

Estudio comparado de los métodos y dispositivos actuales orientados a amortiguar los efectos del terremoto sobre la estructura de los edificios.

ALUMNA: IVET ILIEVA ANGUELOVA

TUTOR: AGUSTÍN JOSÉ PÉREZ GARCÍA

Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Universidad Politécnica de Valencia/Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

2018-2019



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
ARQUITECTURA

RESUMEN

En este trabajo se presentan los sistemas de control más usados en la actualidad, cuyo objetivo es reducir la respuesta sísmica de una estructura. Se realizará una breve explicación del balance de energía en una estructura contando con la energía sísmica, así como de los dos caminos posibles de reducir dicha energía, que es o bien mediante aisladores sísmicos o por disipadores de energía. A continuación, se presentarán los cuatro tipos de sistemas principales, los sistemas activos, pasivos, híbridos y semiactivos, realizándose una breve descripción de las cualidades y del funcionamiento de cada uno de los tipos de amortiguadores clasificados dentro de estos sistemas. Esto nos permitirá poder realizar una comparación entre los cuatro sistemas y sacar ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

PALABRAS CLAVE

Sismos, aisladores sísmicos, dispositivos amortiguadores, sistemas de control sísmico, estructura adaptativa

ABSTRACT

This paper presents the most commonly used control systems today, whose objective is to reduce the seismic response of a structure. A brief explanation will be made of the energy balance in a structure adding in it the seismic energy, as well as the two possible ways to reduce this energy, which is either through seismic isolators or energy dissipation devices. Next, the four main types of systems will be presented: active, passive, hybrid and semi-active systems, with a brief description of the qualities and operation of each of the types of dampers classified within these systems. This will allow us to make a comparison between the four systems and draw advantages and disadvantages from each of them.

KEY WORDS

Earthquakes, seismic isolators, damping devices, seismic control systems, adaptative structure

ÍNDICE

1. Introducción y objetivos.....	4
2. Acción sísmica:.....	5
2.1. ¿Por qué ocurren los sismos?	5
2.2. Sismos y su propagación:.....	7
3. Efectos sísmicos sobre edificios:.....	8
4. Evaluación de la acción sísmica:.....	9
5. Formas de atajar estos efectos:	11
5.1. Criterios generales de diseño ante un sismo:.....	12
5.1.1. Sistemas estructurales básicos:	14
5.2. Uso de las técnicas convencionales.....	16
5.2.1. Construcción de edificios sismorresistentes de acero:.....	16
5.2.2. Construcción de edificios sismorresistentes de hormigón.....	18
5.2.3. Construcción de edificios sismorresistentes de mampostería.....	19
5.2.4. Conclusiones generales:	19
5.3. Uso de las técnicas avanzadas:.....	20
5.3.1. Introducción:	20
5.3.2. Sistemas de control activos:.....	21
5.3.3. Sistemas de control híbridos:	31
5.3.4. Sistemas de control semiactivos:.....	36
5.3.5. Sistemas de control pasivos:.....	46
6. Conclusiones:	73
7. Referencias bibliográficas.....	75

1. Introducción y objetivos

Vivimos en una tierra dinámica y construimos estructuras estáticas, esta es una de las contradicciones que más me llama la atención de este trabajo.

En la actualidad, sabemos que, debido a la tectónica de placas, nuestras placas se crean y se destruyen unos centímetros al año. Esto provoca constantemente terremotos, la mayoría de ellos de una intensidad reducida de la que no preocuparse. Sin embargo, cada cierto tiempo se ha producido a lo largo de nuestra historia algún terremoto de tal intensidad que ha provocado daños catastróficos, llevándose la vida de miles de personas, algunos como el terremoto de Kobe en 1996, el de Chile en 2010, el de Haití en 2010 o el de Japón en 2011. Y eso es sólo el principio, después queda un largo periodo de recuperación, de rehabilitaciones, reconstrucciones y de construcción de nuevos edificios, lo que conlleva gastos millonarios, que en las zonas pobres supone más miseria.

Cómo no podemos saber con certeza cuando ocurrirá un terremoto, ni tampoco la intensidad del mismo, debemos pensar en hacer estructuras dinámicas, las cuales sean capaces de absorber y disipar la energía transmitida por un sismo. Con el paso de los años, los ingenieros han ido estableciendo diseños básicos de estructuras, así como recomendaciones a seguir para conseguir una estructura lo más resistente posible a un sismo, mediante el uso de determinadas disposiciones geométricas o detalles constructivos en las estructuras. Esto conocido como técnicas convencionales, se han ido mejorando con el propósito de que la estructura, aunque no sea capaz de mantenerse en su rango elástico, tenga la suficiente ductilidad como para evitar el colapso y salvar vidas humanas. Se busca que tengan un equilibrio entre rigidez y ductilidad.

Pero y ¿si podemos evitar que incluso se produzcan daños? No solo la gente se sentiría más a salvo, sino que además se reducirían daños y gastos posteriores a un sismo. Esto se puede conseguir gracias a las técnicas avanzadas, cuyo interés ha aumentado considerablemente en los últimos 20 años. Son dispositivos sísmicos que ayudan a reducir considerablemente la respuesta de un edificio y actualmente se pueden clasificar en cuatro grupos, sistemas pasivos, activos, híbridos y semiactivos. A continuación, realizaremos una descripción de los dispositivos clasificados en cada sistema, viendo ventajas, desventajas e implementaciones de los mismos, para posteriormente poder realizar nuestras propias conclusiones.

2. Acción sísmica:

2.1. ¿Por qué ocurren los sismos?

Antiguamente los continentes que conocemos hoy día formaban uno solo conocido como Pangea. Los geólogos consideraron que éste comenzó a fracturarse para dar lugar a los continentes de Laurasia y Gondwana, dos continentes que ocuparían el hemisferio norte y sur, respectivamente, para posteriormente continuar dividiéndose en los continentes de África, Asia, América, Europa y Oceanía.

¿Pero qué podía explicar este movimiento?, y lo más importante, ¿cómo nos afecta hoy en día? La deriva continental, que se puede definir como el movimiento constante y de gran magnitud producido a lo largo de millones de años de los continentes provocó que este único continente se fuera separando poco a poco, considerándose que en este proceso algo tenía que ver la formación de la corteza terrestre. Sin embargo, esta teoría de la deriva continental, desarrollada por Wegener, no fue aceptada en el siglo XX hasta que apareció la denominada tectónica de placas, donde se demostraba claramente el funcionamiento interno de la Tierra.

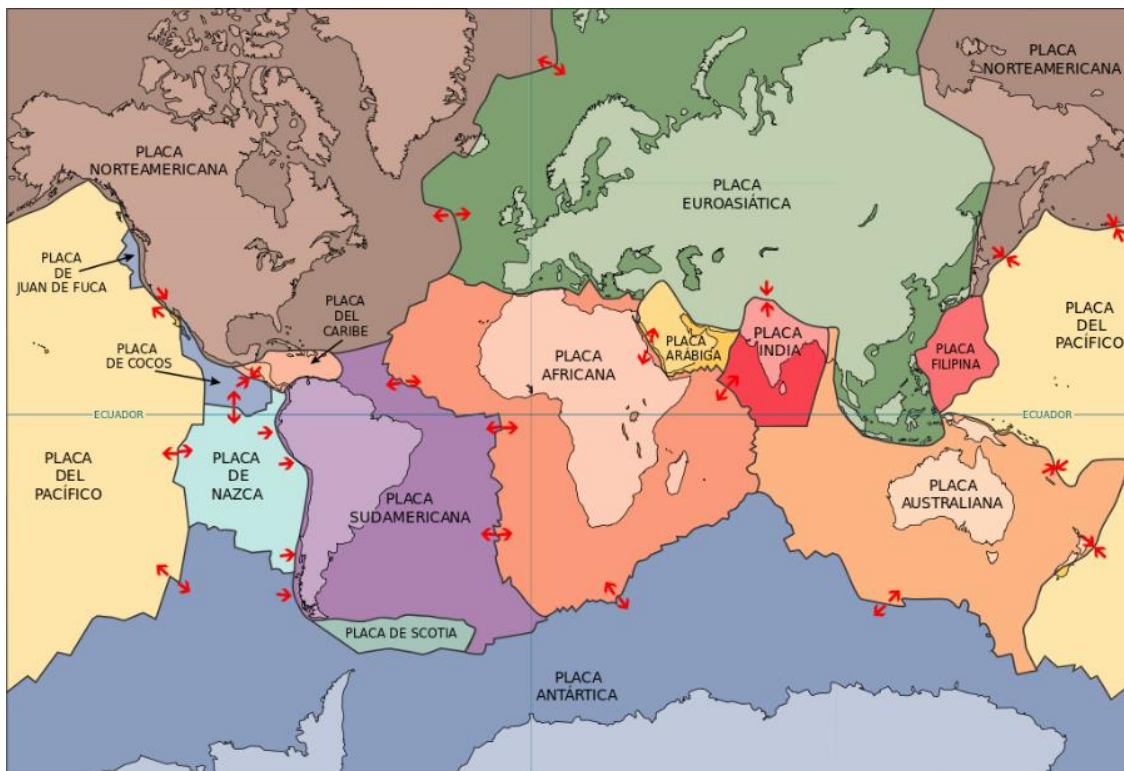


Figura 1: Placas tectónicas

Fuente: <https://www.vix.com/es/btg/curiosidades/2010/10/25/%C2%BFcuantas-placas-tectonicas-existen>

Las capas más externas de la tierra, la corteza y el manto externo, forman una capa muy rígida y fría, que recibe el nombre de litosfera. Debajo de ésta se encuentra la astenosfera, una capa mucho más blanda y con una temperatura tal que podemos encontrar roca fundida. Esta diferencia de distribución de calor provoca que las placas que forman la litosfera, entren en un proceso de convección interno en la Tierra, de modo que se destruyen y se regeneran en los límites de las placas. La litosfera está formada principalmente por siete placas, la Norteamericana, Suramericana, la del Pacífico, Africana, Euroasiática, Australiana y la de la Antártida, a las cuales hay que añadir unas placas intermedias secundarias, de menor tamaño. Estas placas se mueven lentamente varios centímetros al año, cambiando su forma y tamaño constantemente. La creación y destrucción de estas placas se produce en sus límites, pudiendo distinguir tres tipos de límites:

Límites divergentes: las placas se separan, fundamentalmente en las dorsales oceánicas, produciendo la ascensión del material y generando nuevo suelo oceánico.

Límites convergentes: las placas se aproximan, produciéndose la subducción de la corteza oceánica. Esto se produce en las fosas marinas.

Límites de falla transformante: las placas se mueven una con respecto a la otra horizontalmente, sin producirse ni destruirse litosfera. Las fallas son fracturas de la corteza terrestre que se producen por su movimiento. Pueden tener un ancho considerable y pueden observarse a simple vista dado que algunas rocas quedan pulidas o con surcos, que indican la dirección de la falla. Las fallas son la causa de la mayoría de los terremotos, y hay tres tipos de fallas según sus movimientos relativos:

- Fallas horizontales: el desplazamiento dominante es horizontal y paralelo a la dirección de la superficie de la falla. Consisten en varias fracturas paralelas unas a otras que pueden abarcar una anchura superior a varios kilómetros. Muchas grandes fallas de desplazamiento horizontal atraviesan la litosfera y están formadas por el choque entre dos placas tectónicas, éstas reciben el nombre de falla transformante.

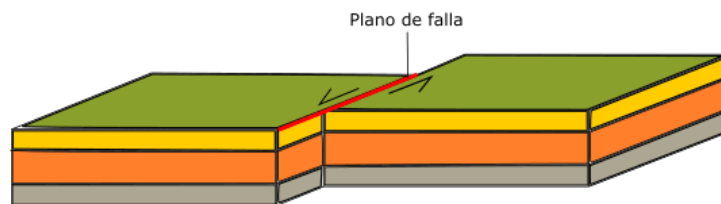


Figura 2: Falla transformante de tipo horizontal.

Fuente: <https://geologiaweb.com/geologia-estructural/fallas-geologicas/>

- Fallas con desplazamiento vertical: son fallas cuyo movimiento es paralelo a la inclinación o buzamiento de la superficie de la falla. Los escarpes de fallas, saltos en la continuidad de un terreno, son producidos por estas fallas y durante su movimiento es cuando se producen los terremotos. Dentro de este tipo de falla podemos realizar otra clasificación:

- o Fallas normales: la mayoría tiene punzonamientos de unos 60° que tienden a disminuir con la profundidad, aunque también los puede haber de menor inclinación aproximándose a las fallas horizontales, denominada en este caso falla de despegue. Suelen ser pequeñas con desplazamientos más o menos de un metro, pero también podemos encontrar fallas normales que se extienden decenas de kilómetros. Las fallas normales nos ofrecen datos de los esfuerzos tensionales que separan la corteza siendo que esta separación se puede producir por fuerzas horizontales opuestas o por levantamiento. La diferencia con las fallas inversas es que lo denominado como techo, superficie rocosa localizada por encima de la falla, se dirige hacia abajo y el muro, la superficie rocosa situada por debajo de la falla, se mueve hacia arriba. En las fallas inversas ocurre lo contrario. Otra diferencia es que en este tipo de falla la superficie "se estira o rompe", mientras que en las fallas inversas la superficie "se acorta".

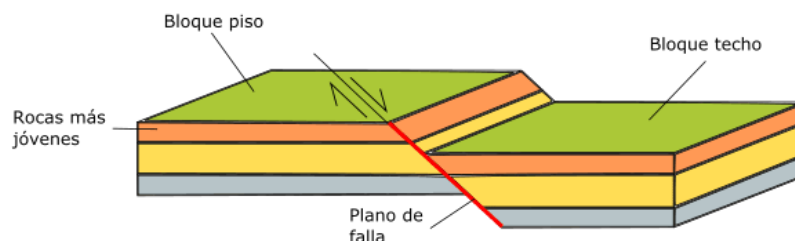


Figura 3: Falla transformante con desplazamiento vertical de tipo normal.

Fuente: <https://geologiaweb.com/geologia-estructural/fallas-geologicas/>

- Fallas inversas: si su ángulo de buzamiento es inferior a 45° , se denomina cabalgamiento. Las fallas de ángulo mayor a 45° suelen ser pequeñas, mientras que los cabalgamientos, menor de 45° , existen a todas las escalas, desde pequeños desplazamientos de entre unos milímetros y unos pocos metros a desplazamientos grandes del orden de decenas a centenares de kilómetros. Los cabalgamientos se producen por fuertes esfuerzos de compresión y suelen ocurrir en las zonas de subducción y otros bordes convergentes.

