

Sistemas modernos de protección sísmica en edificaciones

Lorendys Lucia Laverde Laverde

Monografía para optar el título de Especialista en Estructuras

Director

Álvaro Viviescas Jaimes

Ingeniero Civil Ph D

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Especialización en Estructuras

Bucaramanga

2017

Agradecimiento

Agradezco primeramente a Dios por ser mi guía, permitiendo culminar otro escalón más en mi vida, a mi familia que es el motor de mi vida, por ser mi apoyo incondicional y mi motivación para luchar por mis sueños.

Al profesor Álvaro Viviescas por su orientación prestada y su gran disponibilidad para la elaboración de esta monografía, a mis compañeros de clase por hacer parte de una experiencia más en mi vida.

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Protección sísmica en edificaciones.....	14
2.1 Planteamiento del problema.....	14
2.2 Criterios para implementar sistemas de protección sísmica en edificaciones	15
2.3 Objetivos de la protección sísmica de edificaciones.....	21
3. Sistemas modernos de protección sísmica en edificaciones	22
3.1 Sistemas pasivos de protección sísmica.....	24
3.1.1 Disipadores de energía.....	25
3.1.1.1 Disipadores Histeréticos	29
3.1.1.2 Disipadores Viscoelásticos	33
3.1.2 Aislamiento sísmico,.....	35
3.1.3 Oscilador resonante TMD.....	41
3.2 Sistemas activos de protección sísmica	43
3.3 Sistemas semi activos de protección sísmica.....	46
3.4 Sistemas híbridos de protección sísmica.....	48

4. Comportamiento y desempeño sísmico de las edificaciones que implementan sistemas de protección..... 51

5. Ejemplo de aplicaciones de sistemas de protección en Colombia..... 54

6. Sistemas de protección sísmica recomendados para las edificaciones tipo en Bucaramanga .. 58

7. Conclusiones 62

Referencias Bibliográficas 64

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Número de casos de edificaciones con control de respuesta sísmica según la altura y la técnica de control de respuesta en Japón	18
Figura 2. Esquema Sistemas de Protección Sísmica	23
Figura 3. Esquema mecanismo de operación de sistemas pasivos	25
Figura 4. Edificio con disipación de energía y sin disipación de energía	27
Figura 5. Esquema diversos tipos de sistemas de disipación de energía	28
Figura 6. Torre Titanium-Chile y su disipador de energía	29
Figura 7. Disipadores por fluencia de Metales ADAS	30
Figura 8. Ski Dome (Japón)	31
Figura 9. Hotel Atami Korakuen en Takenaka, Japón	32
Figura 10. Disipador por fricción y su respuesta histerética	32
Figura 11. Dispositivo de disipación Viscoelástico	34
Figura 12. Edificio Gentile Fermi Italia a) vista general b) detalle del dispositivo	34
Figura 13 Petrona Towers (Malasia).....	35
Figura 14 Edificio Amura.	37
Figura 15. Detalle de un aislador NRB.....	38
Figura 16. Aisladores con núcleo de plomo	39
Figura 17. Aisladores de alta disipación de energía HDR	39

Figura 18. Aisladores Friccionales	40
Figura 19 Aislador Péndulo deslizante de fricción	41
Figura 20 Edificio Cerro Colorado en Chile.....	43
Figura 21 Esquema de funcionamiento de un sistema de control activo	43
Figura 22. Esquema de estructura con sistema de control activo	44
Figura 23. Edificio con control mediante AMD	45
Figura 24 Kyobashi seiwa building Japan implementando sistema AMD	45
Figura 25. Comportamiento de un Fluido Magnetoreológico en ausencia y presencia de un campo magnético respectivamente	47
Figura 26. Estructura de un sistema de protección Híbrido.....	49
Figura 27 Ejemplo aplicación sistema Híbrido Edificio Shinjuka Tower Japón	50
Figura 28 Edificio de acero con riostra de pandeo restringido. Foto cortesía del profesor Mamoru Iwata, Universidad de Kanagawa, Japón	52
Figura 29. Hospital El Tunal Bogotá	55
Figura 30. Ubicación del aislador	56
Figura 31. Edificio Belmonte en Cali	56
Figura 32. Vista noroccidental del bloque K2	58
Figura 33 Esquema de cimentación bloque occidental, bloque oriental	58

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Aspectos deseables para el uso de dispositivos de control pasivo de las prácticas de diseño y construcción Colombianas actuales	59

Resumen

Título: Sistemas Modernos De Protección Sísmica En Edificaciones *

Autor: Lorendys Lucia Laverde Laverde **

Palabras Claves: Protección sísmica, disipadores de energía, vulnerabilidad, aisladores.

Descripción

Colombia es un país donde gran parte de su población vive en zonas de amenaza sísmica alta, sin embargo, el uso de tecnologías de control sísmico no se ven implementados en la construcción de sus edificaciones, en los últimos años se han propuesto diferentes alternativas de protección sísmica a nivel mundial siendo Japón y Estados Unidos los países mejor preparados en estos sistemas de protección de edificaciones (SIRVE, 2011). El uso de sistemas de control sísmico para el diseño sismorresistente ha tenido un crecimiento progresivo; con el fin de evitar daños estructurales producidos por los sismos y reducir el número de pérdidas humanas, se ve la necesidad de implementar nuevas tendencias en protección sísmica entre ellas los sistemas de control activo, pasivo, híbrido y semi activo (Silva, 2011).

Este trabajo tiene como finalidad identificar los sistemas modernos de protección sísmica y evidenciar el buen comportamiento y desempeño sísmico de las edificaciones que implementan estos sistemas de protección además de proponer que sistemas de protección sísmica podría ser más adecuados para las edificaciones tipo en la ciudad de Bucaramanga. Se presentan algunos ejemplos de los tipos de dispositivos comerciales más usados en el mundo para el control de respuesta sísmica de edificaciones.

* Monografía

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánica Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes

Abstract

Title: Modern systems of seismic protection in buildings*

Authors: Lorendys Lucia Laverde Laverde**

Keywords: Seismic Protection, Energy Dissipater, Vulnerability, Isolators.

Description

Colombia is a country where a large part of its population live in areas of high seismic threat. However, use of seismic control technologies is not implemented in the construction of buildings. Different alternatives of seismic protection have been proposed at global level with Japan and the United States being the countries best prepared in these systems for protection of buildings. The use of seismic control systems for the seismic resistant design has progressively grown. In order to avoid structural damage caused by earthquakes and reduce the number of human losses, it is necessary to implement new trends in seismic protection including active, passive, hybrid and semi active control systems. Colombia is a country where a large part of its population live in areas of high seismic threat. However, use of seismic control technologies is not implemented in the construction of buildings

This work aims to identify modern systems of seismic protection and to demonstrate the good behavior and seismic performance of buildings that implement these protection systems. Besides proposing which systems of seismic protection could be more suitable for the type constructions in Bucaramanga. Some examples of the types of commercial devices most used in the world for the control of seismic response of buildings are presented.

* Monografía

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánica. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes

Introducción

En Colombia el uso de los diferentes sistemas de protección sísmica ha sido poco empleado debido al escaso conocimiento que se tiene respecto al tema, además de la idea generalizada de que su análisis, diseño e implementación es excesivamente costosa (Duque & Oviedo, 2010) (Pinzón Mayorga & Martínez Lopez, 2014). La alta demanda de vivienda en Bucaramanga y el escaso suelo, generó que la solución fuese edificaciones en altura para satisfacer esa necesidad. Hoy día dominan las edificaciones mayores a 15 plantas; lo anterior, sumado a la alta amenaza sísmica de la ciudad, hace pensar en la necesidad de orientar las soluciones hacia estructuras con sistemas de protección sísmica (Building seismic safety council (BSSC), 2003). Por esta razón es importante promover el uso de tecnologías de exitosa aplicación en entornos internacionales y reconocidas por la comunidad profesional, orientadas a mejorar la respuesta sísmica de las estructuras más allá de los requisitos mínimos de la normativa nacional vigente (Martínez, 1993).

Se deben considerar alternativas de protección sísmica, que tengan un buen desempeño sísmico y que su implementación sea técnica y económicamente viable para las ciudades de Colombia, a partir de las investigaciones y análisis de tecnologías que están siendo utilizadas en otros países (Mayorga Vela, 2011), tal es el caso de los dispositivos disipadores de energía, elementos que hacen parte del sistema de resistencia sísmica de las estructuras, unas veces desde su concepción y otras como parte de una solución de reforzamiento estructural. En esta última parte, al incluir soluciones que consideren los dispositivos disipadores de energía, se puede disminuir tanto el tiempo de ejecución de las obras, como los procedimientos invasivos y alteraciones en la

funcionalidad de la estructura. Así mismo, un disipador podría ser una solución económicamente viable debido a que no se requieren materiales de difícil adquisición ni grandes tecnologías de construcción o de montaje.

Estos sistemas de control de respuesta sísmica han sido objeto de algunas investigaciones en el ámbito internacional (Cancelado, 2012) con el fin de minimizar la amenaza a la vida de las personas, incrementar el desempeño de las estructuras y mejorar la capacidad de las instalaciones esenciales para que funcione luego de un sismo (Salina Baldizón, Torres Espinoza, & Vallejos Sobalvar, 2014). En este documento se presentan los sistemas modernos de protección sísmica utilizados a nivel mundial con el fin de proponer una alternativa de disipación de energía eficiente para resolver los problemas estructurales que deben enfrentar las edificaciones en el momento de un sismo de gran magnitud en la ciudad de Bucaramanga.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Identificar los sistemas de protección sísmica utilizados en la actualidad para mejorar el comportamiento sísmico de las edificaciones.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar en la literatura científica los principales sistemas de protección sísmica para edificaciones
- Describir la contribución a la resistencia sísmica de los sistemas de protección según los casos reportados en la literatura científica analizada.
- Proponer los sistemas de protección sísmica que podrían ser más adecuados para las edificaciones tipo en Bucaramanga.

2. Protección sísmica en edificaciones

2.1 Planteamiento del problema

En los últimos años, la ingeniería sísmica en todo el mundo ha enfocado muchos de sus esfuerzos en investigar e implementar modernos métodos de protección sísmica para permitir a las edificaciones resistir sismos de diferente magnitud con el fin de proteger vidas humanas y evitar el colapso de las estructuras (Ramallo, Johnson, & Specer, 2002) (Zhang & Phillips, 2016)

Encontrar estas nuevas alternativas de protección sísmica que sean capaces de disipar energía ante los eventos sísmicos permitiendo minimizar el riesgo de pérdidas humanas es la idea principal para dar solución a las diferentes preguntas como ¿Qué sistema de disipación se puede

implementar en una estructura a fin de reducir el impacto sísmico en la edificación? (Jácomo Azabache & Quispe Siccha, 2014) (Kitamura, Kitamura, Ito, & Sakamoto, 2004). Es decir, que no presenten muchos daños que provoque el colapso de la edificación ni se vean afectados sus elementos no estructurales y contenidos.

Actualmente existen sistemas modernos de protección sísmica basados en disipadores de energía (Robinson, 1998) (Martínez, 1993), esto se ha ido implementando en diversos códigos de diferentes países (INN, 2003) (Normas Tecnicas Complementarias, 2004). A nivel nacional se ha implementado la Norma Sismo Resistente NSR-10 (AIS, Marzo de 2010) que reglamenta el diseño y construcción de edificaciones en Colombia. Entre las soluciones se comentan algunos sistemas actuales de control estructural, estos sistemas de protección son métodos alternos para disminuir las solicitaciones (fuerzas internas) de una estructura, mejorando sus propiedades dinámicas con base en esquemas de control pasivo, activo, semiactivos e híbrido (Thomson P. , 2011) (Spencer & Nagarajaiah, 2003).

Debido a la alta vulnerabilidad sísmica que presenta Bucaramanga, esta monografía está orientada al estudio de sistemas de protección sísmica de edificaciones con el fin de poder conocer las ventajas de estas adiciones a los sistemas estructurales para compararlos con los sistemas estructurales convencionales.

2.2 Criterios para implementar sistemas de protección sísmica en edificaciones

Se puede decir que no existe un patrón o forma de edificio para la aplicación del control de respuesta sísmica, su utilización ha sido indiscriminada y masiva en estructuras con diferencias significativas en planta, número de pisos, sistema estructural y otros, además de rehabilitaciones

sísmicas (Duque & Oviedo, 2010), la decisión de utilizar uno u otro dispositivo, o bien de elegir una solución convencional, se debe basar tanto en un análisis de costos totales (que incluya costos de mantenimiento, reposición, daños estructurales y no estructurales, pérdida de funcionalidad, etc.) como en un análisis de la respuesta de la estructura ante las excitaciones esperadas durante su vida útil, que pueden asociarse a diferentes estados límite (de servicio o de capacidad última) (Ruiz Gómez S. E., 1998).

Los disipadores de energía se utilizan preferiblemente en estructuras que sean regulares, tanto en planta como en elevación (Ruiz Gómez S. E., 2003). La selección de esta técnica de control de respuesta sísmica para una edificación está relacionada con factores como altura, uso de la edificación, sistema estructural, propósito de diseño (rehabilitación, proyecto nuevo), relación costo -beneficio, planeamiento arquitectónico, etc (Oviedo & Duque, 2009). La distribución de disipadores en la planta de una estructura, debe ser tal que no se provoquen movimientos de torsión en ésta. Se deberán realizar revisiones (preliminar y final) sobre el diseño de los disipadores. Los diseños deben ser supervisados por una persona independiente (diferente de la que hizo el diseño), con experiencia sobre el tema (Limón & Ruiz, 1997), se deberán colocarse en lugares accesibles para su inspección, mantenimiento y, en su caso, reemplazo, aunque la probabilidad de sustitución es muy baja, ya que si se diseñan adecuadamente, los disipadores pueden soportar un número de ciclos suficientemente alto, para no tener que ser reemplazados durante la vida útil de la estructura. Los disipadores deben colocarse de tal manera que, en lo posible, no rompan con la estética ni la funcionalidad del edificio. Se debe inspeccionar regularmente la obra, particularmente después de la ocurrencia de sismos intensos, y llevar un control sobre el desempeño del edificio y los dispositivos.

