiliencia en los países.

CAF –banco de desarrollo de América Latina–, consciente de esta situación, ha sido pionero en promover una cultura de riesgos e implementar estudios y programas sobre las amenazas naturales y su mitigación.

A finales de los años 90, CAF desarrolló el programa PREANDINO que permitió trabajar con los países en el reconocimiento de las responsabilidades que tienen los actores del desarrollo en la creación de vulnerabilidades y en el impulso a la formulación de políticas nacionales, sectoriales y territoriales de prevención y mitigación de riesgos. Esto permitió reunir un cúmulo importante de información sobre nuestro territorio y su realidad.

De esta forma la Institución sentó un precedente en el reconocimiento del impacto de los fenómenos naturales, la implementación de procesos para la incorporación de la reducción de riesgos de desastres en los canales de planificación de las acciones del desarrollo y en el involucramiento de los actores clave de la sociedad.

Con base en esta experticia y con el objetivo de aprovechar y potenciar el conocimiento científico e institucional desarrollado en la región, a partir del año 2012, CAF creó el programa GeóPOLIS.

Éste es una iniciativa que busca continuar el desarrollo de la cultura de prevención, la promoción de mejores prácticas de políticas públicas y la generación de conocimiento en distintas áreas relacionadas con la reducción de riesgos de desastres. Para alcanzar sus objetivos, el programa integra una red de ingenieros y especialistas con alto nivel académico y comprobada experticia en el análisis de problemas acuciantes y en el diseño de estrategias para la mitigación de riesgos. El trabajo se basa en tres líneas de acción: (i) ingeniería sísmica, (ii) planificación y fortalecimiento institucional para la reducción de riesgos de desastres y (iii) cambio climático y disponibilidad de recursos hídricos. El conocimiento generado se pone a disposición de implementadores de políticas públicas, la academia, los gobiernos nacionales y locales, el sector privado y público en general, para promover el desarrollo social, ambiental, económico y sustentable de nuestra región.

GeóPOLIS desarrolla conocimientos para que los tomadores de decisiones y sus equipos técnicos puedan contribuir a la reducción de vulnerabilidades y el aumento de la resiliencia de nuestras sociedades.

El programa genera y pone a disposición conocimiento técnico para la región que favorece al entendimiento y la preparación para los desastres, la evaluación de las estructuras estratégicas, la revisión de los marcos nacionales y locales para el fortalecimiento institucional y la promoción del diálogo de los distintos sectores relacionados con la reducción del riesgo en América Latina.

Tengo la certeza que esta valiosa iniciativa contribuirá al intercambio de mejores prácticas en la región y a la generación de redes de expertos, así como a mejorar la calidad de vida de nuestras sociedades.

L. Enrique García

Presidente Ejecutivo

## RESUMEN

Las normas de diseño sismorresistente de edificaciones, por lo general fijan una referencia de vida útil. Para la mayor parte de las edificaciones es de 50 años. Durante esa vida útil se supone que estarán sometidas a la acción de sismos de baja intensidad y de ocurrencia frecuente, de mediana intensidad y de ocurrencia probable, y de gran intensidad y de ocurrencia poco probable. La “filosofía de diseño” incluye los objetivos de desempeño siguientes:

- Para sismos frecuentes, de baja intensidad, las estructuras no deben sufrir daños, ni en los elementos estructurales ni los no estructurales y deben continuar operativas.
- Para sismos intermedios, poco frecuentes, la estructura puede sufrir daños que deben ser reparables.
- Para sismos severos, se permite que la estructura sufra daños generalizados y hasta puede llegar a quedar inservible, pero sin que ocurra el colapso estructural, a fin de preservar las vidas humanas.

Es deseable localizar la ocurrencia de daños en zonas y elementos de la estructura definidas previamente en el diseño, lo que permite disipar parte de la energía devastadora del sismo a través de mecanismos controlables. Sin embargo, esta filosofía de diseño, que implica la aceptación de niveles de daño reparables, para sismos intermedios, y de grandes niveles de daño para sismos excepcionales, puede traer negativas consecuencias económicas y operacionales. Los aeropuertos, hospitales, cuarteles de bomberos, por ejemplo, entre otras edificaciones estratégicas, deberían continuar funcionando luego de la ocurrencia de un terremoto, por lo que es necesario que en su diseño se tomen previsiones para minimizar los daños estructurales y no estructurales, en las instalaciones de servicio y en los equipos, a fin de garantizar su operatividad.

Una más clara definición de los objetivos de desempeño de una estructura, en especial la exigencia de garantizar su funcionalidad después de terremotos severos, ha motivado el desarrollo de tecnologías de aislamiento sísmico y de disipación de energía, las cuales han mostrado ser efectivas, tanto para en el diseño de estructuras nuevas, como para la rehabilitación y reparación de estructuras existentes.

Es necesario dar a conocer el importante potencial que tienen los dispositivos de control de respuesta sísmica, y en particular los aisladores sísmicos y los disipadores de energía, en la protección de edificaciones. Por la sencillez de sus mecanismos de funcionamiento y por su efectividad, han demostrado ser una alternativa confiable a considerar en el diseño sismorresistente y en los proyectos de readecuación sísmica, vista la necesidad de reducir daños en edificaciones,

garantizar la seguridad de las vidas humanas, disminuir la ocurrencia de pérdidas económicas y contribuir con la resiliencia de las ciudades.

En el presente trabajo se incluyen los siguientes aspectos:

- Clasificación de los principales sistemas y dispositivos de control de respuesta dinámica existentes.
- Los aisladores sísmicos, su mecanismo de funcionamiento y bases teóricas que lo sustentan. Ventajas y desventajas de su uso.
- Análisis de modelos dinámicos simplificados que demuestran matemáticamente los mecanismos de funcionamiento de los aisladores sísmicos.
- Comentarios sobre normas y reglamentos técnicos que se utilizan para el diseño de estructuras con dispositivos de control pasivo de respuesta, lo cual incluye una breve presentación de los desarrollos reglamentarios en EEUU, Europa y América Latina.
- Procedimientos de diseño de estructuras con aisladores, así como los procedimientos y normas para la realización de ensayos y certificación de estos sistemas.
- Principios y mecanismos de funcionamiento de los disipadores de energía y control de respuesta; tipos de disipadores, ventajas y desventajas de su uso.
- Ejemplos de estructuras reales que ilustran el uso de los dispositivos de control pasivo de estructuras (aisladores y disipadores).
- Consideraciones económicas asociadas al uso de los sistemas de control de respuesta presentados.

**Palabras claves:**

Aisladores sísmicos, disipadores de energía, resiliencia, aislamiento sísmico, control pasivo de estructuras, modelos simplificados de análisis sísmico, normativas para uso de aisladores sísmicos, uso de aisladores en puentes, ensayos de aisladores sísmicos.



The background features a solid brown color with several overlapping, semi-transparent circles of varying shades of brown. A thin white line curves across the page from the left edge towards the top right.

# Introducción



# 1 Introducción

## 1.1 Disminuir la vulnerabilidad e incrementar la resiliencia para la reducción de riesgos de desastres

La ocurrencia de desastres asociados a terremotos, han generado grandes pérdidas a la Humanidad a lo largo de la historia, tanto en términos de vidas como en términos económicos.

De acuerdo a cifras de una empresa reaseguradora (Munich Re, 2016) de los 10 eventos que han causado la mayor cantidad de víctimas fatales en los últimos 25 años, 6 son terremotos (y tsunamis producidos por terremotos). Es decir, de un total de 1.022.200 víctimas causadas por esas diez catástrofes, 617.200 son imputables a eventos de origen sísmico.<sup>1</sup>

Al analizar los 10 desastres naturales que generaron mayor cantidad de pérdidas económicas en los últimos 25 años, también 6 fueron terremotos (y tsunamis producidos por terremotos), los cuales causaron pérdidas por 497.000 millones de US\$, lo cual constituye un 62% del total de 771.000 millones de US\$, producidos por los 10 desastres mencionados.<sup>2</sup>

Estas enormes pérdidas de vidas y de recursos económicos pueden traer consecuencias devastadoras en las sociedades.

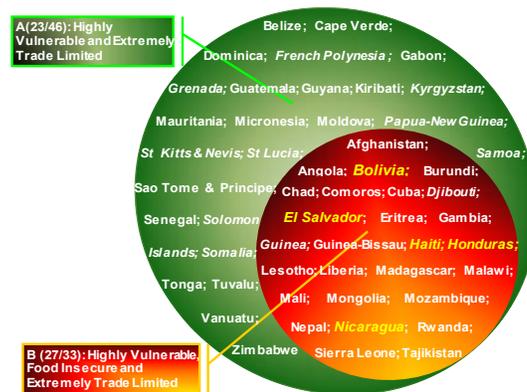
En un análisis presentado en Corrales y Miquelena (2010) se estudian los casos de países que presentan limitaciones extremas de comercio, graves dificultades para cubrir las necesidades alimenticias de su población, y, adicionalmente, son países ubicados en zonas

---

<sup>1</sup> Los 10 desastres naturales que causaron mayor cantidad de víctimas en los últimos 25 años son: Terremoto/tsunami de Indonesia (26/12/2004); Terremoto de Haití (12/1/2010); Ciclón de Myanmar (2-5/5/2008); Ciclón de Bangladesh (29-30/4/1991); Terremoto de India, Pakistán, Afganistán (8.10.2005); Terremoto de China, Sichuan (12/5/2008); Ola de calor, Europa (Julio-Agosto 2003), Ola de Calor Rusia (Julio-Septiembre 2010); Terremoto de Irán (20/6/1990); Terremoto de Irán (26/12/2003). Total de víctimas 1,022,200 . Fuente: Munich Re (2016).

<sup>2</sup> Los 10 desastres naturales que produjeron la mayor cantidad de pérdidas económicas en los últimos 25 años son: Terremoto/tsunami de Japón (11/3/2011); Huracán Katrina, USA (25-30/8/2005); Terremoto de Japón (Tokyo/Kyoto) (17.1.1995); Terremoto China, Sichuan (12/5/2008); Huracán Sandy, USA, Bahamas, Caribe (23-31/10/2012); Terremoto Northridge, USA (17/1/1994); Inundaciones y deslizamientos de tierra Tailandia (1.8-15/11/2011); Huracán Ike, USA, Caribe (6-14/9/2008); Terremoto/tsunami Chile (27/2/2010); Terremoto Niigata, Japón (23.24.27/11/2004). Total de pérdidas económicas: 771.500 millones de US\$ de los cuales 191.860 millones de US\$ estaban asegurados (25%). Fuente: Munich Re (2016) .

de fuertes amenazas naturales y con altos niveles de vulnerabilidad. Cuando todas esas condiciones se encuentran simultáneamente en algunos países, las posibilidades de que éstos logren recuperarse de desastres naturales importantes son mínimas o inexistentes. En muchos casos, no han alcanzado a recuperarse de los efectos desastrosos de un terremoto o de un huracán, cuando sufren el siguiente embate de otro terremoto o huracán. Los países que sufren esa situación, se les clasifica como países que han caído en ‘trampas de resiliencia’ (Corrales, Miquilena, 2010) (ver **Figura 1.1**).



**Figura 1.1:** Países en desarrollo en “trampas de resiliencia”, ubicados en zonas de mayor vulnerabilidad. (Fuente: Corrales, Miquilena, 2010).

El caso de Haití es emblemático: luego de haber sido afectado por el terremoto del 12/1/2010 (ver **Figura 1.2**), que produjo más de 300.000 víctimas<sup>3</sup>, Haití ha sufrido el pasado 5/10/2016 el embate del huracán Matthew (**Figura 1.3**), que causó daños en infraestructura, todavía no cuantificados, y un número de víctimas que una agencia de noticias señala de 877 (Reuters, 2016). Hay que recordar que luego de la ocurrencia del terremoto de Haití en 2010, el insuficiente sistema de recolección de aguas servidas de Port-au-Prince colapsó, y al no contar con las capacidades y las prioridades para su rápida puesta en servicio, se produjo una epidemia de cólera que cobró unas 9000 víctimas. El origen de esta epidemia fue la presencia de cascos azules de la NNUU, de origen nepalés, país en el cual el cólera es todavía endémica (Fuente: Aministry, 2015)

El análisis presentado hasta ahora, arroja dos conclusiones:

<sup>3</sup> El terremoto de Port-au-Prince, Haití, del 12/1/2010, produjo un número de víctimas que ha sido contabilizado con cifras muy diferentes. Munich Re reporta 159.000 víctimas, mientras que el gobierno haitiano reportó más de 316.000 víctimas. (<http://web.archive.org/web/20110115014954/http://www.telesurtv.net/secciones/noticias/87186-NN/nuevo-balance-eleva-a-316-mil-los-muertos-por-terremoto-de-haiti/>)

1. Es necesario incrementar esfuerzos en la prevención y reducción de riesgos de desastres para evitar pérdidas humanas y económicas. Para ello es necesario disminuir las vulnerabilidades de la sociedad
2. Es necesario también que las sociedades puedan recuperarse lo más pronto posible de los desastres, ya que de no ser así, la situación de calamidad que vive la población y la paralización de las actividades económicas y sociales, se complican y generan otro tipo de desastres. Para lograr esa pronta recuperación es necesario reforzar la resiliencia.



**Figura 1.2:** Daños en Haití por el terremoto de 2010. (Autor: UN Photo/Logan Abassi United Nations Development Programme).<sup>4</sup>

En otro ejemplo que muestra la importancia de incrementar la resiliencia, se comenta un estudio realizado en Japón luego de la ocurrencia del terremoto de Hanshin-Awaji del 17 de Enero de 1995 (también llamado el Gran Terremoto de Kobe) (Referencia: Miyamoto, M. et.al. 1999). En el estudio se analizó la situación de los hospitales afectados por el terremoto, y se señala que después de 4 años de ocurrido el terremoto, muchos de los problemas asociados con los hospitales todavía no habían sido resueltos. De la totalidad de hospitales de la ciudad, se seleccionaron 80 y de estos se logró recopilar información de 52 hospitales, los cuales fueron divididos en 3 grupos, de acuerdo a la gravedad de los daños: hospitales muy dañados (28 que fueron afectados en el 50% o más de sus capacidades, o en los que la recuperación del servicio de agua potable tomó más de 2 meses luego de ocurrido el terremoto); los hospitales de daño moderado (8 hospitales cuyo suministro de agua fue cortado por algún tiempo luego de la ocurrencia del terremoto o cuyo servicio de

---

<sup>4</sup> [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2010\\_Haiti\\_earthquake\\_damage4.jpg?uselang=es](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2010_Haiti_earthquake_damage4.jpg?uselang=es)

electricidad tomó 6 horas o más en ser restituido), y hospitales con daños poco considerables (16 hospitales que pudieron prestar sus servicios ordinarios dentro de los 30 minutos posteriores al terremoto).



**Figura 1.3:** Huracán Matthew afecta Haití (4/10/2016). La presencia del enorme huracán va desde el norte de Venezuela hasta las Bahamas y la península de la Florida, y oculta totalmente la Española.<sup>5</sup>

Los resultados muestran que la capacidad de prestación de servicios de los hospitales se vio afectada de manera importante por el terremoto. Sin embargo, los hospitales son edificaciones que reciben un trato especial en las normas sísmicas en lo que respecta a las prescripciones de diseño, ya que se espera que continúen en condiciones de prestar servicios a la población de manera inmediata, luego de la ocurrencia de un terremoto.

Aun respetando las considerables diferencias de vulnerabilidad y resiliencia que existen entre Haití y Japón, es necesario resaltar que, en todos los países del mundo, es necesario hacer esfuerzos que permitan reducir la vulnerabilidad y fortalecer la resiliencia ante eventos destructores, con la finalidad de reducir los riesgos de ocurrencia de desastres.

Este trabajo tiene la finalidad de presentar un conjunto amplio de información relacionada con el uso de los dispositivos de control de respuesta sísmica. Estos dispositivos son la alternativa actual más adecuada para disminuir la vulnerabilidad de las construcciones ante terremotos. Constituyen una alternativa efectiva para diseñar nuevas estructuras y rehabilitar o readecuar estructuras existentes, con los fines de incrementar su seguridad y

---

<sup>5</sup> [http://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/matthew\\_tmo\\_2016278\\_lrg.jpg](http://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/matthew_tmo_2016278_lrg.jpg)

resiliencia en caso de sismos. Esto contribuye también a disminuir la vulnerabilidad de las ciudades en su conjunto y a incrementar su resiliencia ante terremotos de grandes magnitudes.

La historia demuestra que el concepto de aislamiento sísmico no es nuevo. En la siguiente sección, presentaremos el desarrollo que tuvo este concepto en obras importantes de ingeniería, desde la Antigüedad.

## 1.2 Aisladores sísmicos ¿Una innovación en la ingeniería sismorresistente?

Las terribles experiencias de destrucción y los esfuerzos por minimizar los desastres producidos por terremotos, han acompañado al desarrollo de las ciudades desde la antigüedad. Como consecuencia, distintas técnicas han sido ensayadas a lo largo de la historia por artesanos y constructores, especialmente cuando se trataba de construcciones con especiales valores simbólicos, religiosos, funerarios o de poder.

En el libro “History of Earthquake Resistant Constructions. From Antiquity to our Times”, su autor, el ingeniero ruso B. Kirikov, presenta una interesante lista de construcciones de la antigüedad, que se mantienen todavía en pie a pesar de estar ubicadas en zonas de intensa actividad sísmica (Kirikov, 1992).

Las primeras técnicas utilizadas incluían mecanismos de aislamiento sísmico, fundamentados en la idea de aislar las construcciones de los movimientos del terreno producidos por el sismo. Tres técnicas de aislamiento sísmico destacan entre las utilizadas en la antigüedad en la procura del aislamiento sísmico:

- el uso de varias capas de piedras bajo la base de la estructura. Las piedras eran cortadas, con superficies alisadas, y colocadas sin mortero
- el uso de piezas de apoyo de madera
- la colocación de varias capas de arena, piedras, y algunas veces otros materiales, entre el suelo y las paredes.

El uso de piedras cortadas, alisadas y colocadas en varias capas sin mortero, es una de las técnicas que se consiguen más frecuentemente en estructuras antiguas. Una de las construcciones que presenta esta técnica, es la tumba de Ciro el grande, realizada en 550 A.C., en Pasargadae, Persia (ver **Figura 1.4** y **Figura 1.5**).



**Figura 1.4:** Tumba de Ciro el Grande, un caso de aislamiento sísmico en la antigüedad.<sup>6</sup>



**Figura 1.5:** Capas de piedra cortadas y sin mortero para permitir deslizamiento en tumba de Ciro. (Fuente: Bayraktar, A. et al., 2012).

Esta técnica de tres capas de piedra cortada y sin mortero, es conocida como sistema de fundación ‘Orthostat’. Para asegurar un adecuado comportamiento, los entornos de la fundación son dejados libres sin entrar en contacto con otras zonas del suelo u otras estructuras. Por otro lado, Kirikov señala que la tumba de Ciro es una estructura que satisface todos los principios de construcción sismorresistente: simetría, bajo centro de gravedad, dimensiones apropiadas.

En la referencia de Bayraktar, A. et al. (2012), se hace mención a versículos de la Biblia en los que se comenta este tipo de construcción. En Esdras 6:3 “*En el año primero del rey Ciro, el rey Ciro proclamó un decreto: En cuanto a la casa de Dios en Jerusalén, que sea reedificado el templo, el lugar donde se ofrecen los sacrificios, y que se conserven sus*

---

<sup>6</sup> [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CyrustheGreatTomb\\_22057.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CyrustheGreatTomb_22057.jpg)

*cimientos, con su altura de sesenta codos y su anchura de sesenta codos; con tres hileras de piedras enormes y una hilera de madera; y que los gastos se paguen del tesoro real.”<sup>7</sup>*

El uso de la técnica de las capas de piedra destaca también en otros casos de interés, como pudiera ser el Partenón <sup>8</sup> (ver **Figura 1.6**).

El ingeniero Kirikov resalta la importancia de las técnicas utilizadas por los griegos en la concepción y construcción de sus edificaciones; una de ellas es la compactación de las bases del suelo y la elaboración de fundaciones con diversas capas de materiales. Al estudiar casos de estructuras con adecuado comportamiento antisísmico en las costas del mar Negro, Kirikov menciona que encontró varios casos antiguos en los que los griegos usaron, como una de las capas de fundaciones, algas marinas, las cuales mostraron una durabilidad excepcional, inclusive mayor que la madera. Esta capa genera un comportamiento elástico en la base y un deslizamiento que permite aislamiento sísmico.



**Figura 1.6:** El Partenón es una estructura fundada en capas de piedras sin mortero, que ha podido soportar los embates de numerosos terremotos.<sup>9</sup>

Otro caso de fundaciones con capas y aislamiento sísmico, de origen griego, fue encontrada por el ingeniero Kirikov en excavaciones en el mar de Azov, en un pueblo llamado

---

<sup>7</sup> Un codo en esta referencia es una dimensión de aproximadamente medio metro.

<sup>8</sup> En la referencia de Bayraktar, et al., (2012), los autores presentan el análisis del comportamiento del sistema de fundaciones y aislamiento sísmico orthostat, y justifican su adecuado funcionamiento. Asimismo, en la referencia Naderzadeh, A., (2009), se incluye a El Partenón, como una estructura de gran importancia que, gracias al sistema de fundaciones osthostat, ha podido resistir el embate de numerosos terremotos.

[http://www.cibw114.net/symposium2009/pdf/OS09\\_Ahmad\\_Naderzadeh.pdf](http://www.cibw114.net/symposium2009/pdf/OS09_Ahmad_Naderzadeh.pdf)

<sup>9</sup> [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The\\_Parthenon\\_in\\_Athens.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Parthenon_in_Athens.jpg)

Chokrak (ver **Figura 1.7**) (Kirikov, 1992, p.84). Kirikov menciona que encontró que las ruinas de las fundaciones de una edificación importante (muy posiblemente un templo) del siglo III A.C., mostraban huellas dejadas por el fuego, y de acuerdo con información histórica, se supone que fue sometida a la ocurrencia de un severo terremoto. En las ruinas de las fundaciones, pudo determinar la presencia de una gruesa capa de arcilla, luego una capa de piedras de formas naturales, encima de ello una capa nivelación con piedras pequeñas, sobre las que se colocaron los bloques de fundación.



**Figura 1.7:** Excavaciones de ruinas en la costa del mar de Azov. (Fuente: Скампецкий - Own work, CC BY 3.0).<sup>10</sup>

El ingeniero iraní Ahmad Naderzadeh (2009) comenta el caso del obelisco egipcio creado en el año 1450 A.C. a partir de una roca de 18.67m, y que fue transportado a Constantinopla en 379-395 D.C. Fue emplazado sobre 4 bloques de bronce de 50 cm de lado, los cuales a su vez están colocados sobre un bloque de mármol de 3 m de lado, apoyado sobre capas de piedra orthostat. Esta estructura está en pie en Estambul actualmente (ver **Figura 1.8** y **Figura 1.9**)

El uso de fundaciones de madera es otra manera tradicional de generar aislamiento sísmico. La **Figura 1.10** muestra un caso de vivienda en la zona del mar Caspio, con fundaciones exteriores de madera (Khoshsima, E. et al, 2009)

---

<sup>10</sup> <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9504818>.



**Figura 1.8:** Obelisco Dikilitash, traído de Egiptio a Constantinopla (Estambul). (Fuente: Gryffindor - Yükleyenin kendi çal şması , Kamu Mal ).<sup>11</sup>

11

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2456253>.



**Figura 1.9:** Obelisco Dikilitash, base del obelisco.<sup>12</sup>

12

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/55/Istanbul-dikilita%C5%9F\\_-panoramio\\_-\\_HALUK\\_COMERTEL\\_\(3\).jpg/1213px-Istanbul-dikilita%C5%9F\\_-panoramio\\_-\\_HALUK\\_COMERTEL\\_\(3\).jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/55/Istanbul-dikilita%C5%9F_-panoramio_-_HALUK_COMERTEL_(3).jpg/1213px-Istanbul-dikilita%C5%9F_-panoramio_-_HALUK_COMERTEL_(3).jpg)

La incorporación y uso cada vez más difundido de aisladores sísmicos en edificaciones en la actualidad, constituye una innovación en el campo de la ingeniería sísmica, pero, como ha podido verse en esta breve referencia histórica, el esfuerzo por generar mecanismos de aislamiento no es una idea reciente.

En el presente trabajo se hace un amplio análisis ingenieril y actual, del uso y perspectivas de los aisladores sísmicos y de los disipadores de energía, en la prevención de pérdidas de vida y disminución de consecuencias económicas causadas por terremotos.



**Figura 1.10:** Fundación de madera que genera aislamiento sísmico. (Fuente: Khoshima, et. al., 2009).<sup>13</sup>

Otro interesante caso de aislamiento sísmico está presente en las columnas de la Casbah de Argel: **Figura 1.11.**

---

<sup>13</sup> [http://www.openaccesslibrary.org/images/MAL184\\_Ehsan\\_Khoshima.pdf](http://www.openaccesslibrary.org/images/MAL184_Ehsan_Khoshima.pdf).



**Figura 1.11:** Aislamiento sísmico compuesto por troncos de madera entre la columna y la arcada. Casbah de Argel.<sup>14</sup>

### 1.3 Objetivos del presente trabajo

Este libro tiene el objetivo principal de dar a conocer el importante potencial que tienen los dispositivos de control de respuesta sísmica, y en particular los aisladores sísmicos y los disipadores de energía, en la protección de edificaciones y en lograr que las estructuras puedan prestar los servicios para los cuales han sido construidas, de manera segura y confiable, y continuar operativas de manera inmediata luego de ocurrido un terremoto.

Los aisladores sísmicos y los disipadores de energía constituyen, por la sencillez de sus mecanismos de funcionamiento y por la efectividad de su desempeño, una alternativa confiable a considerar en el diseño sismorresistente y en los proyectos de readecuación sísmica, vista la necesidad de reducir daños en edificaciones, garantizar la seguridad de las vidas humanas, disminuir la ocurrencia de pérdidas económicas y contribuir con la resiliencia de las ciudades.

El uso de los aisladores y disipadores permite resolver un conjunto importante de problemas asociados a la ingeniería sismorresistente. Han demostrado su eficacia para diseños de estructuras con altos requerimientos de desempeño (como por ejemplo, los niveles de desempeño que deben tener los hospitales, en los cuales deben minimizarse los

---

<sup>14</sup> [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pilier\\_ancien\\_Alger.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pilier_ancien_Alger.png)

daños estructurales y no estructurales a fin de que permanezcan operativos y en servicio después de eventos sísmicos importantes). También son útiles para proyectos de refuerzo y rehabilitación de estructuras que por sus características o antigüedad, no cumplen con los requisitos normativos vigentes a fin de garantizar niveles mínimos de seguridad y desempeño sísmico. Igualmente, han sido utilizados en la readecuación de estructuras afectadas o no por terremotos, que tienen un alto valor cultural o histórico o en los casos donde los propietarios o usuarios de las edificaciones deciden invertir para mejorar sus niveles de desempeño sísmico.

Este libro está dirigido principalmente a ingenieros proyectistas y constructores, a arquitectos, a técnicos de la construcción, a planificadores y a todos aquellos profesionales de áreas afines, interesados en conocer los sistemas de protección sísmica más utilizados, las prácticas actuales, casos de aplicación y su utilidad en el análisis y diseño de estructuras sismorresistentes. También está dirigido a tomadores de decisiones, a fin de ilustrarlos en la conveniencia de utilizar este tipo de dispositivos, para fortalecer la resiliencia de las ciudades.

En el Capítulo 2, se incluye una clasificación de los principales sistemas y dispositivos de control de respuesta dinámica existentes. En el Capítulo 3 se presentan los aisladores de estructuras, su mecanismo de funcionamiento y bases teóricas que lo sustentan, así como las ventajas y desventajas que su utilización involucra. El Capítulo 4 incluye un análisis de modelos dinámicos simplificados que demuestran matemáticamente los mecanismos de funcionamiento de los aisladores sísmicos. En el Capítulo 5 se comentan las principales normas y reglamentos técnicos que se utilizan para el diseño de estructuras con dispositivos de control pasivo en la actualidad, lo cual incluye una breve presentación de los desarrollos reglamentarios en EEUU, Europa y América Latina. En el Capítulo 6 se introducen los procedimientos de diseño de estructuras con aisladores, así como los procedimientos y normas que pueden contemplarse para la realización de ensayos y certificación de los aisladores. En el Capítulo 7 se presentan los principios y mecanismos de funcionamiento de los disipadores de energía y control de respuesta; se comentan los distintos tipos de disipadores, y las ventajas y desventajas de su uso. En el Capítulo 8 se incluye un conjunto de ejemplos de estructuras reales, documentadas en la literatura consultada, que ilustran el uso de los dispositivos de control pasivo de estructuras (aisladores y disipadores). Por último, en el Capítulo 9 se introduce una discusión de las consideraciones económicas asociadas al uso de los sistemas de control de respuesta presentados.



# Uso de dispositivos de aislamiento sísmico y de disipación de energía



## 2 Uso de dispositivos de aislamiento sísmico y de disipación de energía para el control de la respuesta sísmica de estructuras

### 2.1 Objetivos del uso de los aisladores sísmicos y de los disipadores de energía

Las normas que establecen lineamientos para el diseño sismorresistente de estructuras, incluyen en la definición de las magnitudes de los sismos de diseño, el concepto de vida útil de la estructura. En general, esta vida útil ha sido establecida como de 50 años, para la mayoría de las edificaciones.

Para ese lapso de vida útil se establecen sismos de diseño que pueden considerarse como: de baja intensidad y de ocurrencia frecuente, de mediana intensidad y de ocurrencia probable, y de gran intensidad y de ocurrencia poco probable. Estos últimos, en general, con probabilidad de ocurrencia de 10% durante la vida útil de la estructura, que corresponde a terremotos con periodo de retorno de 475 años. Actualmente, se está proponiendo que para puentes se consideren sismos con periodos de retorno de 1000 años y para aquellos puentes que deban conectarse con centros de atención de emergencia, bomberos o similares, alcancen los 2500 años.

El diseño estructural es concebido con base en una “filosofía de diseño” que incluye objetivos de desempeño, de manera tal que el comportamiento esperado de la estructura sea el siguiente:

- Para sismos frecuentes, las estructuras no deben sufrir daños, ni en los elementos estructurales ni los no estructurales o arquitectónicos, y deben mantenerse operativas y en funcionamiento.
- Para sismos intermedios, poco frecuentes, la estructura puede sufrir daños que deben ser reparables.
- Para sismos severos, se permite que la estructura sufra daños generalizados y hasta pueda llegar a quedar inservible, pero sin que ocurra el colapso global de la edificación, a fin de preservar las vidas humanas.

Construir edificaciones que no sufran daño de ningún tipo, ni deterioro de ninguno de sus elementos estructurales en caso de sismos de gran intensidad, es sumamente costoso desde el punto de vista económico. Por ello, en la práctica ingenieril, se ha admitido que los diseños de estructuras prevean la ocurrencia de ciertos niveles de daño para sismos poco frecuentes. En el diseño, se procura que la ocurrencia de los daños en la estructura se localice en zonas y elementos previamente establecidos, a fin de disipar parte de la energía devastadora del sismo de manera controlada.

Sin embargo, la aceptación de niveles de daño (reparables para sismos moderados, y muchas veces irreparables para sismos excepcionales), trae importantes consecuencias económicas y operacionales para los propietarios o los usuarios de las edificaciones. En ciertos casos, el desconocimiento de estos fundamentos de la filosofía del diseño sismorresistente, llega a acarrear problemas legales. Por ello es conveniente que el ingeniero calculista determine con los propietarios de la edificación, los niveles de desempeño que serían deseables para la estructura frente a los sismos esperados en el sitio de la construcción. Hay que recordar que las normativas y reglamentos técnicos vigentes, recomiendan criterios mínimos de seguridad, generalmente con el fin de preservar vidas humanas, lo que no impide que los propietarios de las edificaciones puedan solicitar que el diseño responda a niveles de desempeño más exigentes.

Usualmente, para casos de estructuras de gran importancia, las normas técnicas prevén el incremento de las solicitaciones sísmicas de diseño a fin de aumentar los niveles de seguridad. Aun así, en muchos casos se producen daños importantes en elementos no estructurales que repercuten en las capacidades de prestación de servicios de estas edificaciones, lo que hace que interrumpan sus operaciones. En el caso de los hospitales, por ejemplo, la interrupción de sus servicios, tan necesarios a la hora de un sismo, trae consecuencias que pueden ser desastrosas para la población.

Un caso ilustrativo fue el del terremoto de Chile de 2010. Después del evento, se hizo un completo análisis de la situación de los hospitales, así como los alcances de los daños ocurridos, tanto estructurales como no estructurales, y de los tiempos de recuperación y recursos necesarios para recobrar la funcionalidad de estas instalaciones. En ese terremoto fueron afectados 130 hospitales (71% de todos los hospitales del país), de los cuales 4 resultaron totalmente inhabitables, 12 tuvieron pérdidas en más del 75% de su funcionalidad, 8 operaron sólo parcialmente luego del terremoto y 62% requirieron reparaciones; los daños fueron estimados en dos mil ochocientos millones de dólares (2800

MM de US\$, EERI, 2010)<sup>15</sup>. La **Figura 2.1** muestra daños no estructurales en uno de los hospitales afectados por el terremoto de Chile en 2010.



**Figura 2.1:** Hospital que presentó daños no estructurales que impidieron su funcionamiento inmediato, luego del terremoto de Chile de 2010. (Fuente: EERI, 2010).

El que ciertas edificaciones o estructuras importantes no estén funcionando luego de la ocurrencia de un terremoto severo, puede traer consecuencias que agraven las condiciones generadas por el terremoto. La atención de la emergencia que genera el sismo, exige considerar requerimientos de desempeño de “operatividad inmediata” para aquellas estructuras que se consideren indispensables a fin de solventar la situación.

También los cuarteles de bomberos son estructuras importantes. Si una estación de bomberos colapsa, aun cuando se preserven las vidas de los bomberos, éstos no podrán atender emergencias. Por ejemplo, las fugas de gas pueden convertirse en grandes incendios, capaces de generar niveles de daños superiores a los que produjo el mismo terremoto. Esto ocurrió en el terremoto de San Francisco del 28 de mayo de 1906. La **Figura 2.2** y la **Figura 2.3** muestran aspectos de la ciudad afectada por el terremoto y por

---

<sup>15</sup> Fuente: EERI, 2010: 130 hospitales afectados por el terremoto conforman el 71% de los hospitales de Chile. El ministerio de Salud de Chile (MINSAL) determinó que de ellos, 4 quedaron inhabitables, 12 tuvieron pérdidas de funcionalidad de más del 75%, 8 operaron sólo parcialmente luego del terremoto, 62% necesitaron reparaciones o sustituciones. 18% de las camas del sector público no estaban operativas luego de 1 mes del terremoto, los daños se estimaron en 2800 millones de US\$, y la reparación o sustitución de los más afectados tomaría de 3 a 4 años. Los daños estructurales fueron mínimos, pero no así los no estructurales, que afectaron la mayoría de los hospitales. En el área de estudio de la provincia del Bio-Bio, todos los hospitales perdieron el servicio municipal de electricidad y las comunicaciones por varios días, y el 71% perdió el suministro municipal de agua. Todos los hospitales tenían sistemas propios de apoyo eléctrico y de agua, pero no de comunicaciones, lo cual generó grandes dificultades para coordinar las ayudas. La mayoría de los hospitales sufrieron daños en los cielos rasos y las luces y causaron condiciones de insalubridad que llevaron a evacuaciones de las instalaciones. Algunos hospitales sufrieron daños menores por roturas de tuberías de agua. Algunos perdieron el uso de ascensores (por falta de energía o por averías mecánicas) y esto obligó al personal a cargar los pacientes por las escaleras. Servicios radiológicos y de laboratorio se vieron afectados. También se produjo un inconveniente desorden en las historias de los pacientes. De los 3 hospitales visitados con aislamiento sísmico en Santiago: ninguno presentó daños salvo en juntas con edificaciones adyacentes.

el incendio. La **Figura 2.4** muestra el incendio en la ciudad de Marounochi, otro evento devastador luego del Gran Terremoto de Kanto, Japón, del 1 de Septiembre de 1923.

El establecimiento de criterios y prioridades necesarias para la reducción de riesgos de desastres y para la rápida recuperación post-terremoto, debe ser planificado antes de la ocurrencia de una catástrofe. Esta planificación tiene como objetivo principal el de facilitar la recuperación de las actividades y el funcionamiento normal en el corto plazo después de un sismo. Esto subraya el requerimiento de fortalecer la resiliencia de las ciudades: es necesario que, después de un sismo, funcionen las infraestructuras fundamentales, como por ejemplo las redes de electricidad y telecomunicaciones, las vías principales, los puentes, y también zonas y comercios de almacenamiento y distribución de alimentos e insumos para la construcción, entre otros. Los criterios de resiliencia implican la necesidad de incrementar los niveles de seguridad en la consideración de las solicitaciones prescritas para el diseño sísmico, e imponen nuevas exigencias tecnológicas a fin de lograr el desempeño estructural deseado. (Mahin, S. 2011). Dentro de esa estrategia de reducir las consecuencias de un sismo y aumentar la resiliencia de las ciudades, se puede comprender la cada vez más pronunciada tendencia en la práctica de la ingeniería, de intentar reducir los niveles de daños esperados en las edificaciones, e introducir criterios de desempeño estructural más exigentes; se busca así mantener la operatividad inmediata de ciertas estructuras importantes después de sismos severos.

El desarrollo de nuevas tecnologías de protección sísmica y su verificación en terremotos severos ha demostrado que es posible proteger las vidas humanas, las inversiones, los contenidos y la operación de estructuras simples o complejas con un costo accesible.



**Figura 2.2:** San Francisco, afectada por el terremoto del 28 de mayo de 1906 <sup>16</sup>.

---

<sup>16</sup> Fotografía de George R. Lawrence (1869-1938), George R. Lawrence Co. - Panoramic photographs, Library of Congress, Reproduction number LC-DIG-ppmsca-07823 DLC Esta imagen está disponible en la División de Impresiones y Fotografías de la Biblioteca del Congreso de los Estados Unidos bajo el código digital ppmsca.07823.



**Figura 2.3:** Incendio en San Francisco luego del terremoto del 28 de mayo de 1906 <sup>17</sup>.

Las nuevas tecnologías de protección sísmica representan un importante salto en el conocimiento y la acción de la ingeniería sismorresistente; éstas permiten, mediante un diseño adecuado, un comportamiento más seguro y confiable de las estructuras sometidas a terremotos.

Los sistemas más utilizados en la actualidad para controlar la respuesta sísmica de las estructuras se basan en mecanismos de aislamiento sísmico y disipación de energía. En general, estos sistemas tienen como objetivos principales, los de mantener la funcionalidad de la estructura, mejorar el confort de los ocupantes del edificio en caso de sismos, y proporcionar protección sísmica adicional en la ocurrencia de eventos severos.

Los aisladores sísmicos, los disipadores de energía, y en general, los sistemas de control pasivo de respuesta, pueden ser utilizados con la finalidad de alcanzar diversos objetivos de desempeño considerados en los diseños estructurales. Como se ha mencionado, se puede apuntar al estándar tradicional de permitir severos daños en la estructura a fin de preservar las vidas ante sismos importantes. Pero también se puede orientar el diseño a alcanzar estándares más exigentes, que apunten, además de a preservar las vidas y la seguridad de

---

[https://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto\\_de\\_San\\_Francisco\\_de\\_1906#/media/File:San\\_Francisco\\_in\\_ruin\\_edit2.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_San_Francisco_de_1906#/media/File:San_Francisco_in_ruin_edit2.jpg)

<sup>17</sup> Fotografía: Chadwick, H. D. (US Gov War Department. Office of the Chief Signal Officer.) Edits by: Durova - US Archive ARCWEB ARC Identifier: 524395 NARA National Archives and Records Administration San Francisco Mission District burning in the aftermath of the San Francisco Earthquake of 1906. [https://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto\\_de\\_San\\_Francisco\\_de\\_1906#/media/File:Sfearthquake3b.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_San_Francisco_de_1906#/media/File:Sfearthquake3b.jpg)

las personas, a limitar los daños en la estructura y sus instalaciones y/o garantizar su operatividad inmediata luego de ocurrido un terremoto.