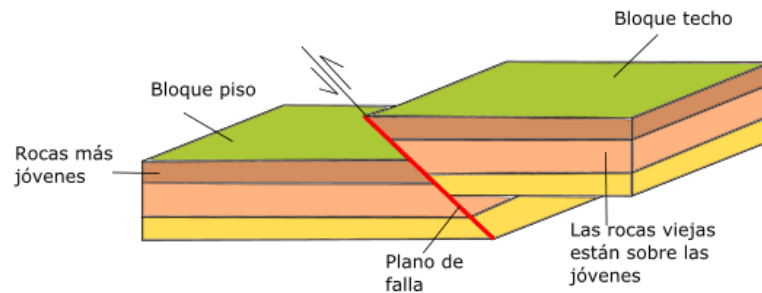


Figura 4: Falla transformante con desplazamiento vertical de tipo inversa.
Fuente: <https://geologiaweb.com/geologia-estructural/fallas-geologicas/>

- Fallas oblicuas: son fallas que tienen una dirección de movimiento intermedia entre las fallas de desplazamiento vertical y las horizontales.

Muchas fallas se pueden observar en el propio relieve de la corteza terrestre, por las montañas o por valles o por el desplazamiento de un río. En la actualidad hay fallas que permanecen inactivas pero que pueden activarse en un futuro. Los movimientos producidos por estas fracturas pueden causar terremotos de gran magnitud como el de San Francisco, CA en 1906, con una magnitud de 8.25, producido por la falla de San Andrés, en California.

El movimiento entre dos placas en los límites o el que se produce en las fallas, va generando una tensión que se acumula a lo largo de un periodo de tiempo en las rocas situadas en lados opuestos de la falla, de modo que cuando esta energía se libera da lugar a terremotos, de mayor o menor magnitud dependiendo de la zona en la que nos encontremos, que pueden generar daños relevantes en las estructuras de los edificios y lo más importante, provocar una gran pérdida de vidas humanas. Nuestro objetivo en este documento de investigación es analizar en primer lugar los efectos y cargas que pueden generar en los edificios, detallar los diversos métodos convencionales y los dispositivos antisísmicos que existen hoy en día, para posteriormente sacar nuestras conclusiones sobre cuales son mas o menos efectivos y sus razones.

2.2. Sismos y su propagación:

Los sismos se producen cuando una gran cantidad de energía se libera debido a los límites de placas y a las fallas. Su punto de origen se denomina foco y suelen producirse bajo una profundidad que puede alcanzar kilómetros, lo que no evita que se perciban en la superficie. Desde el foco la energía se irradia en forma de ondas. Si trazamos una línea perpendicular a la superficie terrestre, obtendríamos el denominado epicentro.

Podemos distinguir dos tipos de ondas, las ondas superficiales, que como su nombre indica viajan sobre la superficie de la Tierra, y las ondas de cuerpo, ondas que viajan por el interior de la Tierra. Dentro de este último grupo encontramos las siguientes ondas, según cómo viajan a través de los materiales:

- Ondas primarias, P: son las primeras ondas que se perciben en un sismo, son ondas longitudinales y hacen que el terreno se estire y se comprima en la dirección de propagación de la onda.

- Ondas secundarias, S: son ondas transversales, más lentas que las anteriores, y su modo de propagación es en perpendicular a la superficie terrestre, sus ondas serian similares a cuando sacudimos una cuerda.

Las ondas superficiales u ondas L (Love), tienen un movimiento muy similar a las ondas S, pero en el plano horizontal y son las más destructivas para los edificios. Tienen una amplitud mayor que las ondas S y son las últimas ondas en registrarse. Otro tipo de onda superficial seria la onda Rayleigh, ondas R, la trayectoria que describen las partículas son elípticas y retrogradas en el plano de dirección de la onda, como si fueran olas de mar.

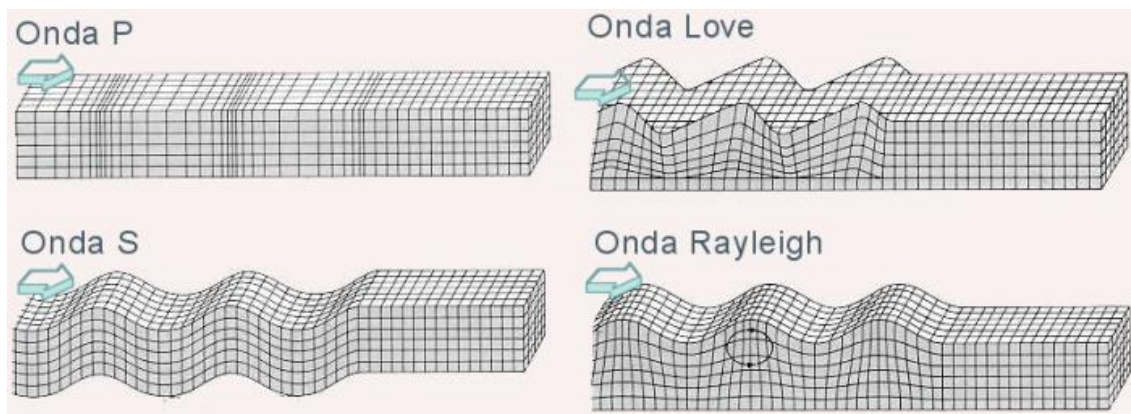


Figura 5: Tipos de ondas.

Fuente: <https://rapsodiadigital.wordpress.com/2017/09/18/sismos-un-fenomeno-impredecible/>

3. Efectos sísmicos sobre edificios:

Las ondas sísmicas producen, por lo tanto, vibraciones horizontales y verticales, siendo las primeras, las fuerzas de inercia, las más dañinas para la estructura. Ésta fuerza se representa como las fuerzas horizontales producidas por el viento y es proporcional al peso muerto que soporta la estructura. Otros factores que debemos tener en cuenta son el periodo de vibración fundamental del edificio y la efectividad del mismo para absorber energía.

- Fuerza lateral: es la que mayores daños causa sobre la estructura. El hecho de que sea proporcional al peso muerto de las estructuras, es una gran desventaja que debemos tener en cuenta a la hora de elegir determinadas conexiones y materiales para evitar crear una masa innecesaria, especialmente en los pisos superiores. La fuerza total horizontal se distribuye entre los elementos verticales y horizontales del sistema, en proporción a su rigidez, comportándose el edificio como una viga en voladizo vertical sometida a una fuerza.
- Periodo fundamental de vibración de la estructura: en la que se deben tener en cuenta que cada una de las partes que componen un edificio tienen su propio periodo fundamental y pueden influir significativamente en su respuesta. El periodo de vibración se determina por su masa, su rigidez y el tamaño de la estructura. Los edificios que son más robustos, con sistemas lateralmente rígidos y de baja altura, suelen tener periodos más cortos, los cuales sufren problemas muy graves ya que pueden entrar en resonancia con el sismo, cuya vibración se caracteriza por tener periodos cortos también, haciendo que la amplitud de respuesta del edificio aumente con cada vibración pudiendo llegar hasta el colapso. Conforme las construcciones van aumentando de altura van adquiriendo una mayor flexibilidad y el periodo fundamental, que también aumenta con la altura del edificio, es tan largo que puede producir el conocido efecto

latigazo en el que distintas partes del edificio se dirigen en direcciones opuestas al mismo tiempo.

- La amortiguación de una estructura depende de su grado de ductilidad, así cuanto más capacidad tenga de deformarse en su rango plástico, más energía disipará. Sin embargo, tampoco podemos hacer que la estructura deforme demasiado pues sino aparecerían los conocidos como efectos P-delta, o momentos de segundo orden.

Para sismos moderados, el comportamiento general de los edificios en primer lugar suele ser resistir en su rango elástico lineal, siendo su rigidez la mayor posible. Cuando debido a fallos frágiles, agrietamiento o a que se ha superado simplemente el límite elástico de la estructura, la rigidez se reduce considerablemente entrando en acción la amortiguación de la estructura, que en el rango plástico como ya hemos mencionado, depende de la ductilidad del sistema. Esta permite una mayor deformación con respecto a la del punto de fluencia hasta llegar al colapso.

Cuando una estructura ha pasado de tener un comportamiento lineal a uno no lineal, el comportamiento dinámico de la estructura se hace más complejo, apareciendo agrietamientos, desprendimientos, pandeos locales y deformaciones residuales de la estructura, es decir, un comportamiento no lineal de la estructura podemos decir que se asocia a daño (Bazán, Meli, 2010). Por ello nos conviene tener cierta ductilidad la cual no solo evita la aparición de fallas de tipo frágil, sino que además proporciona un amortiguamiento adicional. La combinación entre resistencia y ductilidad es clave para conseguir que la energía se disipe ya sea por la resistencia a deformarse debido a la rigidez en su rango elástico o bien por la ductilidad que posee el sistema en su rango plástico, o bien por una combinación entre ambas que nos permita alcanzar un funcionamiento óptimo de la estructura que pueda disipar la mayor cantidad de energía sin alcanzar el colapso.

Debemos imaginar que dicha fuerza si no es disipada ya sea por deformación, agrietamiento, ductilidad u otros mecanismos de disipación, debe ser absorbida y transmitida a lo largo de la estructura, evitando concentrar demasiados esfuerzos en una zona determinada. Para que el edificio pueda resistir favorablemente frente a un sismo es necesario conseguir que todas las partes que lo componen, conexiones, elementos estructurales y sistemas estructurales, se muevan como uno solo. Por ello es muy importante prestar especial atención al detalle constructivo de las conexiones y además dejar cierto grado de movimiento independiente en las partes del edificio. Cada tipo de conexión, cada elemento constructivo, barras, muros, ... y cada material tiene sus propias características y conviene conocerlos para que, a la hora de construir un edificio en lugar de ser perjudiciales para la estructura general, se complementen unos con otros para absorber energía, transmitirla y disiparla.

4. Evaluación de la acción sísmica:

Los comportamientos dinámicos en una estructura no suelen tenerse en cuenta a la hora de su cálculo, pues la aplicación de las cargas ocurre en un espacio de tiempo tan amplio que no afecta al periodo natural del propio edificio. El periodo natural del edificio depende de su masa y de su rigidez, mientras que el tiempo de aplicación de las fuerzas no se iguale a dicho periodo no tendríamos por qué preocuparnos. Sin embargo, cuando ocurre un sismo, la fuerza de aplicación ocurre en segundos y ésta somete a la estructura a un problema dinámico, donde ya entran aspectos como la velocidad, aceleración, inercia, vibración, todos estos relacionados con la energía cinética.

Estos fenómenos pueden ocasionarse por distintos tipos de entornos dinámicos, donde podemos diferenciar las excitaciones deterministas y las excitaciones aleatorias, siendo estas últimas las más fuertes, donde se pueden producir una gran cantidad de excitaciones en un periodo de tiempo muy corto. De estas últimas nos centraremos en las excitaciones aleatorias transitorias, de corta duración, que son las que se producirían por los terremotos.

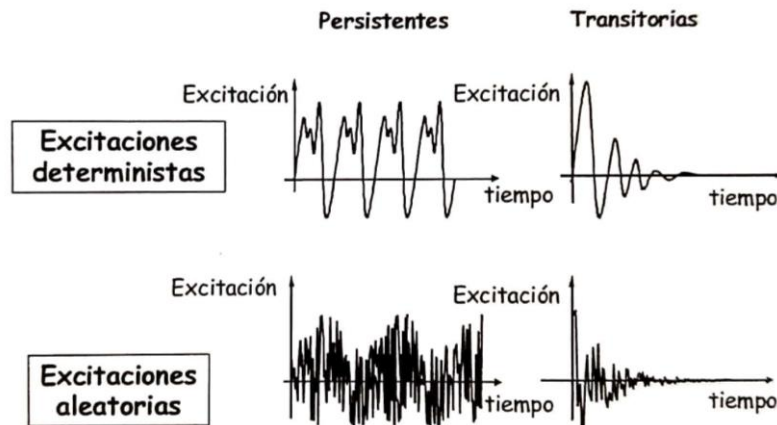


Figura 6: Tipos de excitaciones.
Fuente: E. F. Tremps, 2015

Para estudiar la respuesta sísmica de un edificio, recurriremos al análisis dinámico de un sistema sencillo de un grado de libertad el cual nos puede ofrecer magnitudes básicas que también caracterizan sistemas más complejos de n grados de libertad, como la *frecuencia natural* y el *coeficiente de amortiguamiento* (Tremps, 2015). Al ser sometido a una fuerza sísmica, se producirá un desplazamiento de los puntos materiales de la estructura y, por lo tanto, éstos tendrán una velocidad y una aceleración, una energía cinética. Por ello tendremos una fuerza de inercia, una fuerza de deformación y una fuerza de amortiguación, las cuales hacen referencia a la masa, a la rigidez y a la histéresis de la estructura, respectivamente. Para calcular la respuesta necesitaremos un modelo matemático de un grado de libertad el cuál someteremos a la mecánica newtoniana, teniendo en cuenta la segunda ley de Newton, ley de la inercia, con la que obtendríamos a través de una serie de cálculos que la ecuación de equilibrio dinámico que es una ecuación diferencial, lineal, de segundo orden, de una sola variable, el tiempo, y de coeficientes constantes entre las fuerzas es:

$$p = m\ddot{u} + c\dot{u} + ku$$

Figura 7: Ecuación de D'Alembert.
Fuente: Tremps, 2015

Siendo:

- p : fuerza externa a la estructura
- $m\ddot{u}$: fuerza inercial, debida a la masa
- $c\dot{u}$: amortiguamiento inherente del sistema
- ku : fuerza elástica

Housner propone utilizar el concepto de energía como herramienta para determinar el comportamiento y la respuesta de una estructura ante cargas dinámicas (Oviedo, Duque, 2006). La ecuación de equilibrio dinámico que hemos obtenido también podemos obtenerla basándonos en el principio de conservación de energía, tendríamos la ecuación del balance de energía en el sistema:

$$E_K + E_D + E_S = E_I$$

Figura 8: Ecuación del balance de energía en el sistema.
Fuente: Oviedo, Duque, 2006

Siendo:

- E_K : la energía cinética de la masa
- E_D : la energía disipada por el amortiguamiento de la estructura
- E_S : la energía de deformación elástica del sistema
- E_I : la energía provocada por las cargas dinámicas, sismo o viento

Como podemos ver la energía del sismo se disipa por la energía cinética que se crea debido a la inercia de la masa, la energía de la deformación y la energía disipada por la histéresis propia de la estructura. Si queremos introducir un amortiguador para ver la diferencia entre una estructura con dispositivos antisísmicos y otra sin amortiguadores, tendríamos que introducir un término en esta ecuación que lo representase, quedando la ecuación como:

$$E_K + E_D + E_{Ss} + E_{Sp} + E_P = E_I$$

Figura 9: Ecuación del balance de energía en el sistema con amortiguadores.
Fuente: Oviedo, Duque, 2006

Como podemos ver el término E_S se ha dividido en dos pues en la deformación de la estructura debemos tener en cuenta su rango elástico y plástico. Con esta ecuación podemos ver qué términos nos interesa aumentar o disminuir. Por una parte, si nos centramos en el lado izquierdo de la ecuación, mediante las técnicas convencionales podríamos aumentar el término de la deformación de la estructura, E_S , más concretamente su rango plástico, pues cuanto mayor sea, más energía disipará. Lógicamente, el término que representa la elasticidad, E_{Ss} , no disipa apenas energía y por ello no nos interesa aumentarlo. Otro término que podríamos aumentar, pero esta vez mediante técnicas más avanzadas es E_P , usando dispositivos como amortiguadores de tipo friccionante, viscoelásticos, etc. Por otra parte, si nos centramos en la parte derecha de la ecuación, en el término E_I , que hace referencia a la energía que entra en la estructura, podemos reducirla notablemente mediante aisladores sísmicos. Así, podemos ver que tenemos tres formas de abordar el problema y que nos permiten conseguir nuestro objetivo principal que es reducir la respuesta sísmica del edificio. A continuación, detallaremos estas tres formas con sus ventajas e inconvenientes y mostraremos algunos ejemplos donde se haya hecho uso de los mismos, con el objetivo de finalmente sacar nuestras conclusiones.