Los disipadores son para edificios flexibles que se van a mover bastante, comúnmente por encima de los 10 pisos, controlando su desplazamiento entre un nivel inferior y otro superior mediante unas diagonales y dentro de unos amortiguadores que van a absorber la energía sísmica. Se usan diagonales metálicas por lo general, y en los extremos de éstas se suele insertar y colocar un disipador que va a funcionar igual que un amortiguador de un carro: absorberá la energía y provocará que el edificio se mueva menos, causando pocos daños en la parte interior (Acuña Vigil, 2015), otro aspecto importante, es el precio de este sistema, que sólo puede representar entre el 2% y 3% del costo de un proyecto convencional (aunque se puede reducir a cero).

Por otro lado, los criterios para implementar aisladores de base, se determina a partir de un análisis interdisciplinario que considere: la geología local (fallas locales, estratos, condiciones de suelo, efecto doppler, etc.), amenaza sísmica (sismos presentados, período, frecuencia, severidad, nivel de aceleraciones, etc.), tipo de daño que se considera (menor o reparable), propios de la estructura (forma estructural, regularidad vertical y horizontal, materiales, uso de la estructura, características, etc). El aislamiento sísmico no es sistema que se pueda implementar en todos los casos, por lo tanto no es general, presenta limitaciones en ciertos rangos de masas y secciones de aisladores, el ahorro de los aisladores no se mide en el momento de la construcción, sino después de un sismo (Carrascal Sandoval, 2013).

Si bien es cierto que en promedio los aisladores sísmicos y los disipadores de energía han sido aplicados en edificios por debajo y por encima de los 10 pisos, existe otra solución que es usada para edificios extremadamente altos (Carrascal Sandoval, 2013). En las torres que tienen entre 50 y 100 pisos se utilizan otros tipos de elementos colocando una gran masa en su tercio superior. Esa gran masa, que en algunos casos pesa cientos de toneladas, recibe una señal electrónica de un dispositivo a nivel del suelo de tal modo que cuando se inicia el movimiento telúrico envía un

impulso a la masa y ésta comienza a moverse de forma contraria al desplazamiento del terreno, compensado así al edificio y logrando mantenerlo más quieto y menos esforzado (Roffel & Narashimhan, 2016). Esos sistemas son bastante caros, y que tienen un peso equivalente entre 5% y 10% del edificio y amortiguadores visco elásticos en la base de dicho piso, los cuales incrementan el amortiguamiento de la estructura reduciendo las aceleraciones, desplazamientos y esfuerzos en las estructuras hasta en 40%, disminuyendo los daños en la estructura (Roffel, Narasimhan, & Haskett, 2013) (Gomez, Marulanda, & Thomson, 2007).

Implementación de sistemas de protección sísmica en Japón.

En Japón, su alta amenaza sísmica ha generado la necesidad de implementar estas metodologías. Allí se han proyectado muchos edificios con estos dispositivos, cubriendo la mayoría de las técnicas de control disponibles y demostrando, hasta la fecha, una respuesta satisfactoria ante los eventos sísmicos (Higashino & Okamoto, 2006).

Los dispositivos de control de respuesta sísmica de mayor uso en el Japón son los HD (Disipadores Histeréticos) y VD (Disipadores viscosos), como se ilustra a continuación (Figura 1)

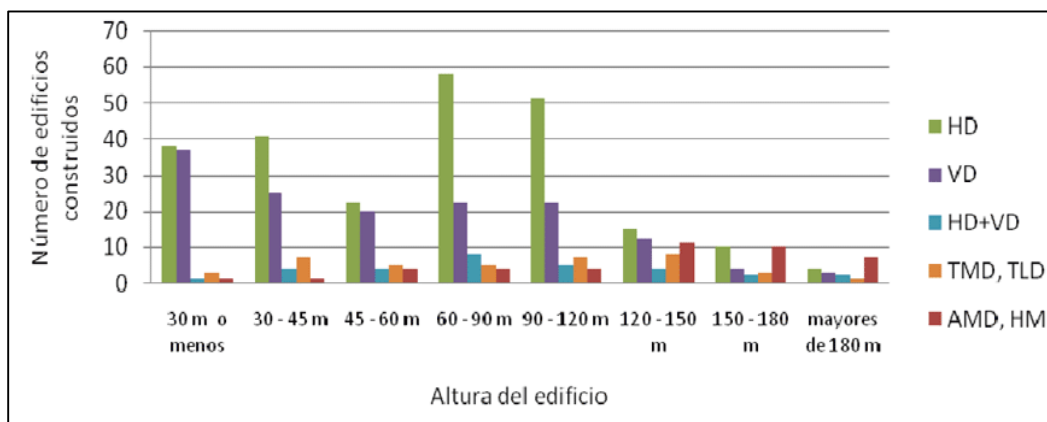


Figura 1. Número de casos de edificaciones con control de respuesta sísmica según la altura y la técnica de control de respuesta en Japón (Kitamura, Kitamura, Ito, & Sakamoto, 2004)

Los dispositivos de tipo AMD (amortiguador de masa activa), HMD (amortiguador de masa híbrido), TMD (amortiguador de masa sintonizada) y TLD (amortiguador de líquido sintonizado) se han utilizado con mayor frecuencia en edificaciones altas (Kitamura, Kitamura, Ito, & Sakamoto, 2004). Las edificaciones destinadas a hotelería, vivienda y oficinas son las clases de edificios en los cuales la aplicación de dispositivos ha sido mayor, con rangos de altura entre 30 m y 250 m.

Las alturas con mayor número de casos de utilización de HD y VD están entre 60 m y 120 m, correspondiente a edificaciones de 20 a 40 pisos. Estos dos tipos de sistemas cubren el 75% del total de las aplicaciones en Japón. Para edificaciones mayores de 120 m, los dispositivos de tipo AMD y HMD han sido más utilizados (Duque & Oviedo, 2010).

La técnica de aislamiento en la base comenzó a desarrollarse con fuerza en los años ochenta. Después del sismo de Kobe (1995), el número de edificios aislados en la base aumentó notablemente, de 10 edificios por año se llegaron a construir más de 150 en un año (Nakashima, Pan, Zamfirescu, & Weitzmann, 2004). El aislamiento en la base pasó de una etapa de experimentación a la de utilización masiva, donde el principal uso era en edificios de hasta 8 pisos.

En cuanto a métodos de diseño estructural, el procedimiento general aplicable a cualquier edificación se divide en dos etapas: diseño y revisión. En la primera etapa se realiza un análisis elástico de la estructura y se procede a hacer el diseño por el método de esfuerzos de trabajo, se verifican derivas, excentricidades y distribución de rigidez. En la segunda etapa, que se considera más como un proceso de revisión que de diseño, se asegura la capacidad última de carga horizontal que tiene la estructura, se verifican derivas y se garantiza un buen balance de rigidez y excentricidades mediante métodos de análisis no lineales, tales como el pushover, análisis límite o análisis contra el tiempo. Según la altura de la edificación, la segunda etapa del procedimiento

de diseño estructural se hace obligatoria la implementación de sistemas de protección sísmica (Japan Structural Engineer and Consultant Association (JSCA), 2002).

Implementación de sistemas de protección sísmica Estados Unidos

En los Estados Unidos, el desarrollo de dispositivos, su estudio e implementación en estructuras también ha crecido a buenos pasos (Duque & Oviedo, 2010); a pesar de eso, no se compara con los avances que ha venido dando Japón. Estados Unidos ha estado más interesado en la técnica de aislamiento de base, ya que en definitiva es la que proporciona mayor reducción de demanda sísmica para edificios de baja y mediana altura (Bonelli, Retamales, Boroschek, & Carvallo, 2015). Por otro lado, también ha incursionado en el estudio de las técnicas de control pasivo atendiendo la necesidad de las edificaciones altas donde el método de aislamiento sísmico no es muy eficiente (Spencer & Nagarajaiah, 2003).

En Estados Unidos, el diseño de edificaciones con control de respuesta sísmica está regido por las disposiciones recomendadas en los diferentes códigos para el diseño de edificios nuevos y otras estructuras (FEMA, 2012), (Building seismic safety council (BSSC), 2003) (ICC IBC, 2015).

La Agencia Federal de Gestión de Emergencias (FEMA) tiene especificaciones propias y diferentes si el edificio se diseña con aislamiento en la base o con un sistema de amortiguadores o disipadores de energía. Se especifica que cuando un edificio está aislado en su base o tiene un sistema de amortiguadores o disipadores de energía se debe realizar una revisión, tanto del diseño del sistema de aislamiento sísmico o del sistema de disipación de energía como de los dispositivos en sí, por un equipo independiente de los diseñadores originales de la estructura. La revisión debe incluir la verificación del criterio para la definición de las características sísmicas del sitio y del desarrollo del espectro y las historias contra el tiempo del movimiento del terreno (FEMA, 2012).

2.3 Objetivos de la protección sísmica de edificaciones

Existen diversas formas de proteger las edificaciones durante un sismo, como ingenieros civiles es un deber conocer y entender estos métodos al menos de manera general. Los sistemas de protección sísmica tienen un papel importante en la actualidad, la utilización de dispositivos avanzados de protección tienen como propósito reducir y controlar el daño estructural evitando el colapso y asegurar la integridad y servicio de la estructura justo después de un sismo (Méndez, 2013) (Higashino & Okamoto, 2006) (Lüders, 2013)

El uso de estos sistemas de protección no sólo garantiza la seguridad de las estructuras en el caso de que ocurra un sismo, también permite plantear estructuras más esbeltas y significativamente más económicas (Cahís Carola, 2000) (Stuardi J. E., 2004). Otros métodos de protección más convencionales, como el reforzamiento, conllevan a estructuras más pesadas y costosas. Además, los sistemas de protección sísmica aseguran la continuidad de la condición de servicio de la estructura inmediatamente después de un sismo, permitiendo el paso de los servicios de emergencia, lo cual es esencial para garantizar la seguridad de la población (Ramallo, Johnson, & Specer, 2002). Estas técnicas complementan las tradicionales de diseño al introducir elementos estructurales adicionales que deben disipar la mayor parte de la energía introducida por los sismos. Estos elementos adicionales se colocan estratégicamente en la estructura principal para que se dé el mayor aprovechamiento de su capacidad de disipación de energía y para que se localice el daño estructural (Bonelli, Retamales, Boroschek, & Carvallo, 2015). De esta manera, después de un evento sísmico fuerte, estos elementos fácilmente se reemplazan sin poner en riesgo la estabilidad y la funcionalidad de la edificación. (Oviedo & Duque, 2009) Se hace una descripción general de las técnicas de control de respuesta sísmica y muestran las formas de clasificarse, entre las cuales

se mencionan las técnicas de control pasivo, las técnicas de control activo e híbrido y las técnicas de control semiactivos.

3. Sistemas modernos de protección sísmica en edificaciones

Los sistemas modernos de protección sísmica comprenden desde dispositivos sencillos como los disipadores de energía, hasta avanzados sistemas de protección activos que demandan gran cantidad de energía para su funcionamiento y contrarrestan directamente los efectos del sismo mediante actuadores (Rodas, 2011) (SIRVE, Protección Sísmica de Estructuras- Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía, 2011). Una amplia gama de estrategias consiste en la incorporación de elementos externos a las estructuras con el fin de mitigar su respuesta dinámica, esto es denominado control estructural (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009), estos sistemas de control o protección sísmica se dividen en cuatro categorías: Sistemas de protección pasivos, activos, híbridos y semi-activos. En la figura 2 se puede observar una clasificación de los mismos.

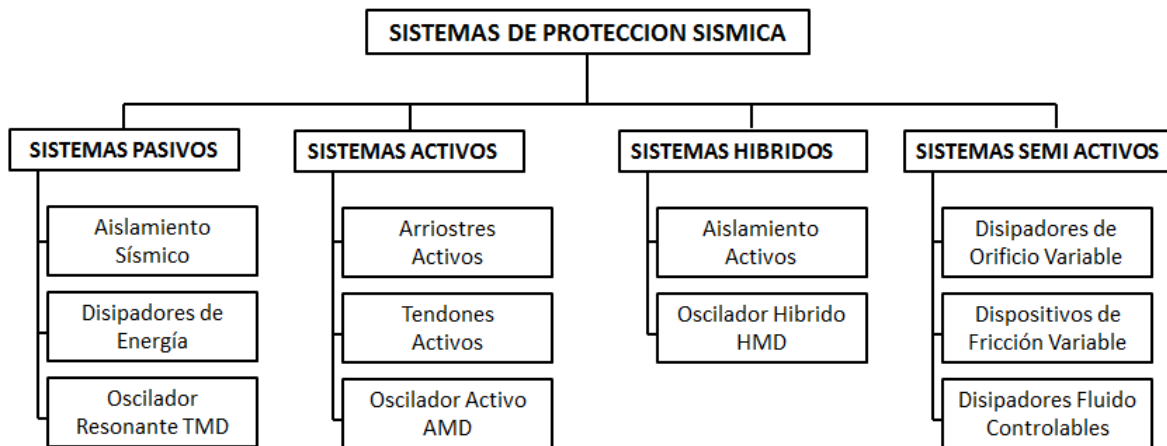


Figura 2. Esquema Sistemas de Protección Sísmica (Rodas, 2011)

Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica y a diferencia del resto de sistemas no precisan de aporte energético para funcionar. Los sistemas activos, semi activos e híbridos están formados por actuadores de fuerza y/o elementos pasivos, controlador a tiempo real y dispositivos de sensores instalados en las estructuras (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009).