**Figura 2.4:** Incendio en la ciudad de Marunouchi luego del Gran Terremoto de Kanto, Japón, del 1 de Septiembre de 1923<sup>18</sup>.

El funcionamiento de un aislador sísmico se basa en generar una discontinuidad en la transmisión del movimiento de la fundación a la estructura. De esta manera no se transfiere la totalidad de la energía del sismo a la estructura; sólo se transmite una pequeña porción de ese movimiento de la fundación por lo que la estructura sufre pequeñas deformaciones y se limitan los daños. La estructura mantiene su respuesta mayormente en el régimen elástico, y hasta puede llegar a comportarse como un cuerpo rígido. De esta manera, se reducen las demandas de ductilidad de la estructura aislada, lo cual trae importantes simplificaciones en el detallado de los miembros estructurales, y en la protección de elementos no estructurales. Esto también trae ventajas que incluyen, por ejemplo, menores restricciones para el diseño arquitectónico y mayores posibilidades en la utilización de una amplia variedad de materiales y componentes estructurales.

Los sistemas de aislamiento sísmico y de disipación de energía en general, también permiten concentrar los daños estructurales en zonas predeterminadas del sistema, lo cual contribuye a que la estructura pueda recuperar su operatividad en periodos de tiempo muy cortos, o inclusive, de manera inmediata luego de la ocurrencia de un terremoto. Si los

---

<sup>18</sup> Fotografía de autor desconocido - Japanese book "Showa History Vol.4: Pre-Showa History - Great Kanto Earthquake" published by Mainichi Newspapers Company.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Gran\\_terremoto\\_de\\_Kant%C5%8D#/media/File:Marunouchi\\_after\\_the\\_Great\\_Kanto\\_Earthquake.JPG](https://es.wikipedia.org/wiki/Gran_terremoto_de_Kant%C5%8D#/media/File:Marunouchi_after_the_Great_Kanto_Earthquake.JPG)

daños se concentran en el sistema de protección sísmica, después de un terremoto, la reparación del sistema estructural y su puesta en funcionamiento nuevamente, se simplifica, ya que va asociada a la reparación o sustitución de los aisladores o amortiguadores afectados.

Los dispositivos de disipación de energía utilizados en sistemas de control pasivo de estructuras, son, generalmente, dispositivos sencillos que muestran un comportamiento inelástico estable y predecible cuando son sometidos a cargas sísmicas. Estos dispositivos pueden mejorar el comportamiento sismorresistente de la estructura, si han sido contemplados cuidadosamente en el diseño estructural y si se incluyen las adecuadas consideraciones sobre las características mecánicas de la estructura, de los dispositivos de disipación y del suelo.

En resumen, con el uso de mecanismos de control de la respuesta estructural dinámica, como son los sistemas de aislamiento sísmico y los dispositivos de disipación de energía, se busca reducir los efectos dañinos del terremoto, tanto en la estructura como en los elementos no estructurales, con el sentido, no sólo de evitar el colapso de la edificación ante sismos severos y la reducción de daños ante sismos intermedios, sino también, de procurar la rápida recuperación de sus capacidades y prestación de servicios en sus instalaciones.

## 2.2 Disipación de energía en el comportamiento sísmico de estructuras

Las prácticas tradicionales de diseño sísmico de estructuras se basan en la idea de que las mismas sufran daños, los cuales deben ser tales que no generen el colapso de la estructura ni pongan en riesgo vidas humanas. En efecto, producto de las deformaciones inducidas por las fuerzas sísmicas, se supone que los materiales ingresan en un rango de comportamiento inelástico y, después de un sismo severo, se espera que la estructura se vea afectada. Un adecuado diseño sísmico permite que, gracias al comportamiento inelástico de los materiales, la estructura tenga una significativa capacidad de disipar la energía que inyecta el sismo, lo que hace posible que no colapse ante la acción de un sismo severo (**Figura 2.5**). En términos prácticos esto se traduce en que las fuerzas de diseño puedan ser reducidas por debajo del límite elástico, según lo prescriben muchos códigos vigentes.

La ecuación de balance de energías para una estructura puede expresarse como lo indica la **Ecuación 2-1**:

$$E_k + E_a + E_h + E_d = E_s \quad (2-1)$$

Donde (ver **Figura 2.5**):

- $E_k$  es la energía cinética absoluta,
- $E_a$  es la energía disipada por amortiguamiento
- $E_h$  es la energía de deformación elástica (recuperable)
- $E_d$  es la energía disipada por efectos de deformación inelástica de los materiales.
- $E_s$  es la energía introducida por las cargas dinámicas externas (sísmicas o de viento). Esta energía introducida mide el trabajo efectuado por la fuerza de corte en la base de la estructura, por lo que incluye el efecto de las fuerzas inerciales de la estructura.

En un adecuado diseño sísmico usualmente es posible prever las zonas de la estructura donde se ubicarán las principales fuentes de disipación de energía por acción inelástica de los materiales ( $E_d$ ). Normalmente se prevé que se formarán “rótulas plásticas” en las vigas primero que en las columnas, y usualmente en zonas de las vigas cercanas a los nodos. De esta manera, con un buen diseño sísmico, se busca controlar los mecanismos de falla de la estructura y evitar el colapso prematuro que pudiera sobrevenir por la ocurrencia de fallas frágiles y repentinas.

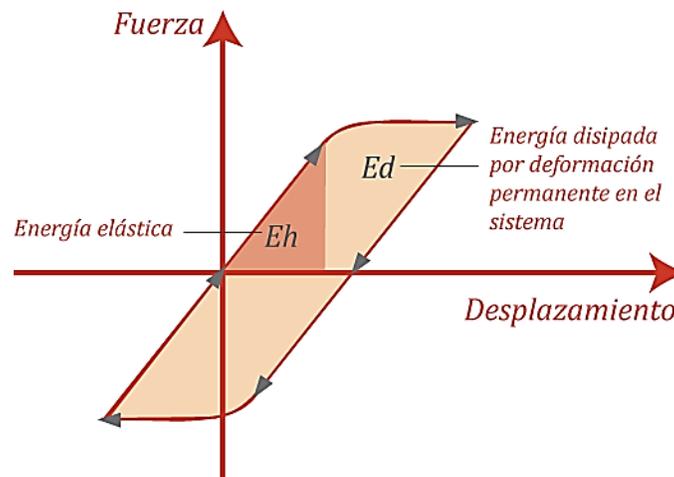
Esta filosofía, como ya se ha mencionado, implica que, para el sismo de diseño máximo (definido en las normas), se espera que la estructura presente daños significativos. Aunque se asegure un buen detallado de las conexiones, las incursiones en el rango de comportamiento no lineal y la repetición de ciclos de histéresis, conllevan degradación de la resistencia y rigidez de los elementos estructurales. Incluso con los procedimientos usuales de diseño sísmico, para sismos moderados, pueden esperarse desplazamientos laterales en los pisos que ocasionen daños sustanciales en elementos no estructurales como paredes de relleno, divisiones, cerramientos, acabados, puertas, ventanas, recubrimientos, etc. Esto hace que los costos de reparación puedan ser muy elevados.

Por ello, desde hace algún tiempo, se han hecho esfuerzos por limitar los daños en la estructura, así como en los elementos no estructurales, y para que la estructura resista las sollicitaciones sísmicas de diseño normativas con un mejor desempeño. Los avances de la ingeniería permiten considerar actualmente la inclusión de dispositivos adicionales de control de la respuesta sísmica, que se añaden a la estructura con el fin de minimizar el daño. Los dispositivos de control de la respuesta, también llamados de protección sísmica, funcionan de manera de incrementar la capacidad de disipación de energía de las estructuras (término de la izquierda del equilibrio energético de la **Ecuación 2-1**) o de aminorar la energía que introduce el sismo (término del lado derecho en la misma

ecuación). Es conveniente resaltar que, con la ocurrencia de deformaciones inelásticas, aumenta el término  $E_d$  (de disipación de energía de la estructura) en la ecuación de energía, lo que tiene también el efecto de reducir la rigidez de la estructura, con lo que a su vez varía la energía de entrada,  $E_s$ .

Con los dispositivos adicionales de protección, se logra incrementar la disipación de energía para que, para una determinada cantidad de energía de entrada (del sismo o del viento), la energía de deformación del sistema estructural original sea menor. Esto significa que la estructura sufrirá menos deformaciones para un nivel dado de energía suministrada cuando se instalan disipadores adicionales, minimizando el daño. En este tipo de sistemas de control se encuentran los llamados disipadores o amortiguadores.

Otra forma de disminuir la disipación de energía debida al comportamiento inelástico (que se traduce en daños) de la estructura, consiste en modificar la energía de entrada al sistema, término  $E_s$ , del lado derecho de la **Ecuación 2-1**. Los sistemas de este tipo, son por ejemplo, los aisladores que se colocan en la base de las estructuras.



**Figura 2.5:** Ciclos de histéresis: Comportamiento lineal y no lineal. (Adaptado de: Oviedo et al, 2006, Figura 2, pag 108).<sup>19</sup>

Desde los años 80 del s XX, se han introducido dispositivos externos de absorción de energía en las estructuras. El objetivo de estos dispositivos, como ya se comentó, es el de concentrar el comportamiento no lineal en regiones de la estructura, especialmente diseñadas y detalladas para tal efecto, y reducir de manera importante el comportamiento

<sup>19</sup> <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5557910.pdf>

inelástico y los daños en el sistema estructural resistente original, mejorando el desempeño esperado en el caso de sismos moderados o severos.

Para este propósito han sido propuestos diferentes tipos de dispositivos. Handson (1993) propone una clasificación de los sistemas de control de la respuesta sísmica en:

- a) Sistemas pasivos: como los aisladores de base y los dispositivos suplementarios de disipación de energía
- b) Sistemas activos: son dispositivos mecánicos cuyas características cambian de acuerdo con mediciones de los movimientos de la estructura

En Oviedo et al (2006), se hace un recuento de los tipos de sistemas existentes y se acoge la clasificación propuesta por la ISO 3010 International Standard “*Basis for design of structures – Seismic action on structures*”, según la cual los sistemas de protección sísmica se clasifican en: de control pasivo, de control activo e híbrido y de control semiactivo.

### 2.2.1 Sistemas pasivos

Los sistemas pasivos son los más utilizados en la actualidad, y es por esto que constituyen el objetivo fundamental del presente trabajo. Entre los de control pasivo se clasifican los de aislamiento sísmico en la base y los disipadores de energía. Los aisladores sísmicos buscan, como su nombre lo indica, impedir que los movimientos sísmicos del terreno se transfieran a la estructura. Los aisladores serán tratados con más detalle en los capítulos 3 a 6 de este trabajo.

En cambio, los disipadores de energía son diseñados para disipar la energía introducida en el sistema estructural por las fuerzas dinámicas externas debidas a sismo o viento. Estos dispositivos permiten aumentar el nivel de amortiguamiento de la estructura. Existen varios tipos de disipadores de energía: de amortiguamiento viscoso y viscoelástico y dispositivos de amortiguamiento por fricción y cedencia (ver **Figura 2.6**).

Una diferencia importante entre los dispositivos viscosos y viscoelásticos, si se comparan con los de fricción y cedencia es la fuerza máxima que cada uno desarrollará durante el terremoto. Para los del primer tipo, esta fuerza vendrá determinada por los desplazamientos y velocidades a lo largo de los dispositivos. Para los de fricción y cedencia, las fuerzas máximas serán iguales a las fuerza de fricción o cedencia de diseño del dispositivo (más el endurecimiento adicional que pueda existir). Las fuerzas máximas son más fácilmente controlables con este último tipo de dispositivos.

Un tercer tipo de dispositivos de disipación de energía, son los amortiguadores de masa sintonizada, que se ubican en puntos estratégicos de las estructuras para reducir la respuesta estructural.

Los sistemas de protección pasivos basados en la disipación de energía, serán comentados con más detalle en el Capítulo 7 de este trabajo.

### 2.2.2 Sistemas activos de control de respuesta

Los sistemas activos son complejos, ya que requieren de la instalación de sensores para procesar y medir las variables de control, a fin de regular la respuesta del dispositivo en caso de ocurrencia de sismo. Usualmente, se colocan acelerómetros para medir las aceleraciones en puntos estratégicos de la estructura y para echar a andar los mecanismos de control.

Un ejemplo de sistema activo son los amortiguadores de masa activa (llamados AMD por sus siglas en inglés: *Active Mass Damper*). Este sistema se basa en cuerpos de masa conocida que se ubican usualmente en el techo de la edificación. Según la lectura de los sensores que deben colocarse para medir la excitación sísmica, un actuador hará oscilar esta masa de manera de compensar las vibraciones inducidas por el sismo.

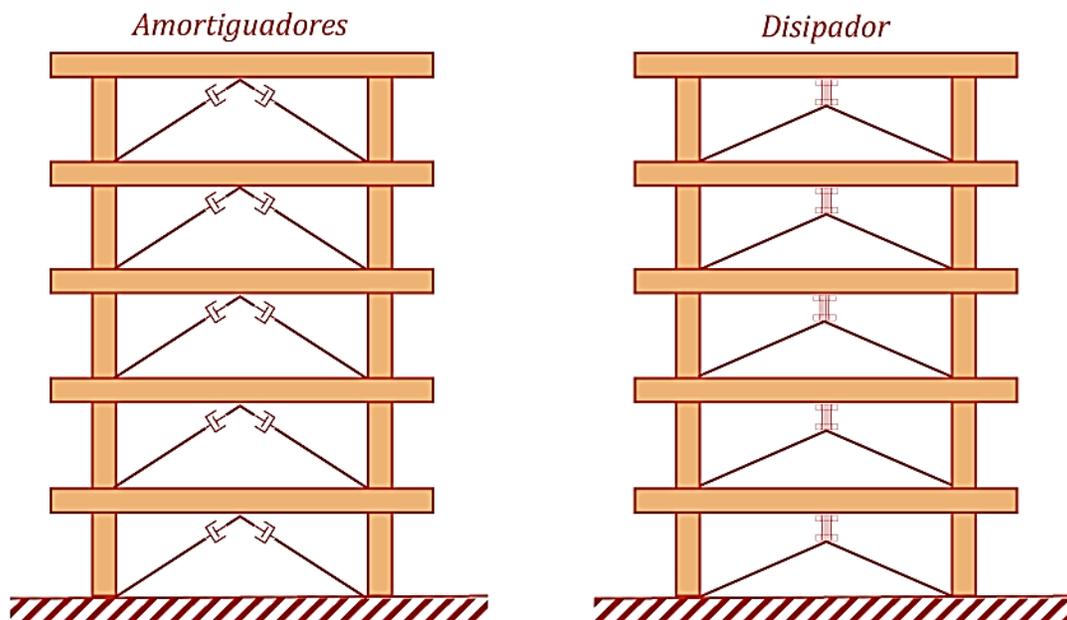


Figura 2.6: Sistemas pasivos de control de respuesta.

En otros tipos de sistemas activos, los actuadores aplican fuerzas sobre elementos de arriostramiento y tensores, para contrarrestar los efectos del sismo.

Los sistemas activos incluyen un algoritmo de control y un procesador de información, por lo que requieren de uno o varios computadores que deben funcionar permanentemente y que necesitan una protección adecuada para garantizar su funcionamiento en el momento de ocurrencia de un sismo; el suministro de energía constante para estos dispositivos es un problema no fácil de resolver, especialmente en los países de América Latina. En un sistema de tipo activo, la estructura es monitoreada constantemente, lo que permite modificar la respuesta de los dispositivos en tiempo real, según el nivel de la excitación sísmica. Este es el principio fundamental de funcionamiento de estos sistemas activos.

Como ya se mencionó, se trata de sistemas complejos y costosos, y una de sus desventajas es que, para garantizar su correcto funcionamiento en la eventualidad de un sismo, requieren de una fuente de suministro de energía continua. También requieren de programas de mantenimiento cuidadosos y de una correcta supervisión y vigilancia, tareas que no siempre son fáciles de garantizar. (Ver **Figura 2.7**).

Los sistemas de protección sísmica activos han sido aplicados principalmente en Japón. En algunos casos se combina la utilización de mecanismos activos y pasivos de protección sísmica. Por ejemplo, en la estructura puede colocarse un aislador de base con control activo del desplazamiento y un amortiguador híbrido de masa (HMD: *Hibrid Mass Damper*). La masa oscilante reduce la respuesta de la estructura, pero además puede disponerse de un actuador para mejorar la eficiencia y generar rigidez.

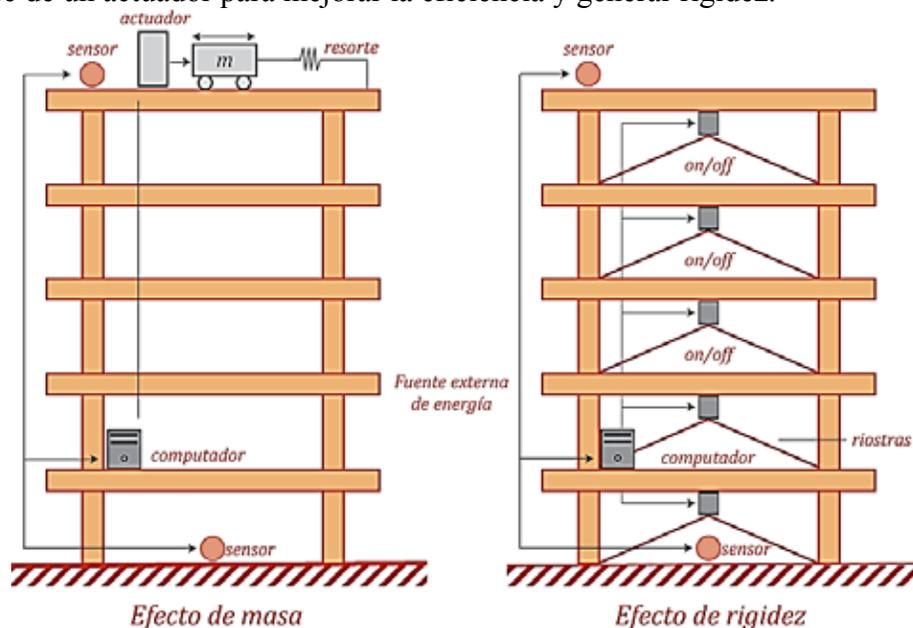


Figura 2.7: Sistemas de control activo.

### 2.2.3 Sistemas semi-activos de fluido controlable

Son sistemas basados en amortiguadores donde las condiciones de amortiguamiento pueden controlarse, ya que funcionan con fluidos de densidad o viscosidad variable. Los fluidos pueden ser de tipo electro-reológico (ER) o magneto-reológico (MR). En todo caso, se caracterizan porque pueden pasar de un estado de fluido viscoso lineal a uno semisólido, cuando se aplica una fuerza en un campo eléctrico o magnético. Esta fuerza es regulada a través de un algoritmo de control y sensores para caracterizar la excitación sísmica y la respuesta de la estructura.

Los sistemas semiactivos se basan en la idea de modificar las propiedades mecánicas de los dispositivos de disipación de energía para lo cual se requiere de un mecanismo de monitoreo y control permanente, al igual que en el caso de los sistemas activos.

Se pueden utilizar en este tipo de sistemas, además de amortiguadores con fluidos reológicos, amortiguadores de masa, o dispositivos de fricción controlable (**Figura 2.8**).

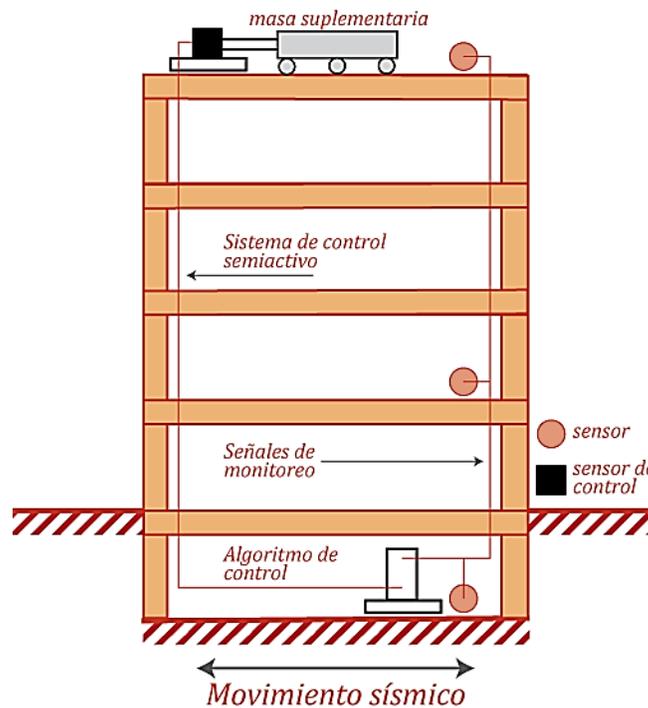


Figura 2.8: Sistemas semi-activos de protección sísmica.





**Aislamiento sísmico**



### 3 Aislamiento sísmico

Para comprender el funcionamiento de los sistemas de aislamiento sísmico, es conveniente recordar cómo se producen los terremotos. Los terremotos son generados por movimientos de reajuste de las placas de la corteza terrestre. Estos movimientos no son libres, ya que existen restricciones en las zonas de contacto entre las placas; estas restricciones producen deformaciones y tensiones que se van acumulando alrededor de las zonas de contacto de las placas. El terremoto se produce cuando se acumula un nivel de esfuerzos y deformaciones de tal intensidad, que se genera una ruptura brusca en la falla. Al ocurrir un terremoto, se libera energía de deformación acumulada, con lo que se producen desplazamientos en las zonas de contacto y un reajuste de las placas. Este proceso se conoce como la “teoría del rebote elástico” (Lafuente et al., 2014)

Los terremotos son, por lo tanto, consecuencia de fracturas en la corteza terrestre, las cuales se originan por ruptura de fallas geológicas, por fricción en el borde de las placas tectónicas o por procesos volcánicos. Los terremotos también pueden ser generados o inducidos por actividades humanas, como por ejemplo detonaciones nucleares y por los efectos de la construcción de embalses de agua. La **Figura 3.1** muestra las placas tectónicas que conforman la corteza terrestre, que están en el origen de la mayor parte de la actividad sísmica del planeta.



Figura 3.1: Las placas tectónicas (Fuente: USGS).<sup>20</sup>

<sup>20</sup> <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/slabs.html>.

En algunos casos, las fallas se hacen muy visibles en la superficie terrestre, como es el caso de la falla de San Andrés, California, la cual se muestra en la **Figura 3.2**.

En el momento en que se produce la ruptura de la corteza y se libera la energía acumulada por las deformaciones de las placas en contacto, se genera un terremoto: un movimiento vibratorio complejo del terreno, que incluye varios tipos de ondas, con distintas amplitudes, frecuencias y tiempos de ocurrencia. Estas ondas de movimiento llegan a la base de la estructura y producen un movimiento en su fundación (**Figura 3.3**).

Una vez que el movimiento del terreno llega a la fundación de la estructura, es transmitido al resto de la misma y la hace oscilar. Dependiendo de las características de las ondas que llegan a la fundación y de las propiedades mecánicas de la estructura (tanto desde el punto de vista de los materiales que la componen, como de su geometría), la estructura se moverá de distintas formas, con un movimiento irregular. Este movimiento es caracterizado por los desplazamientos, las velocidades y las aceleraciones de los distintos puntos de la estructura. Los desplazamientos de los distintos puntos de la estructura generarán fuerzas en elementos que la componen (vigas, columnas, muros, paredes). Estas fuerzas pueden superar la resistencia de algunos de los elementos, y eso puede producir el colapso de algunos elementos y desplazamientos importantes en la estructura, lo cual se traduce en el agotamiento o colapso parcial o total de la estructura.



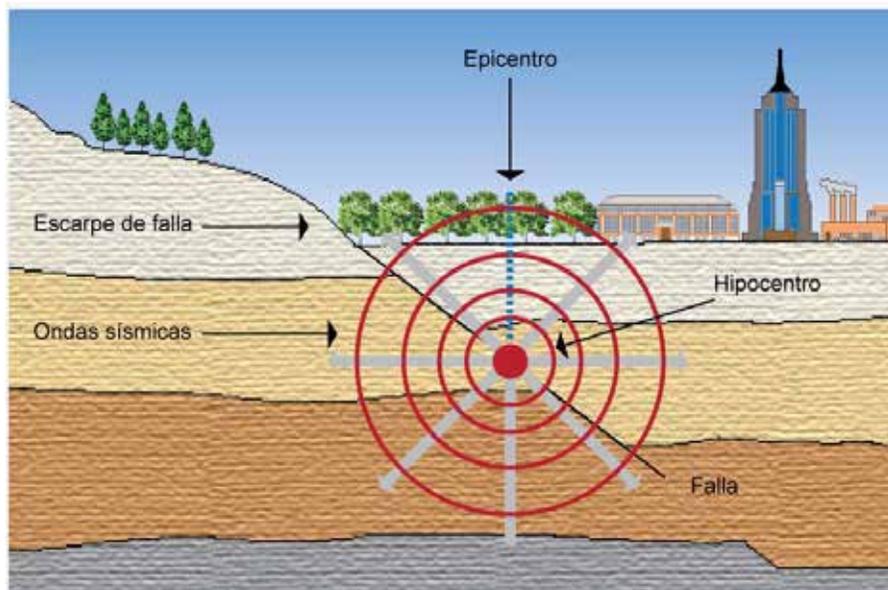
**Figura 3.2:** Vista aérea de la falla de San Andrés. Recorre 1286 km en el estado de California de Estados Unidos y es una de las fallas más estudiadas del mundo. (Fotografía: Leohotens).<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup> [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Falla\\_de\\_San\\_Andr%C3%A9s.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Falla_de_San_Andr%C3%A9s.jpg)

En fin, la energía liberada por el terremoto (en forma de movimiento en la corteza terrestre), es transmitida como movimiento vibratorio a la fundación y al resto de la estructura, lo que, según su intensidad, puede conducir al colapso parcial o total de la misma. Parte de la energía sísmica transmitida a la estructura es disipada por mecanismos de amortiguamiento y de deformación inelástica de los materiales, como fue comentado en la sección 2.2 de este trabajo (ver **Ecuación 2-1**)

Una forma de reducir los niveles de energía que introduce el sismo a la estructura es a través del uso de sistemas de aislamiento.



**Figura 3.3:** Hipocentro y epicentro de un terremoto (Fuente: Laboratorio de Ingeniería Sísmica del Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica).<sup>22</sup>

### 3.1 Aisladores sísmicos: ¿Por qué funcionan y son efectivos? Concentración del daño y readecuación estructural

Un aislador sísmico es un elemento muy flexible que se coloca entre la estructura y la fundación, a fin de transmitir la menor cantidad de movimiento a la estructura, en el momento de ocurrencia de un terremoto (**Figura 3.4**). De no existir el aislador, la

<sup>22</sup> [http://www.lis.ucr.ac.cr/clase\\_index/tv/articulos/imagenes/pub16fig1.jpg](http://www.lis.ucr.ac.cr/clase_index/tv/articulos/imagenes/pub16fig1.jpg)

fundación transmitiría gran cantidad de vibraciones a la estructura; al colocar el aislador, disminuyen las vibraciones en la estructura. La estructura sin aislador será denominada, de ahora en adelante, estructura de base fija (ver **Figura 3.5**).

Los aisladores se incorporan al sistema estructural y cambian sus propiedades dinámicas. Por ser muy flexibles, contribuyen a incrementar el periodo fundamental de vibración del sistema estructural. En el espectro de frecuencias del sismo, a estos altos períodos de vibración, corresponden valores bajos de aceleraciones, por lo que las fuerzas inducidas por el sismo sobre la estructura disminuyen significativamente. Por otro lado, las deformaciones se incrementan de manera importante, pero estas deformaciones se concentran en los aisladores sísmicos, lo que hace que la estructura primaria sufra sólo pequeñas deformaciones. Los aisladores también producen un efecto de amortiguamiento importante que contribuye a disipar la energía introducida por el sismo.

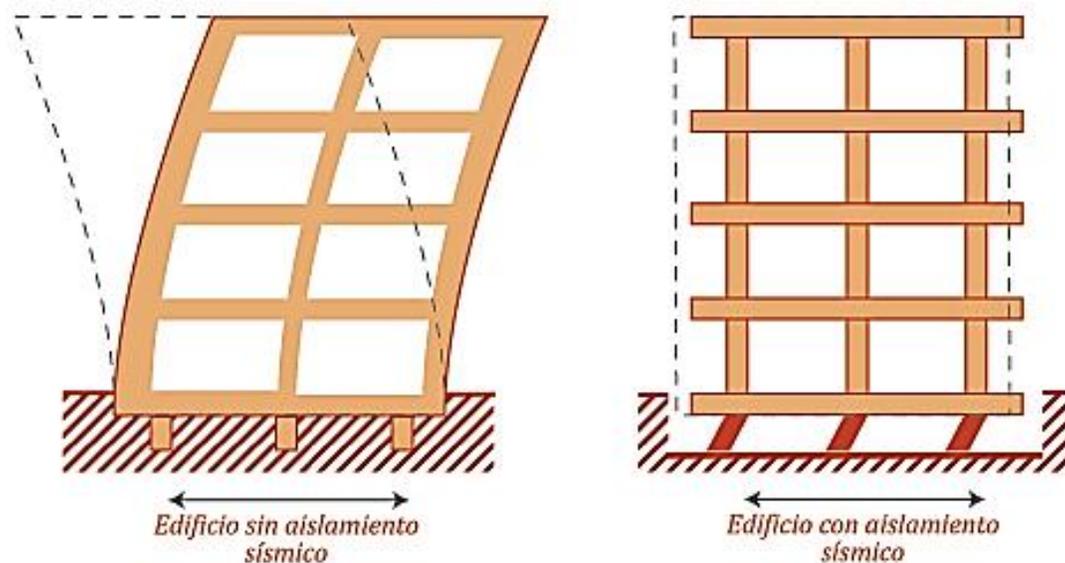
Los aisladores sísmicos son concebidos e instalados para que los movimientos horizontales de la fundación, generados por el sismo, no sean transmitidos a la estructura. Los aisladores no son diseñados, en general, para aislar movimientos verticales, y esto es debido a dos causas: la primera es que las vibraciones verticales producidas por los sismos son generalmente menores que las horizontales; la segunda razón es que las estructuras, dado que deben resistir las cargas gravitacionales, son diseñadas con gran rigidez y resistencia a cargas verticales.



**Figura 3.4:** Aislador sísmico de goma. (Fuente: Kelly, 2013).

La presencia de los aisladores sísmicos no sólo reduce los desplazamientos horizontales de la estructura, sino que concentra los desplazamientos y las eventuales deformaciones para los sismos mayores, en la zona de interfaz de la fundación y la estructura, que corresponde al aislador. Esto permite también hacer reparaciones de manera más sencilla y económica, ya que los eventuales daños se concentran en esas zonas.

Dado que un sistema de aislamiento sísmico incrementa el nivel de protección de la estructura, resulta adecuado para su uso en estructuras que deben mantenerse operativas durante un terremoto, tales como hospitales, estaciones de bomberos, centros de atención de emergencias, estructuras de comunicación principales, centrales energéticas, estaciones de policías, centros de información estratégicos, etc. También son adecuados para la protección de estructuras patrimoniales y monumentos históricos.

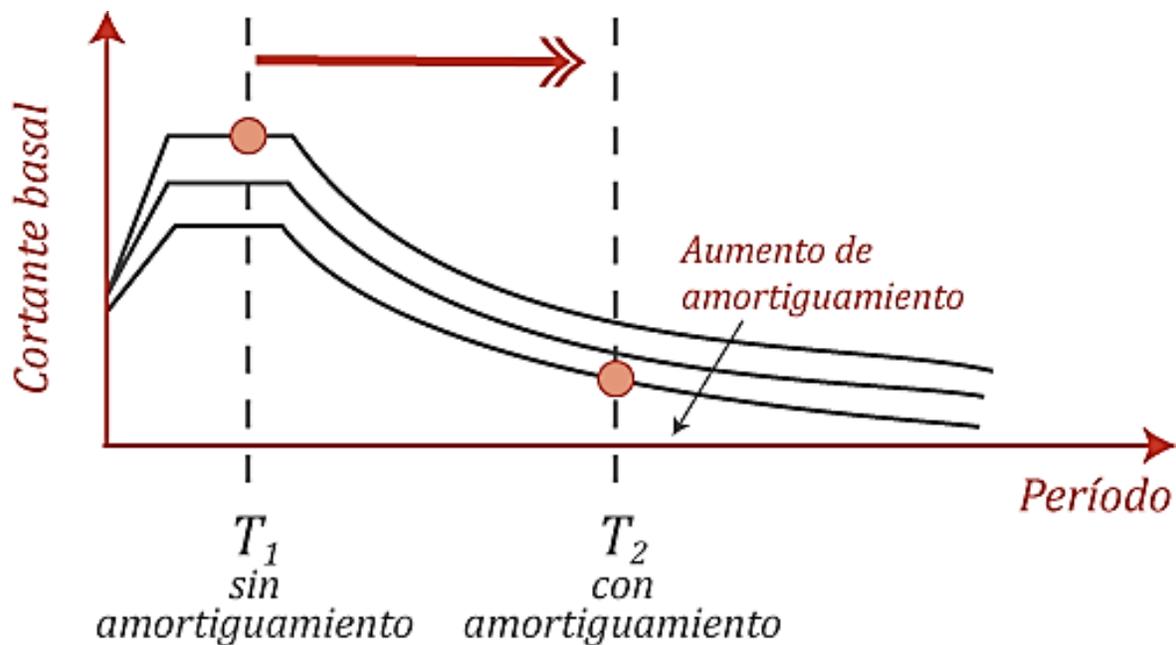


**Figura 3.5:** (a) edificación sin aislamiento sísmico y (b) edificación con aislamiento sísmico.

La **Figura 3.6** muestra de manera esquemática, la variación en la acción espectral en estructuras de base fija y con aislamiento. El periodo de vibración de la estructura sin aislamiento es mostrado como  $T_1$ . Al incluir el aislador a la estructura, el primer periodo de vibración del sistema se incrementa a  $T_2$ , lo que supone una carga sísmica inferior (medida en términos del corte basal). Adicionalmente, los espectros de fuerzas se reducen por el efecto del amortiguamiento introducido por el aislador.

A continuación se ilustran los beneficios del aislamiento utilizando espectros normativos, en este caso correspondientes a normas de Ecuador NEC2011 (Lara O., 2015). Para un sistema estructural que tiene como periodo fundamental de vibración,  $T = 1$  segundo, puede observarse en la **Figura 3.7** que las fuerzas de diseño corresponderán a aceleraciones de 0.69 g si son calculadas a partir del espectro de la norma CEC 2001, y aceleraciones de 0.90 g si son calculadas a partir de los espectros de la norma NEC 2011. Al incorporar

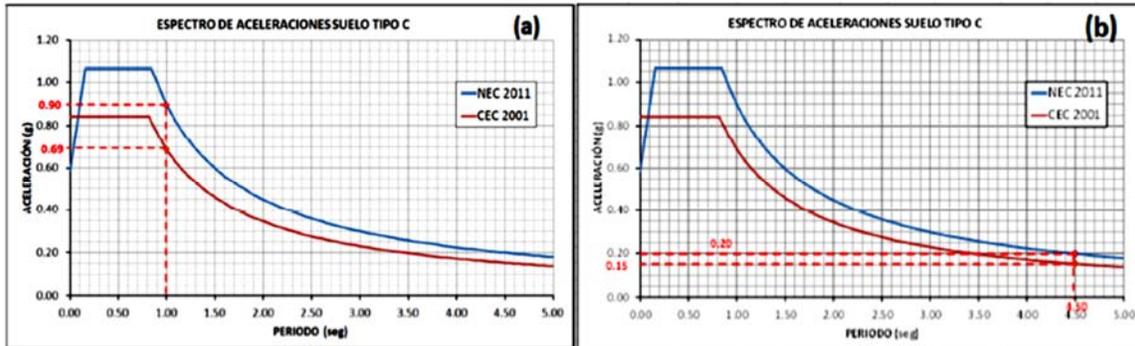
aisladores sísmicos a esta estructura, y lograr el incremento de su periodo fundamental a 4.30 segundos, se consigue que las aceleraciones sísmicas de diseño pasan a ser de 0.15g, para la norma CEC 2001, y de 0.20 para la norma NEC 2011. Esto representa una reducción de las aceleraciones de diseño del 78% con la aplicación de ambas normas, lo que constituye una importante contribución al desempeño de la estructura, tanto ante sismos de mediana intensidad, para los cuales los desplazamientos de la estructura serán pequeños y seguramente podrán evitarse los daños inclusive de componentes no estructurales, como para preservar la integridad de la estructura ante sismos de gran intensidad



**Figura 3.6:** Disminución de la aceleración espectral por incorporación del aislador sísmico. (Adaptada de: Barrio et al. 2015, figura 2(A), open access).<sup>23</sup>

Como ya se ha establecido, la presencia de aisladores sísmicos reduce la sollicitación sísmica a la que es sometida el sistema estructural. Adicionalmente, se concentran los desplazamientos y sollicitaciones en el propio sistema de aislamiento, por lo que la estructura no es sometida a regímenes de fuertes deformaciones (que podrían generar fallas por grandes esfuerzos) ni a regímenes de grandes desplazamientos (que podrían generar el colapso de la estructura por inestabilidad y efectos de segundo orden). Como el daño se concentra en los aisladores, la reparación puede ser, en general, más sencilla y económica.

<sup>23</sup> [http://file.scirp.org/Html/1-2740066\\_52406.htm](http://file.scirp.org/Html/1-2740066_52406.htm).



**Figura 3.7:** Comparación de la aceleración espectral a la cual es sometida una estructura con y sin aislamiento sísmico: (a) Sistema sin aisladores – Alta demanda sísmica; (b) Sistema con aisladores – Baja demanda sísmica. Espectro de norma de Ecuador NEC-2011. (Fuente: Lara, O, 2015).

Como ya ha sido señalado, los diseños sísmicos de estructuras se orientan hacia el cumplimiento de ciertos objetivos de desempeño frente a distintos niveles de sismos. Se establecen usualmente hasta tres objetivos de desempeño: a) que las estructuras no colapsen a fin de preservar las vidas humanas, en el caso de terremotos severos de ocurrencia excepcional; b) que las estructuras sufran daños reparables (tanto en elementos estructurales como no estructurales) con la ocurrencia de sismos moderados probables; y c) que la estructura no sufra daños (ni estructurales ni no estructurales) ante sismos frecuentes de baja intensidad. Sin embargo, según el procedimiento tradicional de diseño sísmico de edificaciones, sólo se verifica la primera condición, y usualmente se diseña para sismos con probabilidad de excedencia del 10% en el tiempo de vida útil de la estructura, la cual se establece de 50 años en la mayoría de los casos (las normas prevén también el diseño con menores probabilidades de excedencia para estructuras importantes). En los últimos tiempos se ha asumido en las estrategias del diseño ingenieril, la necesidad de aumentar la resiliencia de las ciudades, por lo que ciertas edificaciones y obras de infraestructura deben ser diseñadas para cumplir con los niveles de desempeño b y c. Algunas normas técnicas de diseño sísmico ya han incorporado al menos dos niveles de verificación.

Las estructuras sin aisladores sísmicos están diseñadas, por lo general, para presentar una respuesta ante sismos severos, caracterizada por mecanismos de disipación de energía producidos por desplazamientos importantes entre los pisos (derivas), los cuales conducen a incursiones en el rango inelástico de algunos de los elementos estructurales. Esto genera deterioro de elementos estructurales como vigas, columnas y muros. Los procesos de incursión en el rango inelástico imponen deformaciones remanentes, desprendimiento de recubrimiento, desarrollo de tensiones en barras de acero de confinamiento, solicitaciones severas de flexión y de corte sobre los elementos estructurales. Los importantes desplazamientos entre pisos también producen daño en elementos no estructurales, lo cual

puede incluir ventanales, paredes, recubrimientos, techos, luminarias, daños en instalaciones sanitarias, de gas, eléctricas y de telecomunicaciones, además de los daños en equipos y mobiliarios. La reparación de los daños es costosa y en muchas ocasiones impone la reconstrucción parcial o total de las estructuras dañadas por terremotos severos.