5. Formas de atajar estos efectos:

Los efectos debido a las cargas dinámicas de un sismo se pueden disipar mediante técnicas convencionales, que significa construir una estructura con materiales tradicionales, teniendo en cuenta una serie de requisitos impuestos por las normas y recomendaciones para realizar una estructura adecuada en cuanto a su geometría, detalles constructivos y materialidad. Otra opción posible sería mediante técnicas más avanzadas que suponen el uso de dispositivos amortiguadores que permiten crear una estructura más dinámica con formas geométricas más complejas, menos robustas y menos restringidas.

5.1. Criterios generales de diseño ante un sismo:

A la hora de diseñar un edificio frente a un sismo, no solo debemos dimensionar cada una de las partes de la estructura para soportar unas fuerzas internas determinadas, sino que además debemos buscar la solución más apropiada tras el análisis de varios tipos de estructuras. Debemos encontrar un sistema estructural en el que todas las propiedades del edificio se relacionen de la mejor manera posible y en cuanto a propiedades hablamos de resistencia, rigidez y absorción de energía, entre otras. Además, debemos tener en cuenta que su costo final sea el apropiado para el tipo de edificio que vayamos a construir, contando con su costo inicial, el de mantenimiento y el costo esperado de los posibles daños. Se debe realizar también un estudio de cómo se comportarán la estructura, los materiales y las conexiones de cada una de las partes del edificio cuando se sometan a varios ciclos de carga de gran magnitud.

En los primeros pasos del diseño nos conviene conocer y tener en cuenta ciertos aspectos básicos desde el punto de vista del cálculo y desde el conceptual. Las primeras decisiones sobre como diseñaremos un edificio son muy importantes, ya que determinan el comportamiento estructural global y pueden afectarnos muy negativa o positivamente durante el transcurso de un sismo.

La complejidad general, la variación de masas y rigideces, distribución al azar de los elementos verticales y horizontales u otros, pueden provocar daños que podrían haberse evitado si no nos paramos a pensar cuales de los sistemas hará que nuestro edificio funcione de la forma más óptima posible y se adecue a los requisitos necesarios. Dado que no tenemos el tiempo suficiente como para estudiar cada una de las alternativas posibles, se redactarán a continuación algunos de los conceptos básicos a tener en cuenta en estos primeros pasos, los cuales nos garantizarán ya desde el principio cierta seguridad con respecto a algunos de los problemas que se han ido dando en edificios mal diseñados y que podían haberse evitado.

- Simetría: las estructuras simétricas se prefieren pues tanto para una respuesta lineal como no lineal distribuyen los esfuerzos uniformemente por la estructura, de modo que no se producen concentraciones de daño. Así, si hubiera cualquier elemento, como cajas de ascensores o escaleras, o el simple hecho de que en la propia estructura hubiese una diferencia de rigideces entre unos miembros y otros, se podría generar una asimetría en cualquiera de los ejes ortogonales del edificio que podrían generar excentricidades torsionantes que provocarían daños muy graves. Esto se puede solucionar en el caso de los elementos, o bien rompiendo la conexión de éstos con la estructura principal mediante unas juntas, o bien rigidizándolos más o menos dependiendo de la rigidez de la estructura. En el caso de los miembros estructurales, nos conviene que éstos sean similares entre sí, o con características parecidas para evitar que las diferencias nos jueguen una mala pasada.

- Uniformidad: La irregularidad en la continuidad de los elementos de un edificio nos puede dar problemas a la hora de conseguir una homogénea transmisión de esfuerzos, induciendo a crear tensiones elevadas en algunas partes del edificio. Cualquier diferencia de materiales, de masa, o de rigidez, crea un aumento de esfuerzos en zonas de la estructura, tanto en secciones verticales como horizontales que pueden producir daños materiales. Esta diferencia se puede tratar de evitar o, si se trata de una decisión arquitectónica, bastaría con disponer de las adecuadas juntas o conexiones que absorban esta diferencia de esfuerzos. También podemos crear un balance de esfuerzos mediante la modificación de la rigidez o la geometría de ciertas secciones, lo que nos ayudaría a evitar reparaciones innecesarias y que ante un sismo provocarían daños mas graves no previstos.

- Redundancia o hiperestatismo estructural: el hecho de construir una estructura completamente simétrica y uniforme no nos garantiza lamentablemente que no vayamos a tener más problemas a los que enfrentarnos. Y es que, si el centro de masas no coincide justo con el centro de gravedad a pesar de tener las características mencionadas, podría generarse un aumento de esfuerzos en partes donde no estaban previstas, el posible fallo de estos elementos y finalmente acabaríamos teniendo como consecuencia una estructura asimétrica. Una solución a este problema es disponer de una redundancia estructural o de mecanismos alternativos de transmisión de cargas (Bozzo, Barbat, 2000), añadiendo elementos que ayuden a contrarrestar los esfuerzos o haciendo que ciertos elementos de la estructura sean más dúctiles para poder transmitir una fracción de las cargas laterales al resto de la estructura.
- Líneas de defensa escalonadas: se trata de realizar un sistema dual que se encargue de absorber parte de las fuerzas laterales. Éste basa su eficacia en que cuando el primer sistema de elementos frágiles ha sufrido un agrietamiento, el segundo sistema proporciona una segunda línea de defensa, absorbiendo parte de la fuerza lateral que provocaría el colapso del primer sistema, resistiendo a ellas y adquiriendo además un comportamiento más dúctil que el primero, el cual es más rígido y fuerte.
- Fallo frágil y detalles que proporcionan ductilidad: con el objetivo de evitar un fallo frágil que conlleve una pérdida de la resistencia portante de la estructura, ésta se puede plantear ser más dúctil, dentro de los límites de la flexibilidad y según la acción sísmica. Dicho aumento de ductilidad reduciría las fuerzas sísmicas y por lo tanto, los costes de reparación, aunque hacer este tipo de estructura requiere de un mayor coste de construcción. La elección de detalles constructivos dúctiles contribuye a evitar posibles fallos frágiles en los extremos de columnas o vigas.
- Resonancia suelo-estructura: en general, se observa un mayor daño en estructuras flexibles cuando las condiciones locales de suelo corresponden a suelo blando y una mayor concentración de daño en estructuras rígidas en condiciones de suelo firme. Por ello se recomienda emplear estructuras flexibles en suelo firme y estructuras rígidas en suelo blando (Bozzo, Barbat, 2000). Ello es debido a que, si entran en resonancia el suelo y el edificio, provoca que la amplitud de la respuesta del edificio sea cada vez mayor, algo que podría provocar daños muy graves incluso el colapso de la estructura.
- Compatibilidad de deformaciones entre subsistemas estructurales: como es lógico al disponer de distintos sistemas estructurales, como pórticos, muros de cortantes, etc., se debe asegurar que todos juntos funcionen adecuadamente y que la respuesta de uno no afecte al otro.
- Separación entre edificios: en muchos casos a la hora de diseñar un edificio, nos centramos en realizar un buen diseño de este sin tener en cuenta su entorno más próximo. De ahí que este se considere otro punto que, aunque parece lógico, muchas veces no se tiene en cuenta. Para garantizar la seguridad de nuestro edificio y la de los edificios colindantes tenemos varias opciones, como la de disponer de una distancia suficiente entre ambos, proyectar una estructura más rígida o emplear mecanismos de disipación de energía.
- Masas innecesarias: las fuerzas laterales de un sismo son proporcionales a la masa de un edificio, por lo tanto, nos conviene reducir todas aquellas masas de las que se puedan prescindir, para reducir con ello la fuerza que más afecta al edificio durante

un sismo. Es conveniente por ello el empleo de forjados con un menor peso propio puesto que si reducimos su peso a la mitad, la fuerza sísmica se reducirá de forma proporcional (Bozzo, Barbat, 2000).

- Elementos no estructurales: aunque muchas veces pensemos que no aportan rigidez o resistencia, al final terminan formando parte del conjunto y pueden afectar muy negativamente en la respuesta de la estructura, creando esfuerzos de torsión si no se disponen simétricamente en planta, o generando una mayor rigidez no prevista en ciertas partes, teniendo consecuentemente daños inesperados. Por ello, es necesario tenerlos en cuenta a la hora de diseñar el edificio en las primeras etapas de su planteamiento.

5.1.1. Sistemas estructurales básicos:

En términos generales, se busca que una estructura sísmica además de que sea sencilla, simétrica y continua, se busca que sea resistente en ambas direcciones, que la transmisión de cargas se realice de la manera más directa y regular posible de unos elementos estructurales a otros hasta su llegada al suelo, y por último, que tenga cierta ductilidad que le permita alcanzar en su rango plástico la máxima deformación posible para disipar energía. Todo ello con el objetivo de reducir vibraciones, concentración de esfuerzos y efectos torsionales innecesarios.

En la actualidad se establecen una serie de sistemas estructurales básicos que, junto a los requisitos establecidos para cada tipo de material, ofrecen ya de por sí, unas características previas y adecuadas para soportar cargas dinámicas moderadas. No garantizan que el edificio no vaya a sufrir daños, pero sí que sea más rígido y resistente frente a estas cargas y que disipen energía mediante deformaciones inelásticas. Por lo tanto, los sistemas más conocidos son:

Marcos rígidos: son sistemas tridimensionales de marcos, que debido a su geometría son rígidos en ambas direcciones. Además, aportan una buena ductilidad y disipación de energía. Las partes que componen la estructura se dimensionen de tal manera que se produzca el mayor número de articulaciones plásticas antes del colapso de la estructura, en las partes donde mayor ductilidad se pueda lograr. A no ser que las secciones transversales de la estructura sean muy robustas, se producen esfuerzos a flexión en las vigas que hacen que el sistema sea débil frente a cargas laterales. Los edificios de marcos presentan una gran flexibilidad, lo que conlleva dos consecuencias, que su desplazamiento sea en la mayoría de los casos más elevado del permitido en las normas y que su periodo se alargue, que puede resultar negativo en algunas situaciones. Debido a sus desplazamientos, su diseño se suele incorporar en edificios de baja o mediana altura.

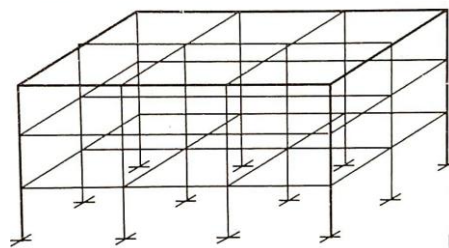


Figura 10: Marco tridimensional.
Fuente: Bazán, Meli, 2010.

Sistemas tipo cajón: es una combinación entre elementos planos verticales y horizontales conectados para crear cierta continuidad. Los muros de carga separados a una distancia reducida aumentan la rigidez del edificio frente a cargas laterales. Sin embargo, los muros se suelen construir con tales dimensiones que su falla suele producirse por esfuerzos a contante y no por flexión y por lo tanto no se espera que se disipe una gran cantidad de energía. Además, también es más

ventajoso hacer que estos muros sean construidos para resistir frente a cargas verticales y no a flexión. Se suelen usar para edificios de mediana y baja altura.

Marcos rigidizados: Tiene una mayor capacidad de resistencia frente a cargas laterales que los marcos rígidos y además no se requiere de un coste demasiado elevado. Estos sistemas basan su eficacia en la distribución de elementos rigidizantes, tales como muros o contravientos, que hacen que presenten un buen comportamiento frente a los sismos, poseyendo una buena rigidez y resistencia. Sin embargo, en este tipo de estructuras se produce una gran diferencia de rigidez entre las partes rigidizadas y las que no, de modo que se debe tener cuidado con estas últimas y con las uniones entre ambas, para que no se produzcan concentraciones excesivas en dichas zonas que puedan provocar daños, como por ejemplo fuertes momentos de volteo en la base del núcleo que transmitan una elevada carga a la cimentación. Para evitar esto, hay que evitar la concentración de muros o contravientos, dispersándolos por la planta, buscando crear una planta más homogénea en cuanto a rigidez y comportamiento, más equilibrada.

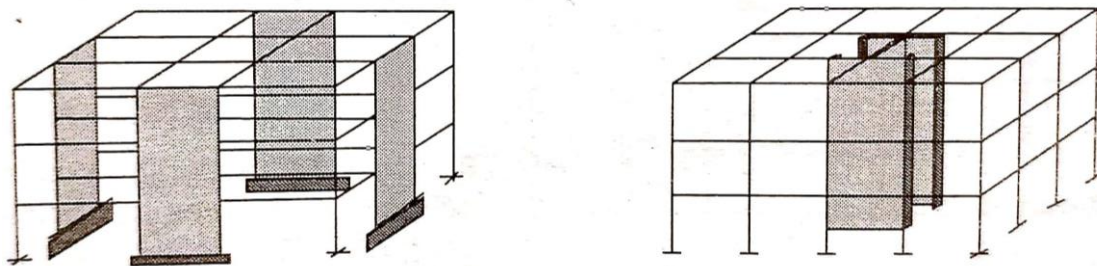


Figura 11: Marco rigidizantes, con muros de rigidez o con núcleos, respectivamente.
Fuente: Bazán, Meli, 2010.

Otro aspecto negativo a remarcar es el hecho de que la capacidad mecánica de muros y de contravientos se reduce con la altura del edificio. Así, si el edificio no posee demasiadas alturas son eficientes, pero si la altura es demasiado elevada, el desplazamiento en el último piso es mayor que si se dispone de un marco rígido solamente.