Los sistemas pasivos se clasifican en sistemas de aislamiento de base, de disipación de energía y en osciladores resonantes. Los aisladores de base, situados sobre la cimentación y soportando al edificio, desacoplan parcialmente al edificio del suelo, disminuyendo la energía de entrada y por consiguiente su respuesta estructural. Los disipadores de energía no alteran la energía de entrada, que depende básicamente del período fundamental y de la masa del edificio, manifestando su eficiencia maximizando la energía disipada y disminuyendo la respuesta estructural. Las propiedades más valiosas de los sistemas pasivos son su robustez, no dependen de fuentes de energía, son mecánicamente simples y su costo es competitivo (Gomez, Marulanda, & Thomson, 2007). Los sistemas activos contrarrestan directamente los efectos del sismo mediante actuadores.

La gran demanda de energía que comporta su actuación ante un sismo severo y la complejidad de los algoritmos de control los convierte en sistemas poco robustos. Los sistemas híbridos y semiactivos nacen ante la necesidad de respuesta en una banda amplia de frecuencias y de menor consumo energético (Bozzo L. , 2002). Los sistemas híbridos son muy similares a los sistemas activos, sin embargo en ellos intervienen elementos pasivos que permiten reducir el consumo energético del sistema ante un sismo. Los sistemas semiactivos emplean dispositivos de control pasivo, sin consumo energético, cuyas características resistentes permiten ser modificadas y controladas a tiempo real mediante actuadores de bajo consumo a través de sistemas de control parecidos a los empleados en los sistemas activos e híbridos.

3.1 Sistemas pasivos de protección sísmica

Los sistemas pasivos son los dispositivos de protección sísmica más comúnmente utilizados en la actualidad, a esta categoría corresponden los sistemas de aislación sísmica los cuales aíslan la estructura de la interacción directa con el suelo, de esta manera los aisladores logran disminuir la energía que entra a la edificación como también su respuesta espectral (Cano Lagos & Zumaeta Escobedo, 2012). Otro dispositivo usado son disipadores de energía los cuales actúan como respuesta del sismo dentro de la estructura, absorbiendo la energía proveniente y disminuyendo la respuesta estructural de la edificación, y por último se tienen los osciladores resonantes TMD (tuned mass damper) (Roffel, Narasimhan, & Haskett, 2013), que normalmente es colocado en la parte superior del edificio con la finalidad de absorción de la energía cinética del edificio. Cada sistema emplea diferentes enfoques para el control de la respuesta estructural y son más efectivos para diferentes tipos de estructuras.

Los sistemas pasivos permiten reducir la respuesta dinámica de las estructuras a través de sistemas mecánicos especialmente diseñados para disipar energía por medio de calor. Estos sistemas de control emplean dispositivos relativamente simples que reducen la respuesta dinámica por medios mecánicos como se muestra en la figura 3, son elementos de carácter reactivo cuya respuesta no es controlable y dependen únicamente de las condiciones de trabajo o de contorno en que se encuentran (Rodas, 2011), poseen una alta confiabilidad ya que no requieren ningún tipo de energía para funcionar y por lo tanto no corren riesgo de quedar fuera de servicio bajo una situación de emergencia.

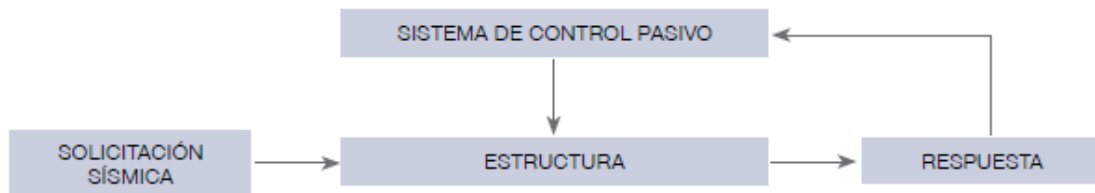


Figura 3. Esquema mecanismo de operación de sistemas pasivos (SIRVE, 2011)

3.1.1 Disipadores de energía. Los disipadores de energía son dispositivos de protección sísmica desarrollados para mejorar el comportamiento de los edificios ante un terremoto, y por lo tanto otorgarle mayor seguridad a sus ocupantes y los contenidos del inmueble. Este sistema es usado a nivel mundial como elemento de protección sísmica (Cahís, 2000), su función principal es mejorar el desempeño sísmico resistente de las edificaciones, absorbiendo la energía sísmica que ingresa al edificio a través de dispositivos de disipación de energía en zonas focalizadas reduciendo entre un 30% y un 50% las vibraciones, aumentando el amortiguamiento de la estructura (Carranza Sandoval, 2013).

Los disipadores tienen la particularidad de que no hacen resistencia hacia el movimiento de la construcción sino que tratan de absorber la energía a través del movimiento que el edificio tiende a tener, pero los esfuerzos máximos que se producen son cuando el edificio no está en movimiento. Sin embargo, en la máxima deformación del edificio, estos elementos trabajan en su mínimo esfuerzo. Por eso durante sismos severos esto es muy conveniente porque un edificio experimenta la reacción de un disipador más fuerte cuando no está deformado, y cuando esto ocurre, tienden a lograr un equilibrio bastante compensando u atenuado (Carrascal Sandoval, 2013). La instalación de los disipadores o amortiguadores es relativamente sencilla, usualmente se usan los nudos de los pórticos para fijar los disipadores (Bozzo, Ordoñez, & Ordoñez, 2001).

Ventajas de los disipadores de energía:

- Disminuye la aceleración en el edificio
- Disminuye el desplazamiento de entrepiso
- Disminuye las fuerzas cortantes en los elementos verticales (columnas)
- Aumenta el amortiguamiento viscoso de la estructura (20 – 40%).
- Baja vibración

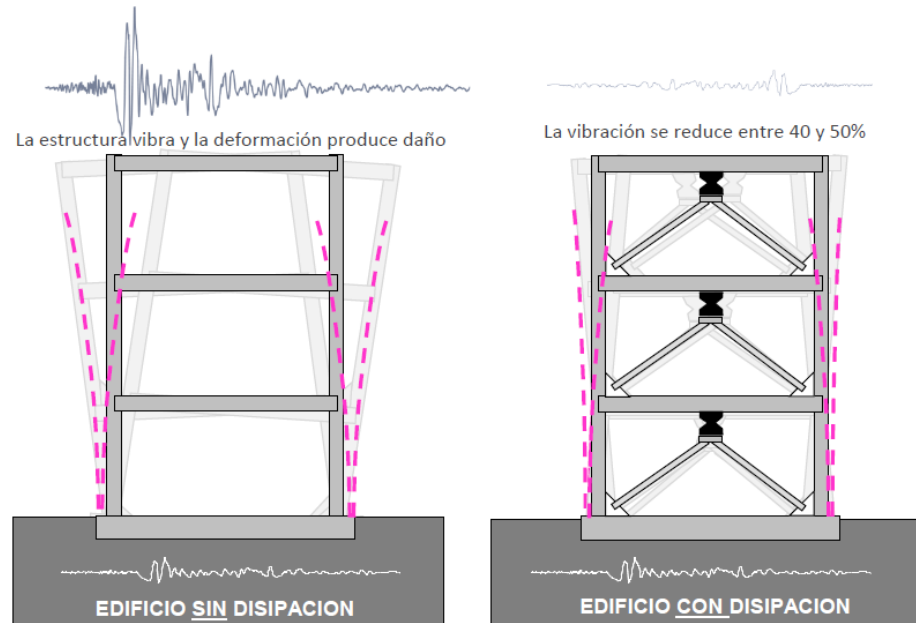


Figura 4. Edificio con disipación de energía y sin disipación de energía (Technologies, 2013)

Existen diversos tipos de disipación de energía como se muestra en la figura 5, estos disipadores de energía se pueden clasificar en disipadores histeréticos y viscoelásticos (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009). Los dispositivos histeréticos dependen básicamente del desplazamiento y se basan en: i) La plastificación de metales por flexión, cortante o extrusión y ii) Fricción entre superficies (Cahís Carola, 2000). Los disipadores viscoelásticos dependen fundamentalmente de la velocidad y se basan en:

- i) Sólidos viscoelásticos, ii) Fluidos viscoelásticos.

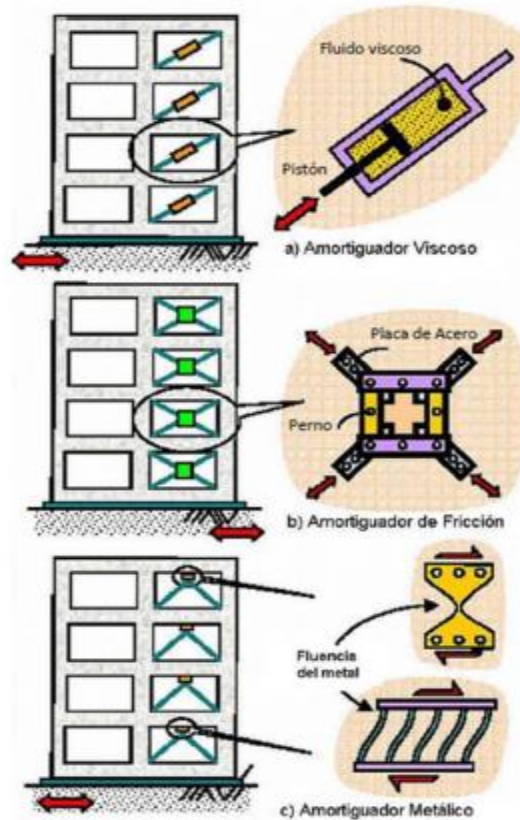


Figura 5. Esquema diversos tipos de sistemas de disipación de energía (Martínez, 2012)

Uno de los principales ejemplos de aplicación de disipadores de energía fue implementado en la torre Titanium- Chile (figura 6). Comprende dos volúmenes curvos con 52 pisos y 190 metros de altura que incluye disipadores de energía sísmica cada tres pisos el proyecto que contempló la incorporación de 45 disipadores metálicos en el edificio: 20 en la dirección longitudinal y 25 en la dirección transversal, los cuales producirán reducciones de hasta un 40% en las deformaciones dinámicas de la estructura.

Esta mega torre paso su prueba a pocos días de ser inaugurado y tuvo un excelente comportamiento el 27 de febrero del 2013 con el segundo sismo más fuerte en la historia de Chile, la cual demostró el avance alcanzado por la ingeniería nacional en tecnología sísmo resistente participando además de incentivar al mundo en la inversión e innovación de estos dispositivos.



Figura 6. Torre Titanium-Chile y su disipador de energía (SIRVE, 2011)

3.1.1.1 Disipadores Histeréticos Son aquellos dispositivos que inician la disipación de energía con el movimiento relativo de entrepiso. Esto se refleja como un incremento en la rigidez de la estructura modificando de esta manera el periodo de la misma (Cano Lagos & Zumaeta Escobedo, 2012). Estos dispositivos disipan energía a través de la deformación plástica de sus componentes o mediante la fricción entre superficies especialmente diseñadas para estos fines. Bajo esta clasificación se encuentran los dispositivos metálicos y los disipadores friccionantes (Oviedo & Duque, 2009).

a) Disipadores por plastificación de metales por flexión:

Estos dispositivos disipan energía por medio de la fluencia de metales sometidos a esfuerzos de flexión, corte, torsión, o una combinación de ellos, estos disipadores presentan, en general, un comportamiento predecible, estable, y confiable a largo plazo; además poseen buena resistencia ante factores ambientales y temperatura. La plastificación de metales en disipadores se puede producir a partir de esfuerzos estructurales o bien a partir del proceso de extrusión (Cahís Carola, 2000), cualquier esfuerzo sea de torsión, flexión, cortante o axial puede conducir a procesos de plastificación en metales. El acero ha sido sin duda el metal más empleado en disipadores. Uno

de los disipadores más conocidos y estudiados es el conocido con el nombre de ADAS (Added damping and stiffness) (Figura 7). Es un dispositivo formado por un conjunto de chapas en paralelo, de espesor constante y sección variable en X, tal que, frontalmente, es similar a dos trapecios unidos por la base menor

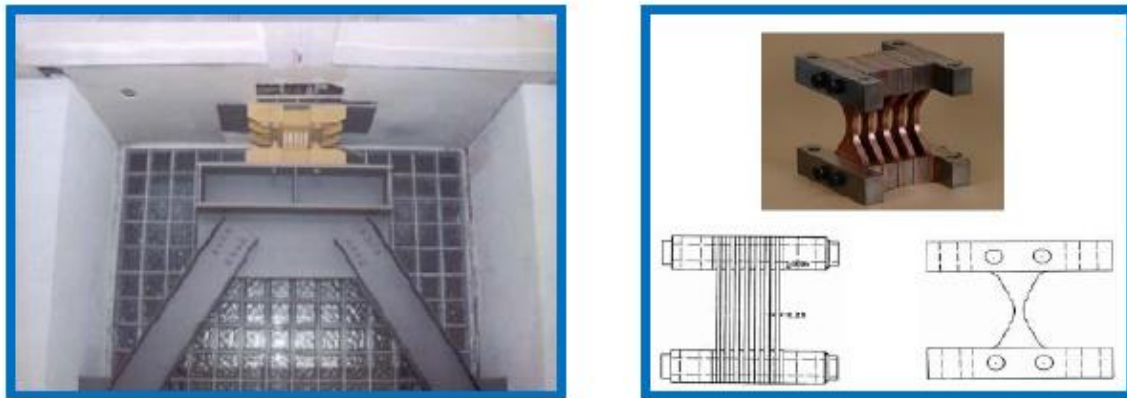


Figura 7. Disipadores por fluencia de Metales ADAS (Cano Lagos & Zumaeta Escobedo, 2012)

Estos disipadores cuentan con ciertas ventajas como comportamiento histeréticos estable, no depende de la temperatura ambiente, sus materiales y comportamiento son conocidos para los ingenieros, tiene comportamiento confiable durante largo plazo, pero al mismo tiempo su principal desventaja es que no puede ser ensayado antes de ser colocado ya que al enfocar la disipación de energía en las deformaciones, el dispositivo ingresa a un rango inelástico que va degenerándolo, por tal razón requiere mantenimiento o incluso remplazo total tras un sismo. (Cancelado, 2012) Las primeras aplicaciones de estos amortiguadores en estructuras civiles ocurrieron en Nueva Zelanda a finales de la década de los 70. Desde esa fecha se han instalado amortiguadores metálicos de fluencia en numerosas estructuras, incluyendo la estructura metálica del Ski-Dome en Chiba, Japón (figura 8).