Al introducir aisladores sísmicos en el diseño estructural se procura que la estructura se comporte como un cuerpo rígido, colocado sobre los aisladores; de esta manera se reducen al mínimo las deformaciones de la estructura y se concentran en el aislador sísmico (ver **Figura 3.5 b**); esto permite que las derivas o desplazamientos relativos entre pisos, sean mínimos. Al lograr este efecto, las fuerzas son transmitidas al aislador, el cual responde generando grandes deformaciones. Los aisladores son específicamente diseñados para resistir estas grandes deformaciones, con lo que protegen la estructura. Al soportar estas deformaciones, los aisladores deben responder sin sufrir daños, y en el caso en que éstos se produzcan, quedan concentrados en el sistema de aisladores, limitando significativa o totalmente, las reparaciones en la estructura primaria. Si los aisladores resultan dañados después de un sismo, es sencillo reemplazarlos, por lo que las instalaciones pueden estar nuevamente operativas rápidamente después de un sismo.

A pesar de las importantes ventajas de los aisladores sísmicos, es necesario tener en cuenta los efectos secundarios que pueden generar problemas distintos a los que se presentan en las estructuras de base fija.

Entre ellos, es necesario verificar los siguientes: los efectos torsionales de la estructura sobre los aisladores (lo cual puede imposibilitar el uso de aisladores); las variaciones de las vibraciones en las adyacencias de la estructura (interacciones suelo-estructura), los cuales pueden eventualmente incluir fenómenos asociados a la cercanía de una falla y movimientos de periodos largos que interactúen con depósitos profundos del suelo; los efectos del envejecimiento del aislador; los efectos de la temperatura; la posible tracción sobre los aisladores por efectos de momentos de volcamiento en la estructura; los requerimientos especiales de uniones flexibles de tuberías y otros sistemas (incluyendo escaleras en la interfaz).

La presencia de desplazamientos verticales, cuando se utilizan aisladores tipo péndulo, puede ser un problema, sobre todo si generan desplazamientos verticales diferentes en los distintos aisladores, lo cual produciría estados de esfuerzos que deben ser verificados sobre la estructura.

También es necesario verificar, para estructuras muy rígidas, la posibilidad de generar, en lugar de la reducción deseada de las sollicitaciones sísmicas, un incremento de cargas por la presencia de los aisladores. En efecto, si la estructura es de periodo muy corto y su acción

espectral está en la rama ascendente del espectro, la presencia del aislador puede generar incremento de cargas.

A manera de síntesis, puede decirse que los aisladores sísmicos funcionan porque introducen flexibilidad en la base de la estructura. En términos de dinámica de estructuras, esta componente de flexibilidad genera efectos positivos para la estructura, reduce las fuerzas horizontales asociadas a los sismos e introduce amortiguamiento adicional a la estructura. El incremento del periodo fundamental va acompañado de una modificación del modo fundamental de vibración de forma tal que se convierte en un modo de traslación. A estas variaciones en la estructura, va asociada una significativa reducción de las contribuciones de los modos superiores ya que se concentra la masa de la estructura en el modo fundamental, con lo que se reduce drásticamente la energía de excitación en los modos superiores. Todos estos efectos podrán ser observados en los ejemplos que se presentan en el Capítulo 4.

### 3.2 Tipos de aisladores sísmicos. Elementos típicos

Hay mucha diversidad en los diseños de aisladores sísmicos. Estos, sin embargo, pueden agruparse en dos tipos.

El primer tipo de dispositivos de aisladores son los elastoméricos, los cuales consisten en elementos que permiten grandes deformaciones laterales. Son cilindros cortos con capas de materiales flexibles como pueden ser gomas de alta resistencia, alternadas con láminas o capas de acero (**Figura 3.8**). Estos dispositivos tienen gran resistencia a las cargas verticales que genera la estructura, principalmente debida a la presencia de las capas de acero, que restringen las excesivas deformaciones por abultamiento de las capas de goma, mientras que no tienen mayores efectos en los desplazamientos horizontales. El resultado es un elemento de aislamiento que posee una gran rigidez vertical, comparada con la baja rigidez lateral.

La goma utilizada en la elaboración de los aisladores puede ser de origen natural o sintético. Las propiedades mecánicas de los aisladores son verificadas mediante ensayos de laboratorio y entregadas al diseñador o al propietario.

Con el fin de limitar también el movimiento relativo y disipar energía, los aisladores deben generar altos valores de amortiguamiento. Para ello se incluyen núcleos de plomo que admiten grandes deformaciones y pueden producir un alto amortiguamiento, el cual varía en función del diámetro del núcleo de plomo.



**Figura 3.8:** Aislador sísmico (Fuente: Lara, O, 2015).

El plomo es utilizado principalmente por su comportamiento elastoplástico, su capacidad de mantener la resistencia durante múltiples ciclos de deformaciones plásticas, además de los altos valores de amortiguamiento que se consiguen, los cuales pueden llegar al 25% o inclusive al 30% del amortiguamiento crítico (Chopra, 2001). Debe tenerse presente que valores muy altos de amortiguamiento, no necesariamente son beneficiosos, aun cuando el nivel a partir del cual esto ocurre, no ha sido determinado con precisión todavía. En ocasiones se usan núcleos de goma que producen un amortiguamiento del orden del 12% (entre 8% y 16%) del amortiguamiento crítico, o amortiguadores hidráulicos. Los núcleos de plomo son colocados en el centro del aislador (ver **Figura 3.9**) y en especial estos últimos, aceptan grandes deformaciones.



**Figura 3.9:** Aislador de capas de goma y acero y núcleo de plomo.<sup>24</sup>

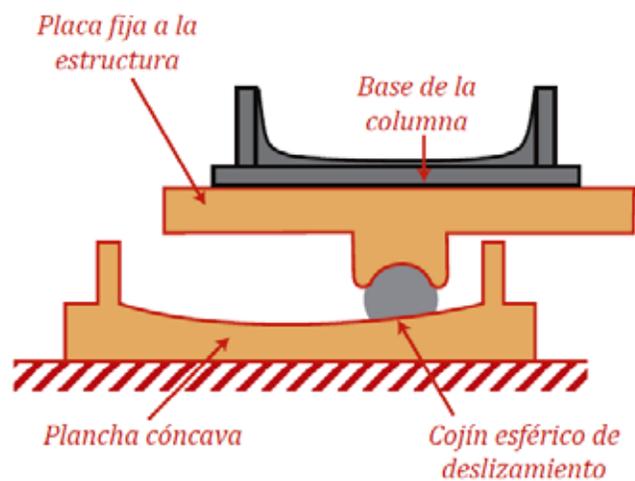
<sup>24</sup> <http://www.taiwanpillar.com.tw/eWebEditor/uploadfile/20061227104737229.jpg>

El segundo tipo de aisladores sísmicos son los de deslizamiento, los cuales se basan en apoyos con planchas metálicas que permiten desplazamientos relativos entre las dos planchas. Una plancha va sujeta a la fundación y la otra a la estructura. El desplazamiento relativo de las planchas permite aislar el movimiento de la fundación del de la estructura, por lo que no se transmite toda la energía de movimiento a la estructura. Estos sistemas deben producir poca fricción a fin de sólo transmitir parte de la fuerza de corte, pero por otro lado, la fricción debe ser suficiente como para que fuertes vientos o pequeños temblores no generen desplazamientos. En algunos casos pueden colocarse fusibles en los aisladores, de manera de garantizar la transmisión del corte hasta cierta magnitud prefijada; en estos casos, la magnitud de ruptura de los fusibles es aquella a partir de la cual deben aceptarse los desplazamientos en el aislador. Los fusibles también pueden ser colocados para que entren en funcionamiento al ocurrir grandes deformaciones, a fin de limitarlas e impedir el colapso; en este caso, la estructura es libre de moverse hasta alcanzar un desplazamiento límite, a partir del cual los fusibles entran en funcionamiento y comienzan a transmitir corte a la estructura. Este segundo tipo de fusibles es utilizado en puentes.

La versión más sencilla de este tipo de aisladores, consiste en dos planchas planas de acero inoxidable, con un material intermedio de baja fricción; dado que, al ocurrir un movimiento severo que desplaza la estructura, cambia la posición relativa de las planchas, se considera que los aisladores de planchas planas no son autocentrantes, es decir, no regresan a su posición de equilibrio inicial. Esto puede ser especialmente inadecuado para elementos no estructurales, como pueden ser las tuberías o escaleras de acceso exterior. Es por esta razón que se introducen elementos que limiten los desplazamientos relativos o mecanismos que recentren la estructura a su posición inicial. Algunos de los mecanismos de realineamiento para aisladores de planchas planas, consisten en la inclusión de anillos que limitan los desplazamientos relativos e incluyen resortes que amortiguan el impacto en los anillos y producen una fuerza que regresa la estructura a la posición central. Este tipo de mecanismos no son ampliamente utilizados. En cambio, es más frecuente el uso de planchas de superficie curva.

Los aisladores con planchas curvas, generan una condición de péndulo, razón por la cual son conocidos como Sistemas de péndulos de fricción (*Friction pendulum systems* o FPS). Estos sistemas incluyen superficies esféricas de contacto que permiten un deslizamiento relativo y generan un movimiento pendular (ver **Figura 3.10**). Estos péndulos funcionan de manera tal que al producirse el desplazamiento entre las planchas generado por el sismo, se produce un leve levantamiento de la estructura; dada la curvatura de las planchas, el peso de la estructura genera una acción restauradora que busca colocar a la estructura en su posición inicial de equilibrio, una vez finalizado el terremoto. El proceso de deslizamiento relativo de las partes es descrito por expresiones no lineales. El conjunto del aislador consiste en planchas curvas de acero inoxidable pulido, con superficies curvas cóncavas, una articulación central (*articulated slider*) y un revestimiento de material compuesto de

baja fricción (**Figura 3.11**). Durante el terremoto, la articulación central se mueve en contacto con la superficie cóncava, generando un movimiento pendular de la superestructura. El periodo de vibración es una función del radio de la curvatura de la superficie cóncava y es independiente de la masa de la superestructura. El amortiguamiento es proporcionado por la fuerza dinámica de fricción, la cual puede ser ajustada en la medida en que se varían las propiedades del material compuesto de baja fricción, generando valores de amortiguamiento que varían entre 10% y 30% del amortiguamiento crítico.



**Figura 3.10:** Esquema de aislador con placas.



**Figura 3.11:** Aislador con placas curvas. (Fuente: Barro et. al., 2015, Figure 4).

También se utilizan dispositivos mixtos, que involucran los dos mecanismos de aislamiento ya mencionados. Entre ellos el más comúnmente utilizado es el que combina

amortiguadores elastoméricos con planchas planas, los cuales son utilizados en estructuras con momentos de volcamiento despreciables. La combinación de ambos sistemas en una estructura es también utilizada, a fin de aprovechar las ventajas de cada uno.

### 3.3 Ventajas y desventajas del uso de aisladores sísmicos

Los sistemas de aislamiento sísmico presentan un conjunto de ventajas:

- En primer lugar, los procedimientos de análisis son simplificados; esto es debido a que la incorporación de los elementos flexibles de aislamiento, por tener un periodo de vibración significativamente más alto que la estructura, permiten desacoplar la respuesta sísmica, y de esa manera la estructura pasa a comportarse como un cuerpo rígido.
- La simplificación del análisis va asociada a que la respuesta es controlada por el primer modo de vibración, y las contribuciones de los modos superiores son despreciables.
- La mayoría de las estructuras pueden ser analizadas como sistemas de tres grados de libertad, y, en el caso de tener distribuciones que permitan reducir significativamente la torsión, pueden seguirse procedimientos de análisis todavía más sencillos, mediante la aplicación de métodos estáticos simplificados.
- El incremento del período fundamental de la estructura genera reducciones en las aceleraciones espectrales, lo cual reduce las fuerzas a las cuales está sometido el conjunto estructura-aisladores. Esto reduce las aceleraciones en la base de la estructura y en los pisos de la edificación.
- La presencia de los aisladores en la base y el mencionado comportamiento de cuerpo rígido genera pequeños desplazamientos entre pisos, con lo que puede, en muchos casos, realizarse un diseño elástico de los elementos estructurales. La reducción de los desplazamientos relativos entre pisos también trae como consecuencia que disminuyen las solicitaciones sobre los elementos no estructurales, permitiendo de esta manera una reducción significativa de los daños en elementos estructurales y en elementos no-estructurales.

- La reducción de las solicitaciones sobre los miembros estructurales trae como consecuencia que sus dimensiones pueden disminuir, con lo que se presentan ventajas desde el punto de vista arquitectónico. Entre las consideraciones de diseño hay que prever el espacio circundante alrededor de la edificación que debe permitir el libre movimiento de la misma. Este espacio debe concebirse de manera tal que facilite el fácil acceso para la verificación del estado de los aisladores y su eventual sustitución, a la hora de presentar daño.
- La presencia del sistema de aisladores y su correcto diseño y distribución contribuye a reducir los efectos de la torsión en la respuesta sísmica.
- En términos generales, la presencia del sistema de aisladores permite la reducción de los daños en la estructura, así como la reducción de los daños no estructurales. Las zonas de mayor daño quedan concentradas en los aisladores, por lo que resulta más fácil la inspección y reparación de la estructura, la cual puede inclusive lograrse con la reparación o sustitución de aisladores.
- El aislamiento sísmico permite reducir los efectos de tensiones residuales que pueden ser provocados por la retracción de elementos estructurales.
- El uso de los aisladores permite concentrar las incertidumbres sobre los procesos constructivos y sus eventuales fallas al momento de la ocurrencia de un terremoto, en los mismos aisladores, los cuales, a su vez, permiten un mejor control de calidad que el que tradicionalmente se puede conseguir cuando se construye una edificación, especialmente en países en los que la mano de obra no es muy calificada.
- Una de las mayores ventajas del uso de aisladores sísmicos es que la operatividad de las estructuras puede recuperarse inmediatamente después de la ocurrencia de un terremoto, en la medida en que se logran los objetivos de desempeño previstos.

Por otro lado, el uso de los aisladores presenta desventajas que deben ser tomadas cuidadosamente en cuenta a la hora de diseñar y de construir una edificación a la cual se le incorpora un sistema de aisladores.

- La primera dificultad es la asociada a la presencia de grandes desplazamientos en la base de la estructura, y como consecuencia del comportamiento de cuerpo rígido, en toda la estructura de manera simultánea (con mínimos desplazamientos relativos). Estos grandes desplazamientos se concentran en la zona de la edificación en la que se colocan los aisladores, los cuales, en la mayoría de los casos van sobre las fundaciones, pero en muchos casos, especialmente en estructuras que han sido reparadas o reforzadas con aisladores sísmicos, pueden requerir ser colocados en niveles intermedios, en la parte baja de la estructura. Los desplazamientos pueden tener un orden de entre 20 cm y 50 cm para fuertes terremotos. En la mayoría de los casos, el espacio necesario para permitir los desplazamientos, se prevén en la zona inferior al primer piso, por lo que el plano de aislamiento queda a nivel inferior al suelo. Pero otras soluciones pueden también desarrollarse. La [Figura 3.12](#) muestra el caso de una edificación que fue colocada sobre aisladores sin restricciones y a un nivel externo, de piso, lo cual presente una excelente y económica solución.
- La presencia de estos grandes desplazamientos introducen consideraciones especiales como son la de incorporar un piso adicional.
- Los grandes desplazamientos pueden afectar estructuras vecinas. Estos daños en estructuras vecinas pueden producir la caída de residuos que podrían introducirse en los espacios necesarios para que la edificación aislada pueda moverse; si esto ocurre, se pierde la capacidad de aislamiento.
- Entre las limitaciones debe considerarse el espacio circundante alrededor de la edificación que debe permitir el libre movimiento de la misma. Este espacio debe concebirse de manera tal que facilite el fácil acceso para la verificación del estado de los aisladores y su eventual sustitución, a la hora de presentar daño. La [Figura 3.13](#) muestra el caso de una edificación colocada sobre aisladores sísmicos y los espacios libres para permitir el movimiento propio del aislamiento, así como el acceso para la revisión de los aisladores.
- Los grandes desplazamientos adicionales introducen requerimientos especiales de flexibilidad de las juntas de las tuberías de los sistemas de servicio para la edificación, como son agua potable, aguas servidas, gas, electricidad, telecomunicaciones, etc, ya que estas tuberías cruzan el

plano de aislación. La **Figura 3.14** muestra instalaciones con dispositivos de flexibilidad.

- Consideraciones arquitectónicas deben también revisarse en el diseño de cada edificación; por ejemplo la presencia de escaleras y rampas de acceso a la edificación, los ascensores y escaleras mecánicas, entre otros dispositivos, deben ser concebidas de manera tal que se adapten a los movimientos en la zona de interface y a las distancias que quedan al dejarse los espacios alrededor de la edificación para permitir su movimiento. Las escaleras y rampas de acceso deben ser fijadas a la estructura y ser construidas de manera tal que puedan moverse.
- La presencia de aisladores impone un plan de mantenimiento para la estructura, que no es necesario para estructuras no aisladas. Este plan de mantenimiento debe incluir la verificación del estado de la zona que permite los desplazamientos alrededor de la estructura.



**Figura 3.12:** Edificación en Java, Indonesia, construida con el plano de aislamiento sobre el terreno. (Fuente: Kelly, J. 2013).



**Figura 3.13:** Espacio para el movimiento libre de los aisladores y acceso para revisión.<sup>25</sup>



**Figura 3.14:** Tuberías y dispositivos flexibles para permitir los movimientos propios de los edificios con aislamiento sísmico. (Fuente: Kelly, J. 2013).

---

<sup>25</sup> [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pole\\_3\\_building\\_seismic\\_base\\_isolator.jpg?uselang=es](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pole_3_building_seismic_base_isolator.jpg?uselang=es)



The background features a series of overlapping, semi-transparent circles in various shades of brown and tan, creating a layered, organic effect. A solid white horizontal banner is positioned at the bottom of the image, containing the title text.

# Métodos de análisis simplificado



## 4 Métodos de análisis simplificado

Este Capítulo tiene la finalidad de ilustrar desde el punto de vista analítico, el comportamiento de los aisladores sísmicos y su contribución a la ingeniería sísmica. El Capítulo presenta matemáticamente, y con explicaciones sencillas, basadas en la dinámica de estructuras, cómo la presencia de los aisladores modifica la configuración de los modelos, y cómo esta configuración supone ventajas en el desempeño de estructuras sometidas a sismos.

Este Capítulo está dirigido a personas que tienen un conocimiento básico de dinámica de estructuras; su revisión puede ser obviada por personas sin ese conocimiento, ya que el resto del contenido del libro puede ser leído sin menoscabo de su coherencia y comprensión.

A continuación se incluye el análisis de modelos de edificaciones de un grado de libertad (1 gdl), de base fija y con aisladores sísmicos; en uno de esos casos, el uso de los aisladores permite la reducción de la sollicitación sísmica, y en otro la incrementa.

Luego se incluye el análisis de dos modelos simplificados de edificios de cinco pisos, sin aisladores sísmicos y con aisladores sísmicos. Se presentan todas las etapas para realizar el análisis.

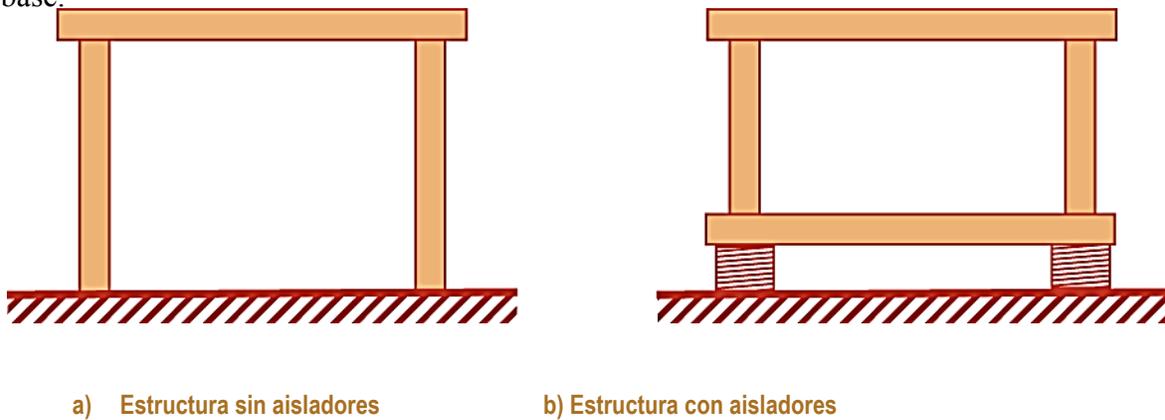
### 4.1 Sistemas de un grado de libertad. Flexibilización de la estructura

A continuación se presentan dos ejemplos simplificados de sistemas de un grado de libertad de un piso. Estos ejemplos representan edificaciones sencillas de un piso, y permiten ilustrar los principios básicos de los aisladores sísmicos.

Para una estructura que puede ser representada por un sistema de un grado de libertad (1 gdl) sin la presencia de aisladores sísmicos, se definen sus características mecánicas: se denomina rigidez lateral  $k$  a la capacidad que puede tener la estructura (principalmente las columnas) de generar un conjunto de fuerzas laterales para oponerse a un desplazamiento lateral inducido por el sismo. La masa de la estructura se representa como  $m$ . Asimismo, la capacidad de disipación de energía de la estructura es representada por una variable  $c$ , la cual es definida como amortiguamiento viscoso y se relaciona con la cantidad de energía disipada en función de la velocidad con la que se mueve la estructura. A la misma estructura pueden colocársele aisladores sísmicos. Como primer comentario se tiene que el comportamiento de un sistema con aislamiento sísmico implica incursiones en el rango

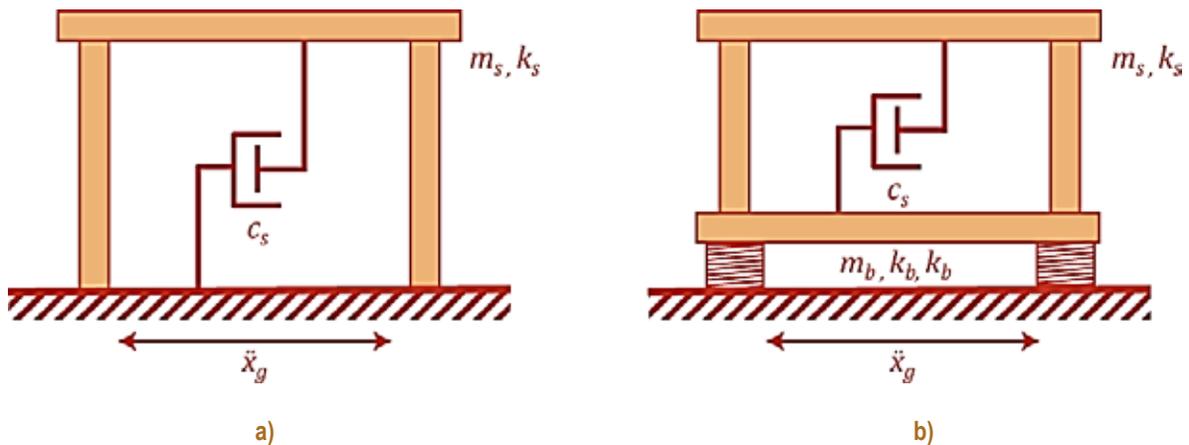
inelástico de los aisladores, sin embargo, en estos ejemplos, se aceptará la hipótesis de linealidad, la cual nos permite ilustrar los efectos principales asociados a la presencia de los aisladores en la estructura. Asimismo, para considerar el amortiguamiento correspondiente a una estructura aislada se utiliza un modelo simplificado; se acepta una solución aproximada, corrientemente utilizada en la dinámica de estructuras, es decir, la hipótesis del amortiguamiento clásico, la cual permite desacoplar el sistema para su solución.

La **Figura 4.1** a) muestra el modelo de una estructura de 1 gdl sin aisladores sísmicos, mientras que la **Figura 4.1** b) incluye la presencia de un aislador sísmico en la base.



**Figura 4.1:** a) Sistema sin aisladores, b) Con aisladores.

Los esquemas simplificados de los sistemas, incluyendo el movimiento sísmico en la base  $\ddot{x}_g(t)$  y los mecanismos de disipación de energía por amortiguamiento, se muestran en la **Figura 4.2**.



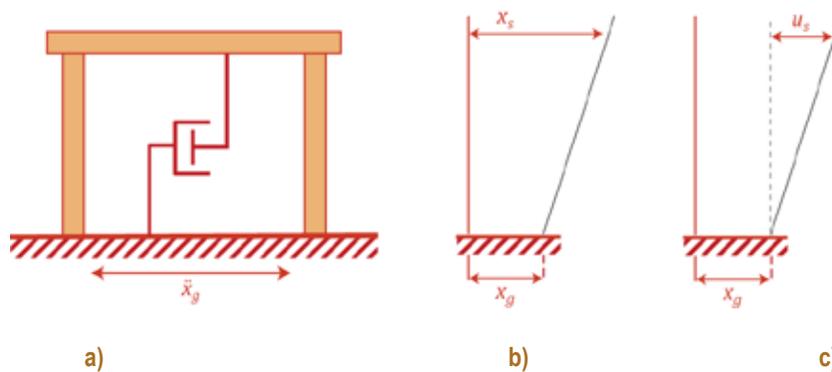
**Figura 4.2:** a) Sistema sin aisladores y mecanismo de disipación, b) Sistema con aisladores y mecanismo de disipación.

En la **Figura 4.2** se representan:

- $m_s, k_s$  y  $c_s$ : masa, rigidez lateral y coeficiente de amortiguamiento del sistema estructural
- $m_b, k_b$  y  $c_b$ : masa, rigidez lateral y coeficiente de amortiguamiento de la base, es decir, del aislador sísmico.
- $\ddot{x}_g$ : aceleración debida al sismo

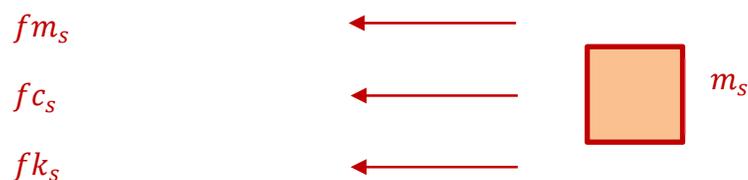
En la **Figura 4.3** se muestran la aceleración inducida por el sismo y las variables de desplazamiento del sistema sin amortiguadores. Para el análisis del sistema es necesario considerar el siguiente conjunto de variables de movimiento:

- $x_s(t), \dot{x}_s(t)$  y  $\ddot{x}_s(t)$ : desplazamiento, velocidad y aceleración absolutos del sistema; el subíndice s representa la estructura de base fija.
- $u_s(t), \dot{u}_s(t)$  y  $\ddot{u}_s(t)$ : desplazamiento, velocidad y aceleración del sistema relativos a la base.



**Figura 4.3:** Movimientos para la estructura sin aisladores: a) estructura, b) desplazamiento absoluto de la estructura y c) desplazamiento relativo a la base.

Para comenzar el análisis se plantea el diagrama de cuerpo libre para la estructura en movimiento, a nivel de la masa de la losa (**Figura 4.4**).



**Figura 4.4:** Diagrama de cuerpo libre.

La ecuación de equilibrio al producirse el sismo es (**Ecuación 4-1** y **Ecuación 4-2**):

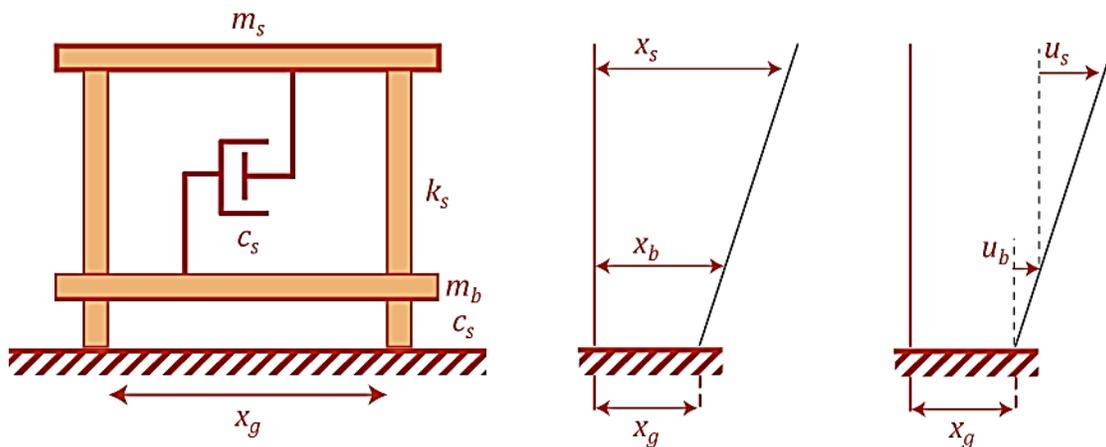
$$f m_s + f c_s + f k_s = 0 \quad (4-1)$$

$$m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_g) + k_s (x_s - x_g) = 0 \quad (4-2)$$

Al expresar la ecuación en términos de movimiento relativo, se llega a la (**Ecuación 4.3**):

$$m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s = -m \ddot{x}_g \quad (4-3)$$

Para el sistema con aisladores sísmicos, las características del sistema son  $m_s$ ,  $k_s$  y  $c_s$ ; las de la base amortiguada son  $m_b$ ,  $k_b$  y  $c_b$ . Las variables de movimiento del sistema son  $x_s(t)$ ,  $\dot{x}_s(t)$  y  $\ddot{x}_s(t)$ , y las de la base amortiguada son  $x_b(t)$ ,  $\dot{x}_b(t)$  y  $\ddot{x}_b(t)$ . Los movimientos del sistema expresados como movimientos relativos son  $u_s(t)$ ,  $\dot{u}_s(t)$  y  $\ddot{u}_s(t)$  y los de la base  $u_b(t)$ ,  $\dot{u}_b(t)$  y  $\ddot{u}_b(t)$  (ver **Figura 4.5**).



**Figura 4.5:** Sistema de 1 dgl sobre aisladores, desplazamientos absolutos y relativos respecto a la base.

El diagrama de cuerpo libre de las dos masas que componen el sistema con aisladores, es el mostrado en la **Figura 4.6**.

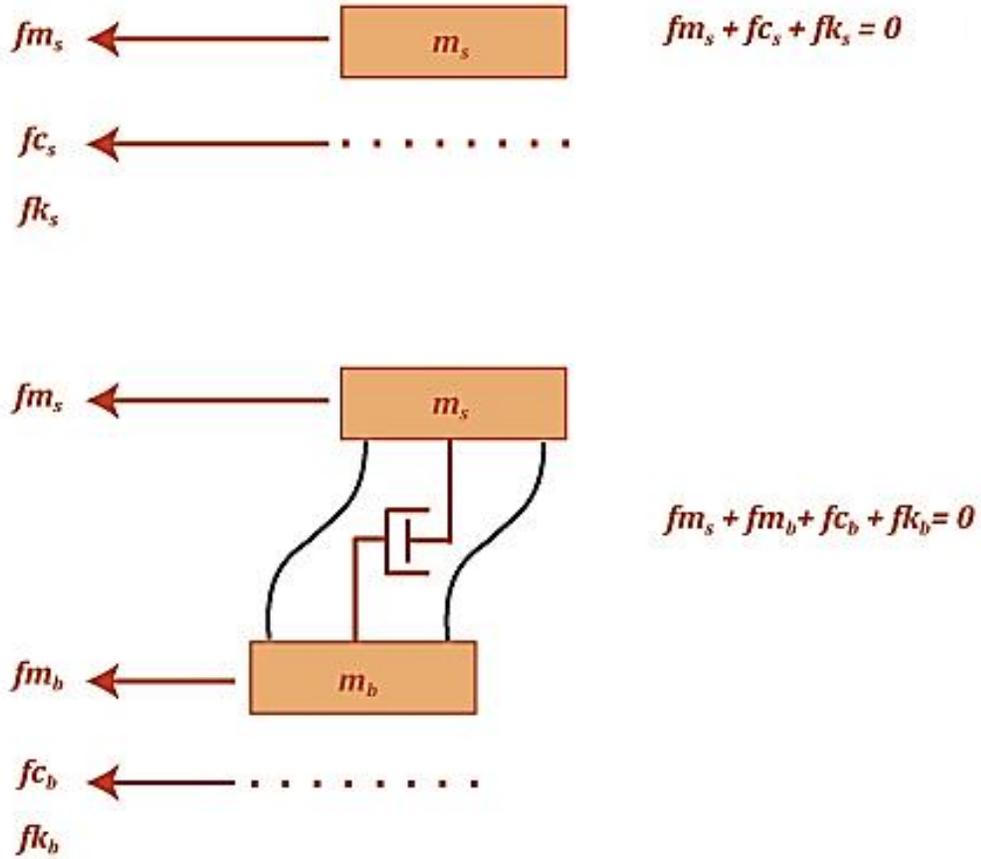


Figura 4.6: Diagramas de cuerpo libre de la estructura sobre aisladores sísmicos.

Las ecuaciones de equilibrio son (**Ecuación 4-4** y **Ecuación 4-5**):

$$m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) + k_s (x_s - x_b) = 0 \quad (4-4)$$

$$m_s \ddot{x}_s + m_b \ddot{x}_b + c_b (\dot{x}_b - \dot{x}_g) + k_b (x_b - x_g) = 0 \quad (4-5)$$

Al llevarlas a movimientos relativos son (**Ecuación 4-6** y **Ecuación 4-7**):

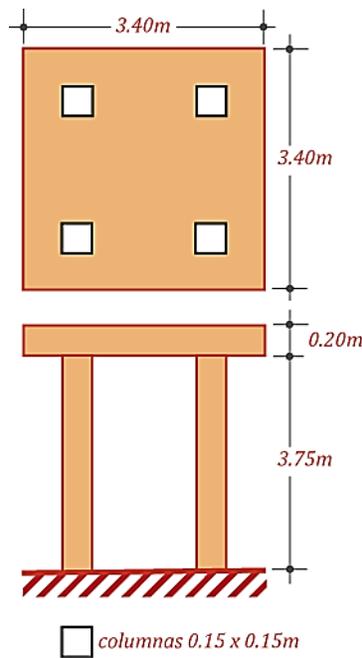
$$(m_s \ddot{u}_s + m_s \ddot{u}_b) + c_s (\dot{u}_s) + k_s (u_s) = -m_s \ddot{x}_g \quad (4-6)$$

$$(m_s \ddot{u}_s + m_s \ddot{u}_b + m_b \ddot{u}_b) + c_b (\dot{u}_b) + k_b (u_b) = -(m_s + m_b) \ddot{x}_g \quad (4-7)$$

Expresadas de manera matricial<sup>26</sup> (**Ecuación 4-8** y **Ecuación 4-9**):

$$\begin{bmatrix} m_s & m_s \\ m_s & m_b + m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & c_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ u_b \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_s & m_s \\ m_s & m_s + m_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (4-8)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{M}\mathbf{B}\ddot{x}_g \quad (4-9)$$



**Figura 4.7:** Características del sistema de un grado de libertad.

En la **Figura 4.7** se muestra un sistema de un grado de libertad cuyas características son las siguientes:

Módulo de elasticidad del concreto:	$E_c$	=	$3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
Momento de inercia de la sección:	$I_0$	=	$bh^3/12 = 4218.75 \text{ m}^4$
Peso de la losa	$W$	=	$(0.20\text{m}) \times (3.4\text{m}) \times (3.4\text{m}) \times (2300\text{kg/m}^3)$
		=	$5317.6 \text{ kg}$
Rigidez de piso	$k_s$	=	$134400 \text{ kg/m}$
Período de vibración (en segundos)	$T_s$	=	$2\pi\sqrt{P/(gk)} = 0.4\text{s}$

A continuación se coloca la estructura sobre aisladores. Para este ejemplo se asume que la masa del aislador  $m_b$  es igual a dos terceras partes de la masa de la estructura,  $m_s$ :

<sup>26</sup> En este Capítulo las matrices y vectores serán denotados con una letra mayúscula, en negrita y cursiva.

$$m_b = (2/3) m_s$$

La rigidez del aislador  $k_b$  se toma, para este ejemplo, como:

$$k_b = (1/15) k_s$$

Al asumir que la estructura es un cuerpo rígido apoyado sobre los amortiguadores, el período del sistema de aislamiento en la base será igual a 2 segundos:

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{m_s + m_b}{k_s/15}} = 2 \text{ s}$$

Al completar las matrices de masa y de rigidez para un sistema de dos grados de libertad, en el cual la parte superior es la estructura y la base es el sistema de aislamiento, se tiene (**Ecuación 4-10** y **Ecuación 4-11**):

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_s & m_s \\ m_s & m_b + m_s \end{bmatrix} = m_s \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_s/15 \end{bmatrix} = k_s \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/15 \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

Al aceptar la hipótesis de amortiguamiento según la cual se pueden desacoplar las ecuaciones, se tiene que las frecuencias de vibración pueden ser determinadas mediante la solución del problema de autovalores (**Ecuación 4-12**):

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\varphi} = \lambda\mathbf{M}\boldsymbol{\varphi} \quad (4-12)$$

donde  $\lambda$  es el autovalor y  $\boldsymbol{\varphi}$  es el autovector.

Esta ecuación puede también plantearse de manera matricial, de manera tal que se opere con todos (o un subconjunto) de los autovalores y de los autovectores (ec 4.13)

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\Phi} = \mathbf{M}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Lambda} \quad (4-13)$$

donde:  $\boldsymbol{\Lambda}$  es una matriz diagonal con los autovalores  
 $\boldsymbol{\Phi}$  es una matriz que contiene los autovectores, arreglados por columna

Las soluciones del determinante generan los autovalores:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 9.68 /s^2 \\ \lambda_2 &= 634.97 /s^2\end{aligned}$$

Estos autovalores conducen a valores de períodos de (en segundos):

$$\begin{aligned}T_1 &= 2.06s \\ T_2 &= 0.25s\end{aligned}$$

Al comparar el primer periodo de vibración del sistema de 2 gdl con el periodo del aislador, se puede comprobar que la diferencia es despreciable, no hay casi variación entre  $T_b= 2s$  y  $T_1 = 2.06s$ , con lo que se verifica que la presencia de la estructura no aporta mayor rigidez al sistema, y que ésta la aportan los aisladores. Asimismo puede observarse que el período de vibración de la estructura sin aislador  $T_s= 0.4s$ , al colocarse el aislador pasa a tener un valor de  $T_2= 0.25s$ .

De la solución del problema de autovalores, pueden obtenerse las formas modales o autovectores. Una de las expresiones que permite conseguir las formas modales para cada uno de los autovectores  $\boldsymbol{\varphi}$  de este ejemplo, es la **Ecuación 4-15**, donde:

$$\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_1, \varphi_2)^t \quad (4-14)$$

$\varphi_1$  y  $\varphi_2$  son las dos coordenadas del autovector  $\boldsymbol{\varphi}$ :

$$\varphi_2 = \varphi_1(k_s/\lambda m_s)(1 - \lambda m_s/k_s) \quad (4-15)$$

Los modos de vibración de este sistema son (**Figura 4.8**):

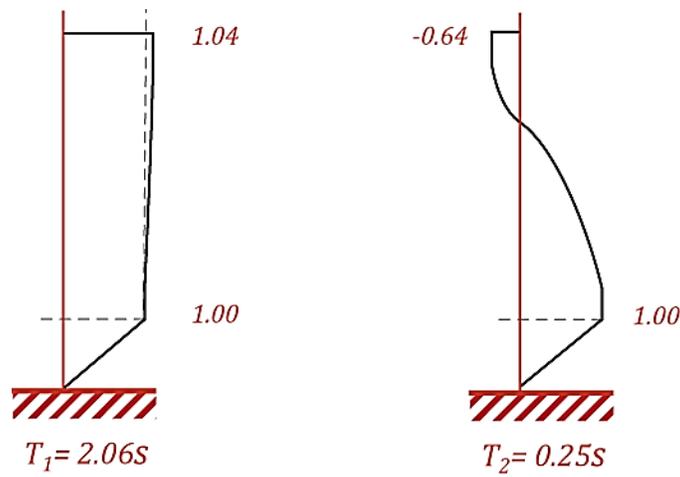


Figura 4.8: Modos de vibración del sistema de 1gdl sobre aisladores.