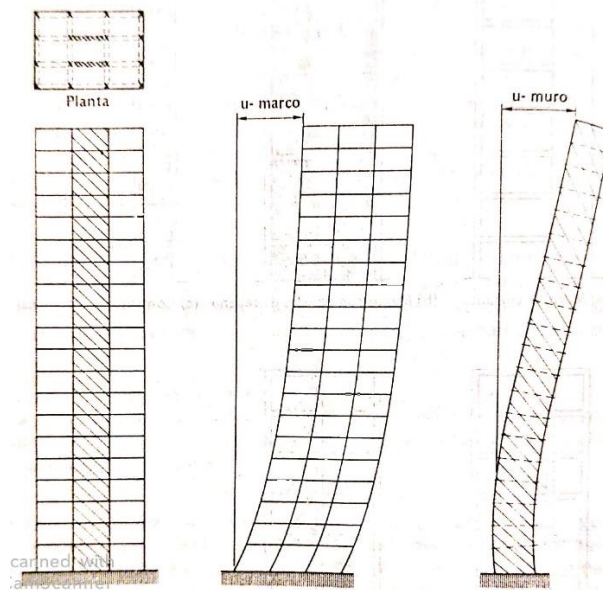


Figura 12: estructura en posición de equilibrio, desplazamiento estructura de marcos, desplazamiento muro rigidizantes.

Fuente: Instituto mexicano del cemento y del concreto, A.C., 1991.

Fachadas rígidas: este tipo de fachadas son muy usadas ya que tienen varias ventajas como distribuir parte de las cargas al perímetro y de tener una planta más libre de pilares y muros. La rigidez se puede conseguir mediante la disposición de un gran número de columnas en fachada, o mediante la combinación de marcos y crujeías con contravientos o muros de rigidez, como podemos ver en la figura 13. Lo mejor sería disponer de un gran número de contravientos que envuelvan el edificio dándole una gran estabilidad frente a cargas laterales, pero a veces es difícil combinar funcionalidad con estética.

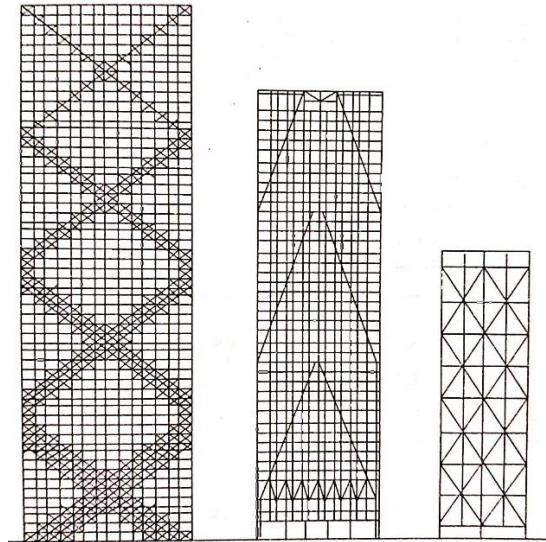


Figura 13: Fachadas rigidizadas mediante contravientos.
Fuente: Bazán, Meli, 2010.

En la actualidad existen numerosas normativas que determinan requisitos conceptuales básicos que una estructura frente a sismo debería cumplir y las comprobaciones necesarias que se deben realizar según el tipo de estructura para saber que se establecen unas condiciones de seguridad mínimas.

5.2. Uso de las técnicas convencionales

5.2.1. Construcción de edificios sismorresistentes de acero:

Se trata de un material muy industrializado y que presenta buenas cualidades, tales como una alta ductilidad, que es la capacidad que tiene el material de poder deformarse en su rango plástico, además de una alta resistencia, sobre todo a tracción, y rigidez. Esto hace que sea muy recomendable frente a sismos.

Estos materiales son muy usados ya que cuando son sometidos a cargas cíclicas, se produce el efecto Bauschinger, unos ciclos de histéresis donde en cada ciclo se disipa cierta cantidad de energía, mientras el material permanezca en su rango plástico. Conforme la velocidad del movimiento adquiere un valor negativo, la tensión y la deformación se reducen hasta alcanzar también valores negativos. Al volver la velocidad a valores positivos, ocurre algo parecido con el resto de componentes de modo que se forman unos ciclos, donde gracias a la deformación que se produce en el material se disipa energía, como se puede ver en la figura 14.

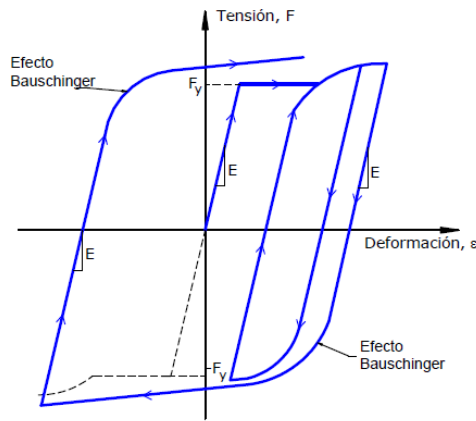


Figura 14: efecto Bauschinger, ciclo histérico del acero.
Fuente: Crisafulli, 2018.

Por ello nos conviene que la ductilidad del acero sea elevada porque cuanto más deformación en el rango plástico menos probabilidad hay de colapso en la estructura o al menos más tiempo habrá de reacción. Esta ductilidad puede verse afectada por varios factores como el desgarramiento laminar, la fatiga de alto o bajo ciclaje, la temperatura, problemas en la ejecución y en las técnicas de fabricación, entre otros.

El desgarramiento laminar está siendo cada vez más controlado mediante la reducción de la inclusión de no-metales u otras sustancias durante el proceso de laminación, que puedan perjudicar el comportamiento del metal produciendo micro-fisuras internas que lo debilitan.

La fatiga tanto de alto como de bajo ciclaje se debe a que el metal es sometido a varios ciclos de carga, en mayor o menor cantidad, respectivamente, que pueden producir fracturas con niveles de tensión menores a la de resistencia a tracción e incluso a la tensión de fluencia. La fatiga de bajo ciclaje puede ser debida a eventos sísmicos y cuando se da, puede producir fracturas las cuales disminuyen la capacidad resistente de la estructura y con ello su ductilidad. Es un factor que se suele tener en cuenta en los cálculos.

En cuanto a aspectos generales en las estructuras de acero, el mayor problema que presentan es la pérdida de la capacidad de determinadas partes de la estructura para mantener su posición inicial frente a esfuerzos de compresión, generándose así fenómenos de inestabilidad global o locales.

Otro fenómeno que afecta a las estructuras es el comportamiento no-lineal, el cual puede producirse por diversas situaciones como por las características propias del material como la fluencia, cuando la estructura se ve afectada por un excesivo desplazamiento que afecte a su equilibrio y su compatibilidad de movimientos, así como por el contacto entre materiales que presenten comportamientos diferentes frente al mismo esfuerzo. Uno de los efectos no-lineales más importantes en una estructura sometida a sismo son los efectos P-delta, donde conforme la estructura se deforma por el movimiento sísmico, se crea un momento debido a las cargas verticales, como podemos ver en la figura 15a.

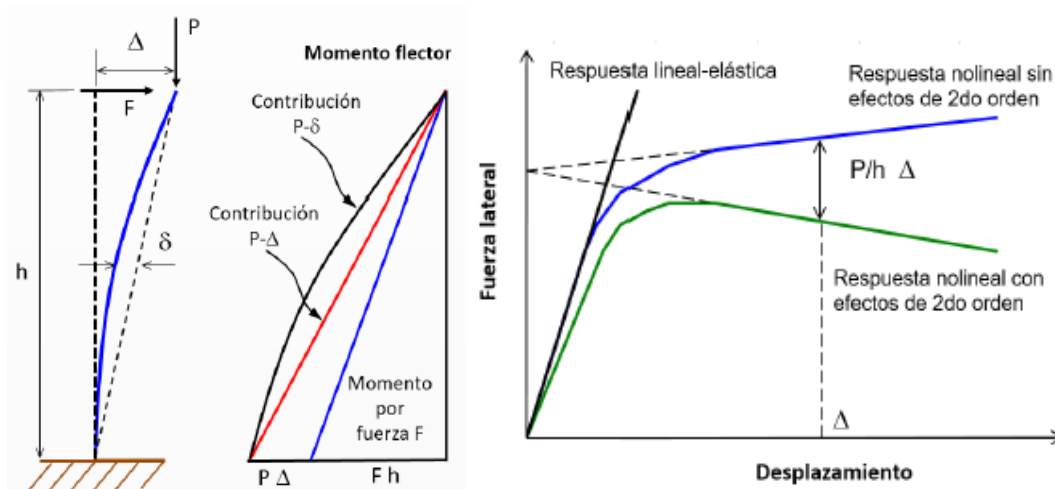


Figura 15a: Efectos P-Delta en una columna en voladizo. Figura 15b: Efectos P-delta en una estructura.
Fuente: Crisafulli, 2018.

En la figura 15b, podemos ver cómo afecta al comportamiento global de la estructura, los desplazamientos aumentan, se exige una mayor resistencia y la rigidez de la estructura se reduce. Este fenómeno puede llevar a reducir la disipación de energía prevista en una estructura trayendo consecuencias muy graves.

Con sus cualidades y debilidades tanto del material como de la estructura en mente, debemos diseñar una estructura fuerte frente a cargas dinámicas, pero con ductilidad no solo en cuanto a material sino también en cada una de las partes que componen la estructura. Con el diseño es necesario identificar las condiciones que pueden llevarnos a fallas de tipo frágil y adoptar estrategias para alcanzar una respuesta estable y con adecuada capacidad de disipación (Crisafulli, 2018).

5.2.2. Construcción de edificios sismorresistentes de hormigón.

Compuesto por cemento, agua, áridos gruesos y finos, es un material que destaca por su resistencia a compresión, y no solo eso, sino que además la mayoría de sus propiedades dependen de dicha propiedad. Su dosificación debe realizarse de tal manera que se consiga adquirir las exigencias deseadas en cuanto a resistencia y durabilidad, proporcionando un tipo de cemento adecuado, controlando los tipos de áridos, así como la cantidad de agua que se introduzca a la mezcla.

El hormigón posee unas cualidades que, unidas al acero, lo convierten en un material muy usado en la construcción. El hormigón es un material poco dúctil, con una resistencia a tracción muy reducida a diferencia de su resistencia a compresión. Esta unión hace que estos dos materiales se complementen, creando un material resistente a compresiones y tracciones.

En cuanto a las estructuras de hormigón armado en general, se suelen requerir en las normas que sean estructuras que proporcionen seguridad y funcionalidad estructural, manteniendo las deformaciones de la estructura dentro de unos límites adecuados frente a las acciones previstas tratando de evitar el colapso de la estructura en el peor de los casos, seguridad en caso de incendio e higiene, salud y protección medioambiental.

En estructuras sometidas a sismos severos, se espera que sean capaces de experimentar cierta deformación en el rango no-lineal, con el objetivo de disipar energía, es decir, que tengan cierta ductilidad sin perder demasiada resistencia. Su nivel de ductilidad depende del tipo estructural, materiales, características geométricas, regularidad en planta y alzado de las masas y distribución de elementos resistentes (EHE-08). Además de ello, también es importante crear detalles estructurales que garanticen el confinamiento del hormigón en las zonas donde se prevé que se

produzcan rótulas plásticas, que eviten el pandeo de las armaduras en zonas de compresión y se potencie la rotura dúctil en las secciones más críticas (EHE-08). Así, se construye una estructura en la que, sometida a sismos sufrirá daños, pero daños que en la mayoría de los casos han sido previstos y ciertamente controlados, formando el máximo número de roturas plásticas.

5.2.3. Construcción de edificios sismorresistentes de mampostería

No presentan cualidades muy deseadas para su uso frente a cargas dinámicas elevadas pues presentan un comportamiento muy frágil, pero tienen cierta eficacia en edificios de baja altura frente a sismos reducidos, gracias a la elevada área transversal que pueden tener en cada una de las direcciones. Sus propiedades mecánicas dependen de las propiedades de las piezas y del mortero usados, así como del tipo de construcción de mampostería que se realice. En general, la resistencia en tensión es muy baja, la falla es frágil y la curva esfuerzo-deformación en compresión es prácticamente lineal hasta la falla (Bazán, Meli, 2010). La propiedad que más interesa de este tipo de construcción es su resistencia a cortante, la cual varía también según las propiedades del mortero usado.

Para mejorar su comportamiento y reducir la aparición de fallas frágiles, se suele emplear acero de refuerzo en el interior de los muros o como elementos de confinamiento, dando lugar a las mamposterías reforzadas y a mamposterías confinadas, respectivamente. Con esto, se pretende que la estructura se comporte como un todo, transmitiendo cargas de forma fluida, evitando la separación entre las distintas partes de una estructura y manteniendo la capacidad de carga tras su agrietamiento. Aun así, no se pueden esperar grandes deformaciones inelásticas por lo que tampoco se puede esperar que lleguen a disipar una elevada cantidad de energía.

5.2.4. Conclusiones generales:

Lógicamente, en todos los tres tipos de estructuras de acero, hormigón armado o mampostería, se buscan conseguir una vez alcanzado el comportamiento no-lineal, que la estructura sea lo más dúctil posible, con el objetivo de salvar vidas humanas.

Sin embargo, hay que destacar que la ductilidad significa que el material ha sufrido un daño y esto conlleva un coste de reparación, que puede ser elevado según como se haya construido la estructura y según la intensidad del sismo. Por lo tanto, no solo conviene que tengan ductilidad, sino también que tengan rigidez y que puedan aguantar en su rango elástico lo máximo posible. Se trata de realizar una combinación entre ambas, rigidez y ductilidad y buscar la respuesta estructural más adecuada para la zona en la que se sitúe, la función que vaya a desarrollar y el coste del que se disponga.

Podríamos entrar a definir, en cada uno de los tipos, los sistemas estructurales más adecuados para enfrentar un sismo, pero en este trabajo el objetivo es ver el comportamiento, las ventajas y desventajas generales del uso de una estructura con un material dado y realizar una comparación algo más general.