Figura 8. Ski Dome (Japón) (Gómez, Marulanda, & Thomson, 2007)

b) Disipadores por fricción:

El principio básico de estos disipadores consiste en utilizar la deformación relativa entre dos puntos de una estructura para disipar energía a través de fricción, estos disipadores a fricción están diseñados para accionarse antes que los miembros estructurales alcancen estados plásticos. De esta forma el edificio es capaz de resistir un terremoto sin recibir un daño significativo a su estructura principal (Quaketek, 2017), operan con los principios de un amortiguador tipo Coulomb transformando la energía cinética en calor mediante la fricción.

Respecto a los aisladores de fricción, al amortiguamiento se produce debido a que la fuerza horizontal del sismo debe vencer primero la fricción estática y posteriormente la fricción dinámica. De acuerdo con (Cahís, 2000) las principales ventajas de estos aisladores son el bajo costo, la alta capacidad de carga vertical que pueden transmitir a la cimentación, la alta disipación de energía por ciclo, además no depende de la temperatura del ambiente, mientras que una desventaja notoria es la modelación de la fricción a lo largo del tiempo, hay desplazamientos permanentes si no actúa una fuerza restauradora. Un ejemplo de una edificación construida con el sistema de control de disipadores por fricción es el Hotel Atami Korakuen en Takenaka, Japón (figura 9).



Figura 9. Hotel Atami Korakuen en Takenaka, Japón (Bonilla Sosa, 2012)

Existen diversos dispositivos basados en la disipación por fricción (Pall & Marsh, 1982). Proponen un sistema que permite ser ubicado en la intersección de un arrostramiento en X (figura 10). Sus curvas histeréticas son prácticamente rectangulares con lo cual la energía disipada por ciclo es máxima para un determinado valor de la fuerza de deslizamiento. El mecanismo desliza ante una carga predeterminada, regulable a partir de la presión ejercida por pernos a través de una llave dinamométrica.

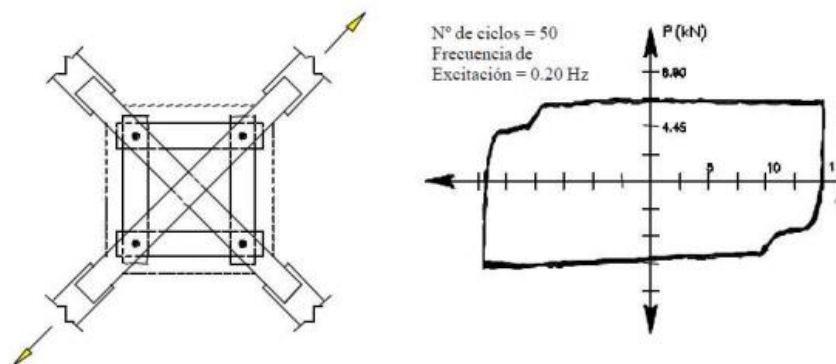


Figura 10. Disipador por fricción y su respuesta histerética (Bozzo & López Almansa, 2000)

3.1.1.2 Disipadores Viscoelásticos Estos dispositivos inician la disipación de energía con la velocidad relativa de entrepiso, no generan ningún efecto en la rigidez de la estructura por lo cual el periodo de la misma se mantiene intacto. Estos disipadores viscoelásticos han sido empleados con éxito, durante los últimos treinta años, para reducir la respuesta de edificios altos ante la acción del viento (Mahmoodi, Robertson, Yontar, Moy, & Feld, 1987). El principio básico del funcionamiento consiste en movilizar un elemento a través de un material viscoelástico. Esto genera fuerzas que se oponen al movimiento del elemento, de magnitud proporcional a la velocidad.

a) Disipadores sólidos Viscoelásticos:

Los disipadores sólidos viscoelásticos están formados con láminas metálicas unidas con capas finas de material viscoelástico como se muestra en la figura 11, y presentan unos ciclos histeréticos característicos elípticos. Su acción disipativa se basa en el aumento del amortiguamiento estructural, presentan algunas ventajas con relación a los dispositivos histeréticos (Stuardi J. E., 2004) (Rodas, 2011):

- No precisan de una fuerza umbral para disipar la energía
- No cambian significativamente los periodos de vibración, con lo cual resulta posible linealizar el comportamiento estructural y realizar una modelación sencilla.

De la misma manera, posee ciertas desventajas de su uso y aplicaciones tales como:

- La poca variación del periodo fundamental no evita el comportamiento resonante.
- Son sensibles a los cambios de temperatura, frecuencia y deformación, resultando necesario minimizar la influencia de estas variables en sus rangos de servicios en estructuras sismo resistente para que su comportamiento resulte previsible.

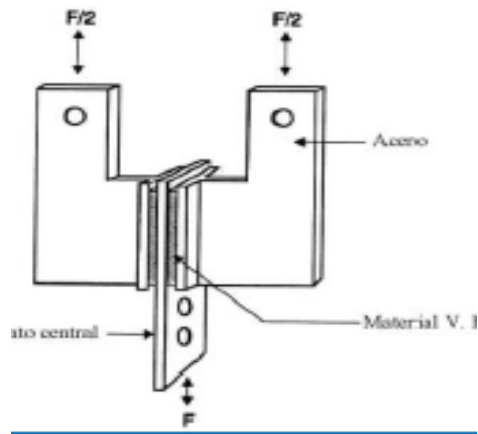


Figura 11. Dispositivo de disipación Viscoelástico (Cano Lagos & Zumaeta Escobedo, 2012)

Un ejemplo de aplicación de amortiguadores viscoelásticos corresponde a la solución adoptada por el edificio de tres pisos Gentile Fermi Italia (figura12), contiene 33 amortiguadores viscoelásticos con diferentes niveles de rigidez (Silva, 2011).

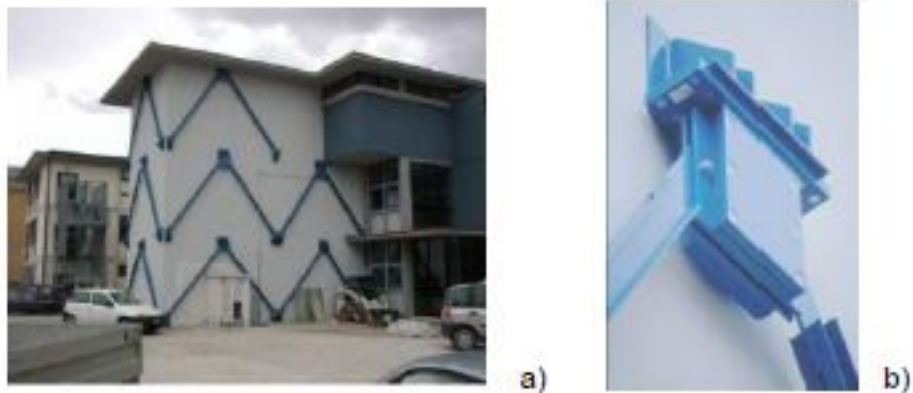


Figura 12. Edificio Gentile Fermi Italia a) vista general b) detalle del dispositivo (Silva, 2011)

b) Disipadores de fluidos viscosos

Los disipadores de fluido viscoso tienen la propiedad de reducir simultáneamente los esfuerzos y las deflexiones de la estructura. Esto es debido a que los disipadores de fluido varían su fuerza solamente con la velocidad, la cual provee una respuesta que es inherentemente fuera de fase con

los esfuerzos debido a la flexibilidad de la estructura. Estos disipadores de fluido viscoso son sencillamente mecanismos llenos de fluido el cual debe ser capaz de mantenerse en servicio durante grandes períodos de tiempo sin mantenimiento. Los requerimientos de los materiales son que deben ser resistentes a la corrosión, libre de esfuerzos de ruptura y alta resistencia al impacto. Esto es especialmente cierto para el cilindro del disipador, el cual debe resistir esfuerzos triaxiales.

Los amortiguadores de fluido viscoso han sido incorporados en un gran número de estructuras civiles incluyendo la torre de iluminación del Rich Stadium en Buffalo, New York, el puente Golden Gate, en San Francisco, California, y los 12 amortiguadores en el puente entre las torres de las Petrona Twin Towers, Malasia (figura 13) (Gómez, Marulanda, & Thomson, 2007).



Figura 13 Petrona Towers (Malasia) (Gomez, Marulanda, & Thomson, 2007)

3.1.2 Aislamiento sísmico, Estos sistema tienen como principio proteger las estructuras de los sismos, para ello desacoplan a la estructura del movimiento del suelo logrando incremento en

el periodo fundamental de vibraciones en todo el sistema incluyendo a los aisladores (Ramallo, Johnson, & Specer, 2002) (Bonilla Sosa, 2012). Estos aisladores se encuentran ubicados entre los cimientos y la superestructura, su presencia alarga el periodo fundamental, con lo cual desacopla de forma parcial la estructura del movimiento del terreno y limita la entrada de energía (James, 1990). El aislamiento de base es más recomendable en estructuras rígidas y que no tengan una elevada relación altura-anchura. Dado que pueden presentar grandes momentos de vuelco generando pérdida de equilibrio. Además al incrementar la altura, las ventajas obtenidas de las variaciones del periodo de vibración disminuyen.

Existen diversos tipos de sistemas de aislación basal (Nakashima, Pan, Zamfirescu, & Weitzmann, 2004), cada uno con sus características propias en cuanto a sus mecanismos de acción, materiales que lo componen, costos de implementación, estudios teóricos acerca de ellos y tipos de estructuras en donde es más conveniente usar. Todos ellos buscan el mismo fin, desacoplar la estructura del movimiento del suelo (Jácobo Azabache & Quispe Siccha, 2014):

- a) Aisladores elastoméricos
- b) Aisladores deslizantes
- a) Aisladores elastoméricos**

Básicamente un aislador elastomérico está formado por un conjunto de láminas planas de goma intercaladas con placas planas de acero adheridas a la goma, mediante un proceso en el cual se aplica al conjunto presión a temperatura muy alta, la goma se vulcaniza y el elemento adquiere su propiedad elástica (Chacón Sierra, 2009). Gracias a su composición, se logra obtener un gran desplazamiento horizontal y una alta rigidez vertical. Estos dispositivos son fabricados a medida para cada proyecto, de acuerdo a la rigidez horizontal, rigidez vertical, desplazamiento, capacidad de carga y capacidad de amortiguamiento requerida.

Un ejemplo de aplicación de este sistema de protección sísmica es el Edificio Amura ubicado en Chile (figura 14). El proyecto tiene 43 metros de largo y 26 metros de ancho aproximadamente. El edificio tiene una superficie total aproximada de 17.580 m² distribuida en 21 pisos y 1 subterráneo y llegando a una altura aproximada de 60 metros sobre el nivel de fundaciones. Está estructurado en base a muros de hormigón armado, en base a la aplicación de un sistema de aislamiento sísmico conformado por 41 aisladores elastoméricos.



Figura 14 Edificio Amura. (SIRVE, 2013)

Existen tres tipos de apoyos elastoméricos ampliamente usados: apoyos de caucho natural (NRB), apoyos de caucho con núcleo de plomo (LRB), y apoyos de caucho de alta disipación de energía (HDR) (Bonilla Sosa, 2012).

- Aisladores de caucho natural (NRB): Este tipo de aislador está formado por un conjunto de láminas planas de goma intercaladas por láminas de acero adheridas a la goma y cubierto en sus extremos superior e inferior por dos placas de anclajes las mismas que van conectadas con la superestructura en su parte superior y la cimentación en su parte inferior por medio de pernos de

anclaje (Mullo Pilamunga, 2014). Entre las láminas de acero, la lámina de goma puede deformarse en un plano horizontal y de esta manera permitir el desplazamiento horizontal de la estructura relativo al suelo (figura 15). Tiene un factor de amortiguamiento bajo en comparación con los otros.



Figura 15. Detalle de un aislador NRB (Oviedo & Duque, 2006)

- Aisladores con núcleo de plomo (LRB): Los aisladores con núcleo de plomo permiten aumentar el nivel de amortiguamiento del sistema hasta niveles cercanos al 25-30%. Al deformarse lateralmente el aislador durante la acción de un sismo, el núcleo de plomo fluye, incurriendo en deformaciones plásticas, y disipando energía en forma de calor. Al término de la acción sísmica, la goma del aislador retorna la estructura a su posición original, mientras el núcleo de plomo recristaliza (figura 16). De esta forma el sistema queda listo para un nuevo evento sísmico (Jácomo Azabache & Quispe Siccha, 2014). Este núcleo de plomo cumple dos funciones principales. La primera es la de aumentar el amortiguamiento del aislador, pues el plomo puede fluir bajo deformación lateral, y la segunda, es la de proveer mayor rigidez lateral a la estructura, tanto para cargas de servicio como para cargas eventuales como por ejemplo las provenientes de viento (Chacón Sierra, 2009).

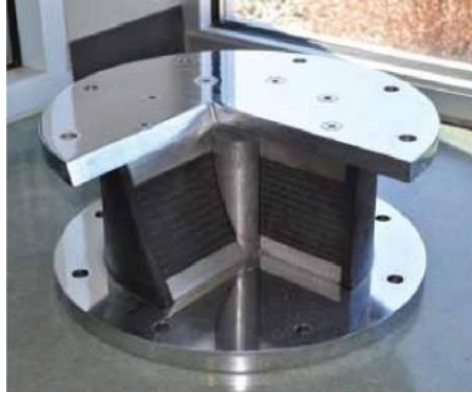


Figura 16. Aisladores con núcleo de plomo (SIRVE, 2011)

- Aisladores de alta disipación de energía (HDR): Al igual que los aisladores NRD van intercalando láminas de goma con delgadas capas de acero, pero en este caso se utiliza una goma que además de entregar la flexibilidad y rigidez requerida como se muestra en la figura 17, se diferencia de los elastómeros comunes porque posee como propiedad natural un alto amortiguamiento, logrado a través de agregar sustancias químicas al elastómero (Aguiar, Almazán, Dechent, & Soares, 2008).