La presencia de los aisladores genera una disminución en las aceleraciones a las cuales está sometida la estructura. El período que determina mayormente las solicitaciones es para el sistema sin aislamiento,  $T_s = 0.4s$ , mientras que al incluir el aislamiento, las cargas son determinadas por  $T_1 = 2.06s$ . Las aceleraciones espectrales muestran una disminución significativa por efectos de la variación del período, pero luego, también son disminuidas por el incremento del amortiguamiento. En el espectro sísmico que muestra la **Figura 4.9**, puede apreciarse que para  $T_s = 0.4s$  se tiene una aceleración sísmica de  $A_s = 1.4g$  con  $\xi = 0.05$  la cual representa al sistema sin aislamiento. Al incorporar el aislamiento se pasa al espectro de  $\xi = 0.10$  y el período del sistema aislado es de  $T_1 = 2.06s$ , el cual conduce a una aceleración espectral del orden de  $0.5g$  (unas tres veces menor que la del sistema sin aislamiento).

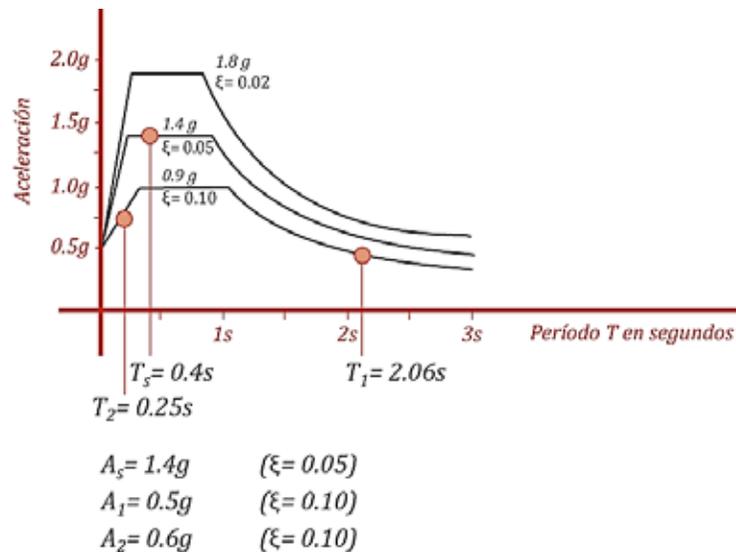


Figura 4.9: Espectro de aceleraciones.

Para determinar las fuerzas actuantes en el sistema, es necesario determinar la contribución de cada modo. La fuerza asociada a cada modo  $i$  viene dada por la expresión (**Ecuación 4-16**)

$$F_i = \mathbf{M}\boldsymbol{\varphi}_i\gamma_i A_i \quad (4-16)$$

Donde:  $F_i$  : contribución de la fuerza en el modo  $i$   
 $\mathbf{M}$  : matriz de masa del sistema  
 $\boldsymbol{\varphi}_i$  : modo  $i$   
 $\gamma_i$  : factor de participación del modo  $i$  (**Ecuación 4-17**)

$$\gamma_i = (\boldsymbol{\varphi}_i^t \mathbf{M} \mathbf{B}) / (\boldsymbol{\varphi}_i^t \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_i) \quad (4-17)$$

$\mathbf{B}$  : vector de distribución de cargas, en este caso (**Ecuación 4-18**)

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

$A_i$  : aceleración aplicada al modo  $i$

Al sustituir los valores de la matriz de masa se obtiene que para el modo  $i$   $\boldsymbol{\varphi}_i^t = [\varphi_1, \varphi_2]$

( $\varphi_1, \varphi_2$  : coordenadas del modo  $\boldsymbol{\varphi}_i$ ) el factor de participación  $\gamma_i$  es igual a (**Ecuación 4-19**):

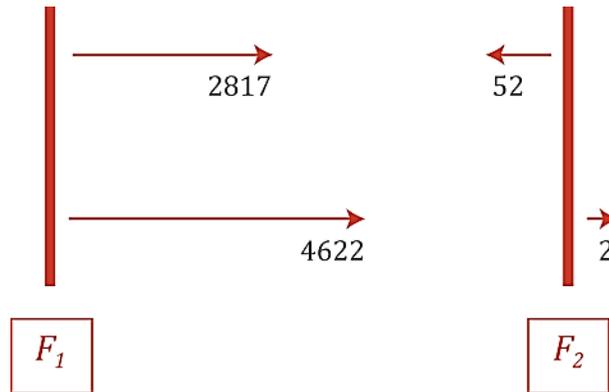
$$\gamma_i = \frac{m_s(\varphi_1 + \varphi_2) + \varphi_2 m_b}{m_s(\varphi_1^2 + 2\varphi_1\varphi_2 + \varphi_2^2) + m_b\varphi_2^2} \quad (4-19)$$

(para los modos en coordenadas relativas)

Los valores de estos factores son:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= 0.03965 \\ \gamma_2 &= -0.03965 \end{aligned}$$

Las fuerzas resultantes por modo en coordenadas relativas al movimiento de la base, se muestran en la **Figura 4.10**:



**Figura 4.10:** Fuerzas resultantes por modo en coordenadas relativas.

Puede observarse que el primer modo, que se aproxima al movimiento de cuerpo rígido del sistema, absorbe más del 98% de las fuerzas, las cuales son transmitidas directamente a los aisladores.

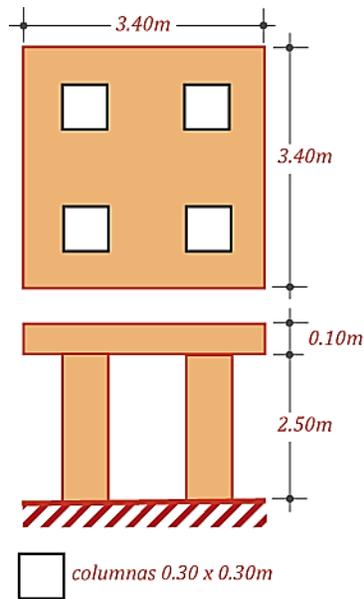
El valor aproximado de la fuerza cortante a la cual es sometida la estructura con el aislador es de  $V_s = 2817.5 \text{ kg}$

En el caso en que la estructura no esté colocada sobre aisladores, el valor de la aceleración es de  $0.6g$  y el de la fuerza cortante es de  $V_f = 7768 \text{ kg}$

Esta fuerza de corte es 2.76 veces superior a la de la estructura aislada.

## 4.2 Ejemplo de 1 gdl: caso desfavorable de uso de aisladores sísmicos

Un segundo ejemplo permite presentar un caso en el cual el uso de aisladores sísmicos no logra disminuir las fuerzas sísmicas que actúan sobre la estructura, por el contrario, las aumentan. Una situación como ésta se produce cuando la estructura es sumamente rígida, y al colocar el aislador, se incrementan las aceleraciones a las cuales es sometida la estructura. En este caso la estructura analizada tiene las dimensiones mostradas en la **Figura 4.11**.



**Figura 4.11:** Estructura rígida de 1gdl sin aisladores.

Las propiedades del sistema de la **Figura 4.11** son:

$$\begin{aligned} E_c &= 3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2 \\ I_0 &= bh^3/12 = 4218.75 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

El peso de la losa es

$$\begin{aligned} W &= (0.10\text{m}) \times (3.4\text{m}) \times (3.4\text{m}) \times (2300\text{kg/m}^3) \\ &= 2774.4 \text{ kg} \end{aligned}$$

La rigidez de la estructura

$$k_s = 7257600 \text{ kg/m}$$

Período de vibración de la estructura sin aisladores:

$$T_s = 0.04\text{s}$$

En esta ocasión también se introduce un aislador sísmico con amortiguamiento  $\xi=0.10$  y se asume que la masa del aislador  $m_b$  es:

$$m_b = m_s \cdot (2/3)$$

La rigidez del aislador  $k_b$  se toma, para este ejemplo, como:

$$k_b = k_s \cdot (1/15)$$

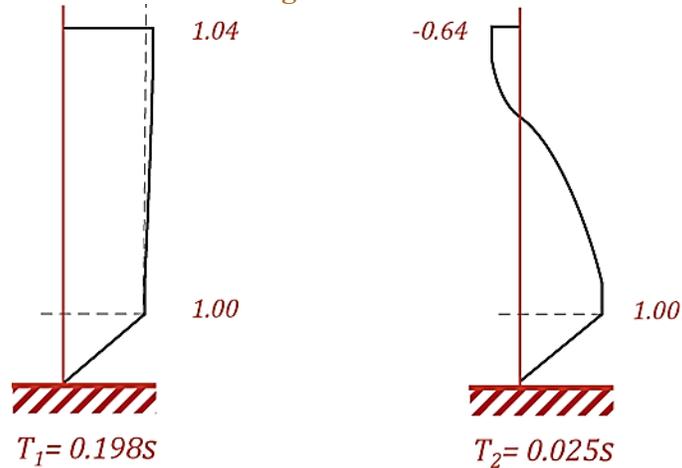
Los autovalores resultantes son:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 1002.05 / \text{s}^2 \\ \lambda_2 &= 65719.52 / \text{s}^2 \end{aligned}$$

Estos autovalores conducen a valores de períodos de:

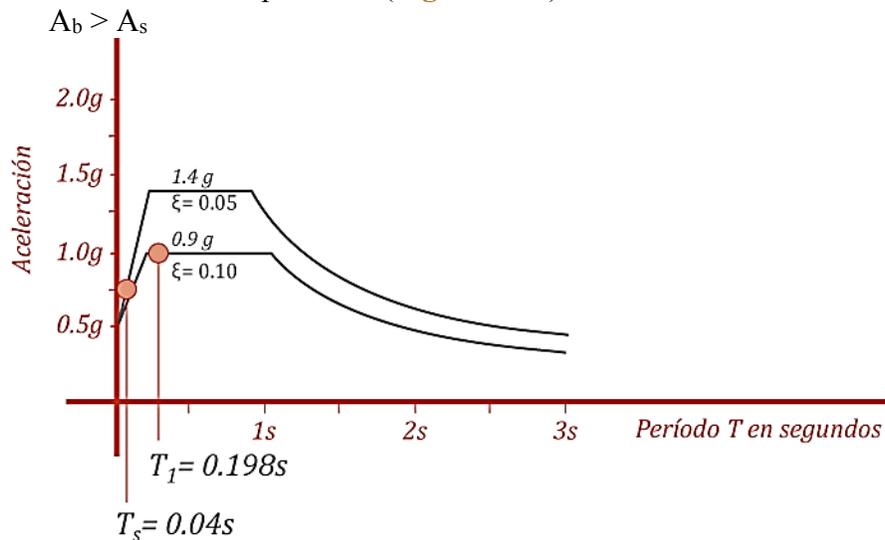
$$\begin{aligned} T_1 &= 0.198s \\ T_2 &= 0.025s \end{aligned}$$

Las formas modales se muestran en la **Figura 4.12**:



**Figura 4.12:** Formas modales estructura rígida de 1gdl sobre aisladores.

En este caso, por ser una estructura sumamente rígida, con período de vibración muy bajo, la inclusión del aislador genera una modificación del período de vibración que incrementa las aceleraciones espectrales (**Figura 4.13**).



**Figura 4.13:** Espectro de aceleraciones en el que se muestra que la estructura rígida incrementa las aceleraciones al colocarle aisladores.

La aceleración a la que es sometida la estructura sin aisladores (con un período de vibración de  $T_s = 0,04s$ ) es igual a  $0.6g$ . Al introducir los aisladores, el período se incrementa a  $0.2s$  y la aceleración espectral a la cual es sometida la estructura, se incrementa a  $0.9g$

$$A_s = 0.6g < A_b = 0.9g$$

En este caso, las fuerzas cortantes sin aisladores son

$$V_f = 1665 \text{ kg}$$

Mientras que con la presencia del aisladores la fuerza cortante pasa a ser

$$V_f = 2536 \text{ kg}$$

En esta oportunidad, el uso de aisladores es desventajoso desde el punto de vista de las cargas a la cual es sometida la estructura, sin embargo, aun este tipo de casos pueden ser analizados en detalle, por la conveniencia de tener las fuerzas concentradas en los aisladores.

### 4.3 Ejemplo de varios grados de libertad

En esta oportunidad se tomará como ejemplo un edificio de cinco pisos, cuyo comportamiento puede ser ilustrado con el siguiente modelo simplificado (**Figura 4.14**).

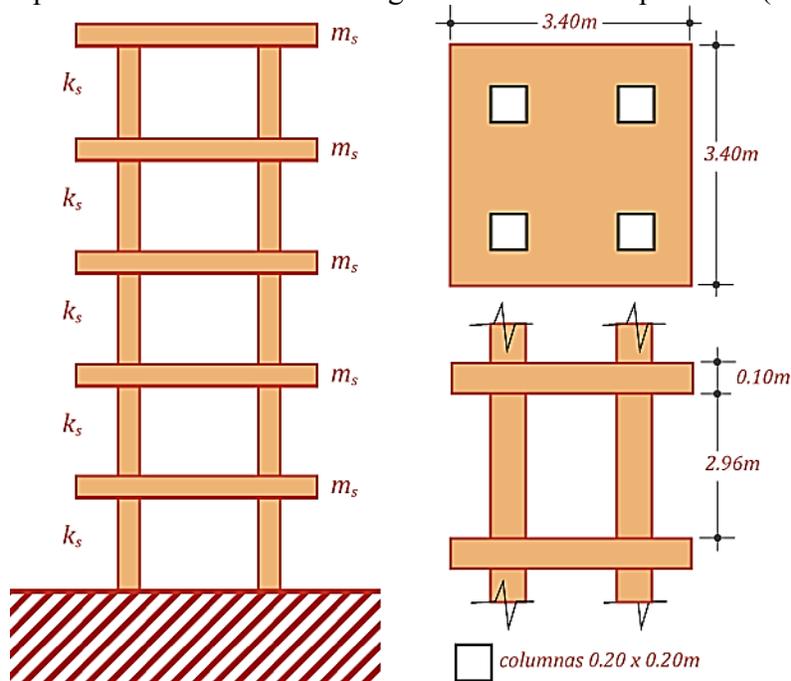
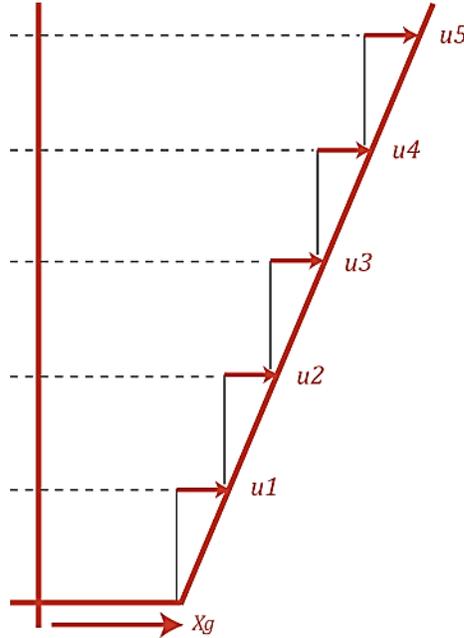


Figura 4.14: Estructura de 5 gdl sin aisladores.

Donde las masas de las losas son todas iguales a  $m_s$ , las rigideces de piso iguales a  $k_s$ , y los amortiguamientos de cada piso iguales a  $c_s$ . El modelo de desplazamientos relativos es el mostrado en la **Figura 4.15**.



**Figura 4.15:** Desplazamientos relativos de la estructura de 5gdl.

Este modelo conduce a las siguientes matrices de rigidez  $\mathbf{K}_s$  y de masa  $\mathbf{M}_s$

$$\mathbf{K}_s = k_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{M}_s = m_s \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{bmatrix}$$

A fin de conocer los periodos de vibración del sistema es necesario resolver el problema de autovalores :  $\mathbf{K}\boldsymbol{\varphi} = \lambda\mathbf{M}\boldsymbol{\varphi}$

Para la misma estructura colocada sobre aisladores sísmicos, el esquema simplificado se muestra en la **Figura 4.16**.

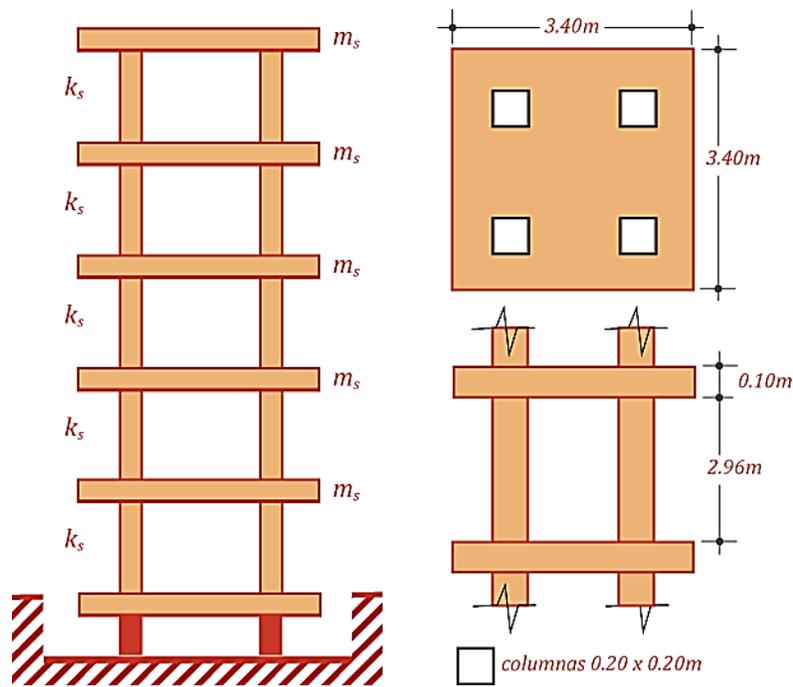


Figura 4.16: Estructura de 5 gdl sobre aisladores.

Donde  $k_b$  es la rigidez del aislador en la base y  $m_b$  es la masa de la losa colocada sobre el aislador. Para este ejemplo, las matrices de rigidez y de masa son;

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_b \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_s & m_s & m_s & m_s & m_s & m_s \\ m_s & 2m_s & 2m_s & 2m_s & 2m_s & 2m_s \\ m_s & 2m_s & 3m_s & 3m_s & 3m_s & 3m_s \\ m_s & 2m_s & 3m_s & 4m_s & 4m_s & 4m_s \\ m_s & 2m_s & 3m_s & 4m_s & 5m_s & 5m_s \\ m_s & 2m_s & 3m_s & 4m_s & 5m_s & 5m_s + m_b \end{bmatrix}$$

En este caso se ha tomado un valor de masa para el aislador, de  $m_b = m_s$  y  $k_b$  ha sido escogido de manera tal que para este ejemplo hipotético,  $T_b = 2.0s$ , para lo cual  $k_b = k_s/50$ .

Las soluciones de los dos problemas de autovalores de las dos estructuras, una sin aislamiento y la otra con aislamiento en la base, conducen a valores que se muestran en la tabla siguiente (**Tabla 4-1**). Los valores de amortiguamientos modales, en términos de % del amortiguamiento crítico de cada modo, que cumplen con la hipótesis que permite desacoplar el sistema, están incluidos también en la tabla.

**Tabla 4-1:** Valores de períodos y porcentajes de amortiguamiento crítico para las dos estructuras (los amortiguamientos han sido tomados de la Fuente: Chopra, 2001).

Estructura de base fija (sin aisladores)			Estructura aislada (con aisladores)		
Modo	T(s)	$\xi(\%)$	Modo	T(s)	$\xi(\%)$
1	0.400	2.00	1	1.987	9.58
2	0.137	5.84	2	0.217	5.64
3	0.087	9.20	3	0.114	7.87
4	0.068	11.80	4	0.080	10.3
5	0.059	13.50	5	0.066	12.3
-	-	-	6	0.059	13.6

Las formas modales del edificio con la base fija, en coordenadas absolutas son (**Tabla 4-2** y **Figura 4.17**):

**Tabla 4-2:** Autovectores en coordenadas absolutas Estructura sin aisladores sísmicos.

<b>Modo 1</b>	<b>Modo 1</b>	<b>Modo 3</b>	<b>Modo 4</b>	<b>Modo 5</b>
3.513	-1.204	0.764	-0.594	0.521
3.229	-0.373	-0.546	1.088	-1.397
2.682	0.715	-0.919	-0.310	1.831
1.919	1.310	0.285	-0.831	-1.682
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>
0.40	0.14	0.09	0.07	0.06
<b><math>\xi_1</math></b>	<b><math>\xi_2</math></b>	<b><math>\xi_3</math></b>	<b><math>\xi_4</math></b>	<b><math>\xi_5</math></b>
2	5.84	9.2	11.8	13.5

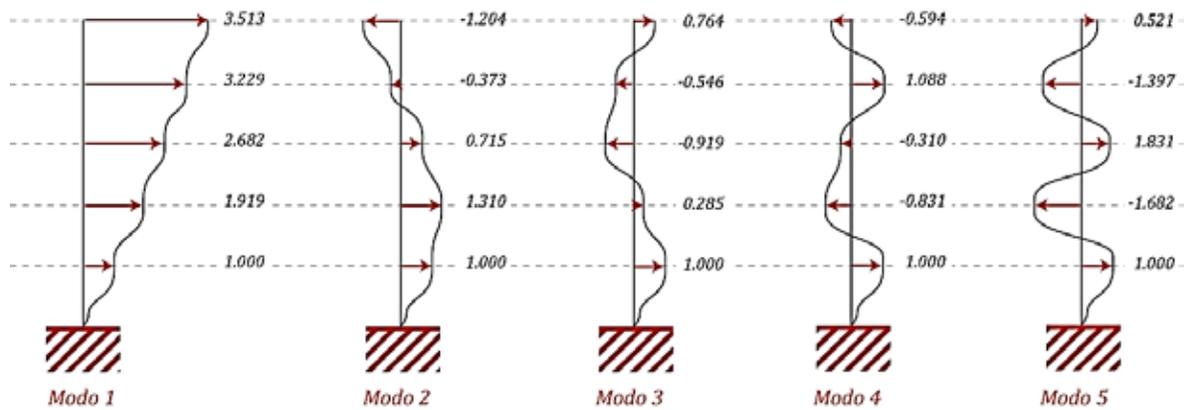


Figura 4.17: Formas modales de estructura de 5gdl, sin aisladores.

Las formas modales del edificio colocado sobre aisladores sísmicos, en coordenadas absolutas, son (Tabla 4-3 y Figura 4.18):

Tabla 4-3: Autovectores en coordenadas absolutas. Estructura con aisladores sísmicos.

Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
1.049	-0.991	0.990	-0.991	0.990	-0.991
1.046	-0.720	-0.005	0.994	-1.983	2.704
1.039	-0.251	-0.995	0.987	0.995	-3.697
1.029	0.286	-0.986	-0.997	0.986	3.699
1.016	0.745	0.014	-0.984	-1.983	-2.712
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

T1	T2	T3	T4	T5	T6
1.99	0.22	0.11	0.08	0.07	0.06

$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$\xi_4$	$\xi_5$	$\xi_6$
9.58	5.64	7.87	10.3	12.3	13.6

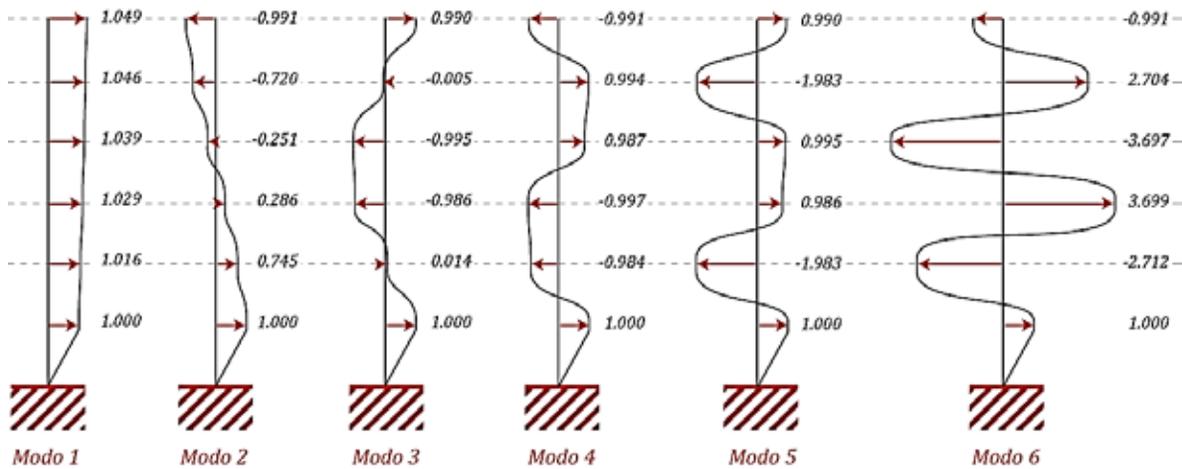


Figura 4.18: Formas modales estructura 5gdl con aisladores sísmicos.

Una vez conocidos los valores de períodos, amortiguamientos y formas modales, se procede a determinar las aceleraciones a las cuales están sometidas las estructuras. Para ello se construyen los pseudoespectros de aceleración y se determinan los valores de pseudoaceleración asociados a cada modo.

A continuación se presentan pseudoespectros para las dos estructuras (Figura 4.19 y Figura 4.20), adaptadas de Chopra (2001)

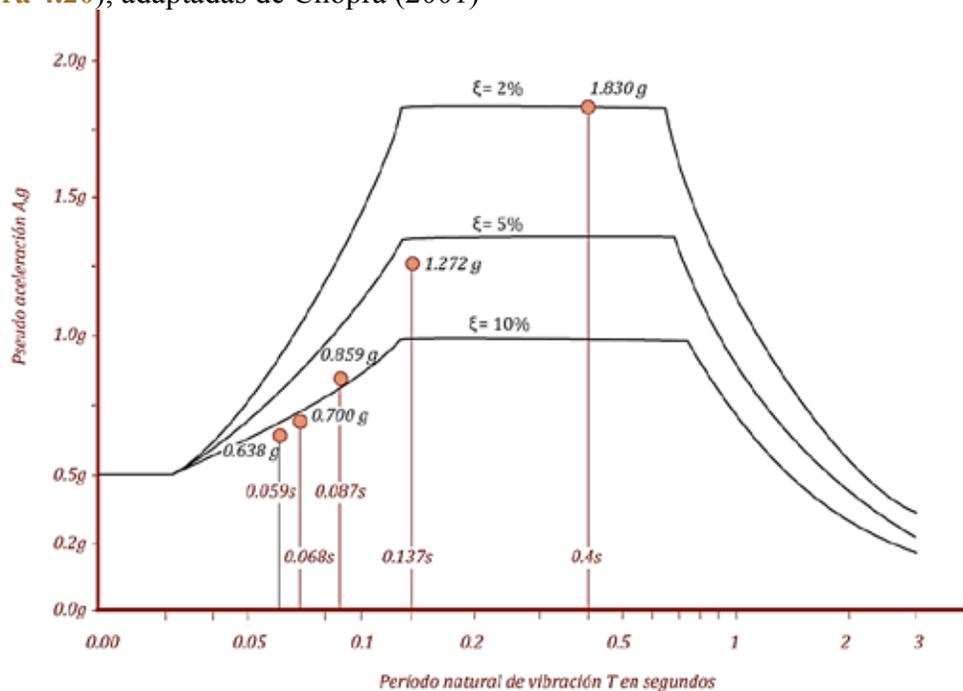
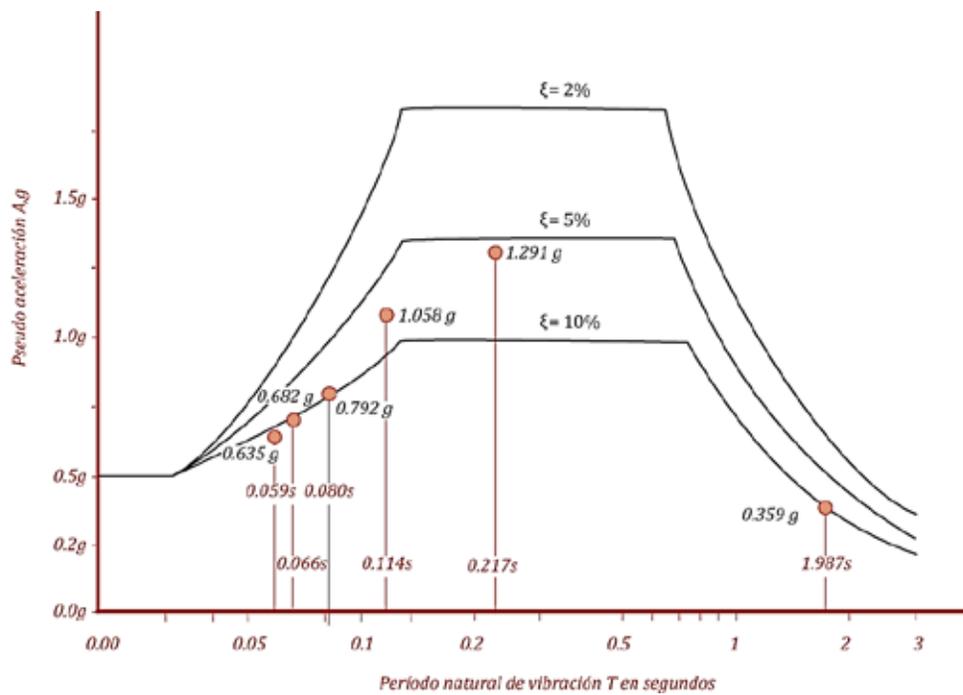


Figura 4.19: Pseudoespectro de aceleración y valores de pseudoaceleración modal, edificio de base fija. (Adaptado de: Chopra, 2001).



**Figura 4.20:** Pseudoespectro de aceleración y valores de pseudoaceleración modal, edificio sobre aisladores sísmicos. (Adaptado de: Chopra, 2001).

A partir de los valores de las pseudoaceleraciones modales, pueden determinarse los valores de corte en la base para cada modo y para las dos estructuras.

A continuación se presenta una tabla (**Tabla 4-4**) que contiene todos los valores de las pseudoaceleraciones asociadas a cada modo, para las dos estructuras. Las pseudoaceleraciones están expresadas en múltiplos de g. La tabla incluye también los valores resultantes de corte en la base de las estructuras, para cada modo. Los valores de corte modal en la base están expresados como valores divididos entre el peso de cada una de las estructuras y luego como valor final en toneladas. Las estructuras cuentan con 5 losas (sin incluir el aislador). El peso total es de:

$$W_{\text{tot}} = 5.m_s.g = 13.87 \text{ t}$$

El valor del corte actuante para la edificación sin aisladores es de 22.38 toneladas mientras que el de la estructura con aisladores es de 4.98 toneladas. El corte que genera la estructura con aisladores es 4.5 veces menor que el de la estructura de base fija.

Esto representa ventajas considerables para la estructura, tanto desde el punto de vista de la seguridad como el de costos y capacidad de recuperación post-terremoto.

**Tabla 4-4:** Pseudoaceleraciones y cortantes modales, estructuras de 5 gdl: sin aisladores y sobre aisladores.

Modo	Estructura de base fija (sin aisladores)		Estructura aislada (con aisladores)	
	PS <sub>A</sub>	V <sub>b</sub> /W	PS <sub>A</sub>	V <sub>b</sub> /W
1	1.830	1.610	0.359	0.3589
2	1.272	0.111	1.291	0.0003
3	0.859	0.021	1.058	0.0000
4	0.700	0.005	0.792	0.0000
5	0.638	0.001	0.682	0.0000
6	-	-	0.635	0.0000
<b>Resultante criterio SRSS</b>	1.614 (V <sub>b</sub> /W)		0.359 (V <sub>b</sub> /W)	
<b>Fuerza cortante en la base</b>	22.38 Ton		4.98 Ton	

Puede observarse que para la estructura sin aisladores, los dos primeros modos aportan al corte en la base, con valores de V<sub>b</sub>/W de 1.610 y 0.111; el tercer modo tiene un valor de 0.021 igual al 1.3% del valor del corte para el primer modo. Para la estructura con aisladores sísmicos, el valor de V<sub>b</sub>/W para el primer modo es de 0.3589 y para el segundo modo es de 0.0003, inferior al 0.1%, por lo cual, la estructura puede ser analizada como un sistema de 1gdl. Esto también queda ilustrado al observar los porcentajes de participación de masa; para la estructura sin aisladores, el primer modo tiene una participación del 87.95% de la masa total, mientras que para la estructura con aisladores sísmicos, el primer modo tiene una participación de la masa de 99.97%.

En vista de que los resultados muestran que la estructura con aisladores puede ser analizada como un sistema de 1 gdl, sus propiedades dinámicas pueden ser obtenidas por medio de un modelo simplificado; en este caso, la rigidez del sistema de 1 gdl lo representa la rigidez de los aisladores (k<sub>b</sub>) y la masa es la total de la estructura más la de los aisladores (M+m<sub>b</sub>). La frecuencia de vibración será:

$$w_b = \sqrt{k_b / (M + m_b)}$$

y el período de vibración:

$$T_b = 2\pi / w_b$$

En el caso de estudio:

$$w_b = \sqrt{\frac{16746.7 \text{ kg/m}}{(5 * (2774 \text{ kg}) + 2774.4) \text{ kg} / 9.81 \text{ m/s}^2}}$$

$$w_b = 3.1415 \text{ /s}$$

$$T_b = 2.000 \text{ s}$$

Estos valores se corresponden con los del sistema de varios grados de libertad.

Para el análisis y verificación experimental mediante ensayos de la capacidad de los aisladores, es necesaria la verificación del desplazamiento al cual es sometido el aislador. Una vez que es aceptado el modelado de la estructura con aislador, como cuerpo rígido, puede determinarse el desplazamiento en la base a partir de la ecuación espectral, mediante la expresión (**Ecuación 4-20**):

$$D(T_b, \xi_b) = \frac{A(T_b, \xi_b)}{\omega_b^2} \quad (4-20)$$

El resultado es	:	D (2.0 s, 9.58%)	=	0.359 .g/w <sub>b</sub> <sup>2</sup>
		D	=	3.59 * 9.81 cm/s <sup>2</sup> * 1/ (3.1415/s) <sup>2</sup>
		D	=	35.7cm

En el Anexo 1 se incluyen los pasos del análisis matemático requerido para la obtención de los resultados que aquí se han presentado, basados en la aplicación de la dinámica de estructuras.

#### 4.4 Comentario sobre los resultados obtenidos de los análisis de los modelos simplificados

Los modelos analizados demostraron que el uso de aisladores sísmicos permite lograr que el primer modo de vibración de la estructura sobre aisladores sea muy cercano al de un cuerpo rígido.

De esta manera se concentra la masa de la estructura en el modo fundamental, con lo que se reduce drásticamente la energía de excitación en los modos superiores

Esto trae como consecuencia que la estructura sufre pocas deformaciones internas, específicamente en lo correspondiente a los desplazamientos relativos entre pisos (deriva), lo cual permite hacer un análisis elástico en la estructura y concentrar las fuerzas cortantes en los aisladores.

Por otro lado, la presencia de los aisladores incrementa el período fundamental de la estructura. Para la mayoría de las estructuras, esto permite disminuir la aceleración correspondiente en el espectro de diseño.

Para el caso de una estructura sumamente rígida, como es el caso de la estructura de un grado de libertad presentada en 4.2, la incorporación de los aisladores sísmicos incrementó el período de vibración. Dado que el espectro de diseño tiene una rama ascendente para períodos cortos, el incremento en el período trajo consigo un aumento en las cargas sobre la estructura.

Con estos efectos, se generan desplazamientos importantes en los aisladores, los cuales deben ser considerados en el diseño.





**Normativas sobre el uso  
de aisladores sísmicos**



## 5 Normativas sobre el uso de aisladores sísmicos

A continuación se incluyen breves comentarios sobre normas que han sido desarrolladas para reglamentar el uso de los aisladores sísmicos y disipadores de energía. En la primera parte se menciona la evolución de las normas y reglamentos que se ha seguido en E.E.U.U. Se incluye también un comentario sobre los lineamientos normativos establecidos en el EUROCODE, y posteriormente se comenta sobre el contexto normativo de la región latinoamericana.

La finalidad de estos comentarios, es la de ilustrar el carácter innovador del uso de estos dispositivos, y poner a la disposición del lector, referencias de distintos instrumentos normativos y la situación actual en la región.

### 5.1 Uso general e implantación de normas en E.E.U.U.

La evolución del uso de los aisladores en edificios nuevos en Estados Unidos, es comentada en el Capítulo 9 del informe 274 de la Agencia Federal para la Atención de Emergencias (FEMA 1997); de ese documento se toman varios aspectos que se incluyen a continuación.

El primer documento que estableció criterios para el uso de aisladores sísmicos en Estados Unidos, es el *Tentative Seismic Isolation Design Requirements*, publicado en 1986 por la *Northern Section of the Structural Engineers Association of California* (SEAOC). Luego de varias versiones de este documento, la SEAOC publicó en 1990: *General Requirements for the Design and Construction of Seismic-Isolated Structures*, el cual era el apéndice 1L del SEAOC Blue Book de 1990. Este documento fue adoptado, con algunos cambios, por el *International Conference of Building Officials* en el *Uniform Building Code* de 1991. Estos lineamientos no eran obligatorios. Nuevas versiones de las recomendaciones sobre el uso de aisladores fueron publicadas de manera sucesiva en el Libro Azul del SEAOC, y destaca la versión de 1996. Paralelamente, el *Uniform Building Code* (UBC) también publicó recomendaciones sobre el uso de los aisladores sísmicos.

A partir de 1992, el *National Earthquake Hazard Reduction Program* (NEHRP) publicó recomendaciones para el uso de aisladores, en el documento *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings* (NEHRP 1998).

Para 1997, y luego de un esfuerzo de más de 2 años, por parte de ambas instituciones, se logró que las recomendaciones para el uso de aisladores sísmicos, emanadas tanto del UBC como de la NEHRP, fueran compatibilizadas, y a partir de ese momento se cuenta con

propuestas basadas en los mismos criterios técnicos. Por lo tanto, las recomendaciones del *International Building*, incluidas en la edición de 1997 de *Uniform Building Code* (UBC) son casi idénticas a las recomendaciones del *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations of New Buildings*, para el aislamiento sísmico de edificaciones. A partir de ese documento de 1997, la publicación del UBC fue sustituida por la del IBC de 2000 (*International Building Code*), con publicación en 2003.

En 1995, la *American Association of State Highways and Transportation Officials* (AASHTO) estableció un grupo que se dedicó a la preparación de requisitos y procedimientos para el diseño de puentes aislados sísmicamente. Este grupo estableció algunas recomendaciones distintas e innovadoras, ya que consideró efectos ambientales y características de los materiales que condicionan el desempeño de los aisladores; éstos incluyen efectos de temperatura, envejecimiento, contaminación, desgaste, frecuencia de carga, velocidad de aplicación de cargas y variaciones de la rigidez en función de los ciclos de carga y descarga. Estos elementos constituyen una innovación para el diseño de mecanismos de aislamiento sísmico y son de vital importancia para el diseño de puentes, dadas sus características de exposición al ambiente y de aplicación continua de cargas y descargas.