5.3. Uso de las técnicas avanzadas:

5.3.1. Introducción:

Las normativas nos ofrecen una serie de normas mínimas para garantizar que no se produzcan daños con un sismo moderado, que se limiten los daños en elementos no estructurales los cuales pueden llegar a ocasionar daños más graves, o que no se alcance el colapso de la estructura y con ello la pérdida de vidas humanas. Lógicamente, el factor económico juega un papel importante pues en muchas ocasiones no permiten el uso de estos dispositivos por su coste, sin embargo, el costo total quizá en la mayoría de los casos nos sale más económico invirtiendo en un dispositivo sísmico dispuesto desde un primer momento para evitar que se produzcan daños o en el peor de los casos el colapso. Muchas de las poblaciones hoy en día, como es el caso de Japón, Chile, Turquía, y otras muchas sufren constantemente agitaciones debido a la energía desprendida de las placas tectónicas, es algo inevitable. Si asumimos que a lo largo de los años de un edificio este se verá sometido a múltiples sismos de magnitudes en la mayoría bajas, pero con la posibilidad de que en algún momento se dé uno de una magnitud elevada, nos lleva a pensar que igual saldría más rentable construir una estructura fuerte y resistente a los sismos y con los dispositivos adecuados para permitir una duración más extensa del mismo. Mantener los edificios en pie, supondría no perder años en regenerar una población destruida en escombros, siendo algo muy importante en las regiones menos desarrolladas, ya que lo único que produciría sería más miseria.

Los dispositivos sísmicos son una adición al diseño sismorresistente convencional, el cual trata como hemos visto de dar rigidez a la estructura mientras se encuentre en el rango elástico y si llega al rango plástico, disipar energía por ductilidad. Estos dispositivos se encargan de disipar una gran parte de la energía sísmica e incluso pueden modificar la energía de entrada a la estructura, como hacen los aisladores sísmicos. Además, reduciendo los esfuerzos también contribuyen a reducir los daños en elementos no estructurales, los cuales no se suelen tener en cuenta a la hora de diseñar una estructura, pero que tienen una gran importancia. Las sensaciones de agitación se reducen y ayudan a mejorar el bienestar de las personas que se encuentren en el edificio durante un sismo. Como vemos, la introducción de estos dispositivos en la estructura de un edificio produce únicamente beneficios.

Principios generales de un sistema de amortiguación:

- Debería ser accesible.
- Debería necesitar poco mantenimiento.
- Su diseño debe tener en cuenta su posible corrosión, su envejecimiento, su exposición a la humedad y a la temperatura, a la fatiga, etc.
- Donde haya grandes oscilaciones, debe haber un amortiguador asociado por seguridad.
- Deben poder tener la posibilidad de ajustarse, aunque hay algunos que ya por su diseño no se ajustan.
- Su diseño debe ir lógicamente acompañado de pruebas experimentales.

Estos dispositivos pueden tener desde un sistema de funcionamiento muy sencillo hasta un sistema más complejo completamente automatizado. Se pueden clasificar en cuatro grupos según su modo de funcionamiento: sistemas activos, sistemas pasivos, híbridos y sistemas semiactivos. Se intentará seguir con la clasificación realizada por el ISO 3010, que es la siguiente:

Sistema de Control	Tipo	Tipo	Dispositivo	
Control pasivo	Aislamiento sísmico	Mecanismos deslizantes o de rodillos	Apoyo de rodillos	
			Apoyo de placa deslizante, tipo péndulo, basculante	
			Capa deslizante	
			Otros	
		Elemento flexible	Elastómero de multicapas	
			Dispositivo flexible	
	Otros			
	Disipación de energía	De tipo hysterético	Acero	
			Plomo	
			Otros	
		De tipo friccionante		
		De tipo fluido	Hidráulico	
			Viscoso	
			Otros	
	De tipo viscoelástico			
Efecto de masa adicional	De masa y resorte			
	De tipo pendular			
	Vibración de líquido			
	Otros			
Otro				
Control semiactivo	Control de amortiguamiento	Sistema de amortiguamiento variable	De tipo hidráulico	
			Otro	
	Control de rigidez	Sistemas de rigidez variable	Riostra	
			Otro	
Otro				
Control activo e híbrido	Efecto de masa	Amortiguamiento activo de masa		
		Amortiguamiento híbrido de masa		
	Control de fuerza	Tendón activo		
		Otro		
	Otro			

Figura 16: Clasificación de las técnicas de control de respuesta sísmica.
Fuente: ISO 3010.

5.3.2. Sistemas de control activos:

Son sistemas que buscan controlar mediante fuerzas de control y en tiempo real, la respuesta del edificio frente a acciones externas dinámicas, mediante el uso de actuadores, sensores y controladores. Los esfuerzos exteriores, así como la respuesta inmediata de la estructura, son detectados por los sensores y analizados por sistemas computacionales de control o también denominados controladores, que a través de algoritmos de control establecen los parámetros a los que los actuadores deben funcionar, añadiendo unas fuerzas determinadas que controlan la respuesta de la estructura, adecuándola a las deformaciones, vibraciones, etc. Suelen requerir de una fuente externa para su puesta en funcionamiento, lo que supone una de sus mayores desventajas, pero se estudia el hecho de que puedan permanecer bloqueados y manteniendo la estructura rígida, si dicha fuente dejase de funcionar, como veremos más adelante.

Los sistemas de control activo con el objetivo de mejorar la seguridad y el servicio (Senatore, Duffour, Winslow, Wise, 2017) de los edificios se han centrado en la reducción de las vibraciones o en el control de la deformación de la estructura debido a cargas elevadas provocadas por sismos, viento, etc. Para el control de la forma se utilizan los cables o tendones activos y los

arriostramientos activos, mientras que para el control de las vibraciones se utilizan los amortiguadores de masa activa, así como los amortiguadores de masa activa híbridos. Otros sistemas menos conocidos pero que también han sido estudiados son los conocidos como deflectores aerodinámicos de geometría variable y las máquinas neumáticas generadoras de pulsos, de los que daremos una breve descripción. Por lo tanto, tenemos el siguiente esquema:

- Control de vibraciones de la estructura:
 - o Amortiguadores de masa activa

- Control de la deformación de la estructura:
 - o Cables o tendones activos
 - o Puntales activos
 - o Estructuras adaptativas
 - o Sistemas activos de acoplamiento en edificios

- Otros:
 - o Deflectores aerodinámicos
 - o Sistemas de generación de pulsos
 - o Sistemas de variación de rigidez

Son sistemas que incluyen sensores de movimiento, sistemas de control y procesamiento de datos y actuadores dinámicos (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011). Requiere la incorporación de diversas tecnologías que le permiten detectar la magnitud del movimiento del terreno y mediante una medición de las aceleraciones en diversos puntos estratégicos de la estructura, establece una serie de parámetros en tiempo real para aplicar los esfuerzos necesarios para contrarrestar los efectos sísmicos. El funcionamiento del sistema podemos verlo en la figura 17, de modo esquemático y es el siguiente: los acelerómetros detectan el movimiento exterior y la respuesta de la estructura para introducirlos en el sistema, en el cual, mediante un algoritmo de control, se procesa la información para establecer las fuerzas necesarias que los actuadores, hidráulicos o electro-mecánicos, deben aplicar sobre masas, para estabilizar la estructura.

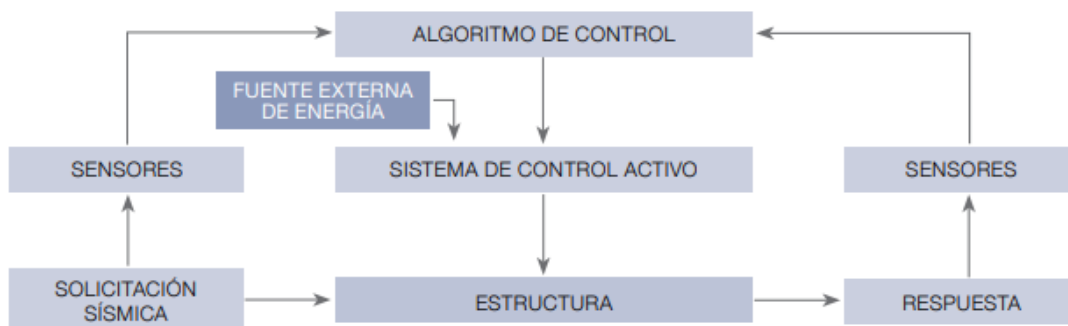


Figura 17: Esquema mecanismo de operación de sistemas activos.
Fuente: Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011.

El único inconveniente es que necesitan una fuente de alimentación exterior para ponerse en funcionamiento, una gran desventaja pues en muchos casos los sismos pueden provocar la caída de los postes de electricidad, con lo que estos sistemas dejarían de funcionar en ese mismo instante. Por ello requieren de otro generador externo de emergencia que sea independiente a la red general de corriente eléctrica, por si esta dejase de funcionar. Otra desventaja es que requieren de un mantenimiento y una vigilancia constante, que no siempre es fácil de conseguir.

Son los sistemas más complejos y caros pero su funcionamiento es de los mejores ya que tienen la capacidad de ir modificando y adaptando la respuesta del dispositivo conforme al movimiento externo.

Los sistemas activos se han desarrollado en Japón y en EEUU, pero sobre todo se han usado en Japón, siendo los más conocidos los osciladores de masa activa (AMD: *active mass driver* or *active mass damper*), los arriostramientos activos (ABS) y los tendones activos. Los dos últimos se encuentran en fase experimental y se detallarán más abajo.

5.3.2.1. Control de los modos de vibración.

Amortiguadores de masa activa sintonizada o amortiguadores de masa activa (ATMD: *active tuned mass damper*; AMD: *active mass drivers/damper*; respectivamente):

Debido a algunas limitaciones de los amortiguadores de masa pasivos, como el hecho de que no pueden ajustar con precisión a la frecuencia natural del edificio y que además tras un fuerte sismo, esta frecuencia puede llegar a cambiar lo que hace que el sistema se vuelva algo más eficiente tras el paso de varios sismos, sobre todo en estructuras irregulares, se decidió innovar en este tipo de sistema, incorporando un dispositivo que nos permitiera resolver este problema, permitiéndonos alcanzar un mejor rendimiento del sistema.

Son en realidad muy parecidos a los amortiguadores de masa sintonizada (AMS), cuyo funcionamiento se detallará más adelante, estando compuestos de un cuerpo con una gran masa, de un resorte y de uno o varios amortiguadores, que controlan el movimiento excesivo de la masa. La diferencia entre los AMD y los AMS, es que los primeros al ser un sistema de protección sísmico activo, disponen de unos sensores que captan el movimiento tanto del terreno como de la estructura, estableciendo unas variables de control, para que el actuador produzca la fuerza necesaria a la que tiene que moverse la masa del dispositivo amortiguador. La masa, en este caso, está conectada a la estructura mediante el actuador mientras que en el sistema pasivo se conecta a la estructura a través de un resorte y un dispositivo amortiguador.

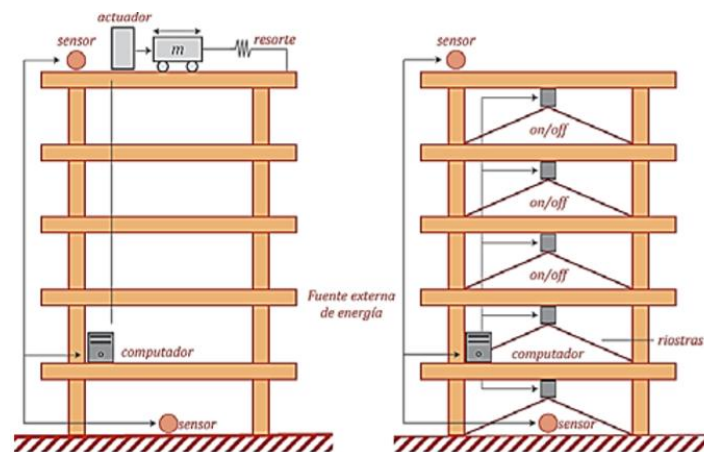


Figura 18: Efecto de masa a la izquierda y efecto de rigidez a la derecha.
Fuente: Genatios, Lafuente, 2016.

Una de las ventajas de los AMD, es que con un único dispositivo es posible controlar varios modos de vibración y en tiempo real, a diferencia de los amortiguadores de masa sintonizada, los cuales suelen ajustarse al primer modo fundamental de frecuencia de la estructura, por lo que para absorber frecuencias de modos superiores se necesitaría disponer de más de un AMS. Algo que es posible pues existen edificios con varios amortiguadores dispuestos en los últimos pisos de la estructura, encargándose cada uno de un modo de vibración determinado de la misma, pero que aumenta el costo de la construcción.

Uno de estos dispositivos fue usado en un edificio de 10 plantas y de estructura metálica, situado en Tokio, en 1989. Se usaron dos sistemas ATMD para controlar vibraciones tanto laterales como torsionales, y un algoritmo de control del tipo LQR. Tras la instalación, el edificio ha sufrido cargas debidas a sismos y tifones, reduciendo en hasta un 26% las vibraciones durante los sismos y un 33% los picos de respuesta debido a cargas de viento (Fisco, Adeli, 2011). Se ha remarcado que el uso de varios sistemas más reducidos de ATMD, son más eficientes frente a sismos que el uso de uno solo.

Actualmente, no son tan utilizados por su coste, pero se están realizando numerosos estudios pues su funcionamiento es muy idóneo sobre todo en poblaciones donde se producen vibraciones constantemente y de diversas magnitudes. Los estudios demuestran que este sistema en la mayoría de los casos funciona mejor que el sistema pasivo y de manera más efectiva frente a excitaciones externas y en edificios de gran altura.

Ventajas:

- Con un único dispositivo se pueden abarcar varios modos de vibración.
- Modifica la respuesta de la estructura en tiempo real.

Desventajas:

- Su coste económico, debido a los diversos mecanismos que componen el sistema.
- Necesita una fuente externa para poder activarse.
- Requieren de un espacio con dimensiones grandes.

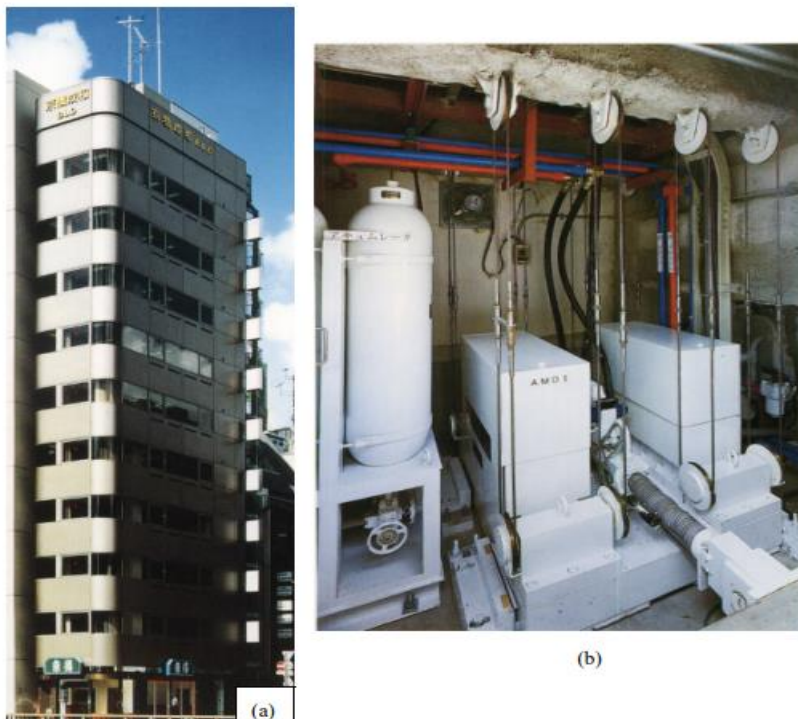


Figura 19a: Edificio Kyobashi Siewa. Figura 19b: Amortiguador de masa sintonizada activo.
Fuente: Karee, Kijewski, Tamura, 1999.