Figura 17. Aisladores de alta disipación de energía HDR (Saldanha Santos, 2011)

b) Aisladores deslizantes

Estos aisladores a su vez se dividen en aisladores friccionales y aisladores de péndulo friccional FPS

a) Aisladores Friccionales: Los aisladores sísmicos friccionales, son los aisladores deslizantes más simples (Mullo Pilamunga, 2014), poseen una superficie de deslizamiento que permite el movimiento horizontal de la estructura independiente del suelo disipando la energía por medio de las fuerzas de rozamientos (figura 18). El coeficiente de fricción del aislador depende de variables tales como la temperatura de trabajo, la presión de contacto, la velocidad de movimiento, el estado de las superficies de contacto (limpieza, rugosidad, etc.) y el envejecimiento (Jácobo Azabache & Quispe Siccha, 2014). Los aisladores deslizantes planos generalmente deben ser acompañados por mecanismos o sistemas restitutivos (típicamente aisladores elastoméricos con o sin núcleo de plomo) que regresen la estructura a su posición original luego de un sismo. Adicionalmente, estos sistemas requieren de mayor mantención y cuidado, ya que cualquier modificación en las superficies deslizantes pueden resultar en un coeficiente de fricción distinto al de diseño.

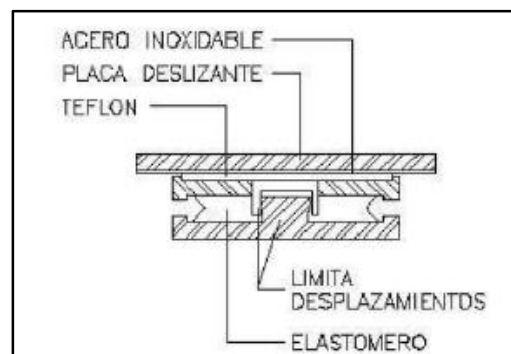


Figura 18. Aisladores Friccionales (Villareal Castro & Oviedo, 2009)

b) Aisladores péndulos friccionales (FPS): El apoyo FPS consiste de un deslizador (resbalador) articulado sobre una superficie de acero inoxidable esférica, el apoyo FPS es activado sólo cuando la fuerza de corte sobre la interface de aislación, debida a las fuerzas sísmicas, supera la fuerza de fricción estática (Aguiar, Almazán, Dechent, & Soares, 2008). Una vez en movimiento, el cursor articulado (deslizador) se mueve a lo largo de la superficie esférica cóncava, causando la elevación de la masa soportada, con movimientos equivalentes a los de un péndulo simple (figura 19). Funciona muy bien bajo cargas sísmicas severas y es muy efectivo reduciendo los grandes niveles de aceleración de la superestructura. Además, tienden a reducir la energía del sismo sobre un amplio rango de frecuencias.

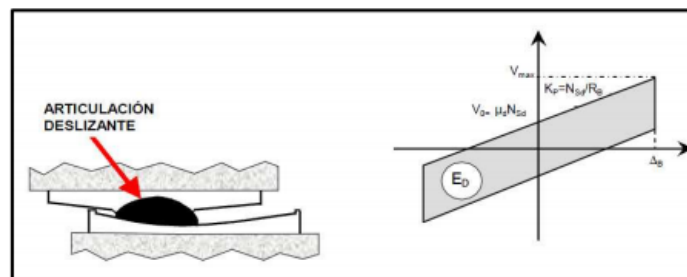


Figura 19 Aislador Péndulo deslizador de fricción (Aguiar, Bravo, & Romo, 2008).

3.1.3 Oscilador resonante TMD Un oscilador resonante TMD (tuned mass damper) es un sistema de un grado de libertad constituido por una masa conectada a la estructura mediante un resorte y un amortiguador (Gómez, Marulanda, & Thomson, 2007) (Roffel & Narashimhan, 2016), un elemento restitutivo y un mecanismo de disipación de energía, usualmente montado en la parte superior de la estructura. Para que el TMD pueda reducir la respuesta dinámica de una estructura debe existir una coincidencia entre las frecuencias naturales de vibración de la estructura y del oscilador resonante (Kwok, Hitchcock, & Burton, 2009). Los osciladores resonantes son

bastante efectivos en la reducción de las vibraciones producidas por el viento en edificios altos. También puede ser empleados para la reducción de la respuesta sísmica (Oviedo & Duque, 2006). Un ejemplo de aplicación de estos sistemas de protección es en el edificio Cerro Colorado en Chile (figura 20). Se trata de un edificio de 15 pisos y 3 subterráneos, con base a un sistema de disipación de energía con Amortiguadores de Masa Sintonizada (AMS). Son dos AMS de 115 toneladas cada uno. Son masas de concreto que se instalan en los techos de los edificios sobre apoyos elásticos y se sintonizan al movimiento del edificio. Son una especie de contrapeso que siempre se opone al movimiento del edificio reduciendo sus deformaciones y protegiendo de esa forma a la estructura y sus contenidos. Al instalarse en el techo del edificio, ofrecen la ventaja de no intervenir la arquitectura del edificio; y generan reducciones entre un 25% y 35% en las deformaciones de la estructura.



Figura 20. Edificio Cerro Colorado en Chile (SIRVE, 2011)

3.2 Sistemas activos de protección sísmica

Los sistemas de protección activos son sistemas complejos que comprende un conjunto de sensores, controladores y procesadores de información en tiempo real que contrarrestan directamente los efectos de sismo como se muestra en la figura 21 (Silva, 2011) (Boza Farfán & Galán Tirapo, 2013), estos sensores están situados en la propia estructura empleados para medir variables correspondientes a la excitación externa, o variables de la respuesta estructural, o de ambos tipos. Normalmente consisten en actuadores que imparten una fuerza o movimiento a la estructura, en dirección opuesta a la vibración, monitoreando la respuesta sísmica de la estructura en tiempo real, detectando movimientos y aplicando las fuerzas necesarias para contrarrestar estos efectos sísmicos (SIRVE, 2011).

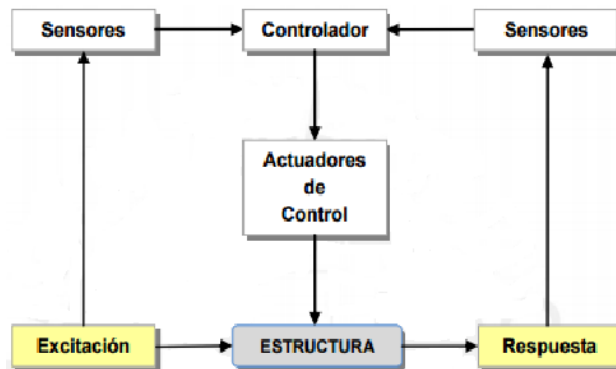


Figura 21 Esquema de funcionamiento de un sistema de control activo (Cahís, 2000)

Una característica esencial de los sistemas de control activo es que requieren una fuente externa de energía para su funcionamiento y, por lo tanto, son vulnerables a cortes en el flujo eléctrico, lo que es altamente probable durante sismos. Estos sistemas pueden mejorar la respuesta dinámica de una estructura, además de presentar una mayor efectividad en el control de respuesta estructural

a comparación de los sistemas pasivos, pero una de sus grandes desventajas es que también lo pueden empeorar en el sentido de que se pueden volver inestables e introducir energía cinética adicional al sistema y presentan un elevado costo de mantenimiento. Otras limitaciones del control activo es la dificultad de obtener un modelo adecuado de la estructura para el diseño del controlador y la dificultad en la medición de desplazamientos y velocidades de la estructura (Gomez, Marulanda, & Thomson, 2007). No obstante, constituyen la mejor alternativa de protección sísmica de estructuras ya que permiten ir modificando la respuesta de los dispositivos en tiempo real, lo que implica un mejor comportamiento de la estructura durante el sismo (figura 22).

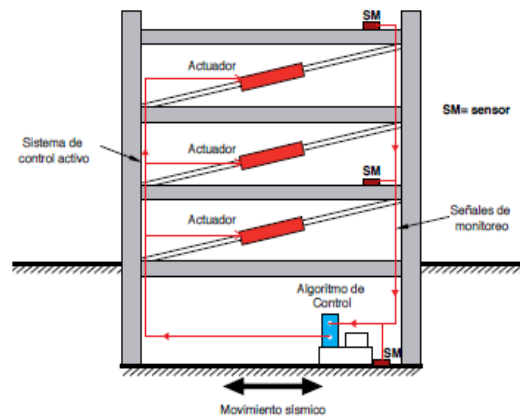


Figura 22. Esquema de estructura con sistema de control activo (SIRVE, 2011)

El Active Mass Damper (AMD), es un ejemplo de un sistema de control activo, el cual es una masa auxiliar móvil usualmente inferior al 1% de la masa total de la estructura es instalada en una de las últimas plantas del edificio (figura 23), con un actuador conectado a ella. La fuerza inercial que presenta la masa oscilante debe contrarrestar los efectos de la acción sísmica y reducir la

respuesta estructural a valores aceptables, un ejemplo de la aplicación de este sistema es el edificio Kyobashi Seiwa Building (Japón) (figura 24)

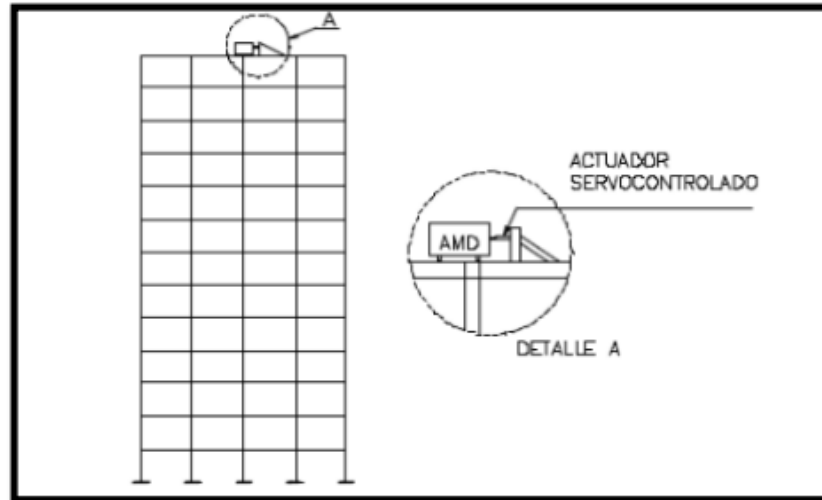


Figura 23. Edificio con control mediante AMD (Villareal Castro & Oviedo Sarmiento, 2009)

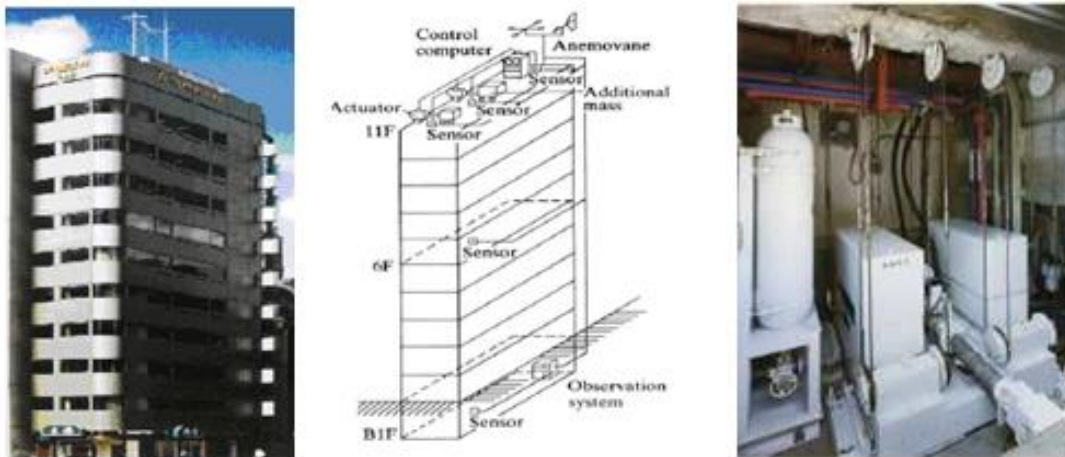


Figura 24 Kyobashi seiwa building Japan implementando sistema AMD (Silva, 2011)

3.3 Sistemas semi activos de protección sísmica

Los sistemas semi - activos tienen un esquema de funcionamiento similar a los sistemas activos, con la diferencia que no aplican fuerzas de control en el sistema estructural, pero poseen distintas propiedades que pueden ser controladas a tiempo real mediante actuadores para reducir la respuesta del sistema estructural con costos energéticos reducidos constituyen una solución intermedia entre los sistemas pasivos y activos (Boza Farfán & Galán Tirapo, 2013).

Los sistemas de protección semi-activa requieren una pequeña cantidad de energía en su funcionamiento, pudiendo en la mayoría de los casos ser alimentados con pilas o baterías, haciendo que estos sistemas inmunes a problemas de corte de energía eléctrica. Existen varios tipos de sistemas de protección semi-activa, dentro de los cuales destacan los disipadores semi-activos de fluidos controlables, aparatos de rigidez variable, disipadores semi-activos viscosos y disipadores semi-activos por fricción (Serino & Spizzuoco, 2002)

a) Disipadores semi-activos de fluidos controlables: Los disipadores semi-activos de fluido controlable han sido propuestos e implementados en varios sistemas estructurales. Este tipo de aparatos están capacitados para modificar el tipo de flujo de un fluido viscoso, es decir, reversiblemente logran alterar la viscosidad del fluido, alterando su flujo libre para un flujo semi-sólido con una resistencia controlable. Esta modificación se da en milisegundos, poco después de que el fluido se expone a un campo magnético o eléctrico (Soong & Spencer, 2000). El fluido que se encuentra en el interior del aparato presenta características particulares, siendo denominados de fluidos magnetoreológicos o electroreológicos, si reaccionan a un campo magnético o eléctrico respectivamente.