En 1997, la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) publicó dos documentos guía para la rehabilitación sísmica de edificios: *FEMA-273 NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings* y *FEMA-274 HEHRP: Commentary on the guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. El uso de aisladores sísmicos es una de las opciones que estos dos documentos establecen para la rehabilitación de edificios existentes. Los lineamientos establecidos por la FEMA son similares a los definidos en los documentos del UBC, pero incluyen la perspectiva de definición de objetivos de desempeño en la rehabilitación de la estructura: ocupación inmediata, preservación de vidas, prevención de colapso. En el año 2000, FEMA publicó el documento: *FEMA 356: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*.

Todos los códigos mencionados incluyen la revisión, por un tercer participante, de los diseños de los mecanismos de aislamiento.

En 1996, un comité de la *American Society of Civil Engineers* (ASCE) constituyó un comité encargado de producir una guía para establecer los procedimientos de ensayo de los sistemas de aislamiento sísmico, y para ello utilizó como referencia un documento desarrollado por el *National Institute of Standards and Technology* (NIST). La guía desarrollada incluyó: ensayos de propiedades básicas, ensayos de prototipos y control de calidad mediante ensayos, de elastómeros y de sistemas de aislamiento por deslizamiento.

Por último, se menciona que en la versión de 2015 del IBC se incluyen recomendaciones para el uso de aisladores sísmicos, y se asocia a una publicación explicativa: *Earthquake*

*Engineering, Theory and implementations with the 2015 International Building Code* (Armouti, 2015).

## 5.2 Normativa para el uso de aisladores en Europa: Eurocode

El Eurocode 8 incluye en la sección 10, de la parte I, los principios que orientan el uso de los aisladores sísmicos para edificios en Europa y los lineamientos para su análisis e implementación (Eurocode 8, 2004). La norma establece estándares unificados para todos los países que pertenecen a la Unión Europea, y es desarrollada en una comisión que incluye especialistas de varios países.

En primer lugar, la norma considera que el aislamiento puede lograrse mediante:

- Incremento del periodo fundamental de la estructura
- Modificando la forma del modo fundamental, convirtiéndolo en movimiento de cuerpo rígido para la estructura, lo cual impone la reducción de la participación de los modos superiores
- Incrementando el amortiguamiento
- Combinando estos efectos.

De esta manera:

- se reducen las fuerzas sísmicas,
- se incrementan los desplazamientos en los aisladores,
- Se limitan o eliminan las incursiones de la estructura en el rango inelástico, lo que simplifica el diseño.

En la norma se establecen distintos objetivos de desempeño:

- Preservación de vidas
- Control de daño estructural y no estructural y de los contenidos
- Estructuras de importancia para protección civil deben mantenerse operacionales

La norma describe los principales tipos de aisladores, así como los principios necesarios para su diseño. Incluye reglas para la adecuada localización de los aisladores. Luego establece los criterios de diseño para edificios. Incluye los métodos de análisis de edificios aislados sísmicamente, e incluye métodos simplificados.

Los requisitos fundamentales del diseño son similares a los de estructuras no aisladas: no-colapso y daño limitado, pero se introduce un factor de confiabilidad incrementada para los aisladores mediante un factor de magnificación de desplazamientos  $\gamma$  (con un valor recomendado de  $\gamma = 1,2$ )

Se incluyen disposiciones sobre la instalación de los dispositivos, de manera que se permita la inspección, el mantenimiento y el reemplazo de dispositivos, por lo que al acceso a los mismos debe ser previsto en el diseño.

Incluye recomendaciones en torno a la colocación de los aisladores a fin de disminuir efectos torsionales sobre los aisladores.

La norma presenta métodos simplificados de análisis, y recomendaciones para la reducción de los efectos torsionales, así como métodos todavía más simplificados para los casos de torsión mínima.

### **5.3 Uso y consideraciones en normas vigentes en la región latinoamericana**

A continuación se hace una revisión de los contenidos normativos para el uso de aisladores y disipadores en varios países de la región latinoamericana: Argentina, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Perú, República Dominicana y Venezuela.

El uso de aisladores y amortiguadores sísmicos en las estructuras es un tema de poco desarrollo normativo en la mayoría de los países de la región, con la excepción de Chile, país que dispone de una normativa específica para el uso de aisladores sísmicos: Norma NCh 2745). Aunque el uso de aisladores y disipadores se ido generalizando en la región, en particular para la construcción de puentes, sus aplicaciones en edificaciones y viviendas son menos generalizadas.

El uso más generalizado de aisladores y disipadores en la región, presenta un gran potencial de aplicación, para enfrentar el problema de la readecuación sísmica de estructuras existentes, el diseño de nuevas edificaciones más seguras frente a sismos y la reparación de estructuras dañadas.

Argentina:

La norma argentina para edificaciones sismorresistentes es: INPRES-CIRSOC 103. EN Argentina el uso de sistemas de protección sísmica, como aislamiento sísmico y la aplicación de disipadores de energía, es aún incipiente. El primer edificio con aisladores se construyó en Mendoza, en el año 2008 para una residencia de estudiantes universitarios (utilizando aisladores de resorte combinados con amortiguadores viscosos) y actualmente se construye otro destinado a un laboratorio que albergará microscopios electrónicos. En este último caso se usarán aisladores de goma. Los disipadores de energía se han utilizado a nivel de investigación en diversas universidades del país (UNSan Juan, UNCuyo, UTN), mediante la fabricación y ensayo de estructuras con disipadores por fluencia del acero (ADAS, TADAS y barras de pandeo restringido). Actualmente hay varios proyectos de

investigación en desarrollo, con lo cual se espera que el uso de los sistemas de protección sísmica se incremente en el futuro.

#### Chile:

En el año 2003 se publicó la norma Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica, que fue la primera de este tipo en la región sudamericana: NCh2745 Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica. Esta norma regula el diseño de estructuras aisladas y hace referencia extensa a la Norma NCh433 (norma de diseño de edificios). La demanda sísmica, los procedimientos de análisis y diseño de la norma de aislación no coinciden con lo establecido en la Norma NCh433. Sin embargo se establece que la estructura debe resistir al menos el cortante mínimo establecido en la NCh433 con el período de la estructura aislada. En el Capítulo siguiente de este texto (capítulo 6), se incluyen aspectos más detallados de las normas chilenas, específicamente en lo relativo al ensayo de aisladores.

#### Colombia:

El reglamento para edificaciones sismorresistentes es la Norma NSR-10. En ella, el tema de los dispositivos de reducción de respuesta sísmica está considerado, por lo que pueden ser empleados por los diseñadores. En Colombia hay algunos pocos casos de edificaciones que los tienen. La norma incluye dos secciones: A.3.8: Estructuras aisladas sísmicamente en su base y A.3.9: Uso de elementos disipadores de energía). En estas secciones se hace referencia a los siguientes documentos: (a) “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings — Provisions and Commentary”, 2003 Edition, Federal Emergency Management Agency, FEMA 450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Buildings Sciences, Washington, D.C., USA, 2004,(b) “Minimum Design Loads for Building and Other Structures”, ASCE/SEI 7-05, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 2006

#### Costa Rica:

Código sísmico de Costa Rica – 2010. Esta norma no contiene ninguna disposición sobre este tema, lo cual no significa que no sean permitidos. El profesional responsable deberá utilizar información técnica bien fundamentada que justifique sus decisiones.

#### Ecuador:

La normativa sísmica es la NEC-2011. En el Capítulo 2 de NEC 2011 se incluyen requisitos para el diseño de sistemas de aislamiento sísmico: Se recomienda el uso de recomendaciones tales como Building Seismic Safety Council, BSSC del 2004, NEHRP, y FEMA 450. Para el uso y diseño de sistemas de disipación pasiva de energía, se recomienda usar los requisitos mencionados para aislamiento sísmico. Hay al menos una experiencia en el uso de disipadores de energía para el Puente Napo en el Oriente ecuatoriano. El uso de los disipadores en ese puente se basó en el diseño e implementación

de un disipador tipo U de acero para tomar el cortante, entre el tablero y las pilas, y al desplazamiento del tablero respecto a las pilas.

Perú:

Reglamento Nacional de Edificaciones RNE – Título III Edificaciones, III.2 Estructuras, E.030 Diseño Sismorresistente. Sin Actualización desde el 2009. El uso de disipadores y aisladores no es mencionado en la norma. Sin embargo, en Perú se ha implementando el uso de aisladores en algunos edificios. Estos ejemplos se mencionan en el Capítulo 8 de este trabajo.

República Dominicana:

La normativa es el Reglamento para el Análisis y Diseño de Estructuras, R-001, Decreto N° 201-11-Forma parte del Reglamento General de Edificaciones, del cual el Análisis y Diseño Sísmico es el Título 1-B. Esta norma acepta el uso de dispositivos de reducción de respuesta sísmica, tanto de aisladores en la base, como de disipadores de energía. Este uso debe ser bien sustentado con detalles de análisis y diseño por parte del diseñador. La norma establece que, de usarse esos sistemas, la estructura debe ser capaz de resistir al menos el 75% de la carga sísmica sin la presencia de los dispositivos de reducción de respuesta, calculada a partir del uso del método estático equivalente.

Venezuela:

La norma vigente es la COVENIN 2001 Norma de Edificaciones Sismorresistentes. Esta norma introduce un artículo que permite utilizar dispositivos de control de la respuesta sísmica, aunque no se reglamenta su uso ni se dan más detalles. Se recomienda para ello la utilización de la metodología ICBO 1977 o FEMA 1997. En el Capítulo 8 se mencionan dos casos de uso de aisladores y disipadores. Actualmente, en 2016, está en discusión una actualización de la normativa sísmica.

The background features a solid brown color with several overlapping, semi-transparent circles of varying shades of brown. A thin white line curves across the scene from the left side towards the bottom right.

# Procedimientos de diseño



## 6 Procedimientos de diseño

Los aisladores sísmicos basan su funcionamiento en la capacidad que tienen de conferir flexibilidad a la estructura, en la dirección horizontal de acción de las fuerzas sísmicas. Al incorporar estas características de flexibilidad se consigue una significativa reducción de las fuerzas sísmicas en la estructura. Esto se produce gracias a que la presencia de los aisladores:

- Incrementa el período fundamental de la estructura y de esta manera se disminuye la aceleración correspondiente en el espectro de diseño.
- Se modifica el modo fundamental de vibración de forma tal que se convierte en un modo de traslación.
- Produce una significativa reducción de las contribuciones de los modos superiores ya que se concentra la masa de la estructura en el modo fundamental, con lo que se reduce drásticamente la energía de excitación en los modos superiores

Al lograrse los objetivos mencionados, se desarrolla un mecanismo de aislamiento que impone que la estructura pueda desplazarse de manera importante en su base. Esto trae consecuencias arquitectónicas y de instalaciones, aspectos tales como los requerimientos de flexibilidad de los empotramientos de las tuberías de agua, electricidad y otros servicios, discontinuidades y movimientos en escaleras y rampas de acceso, etc.

### 6.1 Diseño de estructuras con sistemas de control de respuesta sísmica

El diseño de estructuras con sistemas de aislamiento sísmico depende de muchos factores, los cuales incluyen el período de vibración fundamental de la estructura con base fija, el período resultante de la estructura aislada, las características dinámicas del suelo en el sitio, la forma del espectro de diseño, y las relaciones fuerza-deformación del dispositivo de aislación sísmica.

El objetivo fundamental del diseño es el de obtener una estructura aislada cuyo período fundamental de vibración sea significativamente mayor al período de la estructura sin aislamiento y también suficientemente mayor al período predominante del suelo. De esta manera, las aceleraciones espectrales en el período fundamental de la estructura aislada son significativamente menores a las de la estructura fija, y esto permite que la estructura pueda ser desacoplada del rango frecuencial de máxima energía de la acción sísmica. Esto genera

fuerzas menores en los elementos estructurales de las estructuras aisladas, comparados con los que se obtienen para estructuras fijas. Beneficios adicionales se obtienen de la disminución de la demanda espectral debidos a la presencia del elevado amortiguamiento que suministran los componentes de goma y los núcleos de plomo de los aisladores.

Los procedimientos de diseño son definidos en las normativas que se aplican en cada país. Si bien los conceptos de diseño son comunes, hay diferencias asociadas a la solicitación sísmica a la cual es sometida la estructura, y que es especificada en la normativa de cada país. Para las edificaciones usuales, en general se recomienda conocer el espectro local para un sismo con probabilidad de excedencia de 10% en 50 años (sismo de diseño) y un sismo mayor el cual se define como sismo máximo, el cual, dependiendo del código de diseño, tendrá una probabilidad de excedencia menor, por ejemplo, de 10% en 100 años o 2% en 50 años.

Para la verificación del diseño se recomienda que se realice el análisis con registros reales para condiciones de suelo similares a las condiciones del sitio y compatibles con los espectros de desplazamiento de la normativa de referencia. Debido a que la estructura aislada puede tener periodos de vibración de entre 2 y 6 segundos es necesario que los espectros de diseño cubran este rango.

De acuerdo a los criterios definidos en cada norma, las características de la estructura y los del sistema de aislamiento determinan si el diseño puede realizarse por métodos estáticos o dinámicos (modal o respuesta en el tiempo). En general, si el sistema se comporta esencialmente como de un grado de libertad en cada dirección y el suelo es relativamente firme el método estático es apropiado. Si existe flexibilidad en el suelo, las fundaciones o la estructura, el método modal es recomendable. En caso de no linealidad extrema del sistema de aislamiento o de la estructura la evaluación por análisis de respuesta en el tiempo es un requisito (Boroschek, 2012)

El diseño estático parte con la estimación de valores de desplazamiento de diseño (ver **Ecuación 6-1**).  $C_D$  es el desplazamiento base, el cual depende de la zona sísmica y del tipo de suelo, y se obtiene de los espectros de diseño y de las especificaciones para zonas y suelos definidas en las normas. Este desplazamiento base es modificado por el coeficiente de amortiguamiento  $B_D$

$$D_D = \frac{C_D}{B_D} \quad (6-1)$$

El valor de  $B_D$  varía dependiendo de la norma entre 1 y 3 (ver **Tabla 6-1**).

Luego, el desplazamiento es modificado para tomar en cuenta el efecto de torsión en planta.

$$D_{TD} = D_D \left[ 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (6-2)$$

donde  $D_{TD}$  es el desplazamiento total de diseño,  $e$  es la distancia entre el centro de rigidez y el centro de masas en planta,  $b$  y  $d$  son las dimensiones de la planta,  $y$  es la distancia del punto considerado al eje  $x$ .

**Tabla 6-1:** Factores de modificación de respuesta por amortiguamiento (UBC).

Amortiguamiento efectivo, $\beta_D$ o $\beta_M$ (porcentaje del valor crítico)	Factor $B_D$ y $B_M$
$\leq 2$	0,8
5	1,0
10	1,2
20	1,5
30	1,7
40	1,9
$\geq 50$	2,0

El diseño se realiza para este desplazamiento  $D_{TD}$ . La seguridad del sistema y las dimensiones de las separaciones y juntas flexibles, se verifican para la demanda establecida, de manera similar, por el sismo máximo considerado (Boroschek, 2012).

Para cualquier elemento del sistema de aislamiento se puede calcular el desplazamiento total máximo  $D_{TM}$  en mm, con la expresión 6.3, que incluye, tanto el desplazamiento traslacional en el centro de rigidez, como la componente de desplazamiento torsional en la dirección bajo consideración

$$D_{TM} = D_M \left[ 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (6-3)$$

La estructura se diseña para fuerzas cortantes que consideran la rigidez experimental máxima del sistema de aislamiento y el desplazamiento total de diseño. Para el diseño de

las fundaciones se recomienda utilizar valores de reducción iguales a 1.0 o 1.5; para la estructura el valor de reducción es menor que 2.

Es conveniente disponer de herramientas matemáticas que permitan el análisis de los comportamientos no lineales y dinámicos del sistema. En general, se requerirán algoritmos que permitan modelar adecuadamente la respuesta de la estructura frente a las acciones sísmicas o de viento y estudiar sus posibles mecanismos de falla.

Los modelos deben permitir considerar las características mecánicas y la respuesta de los dispositivos de control. Es importante conocer en detalle el funcionamiento de estos dispositivos y los límites de fuerzas, velocidades o desplazamientos con los que se activan o desactivan y de qué manera interactúan con la estructura.

También es importante modelar adecuadamente la rigidez de los dispositivos y cómo modifican las propiedades de la estructura primaria.

En la actualidad los programas de cálculo permiten realizar análisis de alta complejidad, combinando métodos de superposición modal con análisis incrementales en el tiempo y el estudio no lineal de zonas localizadas de la estructura. En efecto, muchas veces no es necesario efectuar un análisis paso a paso de la estructura completa en cada iteración, ya que el comportamiento no lineal usualmente se considera concentrado en los dispositivos de control. En cada paso, se analiza si las propiedades del dispositivo de control han cambiado o no. Este método se conoce como método rápido no lineal (FNA: *fast nonlinear analysis*).

Otros métodos que se utilizan corrientemente en el análisis de estructuras con sistemas de control son los basados en la historia de la capacidad de respuesta no lineal ante incrementos de carga o de desplazamiento laterales sucesivos sobre toda la estructura (método *pushover*). En cada incremento se realiza un análisis estático, se precisan las zonas de plastificación o falla y se modifican las propiedades de la estructura para el siguiente incremento de carga o desplazamiento.

La incorporación del comportamiento no lineal del aislador en el análisis estructural no deja de ser un proceso delicado, ya que la respuesta sísmica puede ser muy sensible a variaciones en las propiedades de los aisladores. Esto obliga a que, a pesar de las posibilidades definidas en los códigos normativos, que permiten el uso de métodos estáticos equivalentes y espectrales para el análisis, se hace necesario, en muchos casos prácticos, realizar análisis estructurales con historias en el tiempo.

El análisis de estructuras con aisladores sísmicos requiere de un proceso iterativo. A continuación se incluye la organización del proceso de análisis con los siguientes pasos:<sup>27</sup>

- El primer paso es la estimación de las características iniciales del sistema de aislamiento y de la estructura (predimensionamiento).
- Luego se procede a realizar el análisis mediante la aplicación de la carga máxima para el terremoto de diseño, para así determinar la respuesta de la estructura aislada, expresada en términos de desplazamientos máximos y de fuerzas de corte por piso, así como las sollicitaciones y desplazamientos en la base.
- Esta primera etapa de análisis puede desarrollarse utilizando el método estático equivalente considerado en las normativas sísmicas, y en los casos en que se apliquen normativas de aislamiento sísmico, éstas incluyen la mención a los métodos simplificados. Para el modelado del aislador, pueden ser utilizadas las propiedades mecánicas especificadas por el fabricante, las cuales generalmente corresponden a resultados obtenidos de ensayos realizados para proyectos previos.
- A continuación se procede a evaluar el desempeño de la estructura y de los aisladores, utilizando los resultados de desplazamientos y las fuerzas de corte por piso, obtenidos del análisis estático equivalente.
- Los objetivos de desempeño que se utilizan en este caso, deben haber sido previamente determinados con el dueño o el usuario de la edificación, ya que los mismos pueden corresponder a condiciones particulares, propias de la estructura o de los servicios que ésta presta.
- Luego de disponer de la información de la respuesta estructural, los costos y los niveles de desempeño obtenidos, se hacen los ajustes a los sistemas de aisladores y a la estructura, y se repite el proceso de análisis aproximado, para mejorar el desempeño.
- Una vez que se obtiene un desempeño adecuado a partir del análisis aproximado, se procede a realizar un análisis refinado de la respuesta estructural, con la finalidad de verificar el desempeño de la estructura y de los aisladores. En la mayoría de los casos, este

---

<sup>27</sup> El proceso que se presenta se basa en buena medida en la revisión de distintos procedimientos mencionados en varias referencias: Bisch et al (2012), Boroschek (2012), ICBO (1997), Eurocode 8 (2004), Lopez, C. et al. (2012), Papageorgiou, A. S. and Lin, B.-C. (1989).

análisis refinado incluye análisis paso a paso en el tiempo y modelado del comportamiento no lineal de los aisladores.

- La definición de los movimientos sísmicos para el análisis en el tiempo deben guardar compatibilidad con el espectro de diseño, para el “sismo básico de diseño” y para el “máximo terremoto considerado” (ICBO 1997).
- La colocación de los aisladores define un plano de aislamiento, el cual requiere de la construcción de un diafragma, necesario para la distribución de las cargas laterales de la estructura a los aisladores. El diafragma debe lograr que los desplazamientos verticales de los aisladores se mantengan en el mismo plano del diafragma.
- Es necesario verificar que no se produzcan fuerzas de tracción sobre los aisladores, lo cual puede requerir de la redistribución de cargas muertas sobre algunos de los aisladores, o puede requerir refuerzos en algunas zonas de los diafragmas. Esta situación de levantamiento de los aisladores debe ser verificada especialmente en los análisis en el tiempo de la estructura aislada.
- Es necesario tener en consideración que pequeñas variaciones en las características de los aisladores pueden generar cambios importantes en las respuestas de la estructura, por lo que el análisis debe incluir las propiedades estructurales de la forma más precisa posible. Estas propiedades son obtenidas de ensayos. Adicionalmente, debe realizarse el análisis tomando en cuenta las variaciones posibles de las propiedades de los aisladores. Las variaciones de las propiedades pueden deberse a elementos tales como cambios de temperatura, envejecimiento, contaminación, así como los procesos mismos de elaboración de los aisladores.

## 6.2 Procedimientos de ensayos de aisladores

El uso de aisladores sísmicos en estructuras hace que las fuerzas que transmite el sismo a toda la estructura, se concentren en los aisladores. Esto permite que la mayoría de los elementos estructurales no sean sometidos a grandes deformaciones ni a grandes fuerzas, pero, al mismo tiempo, concentra la casi totalidad del esfuerzo resistente en los aisladores. Esto trae ventajas en lo que corresponde al control de calidad de la estructura, ya que la misma no requerirá de detalles muy sofisticados en sus elementos estructurales, dado que éstos no incursionarán necesariamente en rangos no lineales. Pero por otro lado, la concentración del esfuerzo resistente en los aisladores exige que se realice un riguroso control de calidad. Esta situación permite concentrar esfuerzos de mayor nivel tecnológico

en el ensayo y control de los aisladores, lo cual puede asegurar un comportamiento estructural mucho más confiable, en comparación con estructuras no aisladas.

La realización de estos ensayos de control de calidad de aisladores, requiere de instalaciones de laboratorio sofisticadas, que deben ser certificadas y que no están fácilmente disponibles en muchos lugares del planeta. Las magnitudes de las cargas, las variaciones en el tiempo para simular adecuadamente terremotos y los controles de desplazamientos necesarios, imponen requisitos que la mayoría de las bombas hidráulicas y las servo-válvulas, no pueden cumplir (ver **Figura 6.1**). Por lo tanto, pocos laboratorios en la actualidad, pueden llevar a cabo actualmente estos ensayos. Pero esta limitación se irá superando en la medida en que se divulgue cada vez más el uso de los aisladores sísmicos en diversas partes del mundo, y se expanda su utilización en soluciones que sean accesibles a las mayorías (Jampole, 2014, Kelly, 2013).

Adicionalmente, los mismos procedimientos de ensayo pueden sufrir modificaciones que tienden a mejorar la calidad de los resultados, razón por la cual muchos de los datos que se usan de referencia pueden perder confiabilidad en la medida en que se cambian los procesos de ensayo.

Por otro lado, dado que el uso difundido de los aisladores sísmicos es de data relativamente reciente, todavía no se dispone de información suficiente sobre su desempeño ante la acción de terremotos severos. Los terremotos y casos reales son el más importante procedimiento de ensayo, ya que proporciona las experiencias más complejas y realistas sobre el uso de estos dispositivos y el desempeño de las estructuras aisladas. En el Capítulo 8 se comentarán algunas experiencias de estructuras aisladas que han sido sometidas a sismos.

Diversos requerimientos de ensayo son establecidos en las distintas normas, y, desafortunadamente, no hay claros consensos sobre estos procedimientos. El *National Institute for Standards and Technology* (NIST) estableció una guía que define 3 secciones y 5 categorías de ensayos. Estas guías no son específicas para un tipo particular de aislador o tipo de estructura, y pueden ser aplicadas a edificios, puentes, plantas nucleares y equipos. El objetivo de haber concebido estas normas con mucha amplitud, es el de minimizar el desarrollo de normas específicas para cada “subdisciplina”, lo cual complicaría el desarrollo futuro de sistemas y aplicaciones. Las secciones incluidas en la guía del NIST son (Taylor, et. al. 1995 y Shenton, 1994):

- Ensayos de propiedades básicas. Incluyen los ensayos de categoría I y II. Se prevé que estos ensayos se realicen antes de la instalación de un nuevo sistema de aislamiento, y posteriormente, para verificar la calidad del sistema instalado. Con estos ensayos se definen las características fundamentales del sistema: efectos del confinamiento, de la frecuencia de las cargas, de cargas verticales, de la dirección de aplicación de la carga.

- Ensayos de prototipos. Incluye ensayos de categoría III y IV. Estos ensayos son propios para cada proyecto y tienen el sentido de verificar las propiedades del sistema de aislamiento antes de proceder a la manufactura de todos los aisladores de un proyecto. Los ensayos se realizan en dos especímenes de cada tipo de aislador previsto en el proyecto. La categoría III establece los ensayos ante cargas sísmicas, y la categoría IV los correspondientes a cargas no-sísmicas.
- Ensayos de control de calidad. Incluyen ensayos de categoría V. Son ensayos específicos para cada proyecto y se realizan para verificar la calidad durante la fabricación, tanto de los materiales como de los componentes, y unidades completas, y las propiedades del sistema de aislamiento antes de realizar su instalación en la estructura. Se especifican procesos distintos para los aisladores elastoméricos y los de deslizamiento.<sup>28</sup>

En Shenton, H. 1994 se presenta el tipo de ensayos especificados en los lineamientos del NIST: “Los ensayos más importantes de la serie de los prototipos son los que determinan la rigidez efectiva y la disipación de energía. El test básico requiere tres ciclos completos de carga y descarga a  $\pm 0.25D$ ,  $\pm 0.50D$ ,  $\pm 0.75D$  y  $\pm 1.0D$ , en condiciones de temperatura de diseño y bajo las cargas verticales de diseño, teniendo en cuenta que D es el desplazamiento lateral de diseño. Los sistemas que dependan de la temperatura, cargas verticales, frecuencia de la carga, o carga lateral, deben cumplir con otra serie adicional de ensayos”

En Marzo de 2011 fue publicada la norma europea EN: 15129 para ensayo de dispositivos antisísmicos. En Agosto de 2011 recibió el status de “norma armonizada” lo cual le confiere carácter legal obligatorio para todos los países de la Unión Europea. La norma cubre todas las etapas del ciclo de vida de los dispositivos antisísmicos: diseño, fabricación, ensayos, instalación y mantenimiento (Ferroni et.al. 2012).<sup>29</sup>

La norma chilena de 2003, NCh2745-2003, define los ensayos que deben ser realizados para permitir el uso de aisladores sísmicos:

“Las secuencias siguientes de ensayos se deben realizar para el número de ciclos que se indican y bajo una carga vertical igual al promedio  $D + 0.5L$  en todos los aisladores de un mismo tipo y tamaño.”

---

<sup>28</sup> La referencia Taylor, A. et. al. (1995) presenta una detallada lista de los ensayos que forman parte de cada categoría. <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build96/PDF/b96029.pdf>

<sup>29</sup> La referencia Ferroni et. al. (2012) presenta la lista de tareas que deben ser desarrolladas por el fabricante, las responsabilidades de las instituciones certificadoras, los tipos de ensayos que deben ser desarrollados, las características de los dispositivos a ser evaluadas. [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_1609.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1609.pdf)

1. Veinte ciclos completos con inversión de carga para una fuerza lateral correspondiente a la fuerza lateral de diseño para viento.
2. Tres ciclos completos con inversión de carga en cada uno de los desplazamientos siguientes:  $0,2D_D$ ,  $0,5 D_D$  y  $1,0 D_D$ ,  $1,0 D_M$ .
3. Tres ciclos completos con inversión de carga al desplazamiento máximo total  $1,0 D_{TM}$
4. No menos de diez ciclos completos con inversión de carga a  $1,0$  vez el desplazamiento total de diseño  $1,0 D_{TD}$

Si el aislador forma parte del sistema de transmisión de cargas verticales de la estructura, el ítem 2 de la secuencia de ensayos cíclicos especificado anteriormente se debe realizar para dos casos adicionales de carga vertical:

1.  $1,2 D + 0,5 L + |E|$
2.  $0,8 D - |E|$

En que los valores de  $D$  y  $L$  a considerar se definen en NCh433. La carga de ensayo vertical en un aislador debe incluir el incremento de carga axial debido al momento volcante inducido por el sismo  $E$  y debe ser mayor o igual a la fuerza vertical máxima correspondiente al desplazamiento de ensayo que se está evaluando. En estos ensayos las cargas verticales combinadas se deben considerar como la fuerza de compresión más representativa en todos los aisladores de un mismo tipo y tamaño.

### 6.2.1 Cargas verticales máximas y mínimas

Los aisladores que forman parte del sistema de transmisión de cargas verticales se deben ensayar estáticamente para la carga vertical máxima y mínima y para el desplazamiento máximo total. En estos ensayos la carga vertical combinada  $1.2D+1.0L+|E|_{max}$  se debe considerar como la carga vertical máxima y la carga vertical combinada  $0.8D + |E|_{min}$  como la mínima fuerza vertical en cualquier aislador de un mismo tipo y tamaño. La carga vertical de un aislador individual debe incluir los incrementos de carga debido al volcante sísmico,  $|E|_{max}$  y  $|E|_{min}$ , y se debe basar en la respuesta máxima debida al sismo máximo posible.”(citado de: NCh2745-2003)

En resumen los ensayos consisten en los siguientes:

1. Carga vertical de  $1.2D+1.0L+|E|_{max}$  y  $0.8D + |E|_{min}$
2. Para cargas verticales de  $D + 0.5 L$ :
  - 20 ciclos de la carga de viento.
  - Tres ciclos de:  $0.2D_D$ ,  $0.5 D_D$ ,  $1.0D_D$ ,  $1.0D_M$ ,  $1.0D_{TM}$ .
  - 10 ciclos a  $D_{TD}$

3. Para los aisladores que constituyen parte del sistema resistente a cargas verticales, los ensayos anteriores se repiten aplicando una carga vertical de  $1.2 D + 1.0L + |E|_{\max}$  y  $0.8D + |E|_{\min}$  y el desplazamiento total máximo.

donde:

- D: Carga muerta
- L: Carga viva
- $|E|_{\max}$ : Carga sísmica máxima
- $|E|_{\min}$ : Carga sísmica mínima
- $D_D$ : Es el desplazamiento de diseño, en milímetros (mm), en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración (**Ecuación 6-1**)
- $D_M$ : desplazamiento máximo, en milímetros (mm), en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración
- $D_{TM}$ : desplazamiento total máximo, en milímetros (mm), de un elemento del sistema de aislación incluyendo tanto el desplazamiento traslacional en el centro de rigidez,  $D_M$ , como la componente de desplazamiento torsional en la dirección bajo consideración (**Ecuación 6-3**)
- $D_{TD}$ : desplazamiento total de diseño, en milímetros (mm), de un elemento del sistema de aislación incluyendo tanto el desplazamiento traslacional en el centro de rigidez,  $D_D$ , como la componente de desplazamiento torsional en la dirección bajo consideración (**Ecuación 6-2**)



**Figura 6.1:** Ensayo de aislador sísmico. (Fuente: Courtesy of Caltrans and NEES / Date=February 25, 2009).<sup>30</sup>

<sup>30</sup> <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LRBtest.jpg>



# Sistemas pasivos de control basados en disipación de energía



## 7 Sistemas pasivos de control basados en disipación de energía

Los sistemas pasivos de control con disipación de energía pueden ser de varios tipos: histeréticos metálicos, viscoelásticos, de fluidos, de fricción, de masas sintonizadas. Por lo general, se instalan en puntos o elementos seleccionados en la estructura o pueden también colocarse como complemento del sistema de aislamiento sísmico en la base.

En este Capítulo se revisan algunos de los más utilizados. Previamente se discuten algunas nociones de dinámica estructural necesarias para entender el funcionamiento de estos dispositivos.

### 7.1 Cómo funcionan: Efectos del amortiguamiento viscoso en la respuesta sísmica

El concepto de amortiguamiento es bien conocido. Si a una estructura se le aplica una fuerza de impacto (por ejemplo, un golpe brusco) o un desplazamiento inicial (la estructura es halada por un cable en el techo, por ejemplo, y luego se suelta), usualmente comenzará a vibrar con un movimiento oscilatorio que va disminuyendo de amplitud hasta llegar a una nueva posición de reposo o equilibrio. El amortiguamiento es ese efecto que produce que la vibración de la estructura vaya disminuyendo hasta alcanzar nuevamente el reposo.

El efecto de amortiguamiento se traduce en que la estructura disipa energía en sus ciclos oscilatorios. Si el amortiguamiento es muy alto, hay un punto de quiebre (en el valor del amortiguamiento crítico, que es un valor límite) a partir del cual la estructura no oscila después de ser sometida a una excitación inicial (para amortiguamientos iguales o mayores al crítico, la respuesta de la estructura se amortigua y atenúa sin oscilar).

Las edificaciones comunes tienen coeficientes de amortiguamiento inferiores al crítico, razón por la cual, después de un sismo, oscilan y la amplitud de sus ciclos de movimiento disminuye progresivamente hasta detenerse. La medición de la tasa de disminución de la magnitud de la oscilación, conduce a la cuantificación del amortiguamiento de la estructura, normalmente expresado como un porcentaje del amortiguamiento crítico.

La presencia del amortiguamiento en estructuras convencionales ha sido comúnmente aceptada en la práctica ingenieril. El amortiguamiento intrínseco de estas estructuras se modela usualmente, para fines de análisis ingenieril, con amortiguadores viscosos. Se acepta la existencia de un amortiguamiento viscoso equivalente en un rango del 2% al 5% del crítico, para los casos comunes de análisis de la respuesta elástica de edificios típicos.

Los principales factores a los cuales se asocia este amortiguamiento son: la fricción en las juntas, microfisuras en el concreto y en la mampostería, y vibraciones radiadas hacia el suelo. Cuando la amplitud de las oscilaciones es alta y ciertos elementos estructurales (de acero o concreto armado, por ejemplo) comienzan a comportarse inelásticamente, los valores de amortiguamiento son mayores y pueden superar el 10%. En estos casos las estructuras no recuperan su posición original cuando se detiene el movimiento y quedan deformaciones remanentes.

En la mayoría de los códigos y normas técnicas de diseño sísmico de edificaciones, se contemplan espectros de diseño que consideran un 5% de amortiguamiento viscoso equivalente en el sistema estructural. Ese es el parámetro de amortiguamiento más comúnmente utilizado en las normas sísmicas y en análisis estructural.

En la **Figura 7.1** (Hanson R.D, 1993), se observa el comportamiento de cuatro sistemas similares (igual masa y rigidez), de un grado de libertad dinámico, sometidos a un desplazamiento inicial, con distintos niveles de amortiguamiento. Como se observa, cuando el amortiguamiento es menor que el crítico, la respuesta del sistema va disminuyendo progresivamente y oscila hasta la posición de reposo final. La respuesta decae más rápidamente cuando el amortiguamiento aumenta.

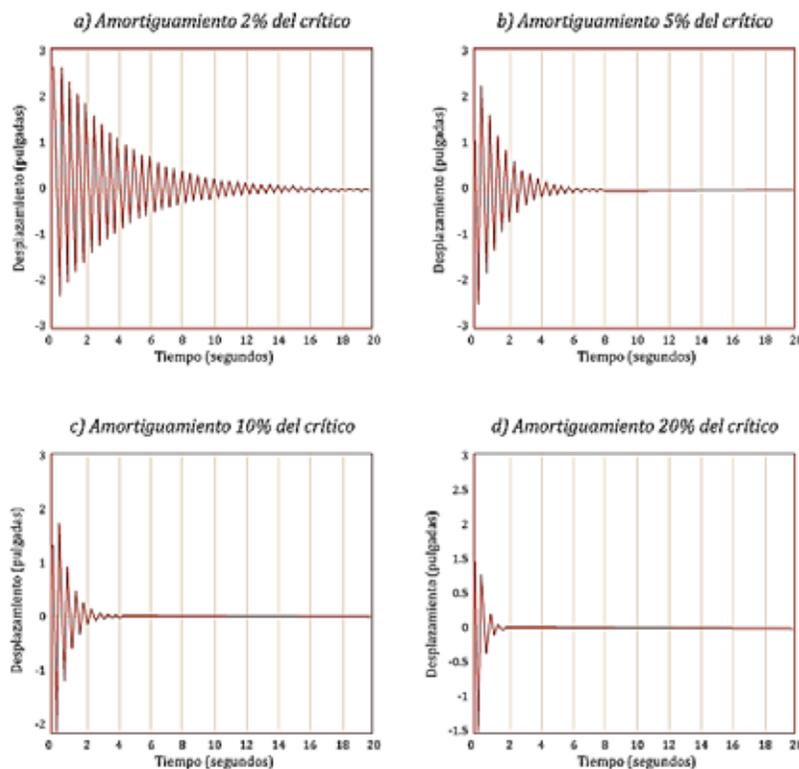
El efecto de incrementar el amortiguamiento varía en función de varios factores. Se ha observado, por ejemplo, en la respuesta estable de sistemas de un grado de libertad a excitaciones sinusoidales, que incrementar el amortiguamiento tiene efectos significativos en la respuesta, solamente cuando la frecuencia de excitación se acerca a la frecuencia natural del sistema (en una banda de más o menos 20%). Es decir, si las frecuencias del sistema no son cercanas a la frecuencia de la excitación, un amortiguamiento viscoso añadido, no tendrá un impacto significativo sobre la respuesta del sistema.

En numerosos códigos de diseño vigentes, se ha venido introduciendo la práctica de utilizar espectros de desplazamientos, los cuales permiten estimar las máximas respuestas de los edificios en términos de desplazamiento para diferentes sismos de diseño. Con la popularización del uso de dispositivos adicionales de disipación de energía como medida de protección sísmica, se han desarrollado expresiones para estimar la disminución de los desplazamientos espectrales para sistemas elásticos cuando se incrementa el amortiguamiento viscoso (cf. Ashour, 1987, citado en Hanson R.d., 1993, pp323). Con ellas se pueden proponer coeficientes de reducción de los desplazamientos espectrales, con fines de diseño.

Todavía numerosos códigos de diseño sismorresistente recomiendan el uso de factores de reducción espectrales para tomar en cuenta la capacidad de respuesta inelástica de las estructuras. Normalmente esto conduce a factores que permiten reducir las fuerzas de diseño; dichos factores de reducción se establecen en función de la ductilidad de los

materiales utilizados, del nivel de detallado del refuerzo, de la tipología estructural y de otras variables (Lafuente et al., 2014)

El uso de dispositivos de disipación de energía añadidos a la estructura primaria, obliga a considerar factores adicionales de reducción de fuerza sísmica en los procedimientos de diseño, necesarios para considerar los efectos del incremento de amortiguamiento que introducen los dispositivos. Se han realizado estudios que demuestran que los procedimientos normativos de diseño sísmico tradicionales, que consideran reducciones espectrales debidas a deformaciones inelásticas pueden seguir utilizándose y que, además, se pueden introducir, de manera independiente factores adicionales de reducción de respuesta que tomen en cuenta la acción de los dispositivos añadidos para lograr mayor disipación de energía. El estudio de Wu (1987, citado en Hanson R.D., 1993), muestra que, en escalas de cambios de amortiguamiento del 10% al 50%, las modificaciones espectrales para alto amortiguamiento y para respuestas inelásticas, pueden considerarse de manera independiente. También los trabajos de Newmark and Hall (1982, citado en la misma referencia), llegan a conclusiones similares.



**Figura 7.1:** Oscilación de sistemas de 1GDL con amortiguamiento viscoso inferior al crítico.  $T_n=0.5$  segundos y desplazamiento inicial de 3 pulgadas. (Fuente: Hanson, Robert, D., 1993, Figure 1, pag. 321).