5.3.2.2. Control de la deformación de la estructura, control de forma.

Con el control de la forma lo que hacemos es controlar la deformación que pueda experimentar la estructura. Como veremos a continuación, hay varios sistemas posibles pero la mayoría en fase de experimentación, siendo los más usados los arriostramientos activos. Podemos decir que todos tienen una forma de trabajo similar, tratándose de barras que se ajustan a la fuerza a la que

deben actuar, bien sea porque las propias barras llevan un actuador, como los puntales activos o porque hay un actuador que las controle como ocurre con los arriostramientos activos. Éstos disponen de sensores y de algoritmos de control, que proporcionan la información necesaria al actuador para que éste pueda controlar la respuesta de la estructura.

Sistemas de arriostramientos activo (ABS: *Active brace system*):

Estos se han estudiado con el uso de actuadores hidráulicos, montados como elementos de arriostramiento en cruz, como las de San Andrés, controlando directamente su respuesta usando fuerzas controladas activas. La diferencia es que en el caso anterior las propias barras llevan integradas unos actuadores que establecen la fuerza a la que debe actuar, mientras que aquí hay un único actuador que controla la cruz entera. Sigue en fase experimental.

Cables o tendones activos:

Este sistema se puede utilizar para controlar los desplazamientos en estructuras de puentes e incluso mediante el control del pretensado en vigas de hormigón armado y de vigas de acero, sometidos a elevadas cargas debidas a sismo, viento, etc. Incluir actuadores supuso una forma eficaz de suprimir vibraciones en determinadas estructuras como por ejemplo en estructuras de celosía con una alta relación rigidez/peso (Senatore, Duffour, Winslow, Wise, 2017).

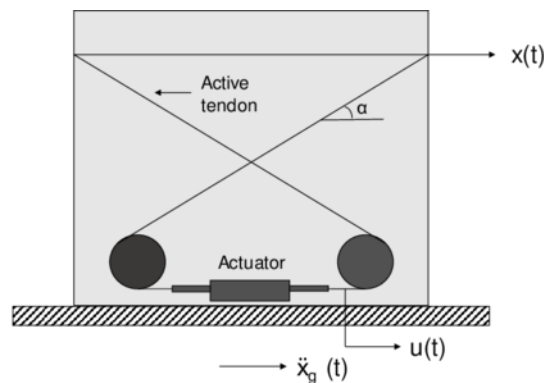


Figura 20: Schematic diagram of active tendon system, Active bracing system with hydraulic actuator (Cheng et al., 2008).

Fuente: Anwar, Aung, Najam, 2016.

Los cables en realidad han sido muy usados en la ingeniería civil, como por ejemplo en la suspensión de puentes, para sostener la cubierta de algunos estadios o para estructuras tipo carpas, por lo que su uso es algo común.

El sistema de tendones activos está formado por cables pretensados, activadores y elementos de control. Se colocan entre pisos, muy similar a las cruces de san Andrés, o en los extremos de los cables de puentes atirantados o de tirantes. Los actuadores se usan para ajustar la tensión del tendón, controlando la fuerza de control aplicada sobre la estructura, haciéndola más rígida o menos.

Abdel-Rohman y Leipholz propusieron que se usaran éstos como sistema de amortiguación activo en edificios altos sometidos a fuerzas provocadas por el viento y se demostró que éstos proporcionaban un control más eficiente que con el uso de los amortiguadores de masa sintonizada activa. Numerosos estudios demostraron que el uso de tendones activos, junto con otros dispositivos como actuadores, piezómetros u otros que hacían que el tendón actuase con la fuerza necesaria, formaban un sistema que permitía controlar las deformaciones que se pudieran dar en una

estructura manteniéndolos dentro de los límites de servicio, así como se demostró numéricamente que podía reducir las vibraciones de un edificio con una estructura de marcos sometido a fuerzas sísmicas. Sin embargo, Korkmaz nos mostró en su artículo “*A review of active structural control: challenges for engineering informatics*”, que de las investigaciones realizadas desde 1983 hasta 2010, sólo el 60% de los estudios habían realizado un estudio del control de vibraciones o de la reducción del riesgo sísmico y tan sólo un 40% de los estudios incluían pruebas experimentales.

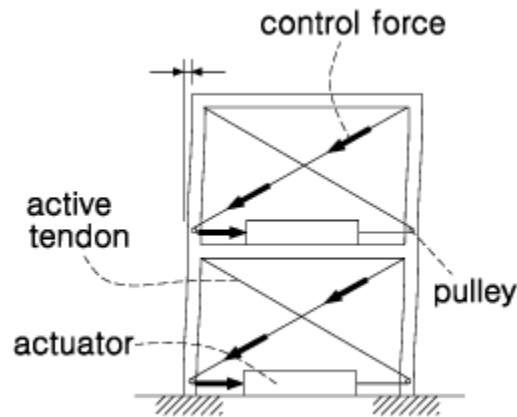


Figura 21: Dibujo esquemático de un sistema de tendones activos.
Fuente: Chang-Geun, Joon Myoung, Tae-Hoon, Moon-Ho, 2008.

En otro estudio se analizó virtualmente como influían estos cables pretensados sobre una estructura sometida a fuerzas sísmicas. Se analizó una estructura con un grado de libertad (SDOF: single degree of freedom) y una con múltiples grados de libertad (MDOF: multiple degrees of freedom). La conclusión es que para sistemas de SDOF, era factible el uso de tendones para diferentes aceleraciones del terreno. Mientras que para sistemas de MDOF, en el que se realizó el estudio de tres casos diferentes en los que variaba la disposición de los tendones, como puede verse en la **figura n**, el resultado fue que el caso B era el más ideal, pues en el caso A, el resultado era bueno para el primer piso pero era insuficiente para el resto y en el caso C, que no era muy práctico, además se producían efectos secundarios que podían afectar negativamente a las columnas. Los tendones son útiles para todos los registros de aceleración utilizados en sistemas de MDOF (Nigdeli, Boduroglu, 2010), llegando a la conclusión de que lo mejor era colocar un tendón activo en cada piso del edificio, como ocurría en el caso B.

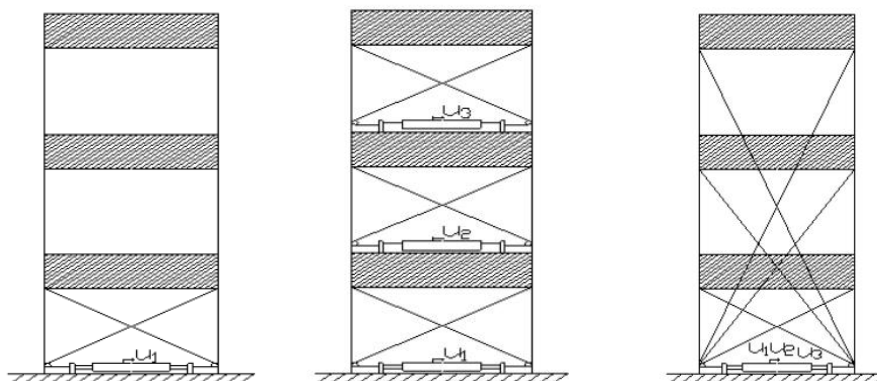


Figura 22: Caso A, Caso B y Caso C, respectivamente, muestran un modelo de un sistema de MDOF con tendones activos colocados de manera distinta cada caso.

Fuente: Nigdeli, Boduroglu, 2010.

Se disponen en estructuras de barras, colocándose como resistencia lateral frente a las acciones sísmicas.

Sistemas activos de acoplamiento de edificios

Investigadores están estudiando como el acoplamiento entre dos edificios puede reducir considerablemente los desplazamientos de una y otra estructura, gracias a la conexión entre ambas. El uso de actuadores, el nivel de control se incrementa lógicamente. Algunos estudios modelizaron el acoplamiento de dos estructuras de diferente peso y altura, estructuras modelizadas en 2D y unidas en un punto por un actuador, en su zona más alta posible, obteniendo como resultados que el acoplamiento de estas estructuras y el uso de actuadores reducía hasta un 69% el movimiento de la estructura. Es algo muy curioso y se evitarían daños típicos que surgen al tener dos edificios muy juntos.

Puntales activos:

En cuanto a los puntales activos, aún se encuentran en fase de experimentación y dado que los resultados son cada vez mejores, su estudio se ha incrementado.

Se han realizado numerosos estudios sobre cómo su incorporación podría afectar en el funcionamiento de diversos sistemas, como su uso en el diseño de suspensiones activas para automóviles, su uso para reemplazar los puntales pasivos para un control más preciso en estructuras que cubren grandes espacios, su uso en estructuras para aplicaciones espaciales, pero sobre todo su uso en estructuras adaptativas con el principal objetivo de reducir las vibraciones.

Un estudio del uso de estas barras activas en estructuras adaptativas de celosía demostró que las barras activas cuyas longitudes eran controlables podían controlar cualquier parte modal seleccionada del movimiento vibratorio de la estructura. Además, se encontró que las ubicaciones óptimas para los miembros activos minimizaban la acción de control requerida, mediante el alargamiento o acortamiento de los actuadores (Korkmaz, 2011).

5.3.2.3. Estructuras adaptativas:

En un pasado, ya había algunos arquitectos como Cedric Price, que soñaban con crear edificios que, a través de un ordenador, el propio edificio pudiera cambiar su forma si ésta no era la oportuna para la función que albergaba o simplemente si se consideraba aburrida, pensando en que el edificio podía llegar a interactuar con el ser humano y viceversa. Hoy en día, sigue pareciendo una utopía, aunque ya podemos ver como a través de un par de botones podemos controlar ventanas, persianas, luces, etc. Impresiona este hecho, pero no muchos se atreven a pensar en cómo la propia estructura del edificio puede llegar a moverse por sí sola según los esfuerzos exteriores a los que sea sometida. ¿Podría el propio edificio ser capaz de interpretar los esfuerzos a los que está siendo sometido y reaccionar de una manera u otra?, ¿y si pudiera establecer cuál es el camino más eficiente para redirigir las cargas, evitando concentraciones?

Senatore Gennaro y compañía, hicieron posible que una estructura fuera capaz de considerar por sí misma por donde debía redistribuir las cargas y cómo debía cambiar su propia forma para evitar una deformación excesiva, mediante el uso de sensores, actuadores y un control inteligente. Para él, la estructura debía funcionar como un cerebro con sus músculos, redistribuyendo los esfuerzos en unas partes u otras, estirando o contrayendo la estructura, debiendo ser capaz de reaccionar sola.

Su método se centró en cómo reducir la energía almacenada en una estructura a costa de un aumento en la energía operacional necesaria para la adaptación de la estructura, a la hora de compensar los desplazamientos debidos a las cargas externas. Las estructuras poseen una cantidad de energía, la cual van perdiendo a medida que son sometidas a diversas cargas exteriores. Por ello, se construyen estructuras fuertes mediante el aumento de las dimensiones de las partes que la componen, cuanta más masa en teoría más rigidez. Pero esto supone un coste mayor a medida que el edificio se hace cada vez más grande y a medida que tiene que soportar cada vez más cargas. Uno de los objetivos de Gennaro, era buscar el punto óptimo en el que la energía total

era la mínima siendo ésta la suma de la energía almacenada en la estructura necesaria para soportar las cargas de una forma segura y la energía necesaria para los actuadores integrados (Figura 23).

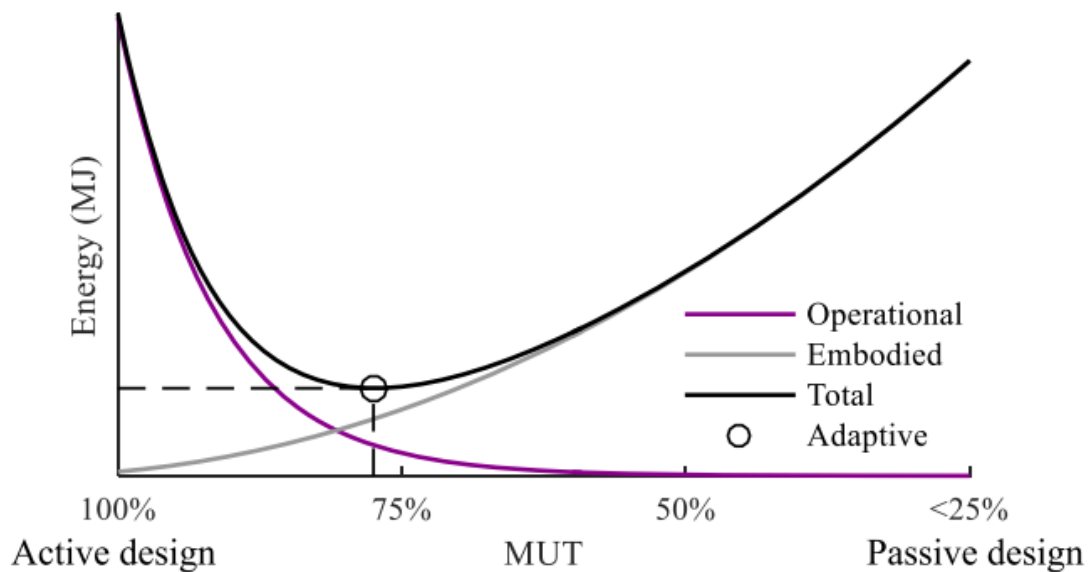


Figura 23: Esquema de la energía absorbida por el sistema estructural (línea de color gris), por un sistema activo (línea de color morado) y por una estructura adaptativa (línea de color negro)

Fuente: Senatore, Duffour, Winslow, Wise, 2017.