En particular, los fluidos magnetoreológicos son fluidos que, cuando están expuestos a un campo magnético, presentan un cambio reversible de sus propiedades, tales como: viscosidad, elasticidad y plasticidad. Cuando no se exponen a un campo magnético, el fluido se comporta como un fluido newtoniano común. En la presencia de un campo magnético, el fluido magnetoreológico presenta un comportamiento visco-plástico con una tensión de flujo en función de la intensidad del campo magnético. Estos tipos de fluidos presentan en su constitución micro partículas magnéticamente polarizadas. Cuando se expone a un campo magnético, estas partículas presentan un momento de dipolo paralelo a la dirección de las líneas de flujo del campo magnético. De esta forma, las partículas, anteriormente dispersadas en el fluido, se alinean a lo largo de las líneas de flujo del campo magnético, formando una estructura encadenada, como está representado en la Figura 25. Cada cadena de partículas formada a lo largo de una línea de flujo, presenta una resistencia para salir de esta configuración, y el nivel de esa resistencia es proporcional a la intensidad del campo magnético que el fluido se expone (Saldanha Santos, 2011).



Figura 25. Comportamiento de un Fluido Magnetoreológico en ausencia y presencia de un campo magnético respectivamente (ACTIMAT, 2009)

b) Aparatos de rigidez variable: Este tipo de aparatos también está capacitado para crear restricciones temporales en puntos críticos de una estructura, cuando sujeta a la acción sísmica. Por lo tanto, los aparatos de rigidez variable consiguen disipar energía acumulada en ciertas zonas

de la estructura, siendo calibrados para que esto suceda, partiendo de información de la respuesta estructural (Xinghua, 2000).

c) Disipadores semi-activos viscosos: El modo de disipación energética de este tipo de aparatos es similar a los disipadores pasivos viscosos, es decir, la energía de excitación es disipada por el calor generado por el movimiento relativo de los dos extremos. Este movimiento es consecuencia de un paso forzado de un fluido viscoso por un orificio, frente al desplazamiento de un émbolo, la finalidad de este dispositivo es reducir adecuadamente la respuesta en aceleraciones, durante una acción sísmica, u otro tipo de acción dinámica. Estos disipadores funcionan pasivamente cuando están sujetos a pequeñas perturbaciones (Saldanha Santos, 2011).

d) Disipadores semi-activos por fricción: Los disipadores de fricción variable utilizados se componen de un conjunto de elementos, cuyas superficies se comprimen entre sí a través de una fuerza ajustable, controlada por un algoritmo. La estrategia normalmente utilizada para calcular esta fuerza se basa en la constante eminencia de bloqueo por parte del dispositivo (Nishitani, Nitta, & Ishibashi, 2000). Estos dispositivos disipan energía cuando hay deslizamiento entre superficies. Por lo tanto, el disipador se vuelve ineficaz mientras no se excede el nivel de deslizamiento, proporcionando sólo rigidez adicional a la estructura.

3.4 Sistemas híbridos de protección sísmica

Los sistemas híbridos son la combinación de sistemas activos y pasivos con el fin de incrementar la eficiencia y confiabilidad del control estructural, estos sistemas consiste en dos o más dispositivos pasivos, activos o semiactivos; debido a la implicación de múltiples dispositivos de control funcionando simultáneamente, los sistemas de control híbrido pueden aliviar algunas de

las restricciones y limitaciones que existen cuando sólo uno de los sistemas es utilizado (figura 26). Además, el sistema de control híbrido puede ser más fiable que un sistema totalmente activo (Gomez, Marulanda, & Thomson, 2007).

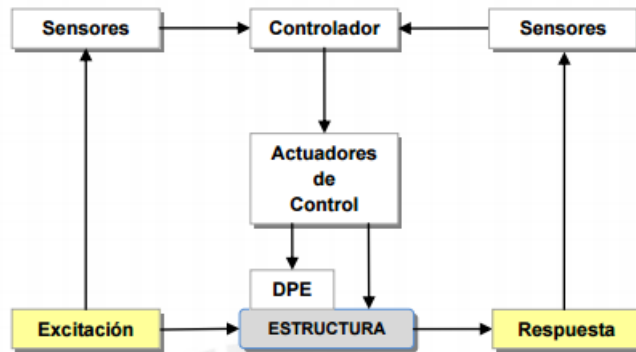


Figura 26. Estructura de un sistema de protección Híbrido (Saldanha Santos, 2011)

La investigación en el área de sistemas de control híbrido ha sido enfocada principalmente hacia los sistemas híbridos con amortiguadores de masa (hybrid mass damper -HMD-) y sistemas con aislamiento de base activo; el sistema HDM es el dispositivo de control más empleado en aplicaciones de la ingeniería civil en escala real. Estos sistemas consisten en la combinación de un amortiguador de masa TMD y un actuador de control activo, la capacidad de este dispositivo para reducir la respuesta estructural radica principalmente en el movimiento natural del oscilador resonante. Las fuerzas de control generadas por el actuador son empleadas solo para mejorar el desempeño del oscilador resonante, incrementando la eficiencia del sistema y permitiendo su adaptabilidad a los cambios en las características dinámicas de la estructura, un ejemplo de aplicación de este sistema fue implementado en el edificio Shinjuka Tower Japan (figura 27).



Figura 27 Ejemplo aplicación sistema Híbrido Edificio Shinjuka Tower Japón (Thomson P., 2001)

4. Comportamiento y desempeño sísmico de las edificaciones que implementan sistemas de protección

La incorporación de un sistema de protección sísmica, otorga óptimos resultados a las edificaciones reduciendo las deformaciones y contribuyendo a asegurar la vida de las personas (Lema Toapanta, 2013); un caso emblemático es el Teaching Hospital de la Universidad de South California (USC) en los Angeles (EEUU), construido sobre 81 apoyos elastoméricos y 68 aisladores con núcleo de plomo. Luego del terremoto de Northridge (1994) no sufrió daños estructurales ni en sus contenidos, continuo operando y su sistema de aislación permitió reducir en un 75% las aceleraciones de campo libre (Gomez, Marulanda, & Thomson, 2007). En comparación, un hospital ubicado en las cercanías del hospital de USC, no quedo en condiciones de seguir operando. Un caso particular es el Nuevo Hospital Militar ubicado en la comuna de La Reina. Este hospital cuenta con parte de su estructura aislada y otra no. En este caso se evidencio como la sección aislada sufrió daños considerablemente menores que la sección no aislada de la estructura (SIRVE, 2011).



Figura 28. Edificio de acero con riostra de pandeo restringido. Foto cortesía del profesor Mamoru Iwata, Universidad de Kanagawa, Japón

En el 2008, realizaron una serie de análisis comparativos entre una edificación de concreto reforzado de 10 pisos con disipadores tipo riostra con pandeo restringido y sin ellos, y demostraron reducciones significativas del daño estructural en la estructura principal (concreto reforzado) y mejora del desempeño estructural cuando las riostras son instaladas (Midorikawa , Asari, & Oviedo A, 2008). De acuerdo al análisis comparativo, se obtuvieron reducciones hasta del 60 % en desplazamientos y daño sísmico de piso, mostraron una distribución en altura casi uniforme de la reducción de desplazamiento y daño sísmico, lo que significó el buen comportamiento del sistema de protección controlada en la estructura principal.

La reducción de los desplazamientos horizontales de piso se atribuye básicamente al aumento de rigidez del sistema dado por las riostras, además de la contribución a la disipación de la energía de vibración (Proença, Panão, Nsieri , Rutenberg, Levy, & Calado, 2008). Esta reducción de

desplazamientos sugiere que la estructura principal podría ser dimensionada para un límite de deriva un poco más alto de lo comúnmente usado y las riostras se encargarían de controlar los desplazamientos. Sin duda, dimensionar la estructura principal para un límite de deriva mayor conduce a reducciones del tamaño de los elementos estructurales de la estructura principal y a posibles economías en la etapa de diseño. Como ejemplo se ha reportado que en edificaciones de acero, el peso de los elementos estructurales del sistema principal puede ser reducido hasta en un 10% cuando se instalan las riostras con pandeo restringido. En edificaciones de concreto reforzado, la reducción en la demanda de ductilidad en los elementos de la estructura principal sugiere una reducción de los niveles de reforzamiento; aunque no se podría asegurar, ya que el reforzamiento es altamente dependiente de aspectos como niveles de carga vertical, especificaciones mínimas de los códigos y factores de seguridad (Montiel O. & Terán G., 2008) (Terán & Amador, 2008).

Si se pudiese dimensionar la estructura principal para atender un límite mayor de deriva y las riostras otorgasen la rigidez adicional necesaria para controlar las derivas dentro de los límites usuales en la práctica, se estaría contando con edificaciones arriostradas con el mismo período de vibración de las edificaciones sin riostras y esto no traería aumentos en las fuerzas equivalentes horizontales de diseño, de acuerdo con los requisitos de diseño de la NSR-10 (AIS, Marzo de 2010). Con fuerzas de diseño iguales a las de la edificación sin riostras, el cortante soportado por la estructura principal se disminuye de inmediato, ya que las riostras también resisten las fuerzas cortantes de piso. Cabe anotar que la mayoría de estas afirmaciones también son aplicables a otros tipos de disipadores histeréticos (Oviedo & Duque, 2009).

En Colombia, la cultura del acero ha estado creciendo desde sus primeros usos a principios de los años noventa, en la actualidad existen en el país empresas dedicadas a las estructuras metálicas, empresas que por la acción de campañas de difusión y capacitación, han fomentado e incrementado

su uso, por esta razón, la fabricación de disipadores de acero sería una opción muy interesante y susceptible de ser desarrollada en Colombia, contando con la industria nacional existente.

5. Ejemplo de aplicaciones de sistemas de protección en Colombia

Aunque ya han transcurrido más de tres décadas desde que las técnicas de control de respuesta sísmica se empezaron a implementar como alternativa para aliviar los efectos de sismos y vientos a las edificaciones en Colombia, país en el cual el 80% de su población vive en zonas de amenaza sísmica alta, todavía no tienen acogida y todavía está lejos de la vanguardia en el uso de técnicas de control de respuesta sísmica (Duque & Oviedo, 2010).

Algunas de las razones por la cual no se han implementado estos sistemas de control son la falta de confianza en el comportamiento sísmico de edificaciones con técnicas de control de respuesta, la desconfianza fundada en la incertidumbre del funcionamiento de los dispositivos de control que requieren alguna fuente de alimentación de energía externa o de algún tipo de mantenimiento durante su vida útil, el posible sobre costo inicial del proyecto, el desconocimiento por parte de los diseñadores de las metodologías de diseño estructural que se requieren cuando se utilizan técnicas de control de respuesta sísmica, y la falta de normalización e información en los métodos de diseño y en especificaciones de los dispositivos de control.

Por estas razones Colombia cuenta con pocos edificios con estas técnicas de control sísmica, a continuación se relacionan los edificios que han implementado estos sistemas de protección sísmica.

Hospital El Tunal en Bogotá 1999

Las técnicas utilizadas en su reforzamiento fueron disipadores de energía pasivos, específicamente disipadores de fricción de acero, convirtiéndose así en el primer centro hospitalario del país en utilizar control de respuesta sísmica en su reforzamiento. Los principales objetivos de la propuesta de rehabilitación fueron: reducir las derivas de piso; asegurar la disipación de energía sísmica con los diferentes mecanismos de la estructura; disminuir el nivel de daño en sismos de intensidad superior; garantizar la resistencia de la estructura y ajustar la estructura lo más posible a la norma vigente (figura 29) (Hospital El Tunal, 2009).



Figura 29. Hospital El Tunal Bogotá (Hospital El Tunal, 2009)

Edificio Belmonte Cali

El edificio Belmonte en Cali es una edificación de 15.000 m², con un sótano y 8 niveles, construido en la década del 50 (figura 31), por decisión de los dueños, se implementó un sistema de protección sísmica usando el aislamiento de base elastoméricos y con núcleo de plomo, es considerada la primera estructura usando el aislamiento de base en Colombia (Rivera & Solarte,

2013). Los aisladores utilizados, fueron instalados en la parte superior de las columnas y bajo la losa del primer piso como se muestra en la figura 30.

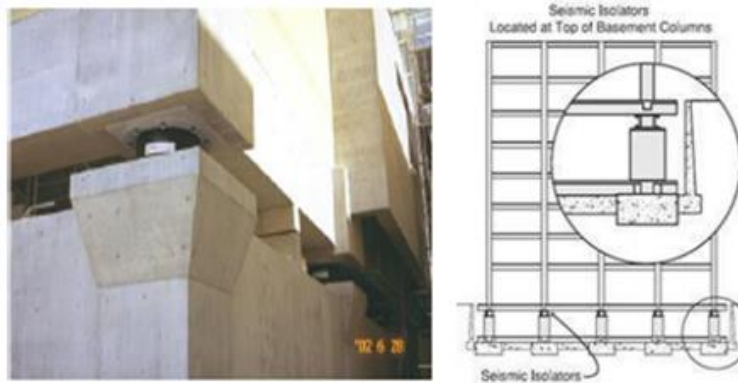


Figura 30. Ubicación del aislador (Rivera & Solarte, 2013).

Luego de un análisis del sistema de protección a implementar, se concluyó que el sistema de aislamiento en la base ofrece significantes beneficios, se demostró que es ventajosa su aplicación desde el punto de vista de costo y ventajas de servicio, este costo depende del nivel de las fuerzas de diseño sísmico del edificio y de la localización del plano de aislamiento.



Figura 31. Edificio Belmonte en Cali (Rivera & Solarte, 2013).

Laboratorio Bloque K2 Universidad Pontificia Bolivariana

La Escuela de ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga, tuvo la necesidad de construir un nuevo edificio para modernizar y reubicar sus laboratorios, por esta razón, se quiso implementar sistemas de aislamiento de base en este nuevo laboratorio (figura 32) (Montero & Fontecha, 2013).