## 7.2 Definición de Sistema Viscoso Equivalente

En esta sección, se comenta brevemente la manera en que se cuantifica el amortiguamiento en una estructura sometida a excitaciones dinámicas. Usualmente se trata de encontrar un amortiguador viscoso equivalente que represente la acción de amortiguamiento observado en la respuesta de la estructura frente al sismo. Asimismo, para los dispositivos que se añaden a fin de aumentar la disipación de energía, se trata de encontrar un amortiguador viscoso equivalente que represente su comportamiento. Se ha utilizado como referencia principal en esta sección, el artículo de Robert D. Hanson (1993).

La siguiente es la expresión de la ecuación del movimiento de un sistema dinámico de un grado de libertad

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = m\ddot{u}_g \quad (7-1)$$

Donde  $m$  es la masa,  $c$  el amortiguamiento,  $k$  la rigidez,  $\ddot{u}, \dot{u}, u$  son las variables de movimiento de la estructura (aceleración, velocidad y desplazamiento) y  $\ddot{u}_g$  el movimiento del terreno por acción del sismo

La relación de amortiguamiento (respecto al crítico) usualmente se expresa como:

$$\xi = c/2\sqrt{km} \quad (7-2)$$

El amortiguamiento viscoso equivalente se selecciona de tal manera que la energía disipada por ciclo por el dispositivo y por el amortiguador viscoso equivalente sean iguales (igualando las áreas de los ciclos de histéresis)

$$C_{eq} = \frac{E_d}{(\pi\omega u_{max}^2)} \quad (7-3)$$

Donde  $E_d$  es la energía disipada en un ciclo por el dispositivo,  $\omega$  es la frecuencia de respuesta en radianes y  $u_{max}$  es el desplazamiento máximo del ciclo en consideración.

Jacobsen (1930, citado por Hanson, R. D, 1993, pag. 321) reconoció la relación entre la disipación de energía y la máxima energía de deformación, como un medio para aproximar el amortiguamiento viscoso equivalente para estructuras con comportamiento no lineal. Usualmente se acepta que:

$$E_d = 4\pi\xi E_s \quad (7-4)$$

Con el máximo desplazamiento espectral,  $SD$ , se encuentra la energía pico de deformación,  $E_s$ :

$$E_s = \frac{1}{2} k(SD)^2 \quad (7-5)$$

La energía que proporciona el sismo,  $E_s$ , fue definida por Hudson en 1956, en función de  $SV$  que es la pseudo velocidad espectral:

$$E_s = \frac{1}{2} m (SV)^2 \quad (7-6)$$

Se supone entonces que la máxima energía de deformación del sistema es igual a la máxima energía cinética que proporciona el sismo. Se acepta que esta relación es válida para terremotos de ciclos numerosos y para relaciones de amortiguamiento hasta del 20%. Conociendo  $E_d$  y  $E_s$  para un sistema en particular, la **Ecuación 7-4**, puede usarse para evaluar  $\xi$ .

Nótese que  $E_s$  no está directamente relacionado con los movimientos del terreno, sino que incluye la respuesta estructural a estos movimientos y el efecto del amortiguamiento de la estructura.

En los años 60 y 70 del siglo XX, se hicieron extensas investigaciones sobre el amortiguamiento viscoso equivalente con miras a representar adecuadamente la respuesta inelástica de las estructuras. Se asumía en estos estudios un comportamiento inicial de la estructura lineal elástico y sin disipación de energía. Luego, una fase de comportamiento inelástico con disipación de energía. Esto es compatible con el comportamiento dúctil y las suposiciones de los métodos de diseño de los 90. A partir de esos estudios, se estableció que los amortiguamientos viscosos equivalentes para los edificios podían variar entre 10% a 50% del crítico, dependiendo del período de vibración efectivo de cada estructura (Rosenblueth, E., Newmark, N.M. 1976).

Los dispositivos de disipación de energía (Hanson et al. 1993) suponen la adición de un sistema de disipación de energía que se añade al sistema estructural inicial. La filosofía de diseño de estos dispositivos, es la de mantener en lo posible la respuesta del sistema estructural primario en el rango elástico durante terremotos severos. Entonces el sistema de amortiguamiento añadido actúa en paralelo con el sistema estructural original para proveer el comportamiento deseado a la hora de un sismo. Se debe prestar especial atención a los procedimientos de análisis que se utilicen, a fin de tomar en cuenta las contribuciones de los dispositivos añadidos a las propiedades del sistema original (en términos de rigidez, principalmente).

En el caso de edificaciones de varios pisos, la distribución de los dispositivos de disipación de energía a lo largo de la altura de la estructura es una consideración de importancia. Numerosos autores recomiendan la distribución en altura de una manera similar a la distribución de rigideces de los pisos (sin cambios abruptos de rigidez). Esto tiene la ventaja matemática de evitar el acoplamiento modal. Sin embargo, las experiencias han demostrado que un acoplamiento modal débil no altera de manera importante las características globales de la respuesta de los edificios con dispositivos de disipación de energía añadidos.

Para edificios de varios pisos, se recomienda que el coeficiente de amortiguamiento equivalente se calcule en cada piso, utilizando la **Ecuación 7-3** y que se utilice para el diseño el amortiguamiento modal obtenido para el primer modo de vibración, ya que éste es el modo de respuesta dominante en la mayoría de los casos prácticos.

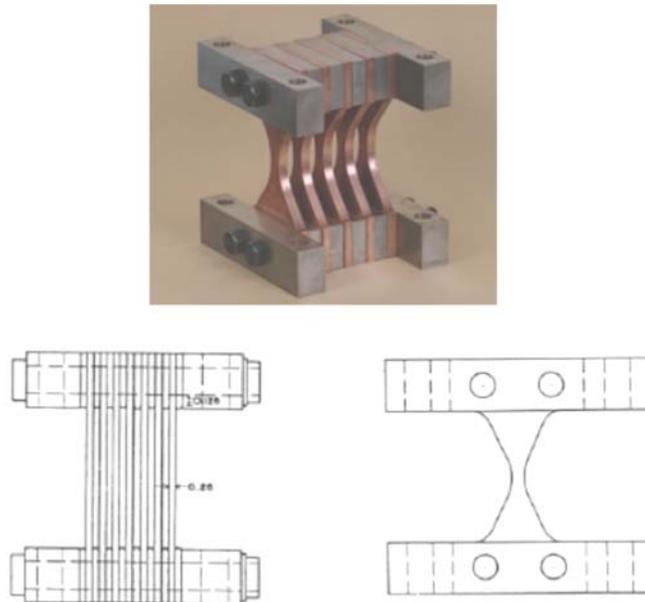
### 7.3 Disipadores histeréticos metálicos

En los disipadores histeréticos se aprovecha las propiedades de deformación inelástica del material constitutivo del dispositivo. Se utilizan principalmente disipadores de acero, ya que este material, debido a su alta homogeneidad, permite una fácil caracterización mecánica del dispositivo. En general su comportamiento es modelado a partir de curvas fuerza-desplazamiento y la energía que disipan se cuantifica a partir de los ciclos de histéresis característicos del dispositivo. Algunos tipos comunes de disipadores metálicos utilizados incluyen: placas a flexión, riostras metálicas, amortiguadores de barras, anillos, etc.

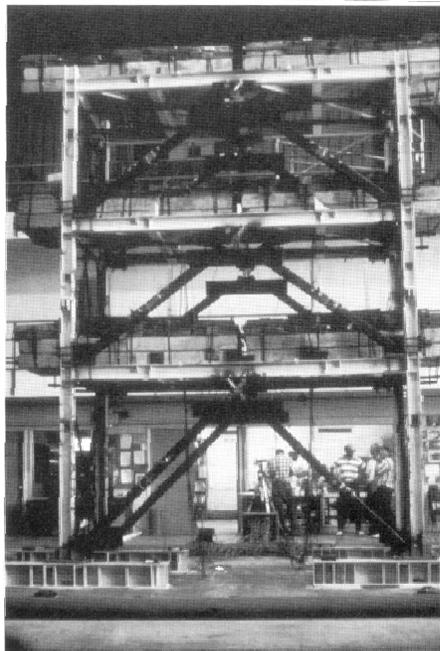
Un disipador tipo ADAS (por sus siglas en inglés: *Added Damping and Stiffness*) como el que muestra la **Figura 7.2**, se diseña para disipar energía a partir de la cedencia en flexión de las placas de acero que lo conforman. Como se observa, son placas en forma de I, sometidas a flexión fuera de su plano.

Para caracterizar el comportamiento de estos dispositivos se requiere conocer su rigidez, la fuerza límite de cedencia y el desplazamiento correspondiente a la fuerza de cedencia. Aiking et al (1993) realizaron un conjunto de ensayos de laboratorio sobre mesa vibrante, que probaron la eficacia de este tipo de dispositivos (Ver **Figura 7.3**). En la **Figura 7.3** se observa cómo se colocan usualmente estos dispositivos, conectados a riostras diagonales concéntricas que aumentan la rigidez de la estructura primaria.

En Estados Unidos los elementos tipo ADAS fueron utilizados por primera vez para la rehabilitación sísmica de un edificio en San Francisco en 1992 (Fierro, 1993). Comentarios sobre este caso se incluyen en el Capítulo 8.



**Figura 7.2:** Disipador tipo ADAS. (Fuentes: arriba: Oviedo et al., 2006, figura 9, pag. 113; abajo: Aiken et al, 1993, figura 20, pag. 349).<sup>31</sup>



**Figura 7.3:** Pórtico metálico con disipadores tipo ADAS ensayado en laboratorio. (Fuente: Aiken et al, 1993, figura 22, pag. 351).

<sup>31</sup> <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/5557910.pdf>.

En la **Figura 7.4** se muestran un disipador tipo TADAS y el disipador tipo panel, constituido por placas alineadas que trabajan en su plano. El disipador tipo TADAS es similar al ADAS, pero basado en placas de acero de forma triangular. También cumplen con la función de añadir amortiguamiento y rigidez a la estructura primaria. Pruebas de laboratorio han demostrado la eficacia de estos dispositivos (Keh-Chyuan Tsai et al., 1993)



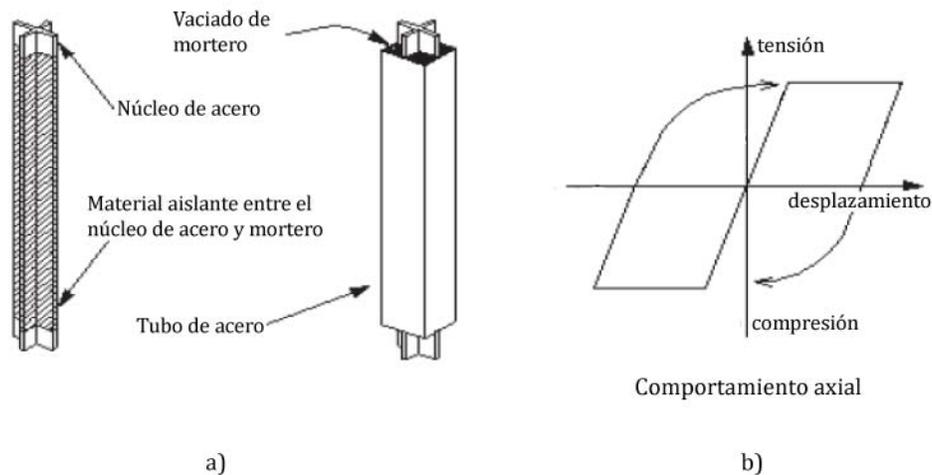
**Figura 7.4:** Disipadores histeréticos metálicos a) Tipo TADAS b) Tipo panel. (Fuente: Oviedo et al., 2006).<sup>32</sup>

Otra clase de disipador histerético son las riostras metálicas mostradas en la **Figura 7.5**.

El dispositivo de la **Figura 7.5** está compuesto por un núcleo de acero y un tubo metálico externo, relleno con un mortero de cemento. El núcleo de acero se encarga de disipar energía cuando sobrepasa el límite de cedencia. La riostra se instala en los pórticos de la estructura primaria, y puede ser sometida a efectos de flexión, cortante o deformación axial. Para el adecuado funcionamiento de la riostra como disipador de energía se requiere que no haya adherencia entre el núcleo de acero y el material de confinamiento.

---

<sup>32</sup> <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/5557910.pdf>



**Figura 7.5:** Disipador tipo riostra metálica. (Fuente: Oviedo et al., 2006).<sup>33</sup>

El concepto inicial introducido por Kimura et al. (1976), fue profundizado por otros investigadores en Japón (Watanabe et al., 1988, Wada et al. 1989 y Watanabe et al.1992) y dio lugar a lo que se conoce hoy como el “*Unbonded Brace™*” (marca registrada) que se ha hecho disponible comercialmente por *Nippon Steel Corporation*. Este tipo de dispositivos se ha utilizado de manera frecuente en Japón desde 1987, en más de 200 edificios. El primer proyecto donde se utilizó el “unbonded brace” en Estados Unidos fue el del edificio de Ciencias ambientales de la Universidad de California (Cameron Black et al., 2002).

Los dispositivos histeréticos metálicos disipan energía a través de la fluencia de metales sometidos a esfuerzos de flexión, corte, torsión, o una combinación de ellos. Presentan un comportamiento estable y confiable a largo plazo y se comportan adecuadamente ante factores ambientales y cambios de temperaturas.

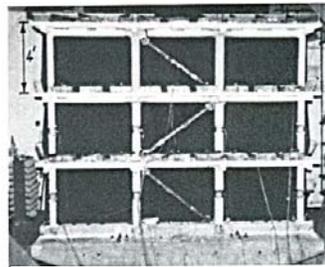
## 7.4 Disipadores Viscoelásticos

Los disipadores viscoelásticos, como otros sistemas de protección de edificios, son dispositivos utilizados para aumentar la capacidad de disipación de energía de las estructuras frente a sollicitaciones de viento o de sismos.

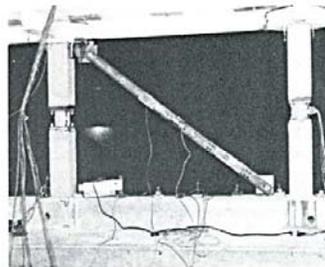
<sup>33</sup> <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/5557910.pdf>.

Pueden utilizarse riostras diagonales viscoelásticas. Se busca que estas riostras sean una fuente adicional de disipación de energía sin formar parte de la estructura portante. El objetivo es que la estructura primaria permanezca en lo posible en el rango elástico, para minimizar los daños en caso de sismos.

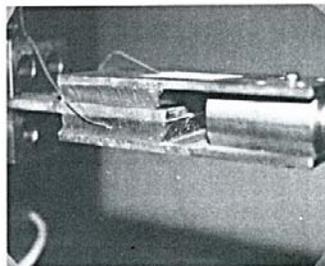
Los disipadores de este tipo que primero se popularizaron fueron los llamados DSSD, por sus siglas en inglés: *Direct Shear Seismic Damper*. Estos amortiguadores sísmicos consisten en planchas de acero entre las que se coloca un material viscoelástico que se deforma bajo esfuerzos cortantes. El ensayo de un modelo en laboratorio con dispositivos de este tipo se muestra en la **Figura 7.6** (Lobo R.F. et al, 1993).



a. Elevación



b. Disipador de abrazadera

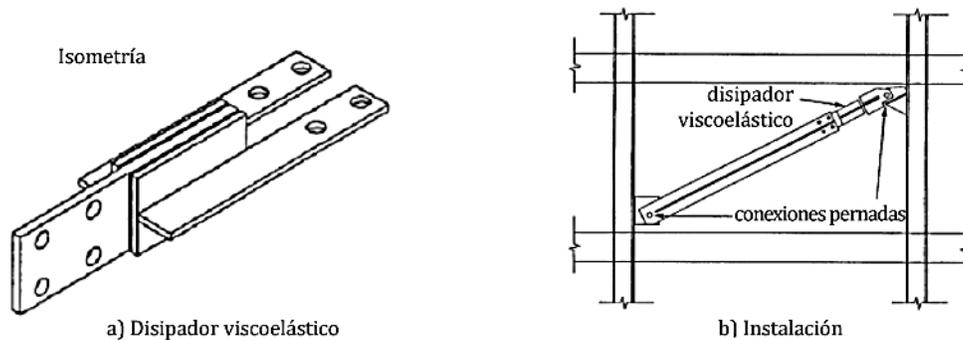


c. Detalles del disipador

**Figura 7.6:** Modelo de estructura de concreto armado con disipadores tipo DSSD. (Fuente: Lobo et al., 1993, Fig. 3, pag. 426).

Los materiales viscoelásticos son generalmente polímeros que, al ser deformados por cortante, ofrecen capacidad de disipación de energía. La **Figura 7.7** muestra el esquema típico de estos dispositivos en los que la disipación tiene lugar cuando existe desplazamiento relativo entre las placas de acero externas y el material viscoelástico interno. En el diseño se deben tomar las previsiones necesarias contra los cambios fuertes de temperatura, deformaciones excesivas y frecuencia de vibración, ya que pueden modificar el comportamiento del dispositivo.

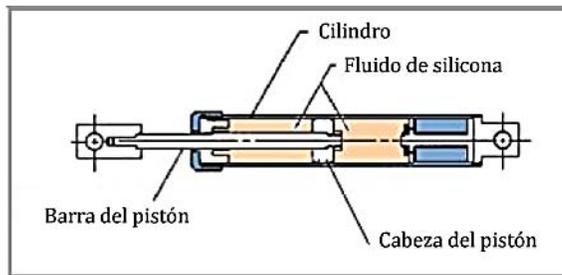
Los disipadores viscoelásticos han sido utilizados en numerosos edificios altos para el control de las vibraciones inducidas por el viento. (Mahmoodi, 1969). Por ejemplo, fueron utilizados en las torres del World Trade Center en New York, de 110 pisos, y funcionaron por más de 20 años, hasta que las torres fueron derribadas por los ataques terroristas de 2001. En otros edificios altos en USA también se utilizaron estos dispositivos para controlar las vibraciones producidas por las fuerzas del viento (Keel, 1986; Mahmoodi, 1989). También otras experiencias pueden citarse en Japón, donde estos dispositivos han sido utilizados para protección sísmica de edificios.



**Figura 7.7:** Disipadores viscoelásticos. (Fuente: Aiken et al, 1993, figuras 4 y 5, pag. 339).

## 7.5 Disipadores de fluidos viscosos

Se basan en el comportamiento de fluidos altamente viscosos. En general consisten en cilindros en cuyo interior se desplaza un pistón embebido en el fluido. Cuando se desplaza el pistón, el fluido pasa por pequeños orificios de manera controlada, produciéndose la disipación de energía (ver **Figura 7.8**). Funcionan de manera similar a los amortiguadores de un automóvil.



**Figura 7.8:** Disipadores basados en fluidos viscoelásticos. (Fuente: Oviedo et al., 2006).<sup>34</sup>

## 7.6 Disipadores de fricción

Estos dispositivos disipan energía cuando se produce fricción a partir del desplazamiento relativo entre dos o más superficies en contacto. Los disipadores de fricción se activan solamente cuando se alcanza un determinado nivel de carga en el dispositivo. Mientras la sollicitación no alcance dicha carga, el mecanismo de disipación se mantiene inactivo.

Existen varios tipos de disipadores de fricción. La **Figura 7.9** muestra el dispositivo tipo Pall (1982), que consiste en dos elementos diagonales con una interface de fricción en el punto de intersección. Un perno en este punto, asegura la fuerza normal necesaria para producir la fricción. Las diagonales están conectadas con elementos verticales y horizontales que garantizan que, una vez iniciado el deslizamiento en una de las diagonales, la otra también deslizará de igual manera en dirección opuesta.

Los dispositivos de fricción tipo Pall han sido usados en Canadá, en edificios y en la rehabilitación de estructuras dañadas por sismos, como las citadas en las referencias (Pall, 1987 and 1991, Vezina, 1992). En Japón pueden citarse los dispositivos de fricción tipo Sumitomo instalados en edificios de 22 y 32 pisos en 1991

El uso de estos dispositivos requiere conocer con certeza las fuerzas en los elementos sometidos a fricción. Resulta a veces difícil garantizar que se activarán con la ocurrencia del sismo esperado. Existen además posibilidades que, después de la ocurrencia de un sismo, queden deformaciones remanentes en las estructuras.

<sup>34</sup> <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/5557910.pdf> la referencia lo tomo de [www.taylordevices.com](http://www.taylordevices.com).

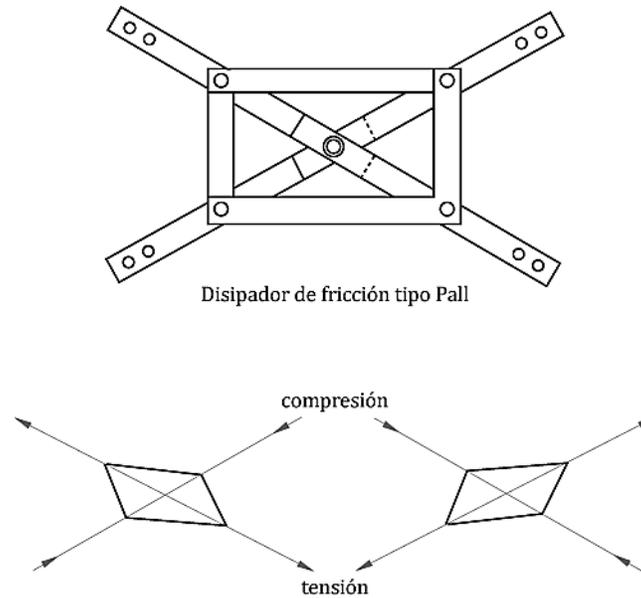


Figura 7.9: Disipador de Fricción tipo Pall. (Fuente: Aiken et al., 1993, figuras 15 y 16, pag. 346).

## 7.7 Disipadores basados en materiales con memoria de forma (SMA)

Son dispositivos de tipo histerético. Con el desarrollo de nuevos materiales con “memoria de forma” (*shape memory alloys*), se han fabricado este tipo de disipadores, con conexiones o elementos pretensionados.

En el trabajo de Ozbulut et al (2011), se expone una revisión del desarrollo de dispositivos de disipación de energía con fines de protección sísmica, que utilizan este tipo de materiales con memoria. En particular, se discuten las aplicaciones de los SMA en dispositivos de disipación de energía de diferentes tipos, sistemas de bielas de arriostramiento, conectores viga-columna. Estos materiales también han sido utilizados en la construcción de aisladores sísmicos.

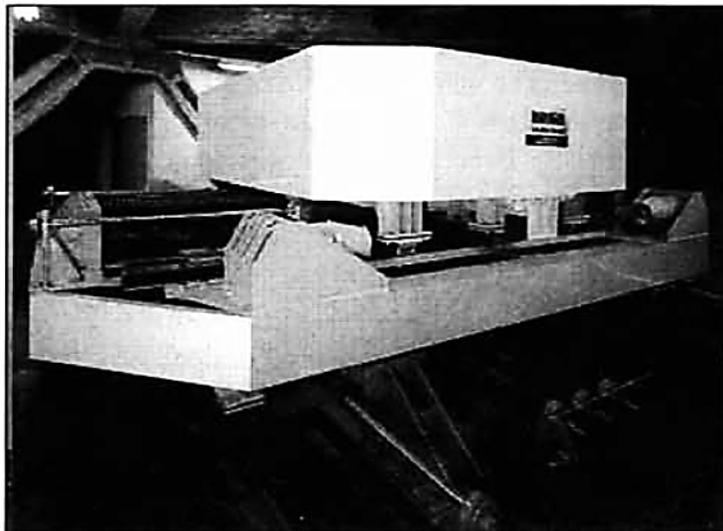
Este tipo de dispositivos que utilizan SMA son muy costosos, por lo que su utilización es todavía restringida en las edificaciones comunes. Sin embargo, ofrecen innovadoras posibilidades para la protección sísmica de estructuras de manera controlable, ya que minimizan el riesgo de deformaciones residuales en las mismas después de eventos sísmicos de importancia.

## 7.8 Amortiguadores de masas sintonizadas

Estos amortiguadores pueden ser simples (un solo sistema de masa amortiguador) o múltiples. También se utilizan sistemas basados en líquidos (tanques de agua generalmente o columnas de líquidos). El amortiguador de masa sintonizado (AMS) consiste en un sistema masa/resorte/amortiguador que se coloca en la estructura principal. La frecuencia natural del dispositivo debe ser cercana a la frecuencia dominante del sistema principal, para que vibre en resonancia. Su uso requiere conocer con precisión las relaciones de frecuencia y amortiguamiento entre el dispositivo y la estructura. El sistema sólo puede ser sintonizado con una sola frecuencia de vibración del sistema estructural primario. En general se ubican en el techo de las edificaciones. Estas masas normalmente están apoyadas sobre aisladores y deslizadores. La masa se sintoniza a una frecuencia cercana a la frecuencia del modo que se desea disminuir. Estos sistemas interfieren únicamente en un nivel de la estructura, con pesos aproximadamente del 1-2% de la masa modal del modo de interés (Boroschek, 2012). El uso de estos dispositivos no siempre genera resultados adecuados de reducción de respuesta sísmica (Sladek, J., Klingner, R., 1983).

Si en la respuesta de la estructura son importantes las contribuciones de los modos superiores, es necesario contemplar la posibilidad de colocar varios AMS, que cubran las frecuencias propias de la estructura que más contribuyan con la respuesta.

Existen muchas maneras de configurar los AMS. La **Figura 7.10** muestra la fotografía de un dispositivo de este tipo. (Montanaro M.I., 2001)



**Figura 7.10:** Fotografía de un AMS. (Fuente: Montanaro M.I., 2001).

Este tipo de dispositivos ha sido utilizado para el control de vibraciones en edificios altos. Un ejemplo es la Torre Crystal en Osaka, Japón. Es una estructura de acero de 157 m de altura. El amortiguador instalado es un AMS de tipo pendular, que posee diferentes masas en cada una de las dos direcciones principales (Fuente: Montanaro M.I., 2001).

## 7.9 Ventajas y desventajas del uso de disipadores de respuesta sísmica

Las ventajas del uso de los disipadores de energía en edificaciones han sido ampliamente aceptadas y probadas en la práctica.

Entre las ventajas principales que pueden citarse, los disipadores de energía permiten la reducción de la demanda sísmica en la estructura principal y la concentración del daño en puntos o elementos identificados previamente. Se busca que, en el caso en que los dispositivos resultan dañados después de un sismo, sean reemplazables para que la estructura recupere su funcionalidad en poco tiempo. En algunos casos, su uso introduce un aumento de la rigidez de la edificación que puede ser también beneficioso.

Los disipadores de energía contribuyen a reducir los esfuerzos y deformaciones de las estructuras inducidos por el sismo, en niveles importantes, si se comparan con estructuras similares sin estos dispositivos. De esta manera, contribuyen a reducir los daños, no sólo en elementos estructurales, sino también en elementos no estructurales y en los contenidos almacenados o bienes existentes dentro de las edificaciones.

Una desventaja que presentan algunos tipos de dispositivos disipadores es que después de la ocurrencia del sismo, las estructuras quedan con deformaciones remanentes que pueden dificultar las labores de recuperación del funcionamiento de la estructura después del sismo. Además, después de un terremoto importante, algunos disipadores deberán ser sustituidos o reparados, lo que introduce costos que deben ser considerados por los diseñadores.

En la **Tabla 7-1** se resumen las principales ventajas y desventajas de los dispositivos de disipación de energía más utilizados (Braz-César M. et al, 2013).

**Tabla 7-1:** Ventajas y desventajas del uso de dispositivos de disipación de energía.

Dispositivo	Ventajas	Desventajas
Amortiguadores hysteréticos metálicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Comportamiento hysterético estable</li> <li>· Confiables a largo plazo</li> <li>· No son sensibles a cambios de temperatura ambientales</li> <li>· Son materiales tradicionales en la construcción, familiares para los ingenieros civiles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Deben ser reemplazados si son solicitados por un sismo</li> <li>· La estructura puede quedar con desplazamientos residuales después de un sismo.</li> <li>· Se requieren análisis no lineales</li> </ul>
Amortiguadores de fricción	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Disipan grandes cantidades de energía por ciclo de histéresis</li> <li>· No son sensibles a cambios de temperatura ambientales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Las condiciones de la superficie de rozamiento pueden cambiar con el tiempo.</li> <li>· Se requieren análisis no lineales</li> <li>· La estructura puede quedar con desplazamientos residuales después de un sismo</li> </ul>
Amortiguadores de fluidos viscosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Comportamiento lineal (facilidades de modelado)</li> <li>· Sus propiedades son constantes en altos rangos de variación de frecuencia y temperatura</li> <li>· Se han comercializado por su alta confiabilidad</li> <li>· Mínima fuerza de restauración</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Dificultades de instalación.</li> <li>· Requieren revisiones periódicas para detectar posibles fugas del fluido viscoso</li> </ul>
Amortiguadores viscoelásticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Polímeros de comportamiento lineal (facilidades de modelado)</li> <li>· Se activan para bajos niveles de desplazamiento</li> <li>· Comportamiento elástico (vuelven a su forma original)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Limitada capacidad de deformación</li> <li>· Su comportamiento depende del nivel de deformación, de la temperatura y la frecuencia.</li> <li>· Requieren revisiones periódicas para verificar posible deterioro del material viscoelástico.</li> </ul>
Amortiguadores de Masa Sintonizada	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ubicación generalmente en el último piso Facilidad de instalación y de mantenimiento.</li> <li>· Adecuado para estructuras regulares donde domine el primer modo de vibración</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Sensibilidad a errores en la frecuencia natural de la estructura y/o la relación de amortiguamiento</li> <li>· Gran espacio requerido para su instalación</li> </ul>



# Ejemplos de uso de aisladores y de disipadores de energía



## 8 Ejemplos de uso de aisladores y de disipadores de energía

En este Capítulo se presentan algunas experiencias de edificaciones donde se han utilizado dispositivos pasivos de protección sísmica en el diseño de nuevas estructuras o en la readecuación sísmica de estructuras existentes. Se mencionan casos en Estados Unidos y América Latina.

Los ejemplos presentados no pretenden ser una revisión exhaustiva ni proporcionar un panorama completo de la aplicación de estos dispositivos. Se han escogido para ilustrar la aplicación práctica de los principales conceptos introducidos en capítulos anteriores, en obras de ingeniería existentes y documentadas en la bibliografía revisada.

### 8.1 Readecuación sísmica de un edificio en San Francisco, Estados Unidos

Este caso corresponde a la primera vez que se utilizaron dispositivos de disipación de energía con fines de protección sísmica en Estados Unidos.

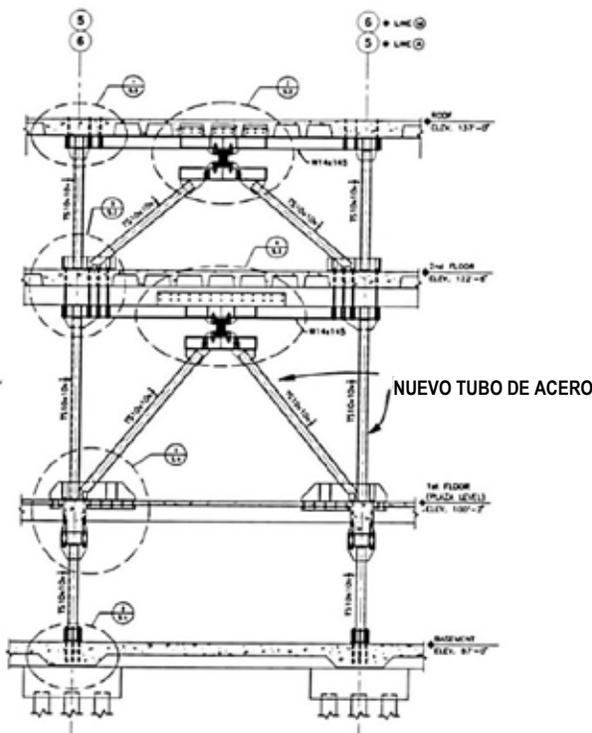
Se trata de un edificio en el centro de San Francisco en California, que resultó dañado con el sismo de Loma Prieta en 1989. Construido en 1967 y desocupado desde 1989, una evaluación efectuada en 1991 reveló que el edificio podía ser vulnerable y presentar riesgo de colapso en caso de la ocurrencia de un nuevo sismo severo.

En el artículo de Perry et al. (1993), se describe el trabajo realizado para mejorar la resistencia del edificio y limitar los daños que podría sufrir la estructura en caso de sismo.

El edificio consta de dos pisos elevados, y bajo el nivel de calle (nivel plaza o *mezzanina* parcial), se ubica un espacio de estacionamiento que ocupa toda la manzana. El edificio fue construido con columnas de concreto armado que presentaban deficiencias de confinamiento. Se observó el efecto de columnas cortas ocasionadas por la existencia de la *mezzanina*, sin adecuado refuerzo cortante, y un significativo efecto torsional debido a una distribución de rigidez en planta muy irregular. Los daños que sufrió el edificio por el terremoto de Loma Prieta de 1989 fueron producto de estas debilidades: grietas de corte en las columnas cortas, agrietamiento diagonal de paredes, fallas de cerramientos de vidrio por torsión y falla de vigas cortas en el segundo piso.

Los propietarios decidieron realizar una rehabilitación de la estructura con objetivos de desempeño que iban más allá de lo especificado por las normas de diseño sísmico en la época. Para el sismo de diseño las normas prescribían un criterio de seguridad y preservación de la vida de los ocupantes; es decir, impedir el colapso de la estructura a costa de permitir daños importantes en la misma. En el proyecto de rehabilitación se planteó el objetivo de controlar y minimizar los daños, de manera de permitir recuperar el funcionamiento normal del edificio rápidamente después de un sismo severo, sin mayores interrupciones en las operaciones normales que en sus instalaciones se llevaban a cabo (se trata de una sede bancaria).

Se estudiaron varias alternativas y finalmente se optó por reforzar la estructura con marcos de acero con riostras diagonales y dispositivos de disipación de energía, colocados en dos ejes perimetrales de la estructura. Estos nuevos marcos se muestran en la **Figura 8.1**. Como se aprecia, las diagonales se acoplan a la estructura original de concreto armado por medios de disipadores de energía tipo ADAS (ver Capítulo 7). Adicionalmente se reforzaron con riostras de acero, algunos pórticos del segundo piso y de la planta baja. Las nuevas columnas de acero fueron llevadas hasta el nivel de base y amarradas a las estructuras de fundación de concreto armado ya existentes. De esta manera, se logró proveer rigidez, resistencia adicional y reducir la respuesta torsional del edificio.



**Figura 8.1:** Nuevos pórticos de refuerzo con riostras de acero y disipadores tipo ADAS para el edificio de San Francisco. (Fuente: Perry et al., 1993, figura 4a, pag. 567).

Los dispositivos ADAS utilizados en este Proyecto fueron siete en total. Consistían en cinco placas de acero de 9 pulgadas de altura libre (22.86 cm) entre los bloques extremos. La fuerza y desplazamiento de cedencia en estos dispositivos eran de 150 kips (68039 kg) y 0.15 pulgadas (0.38 cm), con una rigidez lateral inicial de 1000 kips/inches (178579.67 kg/cm). Estas características de diseño se escogieron considerando la capacidad sísmica de las fundaciones existentes, y atendiendo a la necesidad de reducir los desplazamientos relativos entre pisos y de disminuir la demanda sísmica sobre las columnas de concreto armado originales, consideradas poco dúctiles.

Este proyecto, dado que fue el primero que utilizó dispositivos ADAS para la rehabilitación sísmica de un edificio en Estados Unidos, requirió de consideraciones especiales, ya que los códigos de análisis y diseño vigentes en esa época no los contemplaban. Así, los diseñadores tuvieron que proponer una metodología especial que demostrara que el proyecto cumplía de manera conservadora con los supuestos de la norma vigente, por ejemplo en cuanto a la validez de los factores de reducción de fuerzas por comportamiento inelástico de los materiales. En ese sentido debieron presentar evidencias y resultados de estudios sobre las características de disipación de energía de la estructura y sus reservas de ductilidad. Se realizaron distintos tipos de análisis, entre ellos, de tipo no lineal. Los resultados mostraron que el comportamiento de la estructura, pasados los límites de cedencia, era estable y que las deformaciones máximas laterales bajo solicitaciones severas estaban dentro de los límites aceptables para lograr el nivel de desempeño deseado, de daño controlado.

Desde un punto de vista arquitectónico, la solución adoptada fue dejar los dispositivos de control sísmico a la vista, lo que fue un enfoque innovador para la época (ver **Figura 8.2**).



**Figura 8.2:** Efecto arquitectónico final en la edificación rehabilitada. (Fuente: Perry et al., 1993, figura 10, pag. 575).

## 8.2 Edificio Izazaga, Torre Mayor y otros casos en Ciudad de México

Antes de la utilización de los dispositivos ADAS en Estados Unidos para la rehabilitación sísmica de edificaciones comentada en la sección 8.1, ya existía experiencia en México en el uso de estas técnicas.

En efecto, como consecuencia de los sismos de septiembre de 1985, se observaron daños estructurales en edificios de mediana altura en la Ciudad de México, por lo que surgió mucho interés en técnicas del control de la respuesta sísmica, especialmente en los dispositivos de disipación pasiva de energía.

En el trabajo de Martínez-Romero E. (1993), se describen los proyectos de readecuación sísmica de tres edificios de Ciudad de México usando amortiguadores. Uno de los edificios (el edificio Izazaga) había sufrido daños con el sismo de México de 1985 y no fue adecuadamente reparado, por lo que con la ocurrencia de sismos moderados posteriores resultó dañado nuevamente. Las otras edificaciones fueron objeto de proyectos de mejoramiento de su capacidad sísmica: el hospital cardiológico y el complejo de edificios de Reforma #476.

En el Edificio Izazaga (ver **Figura 8.3**), ubicado en el centro de la ciudad de México (zona de lago) se utilizaron dispositivos tipo ADAS. Fue construido en los años 70, en concreto armado, con 12 pisos y sótano, además de un cuarto de máquinas de dos pisos ubicado sobre el techo. El sistema estructural, muy flexible lateralmente, era de marcos equivalentes y losas planas reticulares, con algunos muros estructurales. En una primera rehabilitación después del sismo de 1985, se colocaron muros adicionales para aumentar la rigidez y resistencia. Sin embargo con los sismos de 1986 ( $M_s=7.0$ ) y de abril de 1989 ( $M_s=6.9$ ), el edificio se agrietó nuevamente. Por ello, se realizó un nuevo proyecto de rehabilitación utilizando dispositivos tipo ADAS de manera de cumplir con los requisitos de las Normas Técnicas vigentes en 1987. Los dispositivos se colocaron en vanos seleccionados de la estructura original, rigidizados con elementos de acero diagonales. La **Figura 8.4** muestra las mejoras en la respuesta de la estructura, tanto en rigidez como en resistencia, ilustradas por el comportamiento de una línea de columnas.



Figura 8.3: Edificio Izazaga en Ciudad de México. (Fuente: Martínez-Romero E., 1993, figura 1, pag. 604).

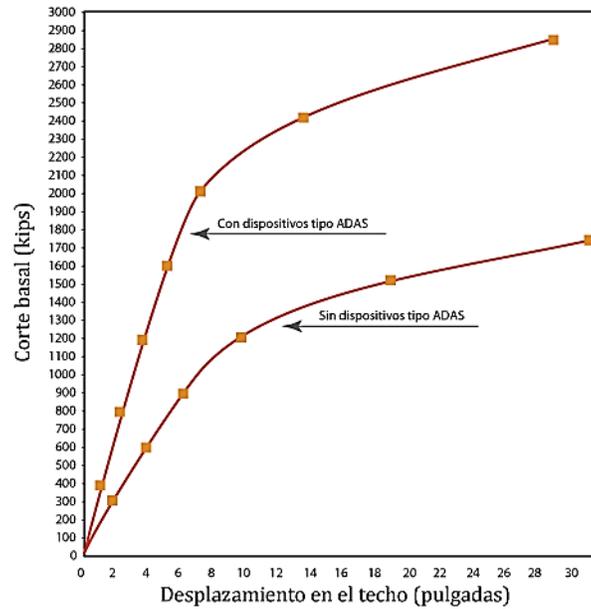


Figura 8.4: Gráfica de Corte basal contra desplazamiento en el techo para una columna en el eje 1. (Fuente: Martínez-Romero E., 1993, figura 10, pag. 611).