Gennaro tuvo tres motivaciones que le llevaron a realizar una estructura a escala real: (1) demostrar el potencial de la metodología de diseño en un ejemplo realista, (2) investigar lo práctico y viable que podía llegar a ser el proceso de diseño aplicado a una estructura real, (3) validar numéricamente las predicciones en contra de los datos experimentales (Senatore, Duffour, Winslow, Wise, 2017). De modo que construyó una estructura en voladizo, de tipo celosía, adaptativa y de acero, de seis metros de largo y la cual poseía actuadores en algunas de sus diagonales. Se trata de una estructura muy esbelta y que estaba hecha para soportar a una persona. Eligió este tipo de estructura porque si los resultados eran posibles de conseguir en las situaciones más adversas como las de un voladizo, también se podrían conseguir en otro tipo de estructuras más simples.

Realizó una comparación entre estructuras pasivas, pasivas pero optimizadas en cuanto a dimensión y adaptativas. Como podemos ver en los gráficos de la figura 24, las estructuras adaptativas ahorran hasta un 80% de masa y un 60% de la energía total. Pasamos de una estructura pesada a una optimizada, lo que puede observarse en las dimensiones cada vez más reducidas de las barras que componen la celosía en la segunda estructura, a una estructura de barras muy esbeltas con actuadores. Así, los beneficios obtenidos eran varios: una reducción de la masa material necesaria, un aumento de la sostenibilidad con un menor impacto ambiental y un estructural más ligera, esbelta y elegante.

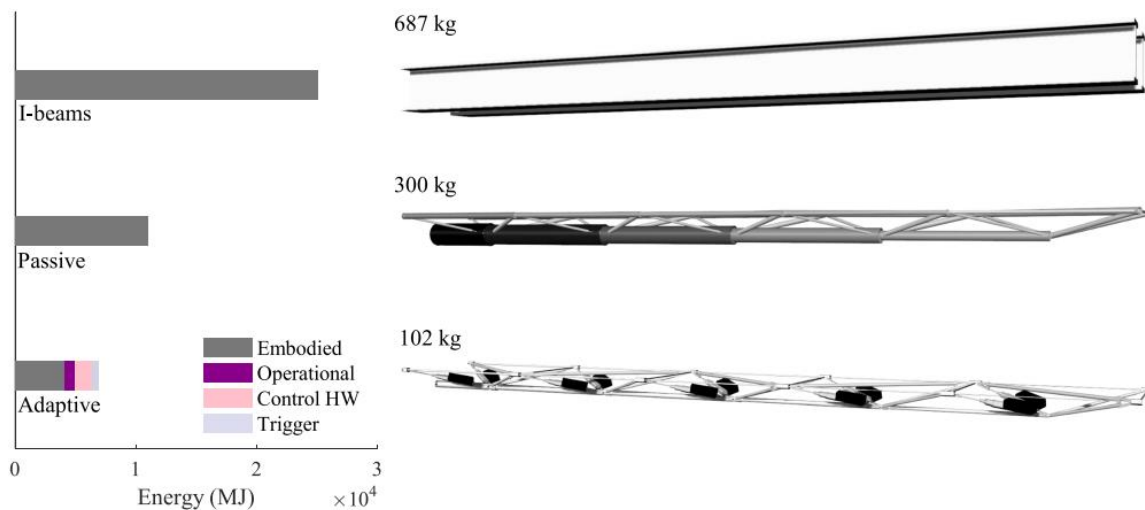


Figura 24: Comparación de la energía absorbida por una estructura pasiva (687kg), una estructura pasiva optimizada (300kg) y una estructura adaptativa(102kg)
 Fuente: Senatore, Duffour, Winslow, Wise, 2017.

Además, aunque estos sistemas actúan con una fuente externa cuando dicha fuente deja de funcionar, los actuadores se bloquean manteniendo la forma de la estructura.

Cuando una persona caminaba por encima de la estructura, los sensores captaban los esfuerzos, y mediante un sistema de control, los actuadores extendían o reducían las barras de la celosía para devolver la estructura deformada a su posición inicial, no deformada. Como podemos ver no se encarga de absorber vibraciones sino de ir controlando las propias deformaciones. A pesar de que se tuvieron en cuenta los posibles efectos dinámicos provocados por la persona al andar mediante un factor de carga adicional, este experimento se realizó para una estructura bajo condiciones quasi-estáticas. Por tanto, el hecho de que no se haya comprobado frente a cargas dinámicas, puede significar que no es un sistema preparado para soportar sismos. Pero podríamos pensar que este tipo de estructuras se pueden implementar para soportar cargas dinámicas, pues si lo pensamos teóricamente, durante un sismo los sensores podrían captar los esfuerzos a los que está siendo sometida la estructura, en tiempo real, y mediante un control inteligente, se mandaría una señal a los actuadores que tratarían de llevar la estructura a su posición inicial, mediante la extensión o la contracción de las barras, dándole más rigidez, contrarrestando las cargas y controlando las excesivas deformaciones que se pudieran producir, un sistema que actuaría básicamente de manera muy similar al sistema de amortiguadores de masa activa.

Estas estructuras basan su eficacia en dos hechos, en primer lugar, su capacidad para redistribuir las tensiones hacia caminos más eficientes y en segundo lugar, controlar la forma de la estructura cuando es necesario. son capaces de controlar los efectos por cargas externas mediante un cambio controlado de la forma y la redirección de las cargas internas. En las estrategias de diseño se busca reducir la combinación entre el esfuerzo controlado y la masa material de la estructura, es decir, entre los sensores y los actuadores combinados con la construcción convencional. La estructura y los dispositivos suelen pensarse como sistemas separados, estableciéndose la ubicación de los dispositivos en primer lugar. Determinar una adecuada disposición de los actuadores es fundamental para una mayor precisión y para minimizar los esfuerzos a controlar. Una reducción en la masa material contribuye a que la energía disipada por la propia estructura se reduzca, pero si esto compensa la energía necesaria para los controladores y actuadores, no es una pregunta que se haya estudiado. ¿Realmente nos convienen estas estructuras, son económicas?

Los mayores problemas de estos tipos de sistemas son la energía necesaria para que entren en funcionamiento, este aumento de energía significa en otras palabras un aumento en el coste de la construcción.

Actualmente, no se han encontrado muchos experimentos de este tipo, lo que me lleva pensar que probablemente sea por el costo que conlleva, pues la tecnología requiere de un costo inicial elevado y la inteligencia artificial es algo que todavía está por ver. Es una de las grandes desventajas de los sistemas activos, pero debemos tener en cuenta que los resultados finales son muy positivos, pues podrían ser capaces de adaptar la estructura a cualquier modo de vibración a la que sea sometida, estudiando los esfuerzos en tiempo real y controlando mediante los actuadores la deformación de la estructura, siendo los daños tras los sismos mucho menores que con el uso de sistemas pasivos.

Estructuras adaptativas/inteligentes:

Como hemos visto este tipo de estructura se adapta al movimiento de su entorno, como si fuera un ser vivo. Es una máquina que tiene la capacidad de reaccionar en tiempo real frente a fuerzas dinámicas externas, como vientos, terremotos o de impacto, cambiando y adaptándose mediante el uso de sensores, actuadores y sistemas computacionales. En lugar de pensar en construir una estructura estática que haga frente a cargas dinámicas, se piensa desde un principio en construir estructuras dinámicas, pero ¿cómo?

Una estructura inteligente se realiza con el objetivo de captar las fuerzas de las cargas dinámicas, captar la respuesta del edificio y mediante algoritmos de control, establecer la fuerza que el actuador debe aplicar si la respuesta de edificio no está siendo la adecuada, para adaptarla a su entorno. Esto nos permite obtener un rendimiento óptimo en los sistemas de amortiguación, así como en la respuesta del edificio, reduciendo considerablemente las vibraciones, desplazamientos y daños de la estructura y, por lo tanto, también los gastos de reparación. Aunque no siempre es tan fácil, como veremos a continuación, a veces los sistemas que se proponen no son tan fáciles de implementar o presentan alguna que otra desventaja que pueden afectar muy negativamente a la estabilidad del edificio.

Una de las estrategias para realizar una estructura inteligente, es disponer una serie de actuadores estratégicamente dentro de una estructura de modo que algunas partes de las estructuras sean activas, siendo controlables y adaptables. Por lo tanto, necesitamos de dispositivos tales como sensores que como hemos comentado mide los desplazamientos que se producen, un dispositivo de control de retroalimentación, que establece la corrección adecuada de la respuesta no controlada y los actuadores, que aplican la fuerza.

Se pueden considerar estructuras inteligentes, las estructuras con sistemas activos, semiactivos o híbridos. Todos ellos comparten el hecho de que mediante sensores se pueden introducir fuerzas que modifiquen la respuesta del edificio, como en el caso de los sistemas activos y de los híbridos, o que modifiquen las características de algunos de los dispositivos que componen el sistema, como en el caso de los sistemas semiactivos, haciendo variables algunas de las partes del sistema.

5.3.3. Sistemas de control híbridos:

Estos sistemas son muy usados en lugares sísmicos como Japón, dado su alto rendimiento conseguido al combinar sistemas de control activo y pasivo. El uso de múltiples sistemas le permite superar restricciones y límites que aparecen durante el uso de un único sistema. Con el uso de dispositivos como los actuadores de control de los sistemas activos, pueden hacerse frente a cargas más elevadas que con los sistemas pasivos no se pueden llegar a superar, así se mejora su funcionamiento y sus limitaciones. Por otro lado, los sistemas pasivos permiten que, si hay un corte de electricidad y los dispositivos activos no pudieran activarse, el sistema se comporte como un sistema pasivo, no dejando desprotegido el edificio como en el caso de usar solo un sistema activo. Así, un sistema complementa al otro y viceversa.

La combinación además también permite reducir la cantidad de energía externa necesaria para poner en funcionamiento el sistema híbrido, siendo esta una de las mayores diferencias con respecto a los sistemas totalmente activos. Los sistemas pasivos ayudan a reducir la energía necesaria para la puesta en marcha de los actuadores. Aunque el coste para su instalación es elevado y son sistemas más complejos, el hecho de que necesiten una fuerza y una energía menor para su funcionamiento, conllevan a una reducción en los costes de control y mantenimiento. En la actualidad, estos sistemas han sido mucho más usados que los activos, gracias a que el edificio queda cubierto frente a un amplio abanico de situaciones y son más fiables.

Se han estudiado sobre todo dos tipos de sistemas híbridos, los sistemas híbridos con amortiguadores de masa (HMD: *hybrid mass damper*) y los sistemas con aislamiento de base activo, los cuales detallaremos a continuación. Numerosos estudios han permitido crear otros tipos de sistemas híbridos partiendo de la base del funcionamiento de estos dos primeros sistemas.

Los sistemas híbridos con amortiguadores de masa (HMD):

Son una combinación de los amortiguadores pasivo de masa sintonizada (AMS o *TMD: tuned mass damper*), con un actuador de control activo. Funcionan tanto como un amortiguador de masa sintonizada (AMS), en los cuales la masa se ajusta al mismo periodo natural de la estructura, como a los amortiguadores de masa activos (ATMD o AMD), donde el actuador establece una fuerza determinada sobre la masa, según las condiciones dinámicas externas y las características de vibración del edificio y de la masa amortiguadora. Estos sistemas actúan en un principio únicamente como sistemas pasivos, pero cuando las excitaciones sobre el edificio son muy elevadas la parte activa entra en funcionamiento. Si una vez entrado en funcionamiento la parte activa, se produce un corte de electricidad o se superan las capacidades mecánicas del actuador y éste deja de funcionar, el sistema vuelve a comportarse como un sistema pasivo, hasta que se vuelvan a alcanzar unas condiciones en el que el sistema pueda funcionar con normalidad. Son muy similares a los AMS de tipo pendular y a los AMS normales, solo que, al incluir el actuador, éste se encarga cuando es necesario de ampliar dinámicamente la amplitud del movimiento natural de los AMS.

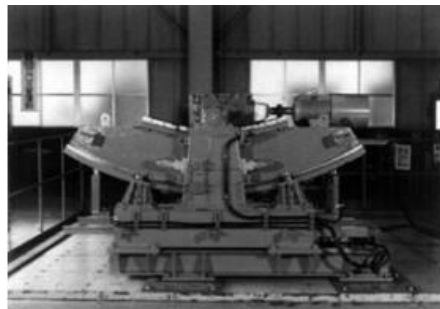


Figura 25: amortiguador híbrido de masa sintonizada con forma de arco.
Fuente: Spencer, Sain, 1997.

Su innovación es cada vez mayor, haciéndolos más compactos y eficientes. Se han construido HMD con péndulos rodados y con forma de arco como el usado durante el montaje de la torre del puente Rainbow para reducir las vibraciones que pudieran darse, o con forma de V, una extensión del anterior, como el usado en la torre del parque Shinjuku, figura 26. El sistema se basa en una masa que se desliza encima de unos rodillos como un péndulo y que es controlada por un actuador y cuyo funcionamiento se activa por un motor. Este sistema a diferencia del sistema de amortiguación de masa de tipo pendular ocupa menos espacio.



Figura 26a: amortiguador híbrido de masa sintonizado. Figura 26b: Torre Shinjuku Park.
Fuente: Kareem, Kijewski, Tamura, 1999.

También tenemos otro diseño el cual se conoce como multi-step pendulum HMD, que significa péndulo de varios niveles de HMD. Un sistema que se duplicó en la torre Yokohama Landmark, usando dos masas de 170 toneladas cada una.

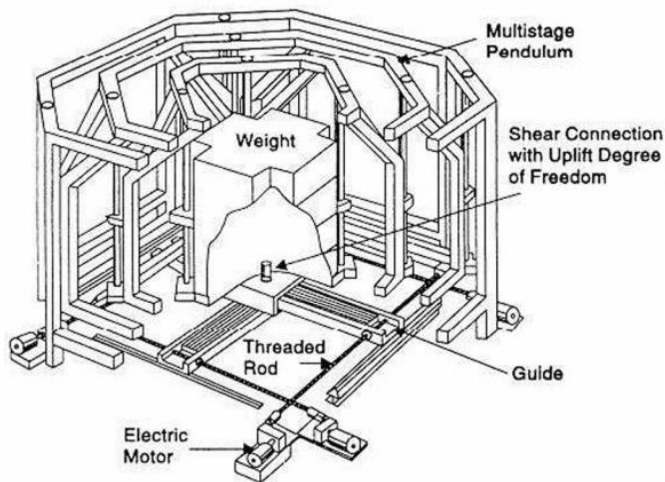


Figura 27a: HMD de péndulo de varios niveles. Figura 27b: Torre Yokohama Landmark.
Fuente: Soong, Spencer, 2002.

Otro sistema que se implementó fue el DUOX System HMD. Se trata de la colocación de una segunda masa sobre el amortiguador de masa pasiva, la cual se conecta a la primera mediante un actuador y un muelle, y que se encarga de contrarrestar el movimiento de la masa amortiguadora pasiva.