El bloque K2 tiene una longitud de 21.6 m y un ancho de 9.9 m con una altura variable entre 6.8m y 8m, la estructura es de un solo nivel, se dividió en dos sub-bloques de igual geometría tanto en planta como en altura pero con diferente vinculación con la cimentación. Dada la diferencia en la profundidad del estrato de suelo competente, y buscando una similar rigidez del suelo bajo cada zapata, los cimientos del tipo superficial, se sub-muraron con concreto ciclópeo, con cierto reforzamiento, el cual a su vez se ancló en las zapatas. El sub-bloque occidental se diseñó con cimentación superficial tradicional, con vigas de amarre y de enlace en las dos direcciones, buscando simular la condición de empotramiento, mientras el sub-bloque oriental, se diseñó con doble sistema de cimentación (figura 33), de tal forma que se tiene doble nivel de vigas, y bajo los ejes de las columnas se dispuso un pedestal para ubicar los aisladores, Las segundas vigas del sistema de cimentación se encuentran a nivel del acabado del piso, no están apoyadas en el suelo, y lateralmente se aislaron mediante muros de concreto reforzado. La placa de cubierta corresponde a una losa maciza, construida mediante viguetas metálicas de lámina delgada y formaleta tipo colaborante, de tal forma que constituyera un diafragma rígido (Montero & Fontecha, 2013). Los aisladores se fabricaron con neopreno dureza 60, con cuatro láminas de acero A36, de 3mm de espesor. Estos se ubicaron antes de la fundida del segundo nivel de vigas.



Figura 32. Vista noroccidental del bloque K2 (Montero & Fontecha, 2013)

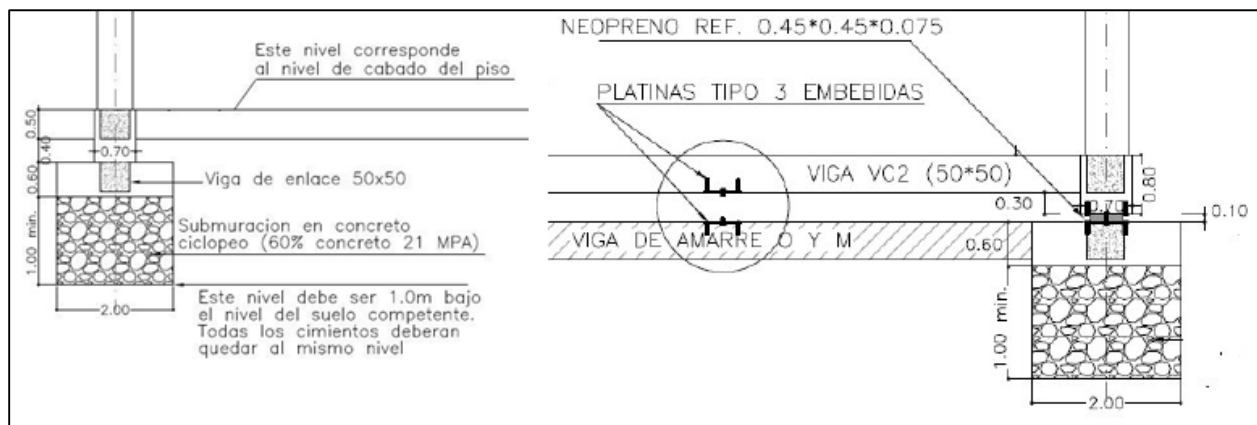


Figura 33 Esquema de cimentación bloque occidental, bloque oriental (Montero & Fontecha, 2013)

6. Sistemas de protección sísmica recomendados para las edificaciones tipo en Bucaramanga

Bucaramanga es una ciudad con tendencia a la masificación de la construcción de edificaciones en altura y, por ende, hacen ver la necesidad de la implementación del uso de técnicas de control

de respuesta sísmica con las que, sin un alto costo, se aumente la protección de respuesta sísmica en edificaciones esenciales como hospitales y estaciones de policía entre otros (Duque & Oviedo, 2010), teniendo en cuenta el tipo de construcción empleado en Bucaramanga, además del dominio de edificaciones mayores a 15 plantas se considera que la técnica de protección pasiva de estructuras sería la más apta para ser implementada en Bucaramanga (Thomson P. , 2001). El control pasivo con disipadores histeréticos metálicos ofrecería mayores beneficios para la fabricación, instalación y mantenimiento de los dispositivos de control, así como también para el análisis y diseño de edificaciones proyectadas con estos dispositivos en la ciudad (Bonelli, Retamales, Boroschek, & Carvallo, 2015). En la siguiente tabla se evidencia los aspectos deseables para el uso de dispositivos de control pasivo de las prácticas de diseño y construcción Colombianas actuales (Tabla 1).

Tabla 1.

Aspectos deseables para el uso de dispositivos de control pasivo de las prácticas de diseño y construcción Colombianas actuales (Oviedo & Duque, 2009)

Aspectos Deseables	Control Pasivo		
	Aislamiento Basal	Disipadores Histereticos	Masa adicional
Bajo costo de instalacion y puesta en obra de los dispositivos de control		*	
Larga vida útil de los dispositivos	*	*	*
Bajo costo de mantenimiento de los dispositivos de control	*	*	*
Bajo costo de reemplazo de los dispositivos de control		*	
Baja probabilidad de reemplazoo post-sismo de los dispositivos de control	*		*
Bajo costo de fabricacion de los dispositivos de control		*	
Instalacion simple en obra de los dispositivos de control		*	
Reduccion del daño estructural por sismo	*	*	*
Simplicidad en el uso para la rehabilitacion o reforzamiento de estructuras existentes		*	*
Simplicidad en la implementacion en sistemas de porticos	*	*	*
Simplicidad en la implementacion en sistemas de muros de carga		*	*
No requiere mano de obra altamente calificada para la instalacion de los dispositivos de control		*	
Alto control de daño en contenidos	*		*
Bajo impacto en las prácticas de construccion actuales		*	
Facil consecución de materiales necesarios para la fabricacion de los dispositivos en el pais		*	
Baja interrupcion del continuo funcionamiento de estructuras indispensables durante la instalacion o reemplazo de los dispositivos de control	*	*	*

El objetivo primordial de la instalación y uso de técnicas de control de respuesta sísmica es la disminución del daño mediante la reducción de la demanda de ductilidad local en la estructura principal. En estructuras de concreto reforzado, la capacidad de los elementos de ofrecer más o menos ductilidad está directamente relacionada con el detallado de refuerzo que tenga el elemento. En Colombia, la norma sismorresistente vigente NSR-10 (AIS, Marzo de 2010) clasifica las estructuras en tres grupos según su capacidad de disipación de energía: DMI (capacidad mínima), DMO (capacidad moderada) y DES (capacidad especial). Estos tres grupos tienen requisitos y especificaciones de detallado de refuerzo diferentes y de mayor exigencia para las DES. Estas especificaciones están enfocadas hacia el nivel de reforzamiento que se les debe proporcionar a los elementos de concreto reforzado para evitar la pérdida de resistencia y capacidad de deformación. Con base en lo descrito y dentro del contexto del diseño estructural tradicional en Colombia, si los disipadores histeréticos tipo riostra con pandeo restringido fueran instalados en pórticos de concreto reforzado resistentes a momento, se podrían considerar dos situaciones: rehabilitación sísmica y proyectos nuevos. En el caso de rehabilitación o reforzamiento de estructuras existentes, al instalar estas riostras se estaría mejorando el desempeño estructural por aumentar la rigidez, la resistencia y el control de deformaciones (Gomez, Marulanda, & Thomson, 2007). En el momento de un movimiento sísmico, se estaría disminuyendo la demanda de ductilidad en los elementos estructurales principales, pues las riostras estarían disipando parte o la totalidad de la energía impuesta por el sismo. Además, se estaría localizando el daño estructural en las riostras, reduciendo los desperdicios e impacto ambiental y disminuyendo las reparaciones post-sismo sin afectar el funcionamiento continuo de la edificación.

Los disipadores histeréticos metálicos ofrecen medidas de rehabilitación o reforzamiento estructural sin comprometer de manera significativa la arquitectura y brindando un mayor nivel de

seguridad en comparación con las técnicas tradicionales, estos disipadores son instalados usualmente en el plano de los pórticos del sistema estructural principal (Ruiz Gómez S. E., 1998). La gran importancia que se da al uso de estos disipadores es que, en el caso de ser utilizados en estructuras indispensables según NSR-10 como estaciones de bomberos, estaciones de policía u hospitales, el funcionamiento de las estructuras no se ve comprometido y de esta manera se puede brindar asistencia continua e inmediata a la comunidad después de un desastre por terremoto. En Estados Unidos ha sido reportado que en la evaluación de alternativas para protección sísmica se prefiere el uso de riostras con pandeo restringido, sobresaliendo por sus beneficios ante los sistemas tradicionales (Oviedo & Duque, 2009).

En Japón las riostras con pandeo restringido se consideran como dispositivos disipadores de energía y el enfoque de análisis y diseño estructurales difiere del tradicional uso del factor R. Allí las edificaciones que tienen disipadores de energía se evalúan con procedimientos de análisis más detallados en los cuales se investiga la respuesta no lineal tiempo-historia de la estructura y de los dispositivos (Pinzón Mayorga & Martínez Lopez, 2014). De esta forma, la disipación de energía y la protección a la estructura principal pueden ser evaluadas claramente.

Es importante anotar que el desempeño estructural de las edificaciones con disipadores de energía hysteréticos depende en gran medida del tipo de sistema estructural principal, arquitectura, efectos locales de sitio, tipo de dispositivo para utilizar, cantidad de dispositivos y su localización en la estructura; por lo tanto, generalizar sobre el orden de magnitud de posibles economías y reducción de daños no es tarea fácil.

7. Conclusiones

- Con la presente monografía se pretendió mostrar las diferentes técnicas de protección sísmica utilizadas como forma de mitigación de vibraciones en estructura con el fin de mejorar los desplazamientos de las estructuras frente a la acción de los sismos además de minimizar la amenaza a la vida de las personas.

- El estado actual de los conocimientos alusivos a la protección de estructuras requieren de una mayor profundización en el estudio e investigación de algunos de los dispositivos presentados como mejora para el diseño y comportamiento de los sistemas de protección de estructuras en Colombia

- Colombia todavía está lejos de ser considerado un país de vanguardia en el uso de sistemas de control de respuesta sísmica, por lo tanto, hacen falta proyectos de investigación y aplicación donde se diseñen edificaciones con los mismos criterios sísmicos, con control de respuesta sísmica y sin él y se haga una comparación económica y técnica que permita verificar o derrumbar estos preconceptos. Además se necesita de programas de capacitación para los calculistas y constructores.

- El sistema de aislación es más efectivo que el sistema de disipación de energía a la hora de protección de la estructura, sin embargo la instalación de estos dispositivos en las edificaciones, son mucho más complejos y onerosos que los sistemas de disipación de energía.

- Se presentaron las razones y se evidenciaron los aspectos deseables para el uso de disipadores de energía metálicos como la opción de control de respuesta sísmica que se acomoda a las características locales de la ciudad de Bucaramanga.

- Por medio de sistemas de protección sísmica, se consiguen una mejora considerable en el comportamiento sísmico de las estructuras ya que aumentan los niveles de amortiguamiento de las estructuras reduciendo así los esfuerzos y deformaciones luego de un sismo.

- Cualquier tipo de edificación puede ser implementada estos sistemas de control, ya sea una edificación nueva, existente, o que necesite continuar operando durante o inmediatamente después de los sismos.

- Los aisladores sísmicos suelen ser más eficientes para reducir demandas sísmicas en estructuras no demasiado altas, mientras que los disipadores de energía son mucho más eficiente en estructuras esbeltas o flexibles o que se encuentren ubicadas en suelos de baja competencia geotécnica.

- Los aisladores sísmicos generar una interfaz entre suelo estructura con el fin de evitar que parte del movimiento generado por el sismo se transfiera a la estructura. Los disipadores de energía son dispositivos que se ubican de manera estratégica en diferentes puntos de la estructura, absorbiendo la energía producida por los sismos.

Referencias Bibliográficas

- ACTIMAT. (Septiembre de 2009). *Materiales inteligentes sensores y actuadores aplicados a estructuras y procesos inteligentes*. Obtenido de <http://www.actimat.es/web/magnetoreologicos.asp>
- Acuña Vigil, P. C. (Septiembre de 2015). Disipadores de energía en la estructura de un edificio, técnicas de diseño sísmo resistente. *POLIS-CIVITAS, Bitacora de urbanismo y planeamiento*.
- Aguiar, Almazán, Dechent, & Suarez, V. (2008). Aisladores de base elastometricos y FPS. Quito, Ecuador: Centro de Investigacion Cientificas de la Escuela Politecnica del Ejercito.
- Aguiar, Bravo, & Romo. (2008). *Alternativas de Modelamiento de Estructuras con Aisladores sísmicos mediante SAP*. Quito - Ecuadore.
- AIS. (Marzo de 2010). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Norma Colombiana de diseño y construcción sismorresistente NSR-10. Bogotá.
- Bonelli, P., Retamales, R., Boroschek, R., & Carvallo, J. (Marzo de 2015). Aplicación de sistemas de aislamiento sísmico en edificaciones de mediana altura. Santiago de Chile: XI congreso chileno de sismología e ingeniería sísmica ACHISINA 2015.
- Bonilla Sosa, L. M. (Noviembre de 2012). Teoría del aislamiento sísmico para edificaciones. México.
- Boza Farfán, Z. E., & Galán Tirapo, D. J. (Abril de 2013). Diseño de un edificio aporticado con Disipadores en Arreglo Chevron. Lima, Perú.
- Bozzo, L. (2002). Análisis y diseño de estructuras equipadas con disipadores de energía SL. Lima, Perú.

Bozzo, L. M., & López Almansa, F. (2000). Disipadores de energía para control de vibraciones de estructuras. Universidad Politecnica de Cataluña, Universidad de Girona.