Después de las primeras experiencias prácticas de rehabilitación de edificios, en los años 1990 se comenzaron a diseñar en México las primeras estructuras nuevas con disipadores de energía como parte del sistema estructural. Por ejemplo, se utilizaron dispositivos viscoelásticos en la construcción del edificio corporativo de la empresa 3M en la ciudad de México. Los dispositivos fueron desarrollados por la misma empresa (Miranda et al. 1998, citado por Tena-Colunga A. ,2003). El edificio, de cinco pisos y tres niveles de sótanos, fue el primer edificio diseñado y construido con disipadores viscoelásticos en México. Se trata de una estructura mixta de pórticos y muros estructurales de concreto reforzado. Los disipadores viscoelásticos estaban dispuestos en contravientos metálicos tipo chevrón. En su diseño se incorporaron criterios de desempeño de operación completa y ocupación inmediata y se consideraron tres tipos de sismos: sismo máximo ( $M_s=8.2$ ), un sismo moderado ( $M_s=7.5$ ) y un sismo de réplica fuerte, similar al ocurrido el 20 de septiembre de 1985 ( $M_s=7.5$ ). Ver **Figura 8.5** y **Figura 8.6**.



**Figura 8.5:** Edificio corporativo de 3M, diseñado con dispositivos viscoelásticos. (Fuente: Tena-Colunga, 2003).<sup>35</sup>

En México, a partir del año 2000 se utilizaron amortiguadores con fluidos viscosos (tipo Taylor) en la construcción de la Torre Mayor de la ciudad de México (Tena-Colunga, 2003). Se trata de un edificio muy esbelto, de 57 niveles y 225 m de altura, ubicado en la Avenida Paseo de la Reforma (la llamada “zona de lago” de Ciudad de México. Ver **Figura 8.7**, **Figura 8.8**, **Figura 8.9** y **Figura 8.10**). Es el edificio más alto en Latinoamérica (225 m de altura). Alberga un hotel, oficinas, comercios y restaurantes. Tiene 13 niveles de estacionamientos (4 subterráneos) y un helipuerto. Se instalaron un total de 98 dispositivos de disipación desde el piso 13 al 57.

---

35

[https://www.researchgate.net/publication/259487438\\_Disipacion\\_pasiva\\_de\\_energia\\_en\\_Mexico\\_un\\_estado\\_del\\_arte](https://www.researchgate.net/publication/259487438_Disipacion_pasiva_de_energia_en_Mexico_un_estado_del_arte).



**Figura 8.6:** Edificio corporativo de 3M, diseñado con dispositivos viscoelásticos. (Fuente: Tena-Colunga, 2003).<sup>36</sup>



**Figura 8.7:** Torre Mayor de Ciudad de México (Fuente: Tena-Colunga, 2003).<sup>37</sup>

---

36

[https://www.researchgate.net/publication/259487438\\_Disipacion\\_pasiva\\_de\\_energia\\_en\\_Mexico\\_un\\_estado\\_del\\_arte](https://www.researchgate.net/publication/259487438_Disipacion_pasiva_de_energia_en_Mexico_un_estado_del_arte).



**Figura 8.8:** Edificio Torre Mayor con disipadores Taylor (Foto cortesía de Enrique Martínez Romero, Tena-Colunga 2003).<sup>38</sup>



**Figura 8.9:** Torre Mayor de Ciudad de México.<sup>39</sup>

---

37

[https://www.researchgate.net/publication/259487438\\_Disipacion\\_pasiva\\_de\\_energia\\_en\\_Mexico\\_un\\_estado\\_del\\_arte](https://www.researchgate.net/publication/259487438_Disipacion_pasiva_de_energia_en_Mexico_un_estado_del_arte).

38

[https://www.researchgate.net/publication/259487438\\_Disipacion\\_pasiva\\_de\\_energia\\_en\\_Mexico\\_un\\_estado\\_del\\_arte](https://www.researchgate.net/publication/259487438_Disipacion_pasiva_de_energia_en_Mexico_un_estado_del_arte).



**Figura 8.10:** Disipadores instalados en la Torre Mayor de Ciudad de México.<sup>40</sup>

Tena-Colunga (2003) comenta otros casos de utilización de disipadores pasivos de energía en edificios de México. Igualmente, cita estudios analíticos y experimentales realizados en el país y concluye que, desde el punto de vista de comportamiento estructural global (por ejemplo, la ductilidad) para estructuras de mediana altura ubicadas en terreno blando, el uso de sistemas de contravientos con disipadores es conveniente, aunque de un costo alto, si se compara con estructuras con contravientos sin disipadores. Algunos estudios sugieren que, a largo plazo, la inversión inicial efectuada en la instalación de los disipadores se compensa con los ahorros derivados de mantener las estructuras operativas y disminuir los costos de reparación en caso de sismos. Sin embargo, en México como en otros países de la región latinoamericana, pocos dueños de edificios e inversionistas toman en cuenta las consecuencias a largo plazo y generalmente se toman decisiones sólo considerando los costos iniciales.

### 8.3 Aeropuerto Jorge Chávez y otras estructuras en Lima

En el año 2006, se reforzó la estructura del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez, usando disipadores viscosos tipo Taylor. Se trata del primer edificio donde se usaron estos dispositivos en Perú. (Casabonne C, 2012)

En el año 2008 se utilizaron aisladores metálicos friccionantes de péndulo invertido en dos tanques de gas natural licuado (LNG).

---

<sup>39</sup> <http://documents.mx/documents/carlos-casabonne-incremento-en-el-amortiguamiento-como-medida-para-reducir.html>.

<sup>40</sup> <http://documents.mx/documents/carlos-casabonne-incremento-en-el-amortiguamiento-como-medida-para-reducir.html>.

A partir de 2010 varios especialistas peruanos han incorporado en sus proyectos sistemas modernos de protección antisísmica como es el caso del Centro Empresarial Reducto, donde se utilizaron disipadores viscosos *Taylor*. También en la nueva sede corporativa de la empresa constructora Graña y Montero se instalaron por primera vez en Perú aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (Gonzales I., 2012)

## 8.4 Puente Amolanas en Chile

Es el puente vial más alto de Chile, con una altura de 100.6 m sobre la quebrada del mismo nombre, en la ruta 5 Norte. Se trata de un puente recto de 268m de longitud (**Figura 8.11**).



**Figura 8.11:** Puente Amolanas en Chile.<sup>41</sup>

En cada estribo (Bit, 2000) se colocaron dos disipadores de energía de fluido viscoso de marca Taylor Devices Inc con las siguientes características: 300 toneladas de capacidad, con un recorrido máximo de 200 mm en cada dirección y velocidad máxima de desplazamiento del émbolo de 1,2 m/s. (**Figura 8.12**).

---

<sup>41</sup> Fotografía: Pato Novoa.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1\\_Puente\\_Amolanas\\_106\\_metros\\_altura\\_3.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1_Puente_Amolanas_106_metros_altura_3.jpg)



Figura 8.12: Disipadores Taylor en el puente Amolanas.<sup>42</sup>

## 8.5 Casos de estructuras con aislamiento sísmico en Chile

En Chile se han utilizado sistemas pasivos de control sísmico en estructuras desde los años 90. La primera estructura sísmicamente aislada fue un edificio de mampostería confinada de cuatro pisos: el edificio Comunidad Andalucía de Santiago. Este constituye un edificio de vivienda económica. En la edificación se colocaron ocho aisladores. Se instrumentó esta estructura con acelerómetros digitales, al igual que otra similar pero de base fija, con fines comparativos. (Moroni, M., Sarrazin, M., Boroschek, R., 1998).

La práctica del aislamiento sísmico progresó rápidamente en Chile. En el año 2003 se publicó la norma Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica (Nch2745.Of2003), que fue la primera de este tipo en la región sudamericana.

Almazán, J.L (2010), presenta una tabla con las obras de ingeniería aisladas sísmicamente en Chile para el año 2010 (**Tabla 8-1**). En casi todas las obras citadas en la tabla, los aisladores han sido construidos por empresas chilenas (Empresa Vulco S.A.), salvo en el caso de los tanques de gas licuado, donde se instalaron dispositivos importados de Estados Unidos.

Las estructuras con aislamiento sísmico se comportaron satisfactoriamente durante el fuerte sismo (de magnitud Mw 8.8), del 27 de febrero de 2010, que afectó la región central y el sur de Chile.

---

<sup>42</sup> <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/1742/11580>.

**Tabla 8-1:** Estructuras con aislamiento sísmico en Chile. (fuente: Almazán J.L., 2010).

	<b>Estructuración<sup>(1)</sup></b>	<b>Número y tipo de aisladores<sup>(1, 2)</sup></b>
1. Edificio habitacional Comunidad Andalucía, Santiago (1992)	Mampostería Armada de Ladrillos Cerámicos, 4 pisos	8 MDRI
2. Viaducto Marga-Marga, Viña del Mar (1996)	Puente continuo de 4 vigas metálicas, 7 vanos (383 m)	36 HDRI
3. Hospital Clínico San Carlos de Apoquindo PUC (2000)	Marcos de H <sup>o</sup> A <sup>o</sup> , 5 pisos + 1 subterráneo (8,000 m <sup>2</sup> )	52 (30 HDRI + 22 LRI)
4. Edificio San Agustín de la Facultad de Ingeniería PUC (2002)	Marcos de H <sup>o</sup> A <sup>o</sup> , 4 pisos + 1 subterráneo (6,000 m <sup>2</sup> )	53 (25 HDRI + 17 LRI + 11 STS)
5. Viaducto Marga-Marga 2 (Troncal Sur), Viña del Mar (2003)	Puente sobre 4 vigas pretensadas de H <sup>o</sup> A <sup>o</sup> , 10 vanos (500 m)	108 HDRI
6. Hospital Militar de Santiago (2004)	Marcos de H <sup>o</sup> A <sup>o</sup> , 4 pisos + 1 subterráneo (50,000 m <sup>2</sup> )	164 (114 MDRI + 50 LRI)
7. Edificio de oficinas Vulco SA (2005)	Marcos de H <sup>o</sup> A <sup>o</sup> prefabricado, 3 pisos	18 (12 LRI + 6 STS)
8. Edificio Asociación Chilena de Seguridad, Santiago (2005)	Marcos y Muros de H <sup>o</sup> A <sup>o</sup> , 7 pisos + 3 subterráneos	32 (29 MDRI + 9 STS)
9. Edificio Asociación Chilena de Seguridad, Viña del Mar (2008)	Marcos y Muros H <sup>o</sup> A <sup>o</sup> , 7 pisos + 2 subterráneos (4,200 m <sup>2</sup> )	25 (18 MDRI + 7 STS)
10. Muelle de contenedores Puerto Coronel (2009)	Plataforma de H <sup>o</sup> A <sup>o</sup> sobre pilotes metálicos	96 LRI
11. Estanques de almacenamiento de GNL en Quintero (2010)	Estanque interior de acero inoxidable y exterior de H <sup>o</sup> A <sup>o</sup>	260 FPS por estanque

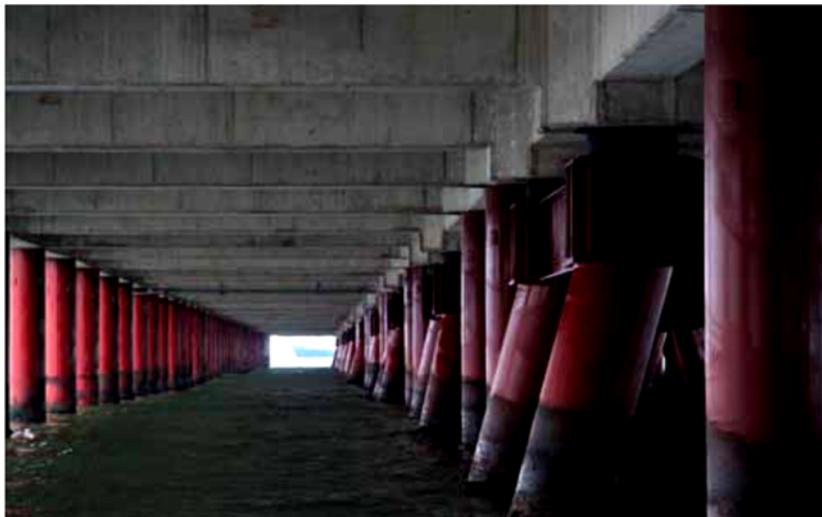
<sup>(1)</sup> Datos obtenidos de Revista Bit (Numero 72 / Mayo-Junio 2010), y pagina web de la empresa Sirve S.A. ([www.sirve.cl](http://www.sirve.cl)).

<sup>(2)</sup> MDRI: medium damping rubber; HDRI: high damping rubber isolators; LRI: lead rubber isolators; STS: steel teflon sliders; FPS: frictional pendulum system.

El Hospital Militar y la Clínica San Carlos de Apoquindo, por ejemplo, siguieron funcionando normalmente después del terremoto, a diferencia de otros hospitales del país, cuyos servicios se vieron seriamente afectados. De los hospitales públicos de la zona afectada (que eran un 71% de los hospitales de todo el país), sólo ocho quedaron parcialmente operativos después del terremoto (EERI,2010)

El muelle de Puerto Coronel merece una mención especial: en 2010 era el único muelle en el mundo con aisladores sísmicos y también fue el único en Chile que no sufrió daños y siguió funcionando normalmente después del terremoto (Almazán J.L., 2010).

El nuevo muelle de Puerto Coronel, aislado sísmicamente, con dos grúas de contenedores, no sufrió daños, mientras que en la **Figura 8.13** se aprecian los daños por fallas en las soldaduras de las pilas, que sufrió un muelle vecino, similar al nuevo, pero construido de manera convencional, sin aislamiento sísmico.



**Figura 8.13:** Muelle en Puerto Coronel. (Fuente: EERI, 2010, pag.16. Foto: E. Miranda).<sup>43</sup>

En cuanto al edificio aislado de mampostería Comunidad Andalucía (**Figura 8.14**), los registros obtenidos indicaron que las aceleraciones máximas fueron cinco veces menores que las que se registraron en el edificio no aislado. En este último, la aceleración máxima en el techo alcanzó aproximadamente 1g. (Bit, 2010).

---

<sup>43</sup> [https://www.eeri.org/site/images/eeri\\_newsletter/2010\\_pdf/Chile10\\_insert.pdf](https://www.eeri.org/site/images/eeri_newsletter/2010_pdf/Chile10_insert.pdf).



**Figura 8.14:** Comunidad Andalucía. Edificio de mampostería aislado sísmicamente en Chile. (Fuente: Boroschek, R., 2012).

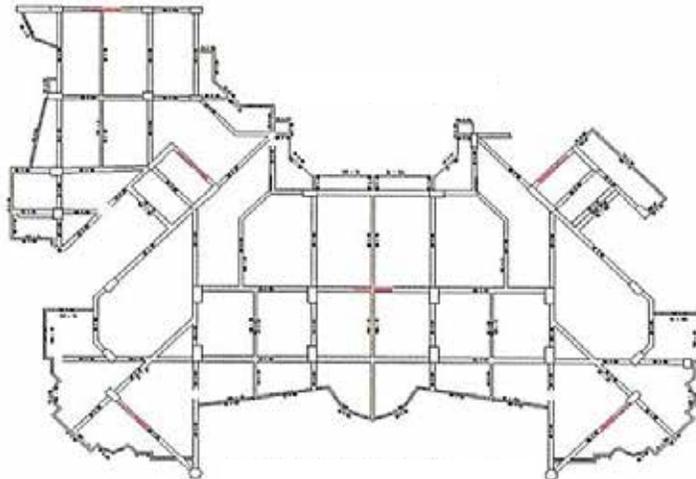
## 8.6 Edificio Pietrasanta en Venezuela

En Venezuela, no es muy frecuente el uso de dispositivos disipadores de energía en edificios. Entre las razones, además de los altos costos asociados con la procura o fabricación de estos dispositivos, podemos citar la escasez de recursos para adelantar estudios analíticos y experimentales en estos temas, así como la insuficiencia de programas de formación de especialistas y capacitación de profesionales en el área de la ingeniería y de la protección sísmica.

Una de las pocas experiencias documentadas (Morón et al., 2009), es la de un edificio residencial de once niveles superiores y dos sótanos subterráneos, llamado Pietrasanta (**Figura 8.15**), ubicado en la ciudad de Barquisimeto. La estructura, de pórticos de concreto armado, es de planta irregular (**Figura 8.16**). Los propietarios decidieron otorgar a la edificación, características que aseguraran una protección sísmica adicional a la que proveen los requerimientos mínimos de resistencia y ductilidad establecidos por la norma vigente en Venezuela (COVENIN 1756-0) para este tipo de estructuras. Con la utilización de sistemas pasivos de disipación de energía, se busca reducir el daño de cerramientos y acabados de lujo en la edificación, y minimizar los costos de reparación después de la ocurrencia de un sismo severo



**Figura 8.15:** Edificio con amortiguadores viscosos tipo Taylor en Venezuela. (Fuente: Morón A., 2009).



**Figura 8.16:** Ubicación de los amortiguadores en planta. Se colocaron seis en cada planta. (Fuente: Morón A., 2009).

Se colocaron un total de 24 amortiguadores como el mostrado en la **Figura 8.17**, distribuidos entre el nivel 4 y el 8 del edificio (**Figura 8.18**). Los amortiguadores tienen una capacidad de 25000 kg. La ubicación de los amortiguadores se definió a partir del análisis del comportamiento de la estructura y características de los dispositivos.

Estos amortiguadores se activan a partir de las velocidades relativas entre pisos. Por razones arquitectónicas, que impedían la disposición de pórticos arriostrados (estructuras contraventeadas tipo chevron son las usualmente previstas para disponer este tipo de dispositivos), en este caso los amortiguadores se colocaron de manera horizontal, con placas o paletas estructurales en voladizo diseñadas para asegurar su funcionamiento apropiado.



**Figura 8.17:** Tipo de amortiguador viscoso utilizado y estructura de soporte, llamadas “paletas estructurales”. (Fuente: Morón A., 2009).



**Figura 8.18:** Estructura en construcción. Se observa la disposición vertical de los amortiguadores en las paletas estructurales. (Fuente: Morón A., 2009).

Los análisis efectuados demostraron que con el uso de los amortiguadores viscosos, se introdujo al sistema un amortiguamiento adicional superior al 10% del crítico. Con la colocación de los amortiguadores, los estudios muestran que se logra una reducción apreciable de los desplazamientos laterales relativos entre los pisos. Estos estudios fueron realizados para distintos acelerogramas considerados, de acuerdo con la amenaza sísmica prevista en el sitio de la edificación. La reducción de las derivas laterales resultó cercana al 40% en el primer piso, para la configuración de disipadores seleccionada.

## 8.7 Sistema de protección sísmica en viaducto ferroviario en Venezuela

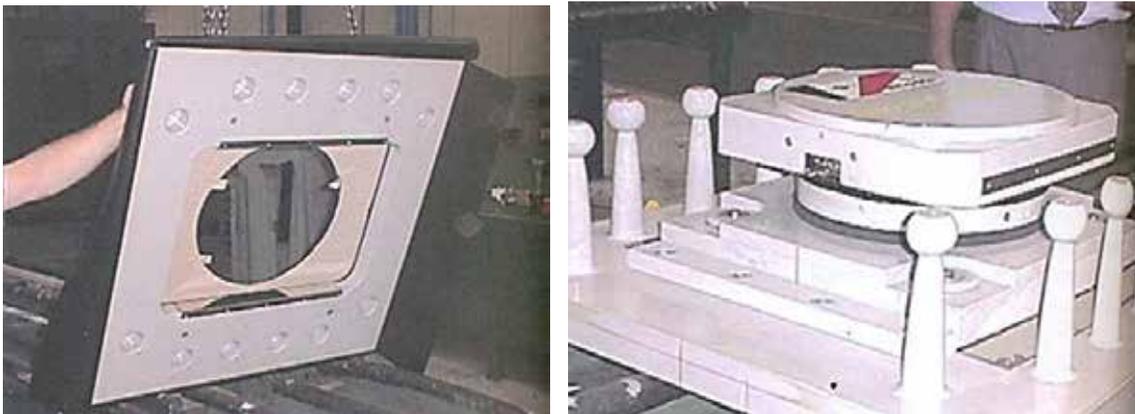
En los años 70 en Nueva Zelanda se comenzaron a utilizar sistemas de control sísmico en puentes. Luego su uso se extendió rápidamente por el mundo. Hasta 1993 se habían empleado dispositivos de aislamiento y de disipación de energía en más de 300 puentes en todo el planeta (Skinner et al, 1993). Actualmente en Latinoamérica su uso es frecuente en viaductos y puentes importantes de reciente construcción.

La **Figura 8.19** muestra un viaducto en el tramo ferroviario Caracas-Tuy Medio, finalizado a finales del 2006 y situado en la región Norte. Central de Venezuela. En este puente se utilizó un sistema de apoyos de los tableros que incluye dispositivos pasivos de disipación de energía. En el trabajo de Pérez Hernández R.J. et al (2009), los autores describen la estrategia de diseño del viaducto. A continuación se resumen algunos aspectos relativos al sistema de control pasivo por disipación de energía escogido.



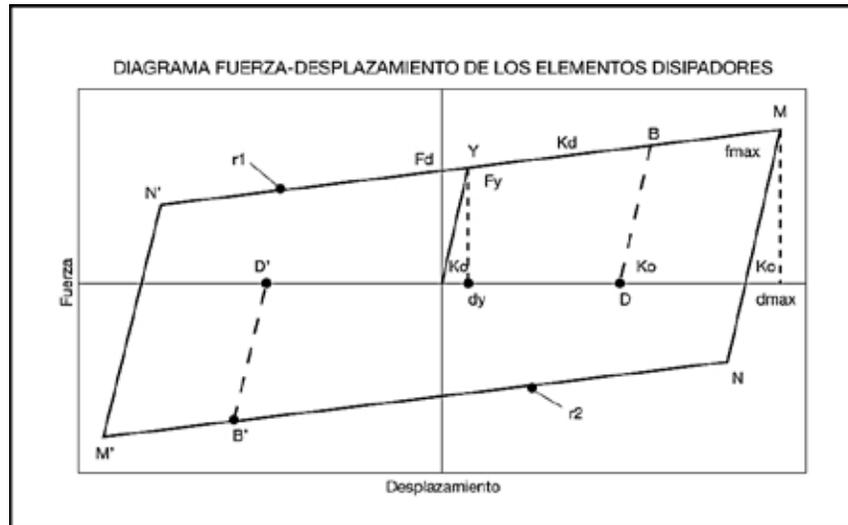
**Figura 8.19:** Viaducto Número 17 antes de la instalación de la vía férrea. (Fuente: Pérez Hernández R.J. et al, 2009, pag. 248).

El sistema de disipación de energía sólo comienza a funcionar cuando se supera un umbral de fuerzas determinado por el diseño. En condiciones operativas de los trenes sobre el tablero, los elementos de conexión trabajan para restringir los movimientos relativos entre el tablero y las pilas. Cuando se supera el límite previsto de fuerzas horizontales, por ejemplo cuando las fuerzas horizontales son como las que puede inducir el sismo esperado, estos elementos actúan como “fusibles” o elementos de “sacrificio” y fallan en corte. Esto permite el desplazamiento relativo entre el tablero y las pilas, y comienza la transmisión de fuerzas a los disipadores de energía, que comienzan a trabajar.



**Figura 8.20:** Aparato de apoyo móvil unidireccional. Izquierda: tapa superior. Derecha: parte inferior mostrando los disipadores. (Fuente: Pérez Hernández R.J. et al, 2009, pag. 244).

La **Figura 8.20** muestra uno de los aparatos de apoyo en proceso de ensamblaje. Como se aprecia, el aparato consta de dos partes, una que se fija al tablero y otra a la pila o estribo del puente. El sistema de disipación de energía está constituido por el conjunto de elementos verticales, de cuerpo tronco cónico y coronados por una esfera, que se aprecian en la foto. Estos elementos son de una aleación especial de acero, de propiedades mecánicas estables frente a los cambios de temperatura. Las superficies de contacto entre ambas partes del aparato, son de acero y teflón (PTF), lo que disminuye el roce entre las mismas una vez que los elemento de sacrificio fallan y comienza el movimiento relativo. El comportamiento de los aparatos disipadores de energía fue probado en un laboratorio de ensayos. El modelo escogido para representar el comportamiento histerético de uno de los elementos disipadores del aparato se muestra en la **Figura 8.21**. De esta manera, el aparato de apoyo funciona como un sistema de resortes elastoplásticos en paralelo.



**Figura 8.21:** Lazo de histéresis idealizado de uno de los componentes disipadores de energía. (Fuente: Pérez Hernández R.J. et al, 2009, pag. 249).

El elemento caracterizado en la figura tiene una resistencia cedente  $F_y$  igual a 62.5 kN, un desplazamiento cedente  $D_y$  igual a 10mm, un desplazamiento de diseño máximo de 110 mm y una rigidez postelástica  $K_d$  de 0,036 veces la rigidez elástica  $K_0$ .

Los resultados de los estudios analíticos efectuados para los distintos espectros y acelerogramas escogidos, indicaron una respuesta adecuada de los elementos del viaducto.

Los criterios de diseño incluyeron la escogencia de un sismo de “control de daño”, con un período de retorno,  $T_r$  de 50 años, para una aceleración del terreno ( $A_{ho}$ ) de 150 o 125 gal (según el sitio) y un sismo de “diseño”, con un período de retorno,  $T_r$ , de 900 años, correspondiente a una aceleración del terreno ( $A_{ho}$ ) de 400 o 360 gal.

El desempeño esperado del puente para el sismo de 50 años es en el rango elástico. El puente no debe sufrir daños y permanecer operativo después del evento. Se espera que para sismos más fuertes comiencen a trabajar los disipadores de energía, concentrando el daño en los aparatos de apoyo. Después de un sismo superior al de 50 años, puede ocurrir que quede un desplazamiento residual entre el tablero y las pilas. Se supone que los costos de reparación en este caso, incluyendo la sustitución de los elementos de sacrificio de los aparatos de apoyo, el recentrado de los tableros (por causa del desplazamiento residual) y la eventual reparación de la vía férrea, deben ser menores que los costos de reparación necesarios en un puente similar sin disipadores, donde los daños se concentrarían en las pilas.

## 8.8 Algunos casos de estructuras aisladas en Estados Unidos

El *Foothill Communities Law and Justice Center* (FCLJC) fue el primer edificio en Estados Unidos donde se utilizó un sistema de aislamiento sísmico en la base (**Figura 8.22**).

Finalizado en 1985, se trata de un edificio de cuatro pisos con un cuarto de máquinas en el techo, ubicado en Rancho Cucamonga, una ciudad al sur del Estado de California, a 12 millas de la Falla de san Andrés.



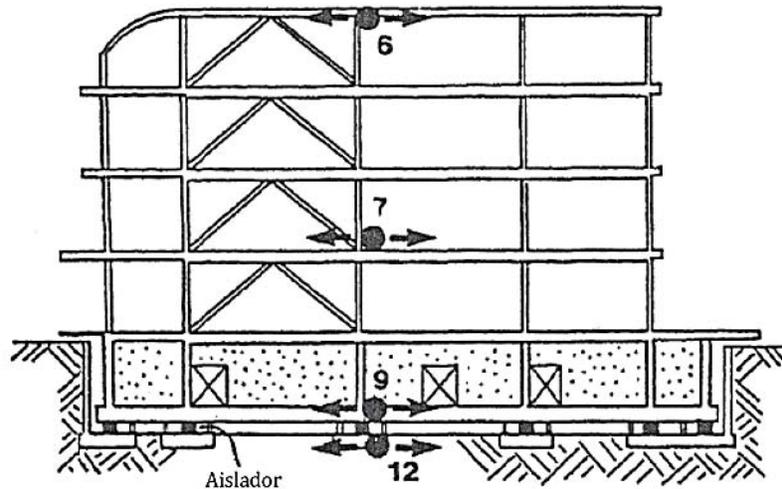
**Figura 8.22:** *Foothill Communities Law and Justice Center*.<sup>44</sup>

La estructura es de pórticos de acero con algunos vanos arriostrados. El edificio tiene un sótano. Este sótano está soportado por dos muros de base. Bajo el sótano se dispuso de un subsótano para colocar los aisladores, que consistieron en 98 rodamientos de caucho natural de varias capas reforzadas con capas de acero. El objetivo de los aisladores fue buscar que el período fundamental de vibración del edificio aislado fuera dos veces superior al de un edificio convencional similar, de base fija. La demanda máxima de desplazamiento horizontal de los aisladores en las esquinas del edificio fue de 15 pulgadas (380 mm)

La **Figura 8.23** muestra la configuración del edificio, que fue instrumentado con acelerómetros para registrar su respuesta y estudiar su comportamiento.

---

<sup>44</sup> <http://www.pbs.org/wgbh/nova/next/tech/rubber-bearings-seismic-protection>



**Figura 8.23:** Sección transversal (eje menor) del edificio, con la ubicación de los acelerómetros 6,7,9 y 12. (Fuente: Marshall Lew et al., 1988, figura 4, pag. 797).<sup>45</sup>

En un estudio realizado a partir de los registros de la respuesta del edificio durante el terremoto de Redlands de 1985, de magnitud 4.8, se concluyó que el comportamiento observado fue satisfactorio y de acuerdo con las expectativas. Se observó que la forma de la estructura afectó la respuesta (el edificio es muy largo en una dirección: 126 m). Esto influyó en que el cambio esperado en el período fundamental de la estructura, que debía ser inducido por el aislamiento, fue realmente muy pequeño. Sin embargo, los aisladores fueron muy efectivos en reducir las aceleraciones transmitidas a la estructura, lo que se atribuyó a la capacidad de amortiguamiento del sistema de aislamiento. (cf. Papageorgiou A.S. et al, 1989).

Los *Angeles County Fire Command and Control Facility*, en California, fue otro edificio aislado con un sistema similar al del *Foothill Center*, con rodamientos de caucho de alto amortiguamiento. Fue construido en 1989. Consiste en dos niveles elevados y el aislamiento se colocó justo debajo del nivel de planta baja. La estructura es de pórticos de acero arriostrados y cada una de las 32 columnas se colocó sobre un amortiguador de caucho. Los 20 aisladores perimetrales fueron dotados de una cadena para restringir el desplazamiento a un máximo de 32 cm. En su diseño, entre otros criterios considerados, se prefirió usar aislamiento sísmico en vez de construir una estructura fija, a partir de una comparación de costos. Se estimó que el diseño aislado costaría un 6% menos que el diseño convencional.

<sup>45</sup> <http://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1534&context=icchge>.

En los Ángeles, el Hospital Universitario de la Universidad de *Southern California* fue construido sobre aisladores. Se trata de una estructura con un sótano, 8 pisos y un penthouse. La estructura es de pórticos de acero arriostrados concéntricamente. Se utilizaron 68 aisladores de plomo/caucho en el perímetro y 81 elastoméricos en el resto de las columnas. El nivel de aislamiento está debajo del sótano con muros de contención que rodean a la estructura, fuera del margen de aislamiento de 33.7 cm. En 1994, durante el terremoto de Northridge, la estructura se comportó adecuadamente. Se estima que la aceleración máxima del suelo en el sitio del edificio fue de 0.49g, mientras que en el interior del mismo fueron inferiores a 0.13g. Otros edificios del mismo centro, de tipo convencional, resultaron severamente dañados. (cf Marvin W. Haling et al., 1996 y Pinzón N., 2014)

Otro ejemplo de estructura aislada en Estados Unidos es el Utah State Capitol, en Salt Lake City, con un sistema de aislamiento compuesto por 265 aisladores.

Los edificios mencionados cuentan con instrumentación apropiada para estudiar su comportamiento. Forman parte de una red de edificios instrumentados, de un programa de la División de Minas y Geología del Departamento de Conservación de California (*California Strong Motion Instrumentation Program*, CSMIP). En la bibliografía se encuentran trabajos donde se muestran resultados del comportamiento de estas estructuras aisladas frente a sismos. Por ejemplo, M.J. Huang et al (1992) analizan la respuesta de estas estructuras durante el terremoto de Landers de 1992. Estos y otros estudios han mostrado que el comportamiento de estructuras aisladas es satisfactorio y permite controlar los daños esperados por efecto de sismos.

Los aisladores han sido utilizados con éxito también para la rehabilitación o reparación de edificios existentes. Para citar algunos casos conocidos:

- En California, el ayuntamiento de los Ángeles fue dañado por el terremoto de Northridge de 1994 y readecuado con rodamientos de caucho de alto amortiguamiento. Es el edificio aislado más alto de los Estados Unidos (138 m de altura) (Figura 8.24).
- El ayuntamiento de Oakland fue severamente dañado por el terremoto de Loma Prieta de 1989 y reestructurado mediante la instalación de amortiguadores en las bases.
- Asimismo, el ayuntamiento de San Francisco sufrió severos daños con el terremoto de 1906 (Figura 8.25), por lo que fue demolido y reconstruido en 1915 (Figura 8.26). Posteriormente fue severamente dañados por el terremoto de Loma Prieta de 1989 y reestructurado mediante la instalación de 530 aisladores de láminas de goma con núcleo de plomo, en las bases. El diseño e implementación del sistema de aisladores resultó bastante complejo, el edificio se estima que puede llegar a tener

un desplazamiento lateral de 45 a 66 cm (18 a 26 pulgadas), con un periodo de vibración del edificio aislado de 2.5s y una aceleración pico de 0.4g. Estas grandes deformaciones requirieron del diseño de juntas flexibles para las instalaciones de plomería, electricidad y teléfono (Chopra, A.K. 2001).



Figura 8.24: Ayuntamiento de Los Angeles.<sup>46</sup>

---

<sup>46</sup> By Brion VIBBER - Created by Brion VIBBER., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3999158>



**Figura 8.25:** Ayuntamiento de San Francisco en ruinas, destruido por el terremoto de 1906. <sup>47</sup>



**Figura 8.26:** Ayuntamiento de San Francisco. <sup>48</sup>

---

<sup>47</sup> U.S. Geological Survey Photographic Library, Mendenhall, W.C. 707, digital file mwc00707. San Francisco City Hall ruins on April 20, 1906 — after the April 18 1906 San Francisco Earthquake, California. Public domain.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/San\\_Francisco\\_City\\_Hall#/media/File:San\\_Francisco\\_City\\_Hall\\_1906-04-20.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/San_Francisco_City_Hall#/media/File:San_Francisco_City_Hall_1906-04-20.jpg)

## 8.9 Uso de aisladores para edificaciones de bajo costo e interés social

El uso de aisladores ha estado fundamentalmente dirigido a edificaciones, puentes y reactores nucleares, los cuales constituyen construcciones de costos importantes, si son comparados con los de viviendas económicas, en las que viven las mayorías de América Latina.

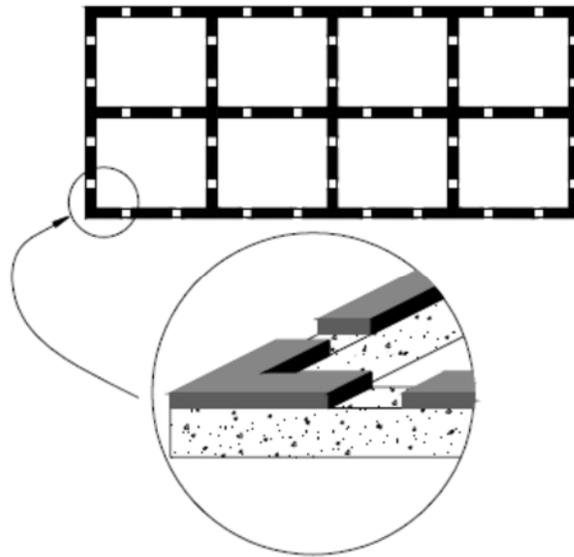
En la sección 8.5 se mencionó el edificio Comunidad Andalucía de Santiago. Este constituye un edificio de vivienda económica, de mampostería confinada, al cual se le incorporaron aisladores sísmicos para mejorar su comportamiento. Ese es un caso de uso de aisladores en edificaciones de interés social.

El uso de estos dispositivos en edificaciones de bajo costo, no es todavía una práctica generalizada; sus costos y la complejidad de su diseño, ensayo, control de calidad e implementación, no constituyen un estímulo para su uso en viviendas y edificaciones de interés social. Sin embargo, distintos investigadores están haciendo esfuerzos por lograr soluciones que permitan que las grandes ventajas que los aisladores sísmicos representan, puedan llegar a sectores más desfavorecidos desde el punto de vista social.

Un aporte significativo es la contribución de Konstantinidis y Kelly (2012), quienes recientemente analizaron el uso de soportes de neopreno, como los utilizados en puentes, para generar aislamiento sísmico. En tal sentido, presentan principios de comportamiento y metodologías de cálculo sencillas que pueden ser utilizadas para tal fin, y los resultados son verificados mediante procesos experimentales. Los resultados son esperanzadores. El objetivo de sus investigaciones ha sido el de proveer aislamiento sísmico ligero y de bajo costo para el refuerzo de viviendas y edificios públicos en zonas del mundo con alto peligro sísmico, en las que dispositivos convencionales de aislamiento sísmico son prohibitivos desde el punto de vista de su costo. La **Figura 8.27** muestra un esquema de esta propuesta.

---

<sup>48</sup> File:San Francisco City Hall September 2013 panorama 3.jpg, Author: King of hearts.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:San\\_Francisco\\_City\\_Hall\\_September\\_2013\\_panorama\\_3.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:San_Francisco_City_Hall_September_2013_panorama_3.jpg)



**Figura 8.27:** Esquema de aislamiento sísmico mediante uso de soportes de neopreno. (Fuente: Konstantinidis, D., Kelly, J., 2012).



**Algunas consideraciones económicas**



## 9 Algunas consideraciones económicas

A fin de determinar las ventajas o desventajas económicas de incluir dispositivos de aislamiento y de disipación de energía en los diseños estructurales, lo más adecuado es comparar los costos de las soluciones con y sin los dispositivos de respuesta pasiva. El resultado que conduzca a la solución más apropiada desde el punto de vista económico, puede ser distinto en cada caso particular, por lo que es necesario realizar una evaluación para los distintos diseños, que tome en cuenta los requerimientos establecidos en los reglamentos, y los definidos por el dueño o el usuario de la construcción. A partir de las condiciones definidas por el usuario, deben estimarse las opciones. Sin embargo, en el caso en que deban protegerse equipos costosos y quiera mantenerse la operatividad inmediata de la estructura, el uso de aisladores es, en general, la mejor solución a considerar.

Uno de los primeros estudios que presentó un análisis de costos para estructuras con fuertes requerimientos en lo relativo a capacidad de prestación de servicios, fue el estudio de Ryan, 1990, en el cual demuestra que en la construcción de una planta nuclear, el costo de utilizar aisladores sísmicos fue de 2% menor que el de las estructuras sin aisladores, y el costo de la construcción de una estación de bomberos resultaba ser 6% más económica cuando se utilizaban aisladores sísmicos. En el caso de edificaciones residenciales, se puede citar un caso de una edificación construida en Ecuador, cuyo costo fue el mismo, al utilizar aisladores que al no utilizarlos, dada la reducción de materiales asociada a las cargas menores y el diseño elástico de la estructura colocada sobre aisladores. (Lara, 2012)

Por otro lado, al igual que ocurre en todos los campos en los que se producen innovaciones tecnológicas, los costos de los aisladores sísmicos han disminuido y disminuirán cada vez más, en la medida en que se difunda su uso, se conozcan más las tecnologías de fabricación y ensayo, y se produzcan mecanismos de aislamiento con fines de generar soluciones con carácter social, para resguardar las vidas e inversiones en países menos desarrollados (Kelly, 2013).