Bozzo, R., Ordoñez, L., & Ordoñez, D. (2001). Disipadores mecanicos de energía. *Revista Bit, Chile*.

Building seismic safety council (BSSC). (2003). Building seismic safety council, National Institute of Buildings Sciences. NEHRP recommended provisions for seismic regulatios for new buildlings-Provisions and commentary. Federal Emergency Management Agency FEMA.

Cahís Carola, X. (Octubre de 2000). Desarrollo de un nuevo disipador de energía para diseño sismorresistente. Analisis numerico y validacion experimental de su comportamiento. Barcelona.

Cahís, X. (2000). Desarrollo de un nuevo disipador de energía para diseño sismo Resistente. Analisis numerico y validacion experimental de su comportamiento. *Tesis Doctoral, universidad Politecnica de Cataluña*. Barcelona, España.

Cancelado, R. A. (2012). CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y MODELAMIENTO ESTRUCTURAL DE UN DISIPADOR PASIVO DE ENERGÍA DE TIPO ARRIOSTRAMIENTO DE PANDEO RESTRINGIDO. PARTE 1. Bogota, Colombia.

Cano Lagos, H., & Zumaeta Escobedo, E. I. (2012). Diseño estructural de una edificacion con disipadores de energía y analisis comparativo sismico entre el edificio convensional y el edificio con disipadores de energía para un sismo severo. Lima, Perú.

Carranza Sandoval, A. (2013). *Global Ingenieros*. Obtenido de Aisladores y Disipadores de Energía: <http://globalingenieros.com/aisladores-y-disipadores-de-energia/>

Carrascal Sandoval, A. (2013). *Global Ingenieros*. Obtenido de <http://globalingenieros.com/aisladores-y-disipadores-de-energia/>

Chacón Sierra, W. D. (Febrero de 2009). Torsión Accidental en estructuras con aislamiento de base. Sangolquí.

Duque, M. d., & Oviedo, J. A. (Junio de 2010). Situacion de las tecnicas de control de respuesta sismica en Colombia. Colombia.

Estudio Comparativo Económico de Edificios con Aislamiento Sísmico en la Base. (s.f.). Obtenido de <http://html.rincondelvago.com/estudio-comparativo-de-edificios-con-aislamiento-sismico-en-la-base.html>

FEMA. (2012). Federal Emergency Management Agency. Washington DC.: Multi-hazard Loss Estimation Methodology.

Gomez, D., Marulanda, J., & Thomson, P. (13 de Diciembre de 2007). SISTEMAS DE CONSTROL PARA LA PROTECCION DE ESTRUCTURAS CIVILES SOMETIDAS A CARGAS DINAMICAS.

Gómez, D., Marulanda, J., & Thomson, P. (14 de Diciembre de 2007). Sistemas de control para la proteccion de estructuras civiles sometidas a cargas dinamicas.

Higashino, M., & Okamoto, S. (2006). Response Control and seismic isolation of buildings.

Hospital El Tunal. (2009). Obtenido de Disponible en: <http://www.hospitaleltunal.gov.co/boletin.htm>

ICC IBC. (2015). International Building by Code nternational Code Council, 2014.

INN. (2003). Instituto Nacional de Normalizacion, Norma Chilena NCh 2745-2003 . Division de Normas del Instituto Nacional de Normalizacion.

Jácomo Azabache, Y. J., & Quispe Siccha, J. C. (2014). Diseño estructural y comparativo entre los sistemas dual y con aislamiento sismico en la base para una clinica de 8 pisos en la ciudad de Trujillo. Trujillo, Perú.

Jácomo Azabache, Y., & Quispe Siccha, J. C. (2014). Diseño estructural comparativo entre los sistemas dual y con aislamiento sismico en la base para una clinica de 8 pisos en la ciudad de Trujillo. Trujillo, Peru.

James, K. (1990). Base isolation: linear theory and desing. *Earthquake Spectra*.

Japan Structural Engineer and Consultant Association (JSCA). (Dec de 2002). Japan Structural Engineer and Consultant Association. Recommendation for Design of structural Controlled buildings.

Kitamura, H. (s.f.). Analysis of the present situation of response control systems in Japan based on building survey database.

Kitamura, H., Kitamura, Y., Ito, M., & Sakamoto, M. (August de 2004). Analysis of the present situation of response control systems in Japan based on building survey database. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*.

Kwok, K., Hitchcock, P., & Burton, M. (2009). Percepcion de la vibracion y el confort de los ocupantes de los edificios altos de viento-excitado.

Lema Toapanta, E. P. (2013). Analisis y diseño de un edificio con aisladores sismicos modelamiento en el ETABS. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.

Limón, L. A., & Ruiz, S. E. (1997). Un ejemplo sobre dos alternativas de refuerzo: disipadores de energia o contraviento. *Revista Internacional de Ingenieria de Estructuras*, 91.

LORD, C. (1995). *LORD Far East, Inc., Nakadate Chou-shi, Japan*. Obtenido de <http://www.lord.com/>

Lüders , C. (2013). Aislacion Sismica de Estructuras (pasado-presente-futuro). Seminario Expo-Hormigon 2013, (ICH) Instituto del Cemento y del Hormigon de Chile.

Mahmoodi, P., Robertson, L., Yontar, M., Moy, C., & Feld, I. (1987). Performance of viscoelastic dampers in world trade center towers. *Dynamic of Structures, Proceedings of the Sessions at Structural Congress'87*. Orlando.

Martinez, C. A. (Noviembre de 2012). Diseño optimo de sistemas pasivos de disipacion de energia para estructuras bajo excitacion sismica.

- Martínez, E. (August de 1993). Experiences on the use of supplementary energy dissipators on building structures. Italy: International Post-Smirt conference isolation, Energy Dissipation and control of vibration of Structures.
- Mayorga Vela, C. A. (Abril de 2011). Caracterización mecánica y modelamiento estructural de un disipador pasivo de energía de tipo arriostamiento de pande restringido Parte 2. Bogota, Colombia.
- Méndez, G. C. (Agosto de 2013). Beneficios y ventajas de los sistemas de proteccion sismica. San José, Costa Rica.
- Midorikawa , M., Asari, T., & Oviedo A, J. A. (2008). Optimum strength ratio of hysteretic energy y dissipating devices in R/C frames. Journal of structural Engineering.
- Montero , S., & Fontecha, G. (Mayo de 2013). Caracterizacion dinamica de una edificacion aislada sismicamente en la base. Bucaramanga: VI Congreso Nacional de ingenieria sismicia, Unviersidad Industrial de Santander, Universidad Pontificia Bolivariana, Asociacion Colombiana de Ingenieria Simica.
- Montiel O. , M., & Terán G., A. (2008). Evaluacion y comparacion de la confiabilidad de edificio de 24 niveles estructurales con contravientos tradicionales y con contravientos restringidos contra pandeo. Veracruz, México: XVI Congreso Nacional de Ingenieria Estructural.
- Mullo Pilamunga, C. L. (2014). ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN EDIFICIO CON AISLADORES SÍSMICOS, MODELAMIENTO EN ETABS. Quito, Ecuador.
- Nakashima, M., Pan, P., Zamfirescu, D., & Weitzmann, R. (August de 2004). Post-Kobe approach for design and construction of base-isolated buildings. Journal of Japan Association for Earthquake Enggineering.
- Nishitani, A., Nitta, Y., & Ishibashi, Y. (2000). Structural Control Based on Semi-Active Variable Friction Dampers. 12th World Conference on Earthquake Engineering.
- Normas Tecnicas Complementarias. (2004). Reglamento de construccion para el Distrito Federal y sus Normas Tecnicas Complementarias, Diseño sismico de Edificaciones. Mexico.

Oviedo, J. A., & Duque, M. (16 de Septiembre de 2006). Sistemas de control de respuesta sismica en edificaciones.

Oviedo, J. A., & Duque, M. d. (Julio de 2009). Disipadores histereticos metalicos como tecnicas de control de respuesta sismica en edificaciones Colombianas. *Revista de la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia)*.

Pall, A. S., & Marsh, C. (1982). RESPONSE OF FRICTION DAMPED.

Pinzón Mayorga, N., & Martínez Lopez, E. (2014). Estado del arte y modelo didactico-descriptivo de amortiguadores y aisladores sismicos. Bogota, Colombia: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.

Proença, J. M., Panão, A., Nsieri, E., Rutenberg, A., Levy, R., & Calado, L. (2008). Buckling-restrained braces. Innovative materials and techniques.

Quaketek. (2017). Obtenido de <https://www.quaketek.com/es/disipadores-sismicos-disipadores-a-friccion/>

Ramallo, J. C., Johnson, E. A., & Specer, B. F. (2002). Samrt Base Isolation Systems.

Rivera, F. A., & Solarte, J. R. (Mayo de 2013). Edificio Belmonte Cali- Aislamiento sismico de base de un edificio patrimonio arquitectonico de la ciudad. Bucaramanga: VI Congreso Nacional de ingenieria sismica, Universidad Industrial de Santander, Universidad Pontificia Boliivariana, Asociacion Colombiana de Ingenieria sismica.

Robinson, W. (December de 1998). Passive control of structures the New Zealand experience. ISET Jpurnal of Earthquake Technology.

Rodas, P. T. (Mayo de 2011). ESTUDIO DE LOS DISIPADORES DE ENERGIA EN EL DISEÑO SISMORESISTENTE. Cuenca-Ecuador.

Roffel, A. J., & Narashimhan, S. (2016). Results from a Full-Scale study on the condition assessment of pendulum Tuned Mass Dampers. American society of civil Engineers.

Roffel, A., Narasimhan, S., & Haskett, T. (2013). Performance of pendulum Tuned Mass Dampers in reducing the responses of flexible structures. American society of civil Engineers.

Ruiz Gómez, S. E. (22 de Octubre de 1998). Alternativas para controlar la respuesta sísmica de los edificios. Asociación Mexicana de ingeniería sísmica, Academia de número de la academia Mexicana de ingeniería.

Ruiz Gómez, S. E. (31 de Marzo de 2003). Algunas recomendaciones para el refuerzo sísmico de edificios, empleando disipadores de energía. *Revista Digital Universitaria UNAM*.

Saldanha Santos, P. M. (Diciembre de 2011). Sistemas de Protección Sísmica Semi-Activos Aplicados em Estruturas de Engenharia Civil.

Salina Baldizón, E. M., Torres Espinoza, M. O., & Vallejos Sobalvar, M. D. (Marzo de 2014). Estudio comparativo Técnico-Económico sobre el uso de aislamiento sísmico en la Base. Managua, Nicaragua.

Serino, G., & Spizzuoco, M. (2002). "About the Design of Passive and Semi-Active MR Dampers for Seismic Protection of Buildings", London: European Conference on Earthquake Engineering.

Silva, M. J. (Noviembre de 2011). SISTEMAS PASSIVOS, ACTIVOS, HÍBRIDOS E SEMIACTIVOS PARA A PROTECÇÃO SÍSMICA DE .

Silva, M. J. (Noviembre de 2011). SISTEMAS PASSIVOS, ACTIVOS, HÍBRIDOS E SEMIACTIVOS PARA A PROTECÇÃO SÍSMICA DE ESTRUTURAS: ESTADO DOS CONHECIMENTOS.

SIRVE. (2011). *Diseño del sistema de protección sísmica Edificio Cerro Colorado*. Obtenido de Seismic Protection Technologies: <http://sirve.cl/archivos/proyectos/disen-del-sistema-de-aislamiento-sismico-edificio-cerro-colorado>

SIRVE. (2011). Protección Sísmica de Estructuras- Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía. *Corporación de Desarrollo Tecnológico- Cámara Chilena de Construcción*.

SIRVE. (2013). *Sistema de Aislamiento Sísmico Edificio Amura*. Obtenido de Seismic Protection Technologies: <http://sirve.cl/archivos/proyectos/sistema-de-aislamiento-sismico-edificio-amura>

Soong, T., & Spencer, B. F. (2000). Active, Semi-Active and Hybrid control of structures. New Zealand: World conference on Earthquake Engineering.

Spencer, B., & Nagarajaiah, S. (July de 2003). State of the art of structural control. Journal of structural Engineering, ASCE.

Spencer, B., & Nagarajaiah, S. (July de 2003). State of the art of structural control. Journal of structural Engineering ASCE.

Stuardi, J. E. (2004). Dispositivos viscoelásticos para protección sísmica. *Revista BIT; Revista Técnica de la Construcción*.

Stuardi, J. E. (2004). Dispositivos viscoelásticos para protección sísmica. *Revista Bit, Revista técnica de la construcción*, 61.

Technologies, S. P. (10 de Septiembre de 2013). Obtenido de <http://sirve.cl/archivos/7215>

Terán, G., & Amador. (2008). El papel de la innovación dentro del contexto de la ingeniería estructural mexicana: el caso de los contravientos restringidos contra pandeo. Veracruz, México: XVI congreso Nacional de Ingeniería Estructural.

Thomson, P. (2001). Sistemas de control estructural. Cartagena: Memorias del Primer Encuentro del Acero en Colombia.

Thomson, P. (2011). Sistemas de control estructural. *Primer Encuentro del Acero en Colombia*. Cartagena.

Torres Rodas, P. (2011). Estudio de los disipadores de energía en el diseño sismorresistente. Cuenca.

Villareal Castro, G., & Oviedo Sarmiento, R. (2009). EDIFICACIONES CON DISIPADORES DE ENERGÍA. Lima-Peru.

Villareal Castro, G., & Oviedo, R. (2009). Edificaciones con disipadores de energia.

Whittaker, A., Bertero, V., & Alonso, J. (1989). Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements. Earthquake Engineering Research Center, University of California.

Xinghua, Y. (2000). Model and Analysis of variables stiffness semi-active control system. New Zealand: 12th world conference on Earthquake Engineering.

Zhang, R., & Phillips, B. M. (2016). Performance and Protectios of Base-Isolated Structures under Blast Loading. American Society of Civil Engineers.