En la actualidad se desarrollan metodologías de análisis de costos y se realizan complejos procesos de evaluación (Terzic, V. et al., 2012, Ryan, et. al. 2010), sin embargo, todavía no se tiene suficiente información como para conocer a priori y de manera clara los costos involucrados con las distintas soluciones posibles.

Un análisis adecuado de los costos asociados a la implementación de dispositivos de aislamiento o de disipación en estructuras, requiere de la revisión de varias etapas en la vida útil de la estructura.

Los primeros análisis que se presentan, en relación con los costos, son los asociados a las etapas de construcción. Al comparar los costos de la estructura sin aisladores, con los de la estructura con aisladores, sólo se está considerando la inversión inicial, es decir, la asociada a la construcción. Al implementar sistemas de aislamiento sísmico, es necesario incluir costos de elementos tales como: excavación adicional, dispositivos de aislamiento, paredes para preservar los espacios de libre movimiento del edificio, planchas para cubrir y proteger estos espacios, detalles en juntas de escaleras, rampas y accesos, juntas en las tuberías, ajustes para los ascensores, posibles reducciones en el terreno que pueda aprovecharse comercialmente, dada la necesidad de preservar espacios para los aisladores y sus movimientos, costos del diseño del piso suspendido sobre el plano de aislamiento, etc.

En la arquitectura del edificio deben contemplarse la ubicación y funcionamiento de los aisladores y de los dispositivos de control de respuesta. Muchas veces las instalaciones eléctricas, sanitarias y otros servicios requieren también de consideraciones especiales para adaptarse al funcionamiento de los dispositivos y sistemas de control implementados. También es necesario prever los costos de mantenimiento y reparación a lo largo de la vida útil de la estructura.

En el caso en que se usen dispositivos de control activo de respuesta, debe garantizarse el funcionamiento adecuado de los dispositivos de control durante los sismos, por ejemplo, las fuentes de suministro de energía deben ser permanentes y confiables en caso de ocurrencia de sismos severos.

Es indispensable contar con las capacidades humanas y técnicas requeridas para la adecuada instalación y mantenimiento de los sistemas de control y monitoreo; estas generalmente implican costos más elevados en la preparación e implementación de los mecanismos.

En algunos países, las normas y disposiciones legales vigentes, obligan a contemplar costos de certificación y control de calidad de los sistemas implementados, inclusive, algunas normativas exigen el desarrollo del proyecto con un par técnico que sea especializado en el uso de los dispositivos.

Todos estos costos varían con cada proyecto, en cada país y en cada localidad.

Como ha sido mencionado, al incorporar aisladores también se reducen costos de materiales en el proceso constructivo. Los tamaños y detallado de las vigas y columnas disminuyen dado que no requieren soportar cargas sísmicas. También se producen disminuciones de costos en elementos no-estructurales, como por ejemplo los mecanismos de fijación de techos, luminarias, muebles, fijación de fachadas de vidrio, ya que no son sometidos a movimientos tan severos como los fuertes terremotos.

El uso de aisladores también permite que los costos de seguros sean menores, ya que los riesgos de daño en la estructura son menores.

Los costos asociados a la implementación de dispositivos que disminuyan los daños y logren objetivos de desempeño más exigentes, es menester compararlos con las probables consecuencias derivadas de la ocurrencia de terremotos y los costos de reparación de las estructuras. Si los dispositivos de aislamiento no forman parte del diseño, las normas han sido concebidas de manera tal que debe aceptarse que durante la vida útil de la estructura se producirán eventos sísmicos que generarán daños, tanto estructurales como no estructurales. Por ejemplo, debe aceptarse que existe una probabilidad del 10% (u otra más reducida, de acuerdo a las consideraciones normativas y de diseño) de que ocurra un sismo igual o mayor al de diseño en la vida útil de la estructura. Esto indica que para contabilizar los costos reales, se requiere de una estimación de las condiciones en las cuales se encontraría la estructura sometida a un terremoto de esta magnitud y una proyección de los costos probables de reparación o de sustitución. Asimismo es conveniente la estimación de los daños a elementos no estructurales, dada la ocurrencia de sismos intermedios y más frecuentes, que también es necesario considerar.

En esta dirección de análisis, si una estructura convencional, diseñada a partir de la acción de un sismo de diseño comúnmente contemplado en las normas, tiene un 10% de probabilidad de sufrir un sismo destructor en su vida útil de 50 años, hay un costo probable de reposición del 10% del valor de la construcción, además de los costos de los valores que en ella se encuentran, y de los costos de pérdidas asociados al tiempo que transcurre mientras se construye una nueva estructura (en términos de interrupción de los servicios que la estructura presta). Este 10% puede cubrir buena parte de los costos de la instalación de los sistemas de aislamiento. Es muy posible que al considerarse estos costos probables, el uso de aisladores sísmicos quede suficientemente justificado.

En las consideraciones económicas no pueden olvidarse la contratación de seguros, los cuales cubren gastos de reparación y de lucro cesante, y pueden cambiar del todo los resultados de las estimaciones mencionadas hasta ahora. Un factor importante a tomar en cuenta, es que si la estructura cuenta con dispositivos de aislamiento sísmico, probablemente el costo de los seguros resultará más económico.

Las ventajas del uso de aisladores comienzan a comprenderse con más claridad, al considerar la ocurrencia de un terremoto. En efecto, los costos de reparación y, adicionalmente, los tiempos asociados a la recuperación de la funcionalidad, pueden ser muy importantes en estructuras de base fija. En cambios, en estructuras aisladas, los costos de reparación y los lapsos de tiempo para la recuperación de su funcionamiento, pueden ser mínimos o inexistentes. Estas consideraciones son fundamentales en estructuras como hospitales, por ejemplo.

Las conclusiones de dos importantes estudios establecen lo siguiente:

-Los sistemas de aislamiento sísmico proveen importantes ahorros de daños para sismos frecuentes, probables y poco probables, con lo que se justifican las inversiones iniciales adicionales. Más aún, al incluir sistemas de aislamiento que cumplan con objetivos de desempeño más exigentes que los establecidos por las normas, no sólo se consiguieron mejores desempeños, sino también reducciones significativas de costos en el ciclo de vida de las estructuras analizadas (Terziz, et al. 2012)

-El impacto económico de un terremoto puede ser mucho mayor si se considera el tiempo durante en el que se detiene el funcionamiento de la estructura y si se consideran las pérdidas de ganancia que no se producen durante ese tiempo, y todo eso se evita al instalar sistemas de control pasivo (Ryan et al., 2010)

Es importante señalar otros aspectos favorables a la rápida recuperación de la operatividad de una edificación: al contarse con edificaciones sin daño y con inmediata funcionalidad se generan otros beneficios indirectos en la sociedad que influyen en la recuperación de la actividad económica global más allá de la actividad propia de la edificación; se trata de contribuir con el aumento de la resiliencia de una comunidad. Si al ocurrir un terremoto se cuenta, por ejemplo, con locales comerciales que vendan productos de construcción, que no sufran daño, las actividades de reparación de casas se pueden hacer más rápido, y se contribuye a reanudar la actividad productiva de la comunidad.

Este factor de resiliencia también es importante ya que contribuye con infundir en la población un sentimiento de seguridad y confianza: la población tendrá una perspectiva de rápido reinicio y continuidad de las actividades cotidianas, después de un evento sísmico, lo cual tiene un positivo impacto humano y como consecuencia, económico también. La presencia de estructuras destruidas parcial o totalmente, genera una percepción pesimista y negativa que afecta desfavorablemente a la población.

Por último, es necesario considerar el principal beneficio directo del uso de estos sistemas, y es que permiten reducir el número de víctimas y de daños ante sismos severos, por lo que aumentan los niveles de seguridad para los ocupantes de las edificaciones.

The background features a solid brown color with several overlapping circles of varying shades of brown and tan. A thin white line curves across the page from the left side towards the top right.

## Bibliografía



## Bibliografía

- Aiken Ian D., Douglas K.Nims, Andrew s. Whittaker, and James Kelly (1993), Testing of Passive Energy Dissipation Systems, In Earthquake Spectra, Vol 9, NO 3., 1993
- Almazán, José Luis (2010) Comportamiento de estructuras antisísmicas durante el terremoto del Maule y su posible efecto en las normas de diseño sísmico en Chile. Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo, v. 7, n. 2/3, mai./dez, en <http://www.seer.upf.br/index.php/rsaee/article/viewFile/2594/1769>
- Amnistia Internacional (2015): “La ONU no puede lavarse las manos sin más ante el dolor y el sufrimiento humano que ha causado.” <https://www.amnesty.org/es/latest/news/2015/10/un-failing-cholera-victims-in-haiti-five-years-after-outbreak/>.
- Armouti, (2015) “Earthquake Engineering, Theory and implementations with the 2015 International Building Code, 3rd. Edition. <http://shop.iccsafe.org/earthquake-engineering-theory-and-implementation-with-the-2015-international-building-code-third-edition.html>
- Barmo, A. et. al. (2015): Barmo, A., Mualla, I., Hsan, H. “The Behavior of Multi-Story Buildings Seismically Isolated. (Hybrid Isolation: Friction, Rubber and Rotational Friction Dampers)” Open Journal of Earthquake Research, Vol.04 No.01(2015), Article ID:52406,12 pages [http://file.scirp.org/Html/1-2740066\\_52406.htm](http://file.scirp.org/Html/1-2740066_52406.htm)
- Bayraktar, A., Keypour, H., Naderzadeh, A. (2012) “Application of Ancient Earthquake Resistant Method in Modern Construction Technology”. 15 World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), Lisboa, 2012. [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_5773.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_5773.pdf)
- Bisch et al, (2012): P. Bisch, E. Carvalho, H. Degee, P. Fajfar, M. Fardis, P. Franchin, M. Kreslin, A. Pecker, P. Pinto, A. Plumier, H. Somja, G. Tsionis. “Eurocode 8: Seismic Design of Buildings. Worked examples presented at the Workshop “EC 8: Seismic Design of Buildings”, Lisbon, 10-11 Feb. 2011. [http://eurocodes.jrc.Ecuacióneuropa.eu/doc/WS\\_335/report/EC8\\_Seismic\\_Design\\_of\\_Buildings-Worked\\_examples.pdf](http://eurocodes.jrc.Ecuacióneuropa.eu/doc/WS_335/report/EC8_Seismic_Design_of_Buildings-Worked_examples.pdf)

- BIT (2000), Revista, Chile, en <http://www.revistabit.cl/revistabit/www/admintools/>
- Black, C., Makris, N., Aiken, I. (2002) Component Testing, Stability Analysis and Characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces, Final Report to Nippon Steel Corporation, Tokyo, Japan, PEER Report 2002/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, September 2002 en: [http://peer.berkeley.edu/publications/peer\\_reports/reports\\_2002/0208.pdf](http://peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2002/0208.pdf)
- Boroschek Rubén (2012), Ponencia en Taller Geópolis, CAF, Normativa sísmica en América Latina
- Casabone Carlos (2012), presentación ponencia en: <http://documents.mx/documents/carlos-casabonne-incremento-en-el-amortiguamiento-como-medida-para-reducir.html>)
- Centeno Graü, M. (1940) Estudios sismológicos. Litografía del Comercio, Caracas. /Segunda edición en 1969, aumentada y corregida, Vol VIII Acad. de Cienc. Físic., Matem. y Nat., Talleres Cartografía Nacional, Caracas/.
- Chopra, A.K. (2001) “Dynamics of Structures. Theory and applications to Earthquake Engineering” Prentice Hall.
- Corrales, W. Miquelena, T (2010) “Overcoming Trade and Development Limitations associated to Climate Change and Disaster Risks. A Policy Paper on Basic proposals for an Initiative focused on highly vulnerable, trade limited and food insecure developing countries”. [http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2011/en/bgdocs/Corrales\\_&\\_Miquelena\\_2010.pdf](http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2011/en/bgdocs/Corrales_&_Miquelena_2010.pdf)
- EERI (2010) Special Earthquake Report- June 2, en: [https://www.eeri.org/site/images/eeri\\_newsletter/2010\\_pdf/Chile10\\_insert.pdf](https://www.eeri.org/site/images/eeri_newsletter/2010_pdf/Chile10_insert.pdf)
- Eurocode 8 (2004) Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance -Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings <https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1998.1.2004.pdf>
- FEMA (1997) Report 274 NEHRP “Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings”. Federal Emergency Management Agency, Report FEMA 274, Washington D.C.
- Ferroni, D. et.al. (2012): Ferroni, D., Vazzana,G., Cuminetti,D., Quaglini,V., Dubini, P., Poggi, C. (2012) “Certification of anti-seismic devices according to the

European Standard EN 15129:2009: Tasks for manufacturers and notified bodies” 15 World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_1609.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1609.pdf)

- Gonzales Iván (2012) Ingeniería sismorresistente con aisladores y amortiguadores sísmicos, Revista técnica del Capítulo de Ingeniería Civil, pp 26, Lima, Perú, en [http://www.cdlima.org.pe/docs/pdf\\_civil/diciembre-2012.pdf](http://www.cdlima.org.pe/docs/pdf_civil/diciembre-2012.pdf)
- Hanson, Robert D. (1993), Supplemental damping for improved seismic performance in Earthquake Spectra, Aug 1993 , vol 9, n. 3, pp 319-370.
- Huang, M.j. Malhotra,P.K., Shakal, A.F. (1994). Analysis of Records from Four Base-Isolated Buildings during the 1992 Landers Earthquake. 5NCEE, Chicago. [http://www.conservation.ca.gov/cgs/smip/docs/reports/Other/Documents/OSMS\\_94-29.pdf](http://www.conservation.ca.gov/cgs/smip/docs/reports/Other/Documents/OSMS_94-29.pdf)
- ICBO (1997) “International Conference of Building Officials, 1997 Uniform Building Code, Vol 2. Structural Engineering Design Provisions, California.
- ICBO (2003) “Seismic-isolated structures” Section 1623, International Building Code, 2003 Ed. International Conference of Building Officials, California.
- Jampole et. al. (2014): Jampole, E.A., Swensen, S. D., Feel, B., Miranda, E., Deierlein, G.G. “Dynamic Testing of a low-Cost Sliding Isolation System for Light-frame Residential Structures” 10 US NCEE, Alaska, July 21-25 <https://nees.org/resources/11238/download/10NCEE-000263.pdf>
- Kelly, James (2013): “A Tested, Inexpensive Way to Protect Buildings from Earthquakes” <http://www.pbs.org/wgbh/nova/next/tech/rubber-bearings-seismic-protection/>
- Konstantinidis, D., Kelly, J. (2012) “Two low-cost seismic isolation systems” 15 World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, 2012 [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_0987.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0987.pdf)
- Kirikov, B. (1992) “History of Earthquake Resistant Construction” Instituto de Ciencias de la Construcción, Eduardo Torrojas, Madrid
- Khoshshima, E. et al (2009): Khoshshima, E., Mahdavi, A., Inangda, N., Rao, S.P. “Evaluation of Traditional architecture of Southern Shores of Caspian Sea Region in Iran” Conference of the International Journal of Arts and Sciences, 1(6): 164 - 177 (2009), CD-ROM. ISSN: 1943-6114, © InternationalJournal.org. [http://www.openaccesslibrary.org/images/MAL184\\_Ehsan\\_Khoshshima.pdf](http://www.openaccesslibrary.org/images/MAL184_Ehsan_Khoshshima.pdf)

- Lafuente, Marianela, Grases, José, Genatios, Carlos (2014) Revisión de la Normativa sísmica en America Latina. CAF, Caracas, noviembre 2014. <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/897>
- Lara, Ottón, 2015 “Sistemas de protección sísmica” Notas de clase.
- Lobo et al, (1993), en Spectra vol 9, n. 3, pp. 426.
- López, C., Retamales, R. y Kannegiesser, T. (2012) Protección Sísmica de Estructuras. Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía. Documento desarrollado por la Corporación de Desarrollo Tecnológico y Cámara Chilena de la Construcción. Documento Técnico No 29, Chile. En: [http://descargas.coreduc.cl/Proteccion\\_Sismica\\_de\\_Estructuras\\_-\\_Febrero\\_2012\\_CLR\\_v4.1.pdf](http://descargas.coreduc.cl/Proteccion_Sismica_de_Estructuras_-_Febrero_2012_CLR_v4.1.pdf)
- Mahin, Stephen (2012) “Lessons from Recent Earthquakes: the need for More resilient Cities” Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons learned from the Great East Japan Earthquake, March 1-4 2012, Tokyo, Japan.
- Marshall Lew and John C. Bowman Jr., "Case History of Seismic Base Isolation of a Building –The Foothill Communities Law and Justice Center" ( June 1, 1988). International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. Paper 3. <http://scholarsmine.mst.edu/icchge/2icchge/2icchge-session4/3>. Figure 4, page 797
- Martínez-Romero E., (1993) in Earthquake Spectra, Vol 9, No 3, Figures 3-10, pp. 604-611.
- Marvin W. Halling, John F. Hall and Yasuteru Okahashi (1996), System Identification of Base-Isolated Buildings Utilizing Records From Recent Southern California Earthquakes, Paper N0 1342, 11 world Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd
- Mayes, R.L. (1990) “The Economics of seismic isolation in buildings” Earthquake Spectra, Vol. 6, pp. 245-263)
- Miyamoto, M. et.al. (1999): Masaki Miyamoto, MD, PhD, Masao Sako, MD, PhD, Michio Kimura, MD, PhD, Tsuyoshi Kanno, MD, PhD, Michitoshi Inoue, MD, PhD, Hiroshi Takeda, MD, PhD, Takashi Takahashi, PhD, Hiroshi Inada, PhD, Kotarou Minato, PhD, Norio Hashimoto, PhD, Tetsuo Kawamura, PhD, Michio Naito, PhD, Toshio Hattori, PhD, Kazuo Nakazawa, PhD, and Masayuki Irie, PhD. “Great Earthquakes and Medical Information Systems, with Special Reference to

- Telecommunications” *J Am Med Inform Assoc.* 1999 May-Jun; 6(3): 252–258. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC61365/>)
- Montanaro, María Inés (2001), *Sistemas de Control de Vibraciones en Estructuras de Gran Altura (vibration control system in very high structures)* en: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewFile/640/722>
  - Morgan, T., Mahin, S. (2011) “The Use of Base Isolation Systems to Achieve Complex Seismic Performance Objectives” *PEER* 2011/06, July 2011, [http://peer.berkeley.edu/publications/peer\\_reports/reports\\_2011/webPEER-2011-06-MORGAN.pdf](http://peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2011/webPEER-2011-06-MORGAN.pdf)
  - Morón Alfredo y Gaschteff Leonardo (2009), *Implementación de Amortiguadores viscosos en un edificio residencial*, en *Ingeniería Forense y Estudios de Sitio. Vol II*, pp257-272, compilación José Grases, Ediciones CITECI-CONSULIBRIS, Caracas.
  - Munich RE (2016) “Significant natural disasters since 1980” *NatCad Service.* <https://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/natcatservice/significant-natural-catastrophes/index.html>
  - Naderzadeh, A. (2009) “Historical Aspects of Seismic Base Isolation Application” [http://www.cibw114.net/symposium2009/pdf/OS09\\_Ahmad\\_Naderzadeh.pdf](http://www.cibw114.net/symposium2009/pdf/OS09_Ahmad_Naderzadeh.pdf)
  - NCh2745 (2003) Norma chilena 2745
  - NEC (2011) Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2011:  
<http://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/08/NEC-SE-DS.pdf>
  - NEHRP (1998) *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings (Part 1 Provisions, Part 2 Commentary)* Prepared by the Buildings Seismic Safety Council of the Federal Emergency Management Agency, FEMA, report 302, Washington D.C
  - Oviedo, Juan Andrés y Duque María del Pilar (2006), *SISTEMAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES*, *Revista EIA*, ISSN 1794-1237 Número 6, p. 105-120. Diciembre 2006, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia), en <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/5557910.pdf>

- Oviedo, Juan A. and Kitamura, Haruyuki (2005). Application of seismic response control technique to a building designed under Colombian regulations. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering yearbook, Publication No. 44, 2005.
- Ozbulut O. E., Hurlebaus S. and Desroches R. (2011), Seismic Response Control Using Shape Memory Alloys: A Review, in [http://cee.virginia.edu/osmanozbulut/wp-content/uploads/sites/20/2014/10/Ozbulut\\_Hurlebaus\\_DesRoches\\_2011\\_SMA\\_Review.pdf](http://cee.virginia.edu/osmanozbulut/wp-content/uploads/sites/20/2014/10/Ozbulut_Hurlebaus_DesRoches_2011_SMA_Review.pdf)
- Papageorgiou, A. S. and Lin, B.-C. (1989), Study of the earthquake response of the base-isolated Law and Justice Center in Rancho Cucamonga. Earthquake Engng. Struct. Dyn., 18: 1189–1200. doi:10.1002/eqe.4290180809
- Pérez Hernández R.J., Nieto Febres J.J, Solórzano Betancourt E.M., (2009) Estrategia de Diseño del tramo Ferroviario Caracas-Tuy Medio, en Ingeniería Forense y Estudios de Sitio. Vol II, pp243-255, compilación José Grases, Ediciones CITECI-CONSULIBRIS, Caracas
- Perry Cynthia L., Fierro Eduardo A., Sedarat Hassan y Scholl Roger E. (1993), “Seismic Upgrade in San Francisco using Energy Disipation Devices” Earthquake Spectra, Vol. 9, No 3, pp 559-579
- Pinzón Mayorga Nathaly, Martínez López Edwin (2014), Estado del arte y modelo didáctico descriptivo de amortiguadores y aisladores sísmicos, Trabajo de grado para optar al título de Ing. Civil, Universidad Católica de Colombia, Bogotá.
- Reuters (2016) “Hurricane Matthew kills almost 900 in Haiti before hitting U.S” <http://www.reuters.com/article/us-storm-matthew-idUSKCN1250G2>
- Ryan et. Al. (2010): Ryan, K.L., Sayani, P.J., Dao, N.D., Abraik, E., Baez, Y.M. “Comparative lifecycle analysis of conventional and base-isolation buildings” proceedings of the 9th US and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Toronto.
- Rosenblueth, E. (1980) “Design of Earthquake Resistant Structures” John Wiley & sons, 1980
- Rosenblueth, E., Newmark, N. (1976) “Fundamentos de Ingeniería Sísmica” Editorial Diana, México, 1976

- Sarrazín M., et al, (2005) “Puente Amolanas: Alto Nivel en Protección Sísmica”, Revista Bit; Mayo 2005, págs. 42, Chile.
- Shenton, H. (1994) “Standard Test Procedures for Seismic Isolation Systems” <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build94/PDF/b94073.pdf>
- Sladek, J. and Klingner, R. (1983). "Effect of Tuned□Mass Dampers on Seismic Response." J. Struct. Eng., 10.1061/(ASCE)0733-9445(1983)109:8(2004), 2004-2009.
- Taylor, A., Shenton, H., Chung, R. (1995) “Standards for the Testing and Evaluation of Seismic Isolation Systems” Proceedings of the ASCE/JSME Pressure Vessels and Piping Conference, Honolulu, Hawaii, July 23-27, Vol. 319, pp39-43.
- Tena-Colunga Arturo (2003), Disipación pasiva de energía en México: un estado del arte Conference Paper November, UNAM, Mexico en [https://www.researchgate.net/publication/259487438\\_Disipacion\\_pasiva\\_de\\_energia\\_en\\_Mexico\\_un\\_estado\\_del\\_arte](https://www.researchgate.net/publication/259487438_Disipacion_pasiva_de_energia_en_Mexico_un_estado_del_arte)
- Terzic, V., Merrifield, S.K., Mahin, S.A., (2012) “Lifecycle cost comparisons for different structural systems designed for the same location” Proceedings 15 World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa. [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_4678.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_4678.pdf)



The background features a solid brown color with several overlapping circles of varying shades of brown and tan. A thin white line curves across the page from the left edge towards the bottom right.

**Anexo**



## ANEXO 1

### Cálculos matemáticos para la obtención de los resultados para el modelo de 5 pisos, sin y con aisladores sísmicos

A continuación se incluyen todos los pasos matemáticos que fueron aplicados para resolver el problema dinámico de una estructura de 5 gdl, primero sin aislador sísmico y luego colocada sobre aisladores sísmicos. Estos son los ejemplos presentados en el Capítulo 4.3.

Datos de la estructura

Dimensiones		
Losa	B	3.4
	H	0.1
Altura	H	2.96271
Columna	B	0.2
Ec		3500000000
densidad concreto (den)		2400
G		9.81
Io	$(bh^3/12)$	0.00013333
K	$(4*12Ec*Io)/(H^3)$	861351.845
Peso losa	$(den*B^2*h)$	2774.4
M	(Peso/g)	282.813456
$k_s$	K	861351.845
$m_s$	M	282.813456
$m_b$	$m_b=m_s$	282.813456
$k_b=(1/f)*k_s$	f=	51.4341
	$k_b=(1/f)*k_s$	16746.7078
	$k_s/m_s$	3045.65369

Rigidez de piso

Estructura sin aislador  $k_s=$  861351.845

Matriz de rigidez:  $\mathbf{K} = k_s \mathbf{I}$  (diagonal con  $k_s$ )

$k_s$	0	0	0	0
0	$k_s$	0	0	0
0	0	$k_s$	0	0
0	0	0	$k_s$	0
0	0	0	0	$k_s$

Masa por piso :

$$m_s = 282.813456$$

Matriz de Masa  $\mathbf{M} = m_s \mathbf{M}$

$\mathbf{M}$

1	1	1	1	1
1	2	2	2	2
1	2	3	3	3
1	2	3	4	4
1	2	3	4	5

Problema de autovalores a resolver

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\varphi} = \lambda \mathbf{M}\boldsymbol{\varphi}$$

Planteado de manera matricial para resolver todos los autovalores y autovectores, es:

$$\mathbf{M}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Lambda} = \mathbf{K}\boldsymbol{\Phi}$$

si  $\mathbf{M} = m_s \mathbf{M}$  y  $\mathbf{K} = k_s \mathbf{I}$

el problema puede ser propuesto como:

$$\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\Lambda} \cdot (m_s/k_s)) = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} \boldsymbol{\Phi} \quad \text{donde} \quad \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} \boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Lambda}$$

$$(\boldsymbol{\Lambda}^* (m_s/k_s)) = \boldsymbol{\Psi}$$

el problema de autovalores a resolver es

$$\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} \boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Psi}$$

luego de resuelto ese problema , se obtienen los autovalores por medio de

$$\boldsymbol{\Lambda} = \boldsymbol{\Psi}^* (k_s/m_s)$$

Matriz de  
masa  
invertida:

$M^{-1}$

2	-1	0	0	0
-1	2	-1	0	0
0	-1	2	-1	0
0	0	-1	2	-1
0	0	0	-1	1

Solución del  
problema de  
Autovalores  $\psi$

Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
0.081				
	0.6903			
		1.7154		
			2.8308	
				3.6825

Autovectores (coordenadas relativas)

Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
0.1699	-0.4557	0.5969	0.5485	-0.326
0.326	-0.5969	0.1699	-0.4557	0.5485
0.4557	-0.326	-0.5485	-0.1699	-0.5969
0.5485	0.1699	-0.326	0.5969	0.4557
0.5969	0.5485	0.4557	-0.326	-0.1699

Autovalores del problema real  $\Lambda$

Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
246.70				
	2102.41			
		5224.51		
			8621.64	
				11215.62

	Frecuencias(1/s)	Períodos(s)
Modo 1	15.71	0.40
Modo 2	45.85	0.14
Modo 3	72.28	0.09
Modo 4	92.85	0.07
Modo 5	105.90	0.06

Autovectores en coordenadas absolutas

Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
3.513	-1.204	0.764	-0.594	0.521
3.229	-0.373	-0.546	1.088	-1.397
2.682	0.715	-0.919	-0.310	1.831
1.919	1.310	0.285	-0.831	-1.682
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
T1	T2	T3	T4	T5
0.40	0.14	0.09	0.07	0.06
$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$\xi_4$	$\xi_5$
2	5.84	9.2	11.8	13.5

Modos de vibración normalizados (factores de participación unitarios)

Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
1.252	-0.362	0.159	-0.063	0.015
1.150	-0.112	-0.113	0.115	-0.041
0.956	0.215	-0.191	-0.033	0.053
0.684	0.394	0.059	-0.088	-0.049
0.356	0.301	0.208	0.106	0.029

Masa por modo

4.398	0.436	0.121	0.037	0.008
-------	-------	-------	-------	-------

% de masa total por modo

87.95%	8.72%	2.42%	0.75%	0.16%
--------	-------	-------	-------	-------

Pseudo aceleración espectral (Fuente: Chopra)

1.83	1.272	0.859	0.7	0.638
------	-------	-------	-----	-------

Corte en la base por modo, dividido entre el peso del edificio

1.610	0.111	0.021	0.005	0.001
-------	-------	-------	-------	-------

Resultante del corte en la base, dividido entre el peso

Criterio SRSS	1.614
---------------	-------

Corte en la base	toneladas	22.383
	KN	219.573

Ejemplo simplificado de análisis de edificio de 5 pisos:

Estructura con aislamiento sísmico

Propiedades de los aisladores: rigidez  $K_b = (1/51.43) * K_s$ , masa  $m_b = m_s$

Matriz de rigidez de la estructura con aislador :  $K$

$k_s$	0	0	0	0	0	0
0	$k_s$	0	0	0	0	0
0	0	$k_s$	0	0	0	0
0	0	0	$k_s$	0	0	0
0	0	0	0	$k_s$	0	0
0	0	0	0	0	$k_s$	0
						$k_b$

Matriz de Masa de la estructura con aislador :  $M$

1	1	1	1	1	1	1
1	2	2	2	2	2	2
1	2	3	3	3	3	3
1	2	3	4	4	4	4
1	2	3	4	5	5	5
1	2	3	4	5	6	6

$M^{-1}$ 

2	-1	0	0	0	0	0
-1	2	-1	0	0	0	0
0	-1	2	-1	0	0	0
0	0	-1	2	-1	0	0
0	0	0	-1	2	-1	-1
0	0	0	0	-1	1	1

 $M^{-1}K$  matriz producto para resolver el problema de autovalores

6091.30738	-3045.6537	0	0	0	0	0
-3045.6537	6091.30738	-3045.6537	0	0	0	0
0	-3045.6537	6091.30738	-3045.6537	0	0	0
0	0	-3045.6537	6091.30738	-3045.6537	0	0
0	0	0	-3045.6537	6091.30738	-59.216645	0
0	0	0	0	-3045.6537	59.2166447	0

El problema de autovalores a resolver es:

$$\Lambda \Phi = M^{-1}K\Phi$$

Autovalores  $\lambda$ (matriz de autovalores:  $\Lambda$ )

Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
11368					
	9142				
		6101			
			3061		
				835	
					10

Autovectores (coordenadas relativas)  $\Phi$ 

Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
-0.288	-0.493	-0.554	0.448	0.199	0.003
0.498	0.494	0.002	0.446	0.344	0.007
-0.575	-0.002	0.554	-0.004	0.394	0.010
0.499	-0.492	-0.004	-0.450	0.337	0.013
-0.289	0.494	-0.554	-0.443	0.187	0.016
0.078	-0.166	0.279	0.450	-0.734	1.000

	Frecuencias(1/s)	Períodos (s)
Modo 1	3.16	1.99
Modo 2	28.90	0.22
Modo 3	55.33	0.11
Modo 4	78.11	0.08
Modo 5	95.61	0.07
Modo 6	106.62	0.06

## Autovectores en coordenadas absolutas

Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
1.049	-0.991	0.990	-0.991	0.990	-0.991
1.046	-0.720	-0.005	0.994	-1.983	2.704
1.039	-0.251	-0.995	0.987	0.995	-3.697
1.029	0.286	-0.986	-0.997	0.986	3.699
1.016	0.745	0.014	-0.984	-1.983	-2.712
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
T1	T2	T3	T4	T5	T6
1.99	0.22	0.11	0.08	0.07	0.06
$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$\xi_4$	$\xi_5$	$\xi_6$
9.58	5.64	7.87	10.3	12.3	13.6

modos de vibración normalizados  
(factores de participación unitarios)

Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
1.018	-0.022	0.005	-0.002	0.000	0.000
1.015	-0.016	0.000	0.002	-0.001	0.000
1.009	-0.006	-0.005	0.002	0.000	0.000
0.999	0.006	-0.005	-0.002	0.000	0.000
0.986	0.016	0.000	-0.002	-0.001	0.000
0.971	0.022	0.005	0.002	0.000	0.000

## Masa por modo

5.998	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
-------	-------	-------	-------	-------	-------

## %de masa por modo

99.97%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
--------	-------	-------	-------	-------	-------

Pseudo aceleración espectral (Fuente:. Chopra)

0.359	1.291	1.058	0.792	0.682	0.635
-------	-------	-------	-------	-------	-------

Corte en la base por modo, dividido entre el peso del edificio

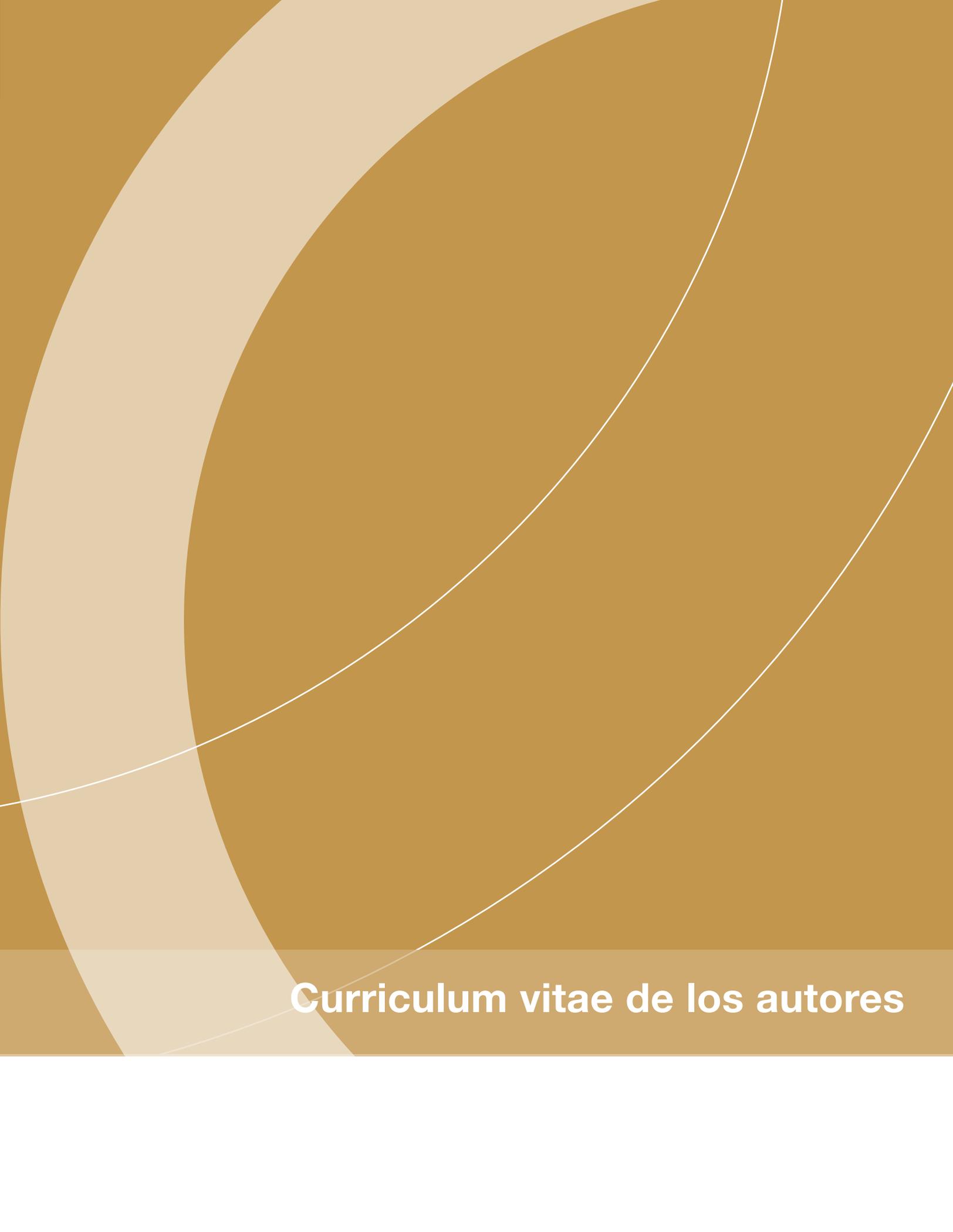
0.359	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-------	-------	-------	-------	-------	-------

Resultante del corte en la base, dividido entre el peso

Criterio SRSS					0.359
---------------	--	--	--	--	-------

Corte en la base (sin considerar losa del aislador)

	toneladas	4.979
	KN	48.841



## Curriculum vitae de los autores



## CURRICULUM VITAE DE LOS AUTORES

### Carlos Genatios

Ingeniero Civil Universidad Central de Venezuela (1980), M.Sc. U. Federal Rio de Janeiro, Dr. Sc. INSA Francia (1991) DEA U. Toulouse. Estudios post-doctorales ÉNS-Université Pierre et Marie Currie, Francia, e INSA-Toulouse. Prof. titular Instituto de Materiales y Modelos Estructurales UCV, del cual fue Director (1998-99). Lic. Filosofía UCV. Viceministro Desarrollo Urbano (1999). Ministro de Ciencia y Tecnología. Presidente Consejo Andino de Ciencia y Tecnología. Consultor BID, CAF, CEPAL-ONU y BM. Cofundador de siete cátedras de pre y post grado, UCV. Autor o coautor de más de 150 artículos científicos y de 300 de opinión y de 14 libros sobre ingeniería estructural, prevención de desastres, vivienda y ciencia y tecnología. Cofundador: Centro Nacional Tecnologías de Información, Fondo investigación y desarrollo en telecomunicaciones, Centro CITECI, Centro Pascal. Ha recibido las condecoraciones de Gran Oficial de la Orden Nacional del Mérito, Francia y Comendador Orden Palmas Académicas, Francia. Ganador en coautoría 1er premio nacional I+D en vivienda. Miembro de número de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat (sillón XXX).

### Marianela Lafuente

Ingeniero Civil Universidad Central de Venezuela (1980), M.Sc. Universidade Federal de Rio de Janeiro, Dr, Sc. Institut National des Sciences Appliquées, Francia (1991). Post doctorado INSA-Toulouse, Francia y ENS Cachan, Francia. Prof. titular Instituto de Materiales y Modelos Estructurales UCV, del cual fue Directora (1999). Lic Filosofía UCV y Lic. Letras U. Toulouse. Viceministra de Ciencia y Tecnología (1999-2002). Investigadora en ingeniería estructural, prevención de desastres, y en ciencia y tecnología. Consultora BID, CAF, CEPAL-ONU y BM. Cofundadora de 7 cátedras de pre y post grado en ingeniería UCV. Autora o coautora de 150 artículos científicos, y de opinión y de 14 libros. Cofundadora de: Centro Nacional de Tecnologías de Información, Fondo para investigación y desarrollo en telecomunicaciones, Centro CITECI, Centro Pascal. Ganadora en coautoría del Primer premio nacional investigación en vivienda. Individuo de número de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat (sillón XXV).





GeóPOLIS, es un programa de CAF –Banco de desarrollo de América Latina– que desarrolla una visión integral y multidisciplinaria para el fortalecimiento de capacidades en América Latina y el Caribe sobre prevención y gestión de riesgos de desastres. Articula una red de ingenieros y especialistas con alto nivel académico y comprobada experiencia en las líneas de investigación del programa: (i) ingeniería sísmica, (ii) planificación y fortalecimiento institucional para la reducción de riesgos de desastres, y (iii) cambio climático y disponibilidad de recursos hídricos. La serie GeóPOLIS consiste en un conjunto de documentos orientados a difundir las experiencias, estudios de casos y mejores prácticas de la región con el objetivo de mejorar la calidad de vida de nuestras sociedades.