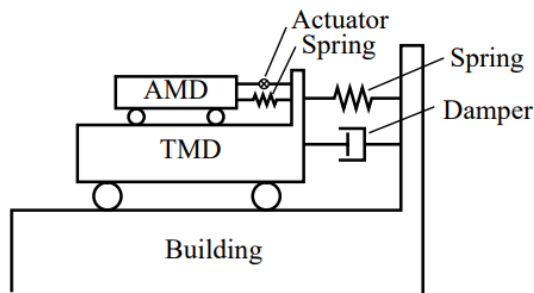


Figura 28a: concepto del sistema DUOX HMD; Figura 28b: Sistema DUOX HMD.
Fuente 28a: Kareem, Kijewski, Tamura, 1999; Fuente 28b:
https://www.kajima.co.jp/english/tech/seishin_menshin_e/structural/index.html

Este sistema posee una alta eficiencia de control y una pequeña fuerza de accionamiento, y fue instalado en dos edificios, en el Dowa Kasai Phoenix Tower y en el edificio Ando Nishikicho. Este último de 14 plantas de altura, fue capaz de soportar sismos de intensidad 5 y fuertes vientos gracias a la instalación del sistema. El sistema se instaló en la última planta coincidiendo con el centro de gravedad del edificio y consistía de un control en dos direcciones simultáneamente, con amortiguadores de aceite y rodamientos de goma laminada como aisladores de vibraciones y ruido.

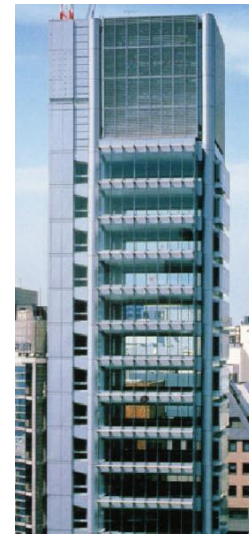
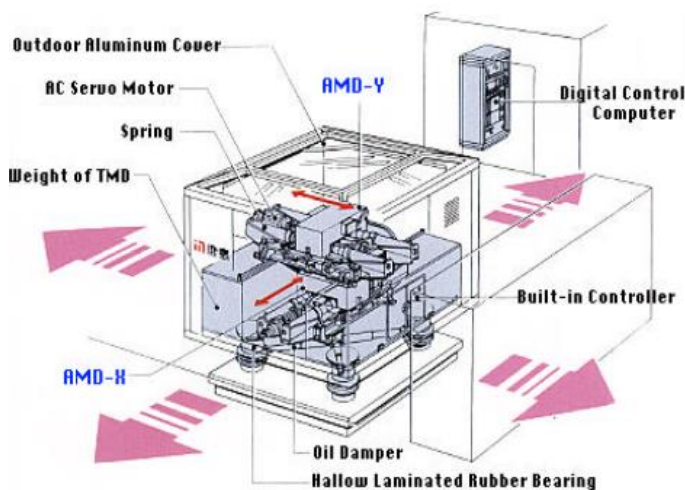


Figura 29a: Dibujo del DUOX system HMD. Figura 29b: Edificio Ando Nishikicho.
Fuente 29a y 29b: Kareem, Kijewski, Tamura, 1999.

Otro tipo de HMD fue propuesta por Cheng, donde combinaba el uso de un actuador de control con un amortiguador de líquido sintonizado pasivo, para controlar las vibraciones debidas al viento en la torre Nanjing, de 310 metros de altura. Sin embargo, debido a que se trataba de una estructura ya existente era difícil de establecer este sistema, por lo que finalmente se optó por disponer de un innovador sistema de amortiguador de masa activa/híbrido, que trataba de una masa en forma de anillo de 60 toneladas sobre cojinetes de fricción deslizantes. Este sistema logró mantener la respuesta del edificio dentro de unos límites aceptables para el confort de las personas durante fuertes cargas dinámicas externas.

Como podemos ver estos sistemas híbridos suponen una gran ventaja, pues al usar múltiples dispositivos, activos, pasivos, se consigue un control más eficiente de la respuesta de la estructura, superando límites que se tienen usando un único tipo de sistema, de modo que, por ejemplo, si

los actuadores dejan de funcionar por cualquier razón, el sistema se puede comportar como un sistema pasivo no dejando desprotegido al edificio como puede llegar a ocurrir con los sistemas activos. Se ha demostrado que estos sistemas híbridos han llegado a reducir hasta un 50% la respuesta estructural en edificios localizados en Japón (Kareem, Kijewski, Tamura, 1999).

Sistemas con aislamiento de base activo (HBIS: *Hybrid base isolation system*):

Otro tipo de sistema híbrido se consiguió con la combinación de un sistema de aislamiento de base pasivo con un actuador de control. Los sistemas de aislamiento sísmico han sido muy usados debido a su fiabilidad, simplicidad y efectividad (Kareem, Kijewski, Tamura, 1999). Sus limitaciones se han mejorado gracias a la adición del control activo, pues no solo es capaz de absorber la aceleración a la que es sometida la estructura y reducir las distorsiones de pisos, sino que además es capaz de reducir el desplazamiento máximo de la base, algo que el sistema pasivo no podía controlar. Mejora su rendimiento sin suponer un coste adicional demasiado excesivo.

En un estudio realizado por Markou, A, Oliveto, G. y Athanasiou, A., se analizó el rendimiento de un sistema híbrido de aislamiento base frente a cargas sísmicas, el cual había sido usado en el reacondicionamiento de dos edificios de hormigón armado, situados en Solarino, en el este de Sicilia. Se realizó un modelo matemático, llevando a cabo una serie de simulaciones con el objetivo de evaluarlos frente a diversas situaciones.

El HBIS usado está compuesto por 12 apoyos de goma de alta amortiguación (HDRB: *high damping rubber bearings*), los cuales se colocan debajo de las columnas perimetrales o de esquina, debido a que éstas transfieren una carga menor y por 13 apoyos de deslizamiento de baja fricción (LFSB: *low friction sliding bearings*), los cuales se colocan debajo de las columnas centrales, que son las que más carga transfieren. Son muy usados debido a que los LFSB no tienen un coste muy elevado a diferencia de otros tipos de rodamientos de goma con el mismo peso.

En la primera aplicación se sometió el modelo a numerosos movimientos armónicos del suelo, obteniendo en los resultados que incluso con aceleraciones de amplitud reducida con frecuencias similares a las frecuencias del sistema, se superaba la capacidad de desplazamiento del aislamiento de base. Aunque según los análisis, es un buen sistema ante cargas sísmicas que poseen un contenido de frecuencias relativamente altas. El sistema fue sometido a 27 movimientos fuertes del suelo, de intensidades similares a grandes terremotos ocurridos en Italia, donde en 8 de las pruebas, los desplazamientos inducidos superaban la capacidad de deformación del sistema. Estas demandas excesivas de los terremotos de estas características fueron estudiadas llegando a la conclusión de que podía deberse a la proximidad a la falla, a que las frecuencias del sismo similares a las frecuencias del sistema llevaban una gran cantidad de energía y/o a que el suelo era blanco.

Los resultados fueron negativos con respecto al uso de este tipo de sistemas frente a suelos blandos, donde los terremotos se caracterizan por tener bajas frecuencias y amplitudes que pueden provocar que el sistema entre en resonancia.

En otro estudio se quiso analizar el uso de un HBIS, compuesto por rodamientos de caucho de baja amortiguación (LDRBs: *low damping rubber Bearing*) que actúan como aisladores sísmicos pasivos, y por 4 amortiguadores magneto-reológicos (MR), que actúan como dispositivos de control semiactivos.

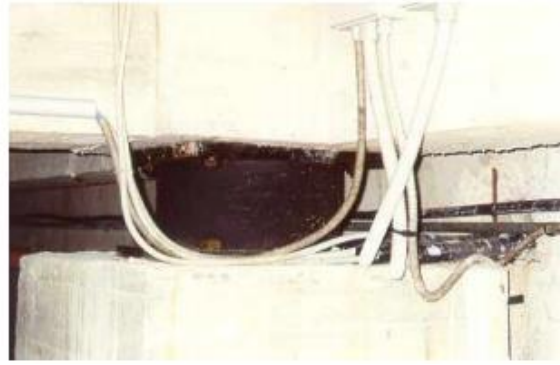


Figura 30a: Centro Médico de la Armada Italiana en Ancona, Italia; Figura 30b: dispositivo actual de aislamiento sísmico pasivo.

Fuente 30a y 30b: Forni, Antonucci, Arcadi, Occhiuzzi, 2004.

Se modelizó el Centro Médico de la armada italiana en Ancona, Italia, el cual posee un sistema de aislamiento pasivo con 44 rodamientos de caucho de alta amortiguación (HDRB), y se comparó con el uso del sistema híbrido. El sistema híbrido era controlado por un algoritmo de control de velocidad (VCA: *velocity control algorithm*), el cual activaba el amortiguador MR cuando la velocidad relativa entre el suelo y el edificio excedía un valor determinado. Quiero recalcar que incluso los algoritmos usados para el control de los dispositivos son importantes. En este artículo se realizó una pequeña comparación entre el uso de algoritmos de control de velocidad y de algoritmos de control del desplazamiento (DCA: *displacement control algorithm*). Mientras que este último limita el rango de funcionamiento de los amortiguadores MR, el VCA hace que su rango sea proporcional a la velocidad de deformación, de modo que la estructura queda protegida frente a sismos altos inesperados. Además, los VCA no permiten la entrada de altas excitaciones sísmicas de terremotos moderados.



Figura 31: Amortiguador magneto-reológico desarrollado por Maurer-Söhne.

Fuente: Forni, Antonucci, Arcadi, Occhiuzzi, 2004.

Las conclusiones fueron que, aunque el edificio está muy bien diseñado con un sistema pasivo de aislamiento óptimo que presenta un comportamiento hasta ahora bueno y cuyos resultados son difíciles de superar, el uso de este sistema híbrido dio incluso resultados mejores. Los desplazamientos máximos se redujeron usando el VCA y también las aceleraciones de la estructura hasta un 50%. Algo muy positivo para evitar daños graves y sobre todo el colapso del edificio.

El uso de este sistema híbrido de aislamiento permite el uso de LDRB, los cuales son más expansivos y duraderos, y nos permiten además controlar efectos torsionales que puedan producirse debido a disposiciones asimétricas u otros. Estos sistemas híbridos además de reducir los desplazamientos, también redujeron las aceleraciones. Aunque el coste del sistema de control es elevado, el uso de este tipo de rodamientos LDRB lo compensa.

Múltiples estudios intentan demostrar la alta eficacia de estos sistemas de aislamiento de base pasivos unidos a actuadores, a amortiguadores magneto-reológicos semiactivos, u otro tipo de dispositivos semiactivos, los cuales aumentan su rendimiento y su eficacia. Estos sistemas no están hechos para soportar sismos muy severos, sin embargo, la combinación con otros sistemas hace de estos, uno de los sistemas más interesantes.

A pesar de todo, son difíciles de incorporar en los edificios, debido a que requieren de un control cuidadoso, una sintonía y unos algoritmos de control algo complejos para implementarlos (Chan, Lin, Tagawa, 2019). Algunos dispositivos que forman parte de estos sistemas gastan demasiada energía, debiendo mantenerse activados, como los actuadores hidráulicos, aunque es algo que ya está siendo estudiado, como, por ejemplo, en los sistemas de control semiactivo como veremos a continuación.

5.3.4. Sistemas de control semiactivos:

Varios problemas son los que ponen en jaque el uso de sistemas completamente activos, como por ejemplo y siendo una de las causas más principales, la gran cantidad de energía necesaria para poner en funcionamiento un sistema de este tipo y sobre todo en estructuras de grandes dimensiones. Esto hace que estos sistemas no sean del todo seguros para la protección de estructuras frente a sismos. Con el objetivo de dar solución a algunos de los problemas que suponía el uso de sistemas completamente activos surgieron los sistemas semiactivos.

Este sistema ha sido muy estudiado recientemente dado que permite una combinación de los sistemas activos y pasivos, escogiendo las mejores características de ambos sistemas para la protección de las estructuras contra cargas de viento y sismo. Esta combinación permite que no sea necesaria tal cantidad de energía que cuando se trata de un sistema activo, de hecho, muchos pueden operar con energía procedente de una batería, lo que es muy importante pues evita que el sistema quede inutilizado frente a fallos eléctricos durante un sismo. Los costes de implementación son más rentables y tienen la capacidad de trabajar con una amplia gama de frecuencias.

La diferencia con los sistemas híbridos los cuales también son una combinación de estos dos sistemas, es que los sistemas semiactivos no aplican ninguna fuerza mecánica en la estructura, pero tienen propiedades que pueden ser controladas y pueden variar, adaptando el funcionamiento del sistema a las variaciones de su entorno. A diferencia de los sistemas de control activos, estos no tienen la capacidad de desestabilizar la estructura de la estructura. Algunos estudios indican que, si su implementación se realiza correctamente, son mejores que los sistemas pasivos y, además pueden llegar casi a ofrecer el mismo rendimiento que los sistemas activos, permitiendo controlar la respuesta de la estructura durante condiciones de cargas variables.

Hay una gran variedad de sistemas semiactivos siendo los más conocidos los siguientes:

- Amortiguadores semiactivos de fluido con orificios variables
- Amortiguadores semiactivos de fricción variable
- Amortiguadores semiactivos de rigidez variable
- Amortiguadores semiactivos de masa sintonizada
- Amortiguadores semiactivos de líquido sintonizado
- Amortiguadores semiactivos de fluido variable
- Amortiguadores semiactivos de impacto variable
- Amortiguadores semiactivos magneto-reológicos

Amortiguadores semiactivos de fluido con orificios variables:

Fue propuesto por primera vez por Feng y Shinozuka para controlar el movimiento de puentes durante eventos sísmicos. En la **figura n**, podemos ver un esquema de cómo funciona dicho sistema. Se trata de una válvula de orificio variable, electromecánica y controlable, la cual se encarga de alterar la resistencia al flujo de un amortiguador hidráulico de fluido convencional.

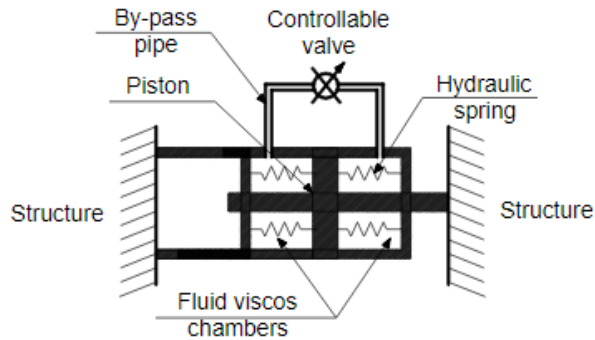


Figura 32: esquema de un amortiguador de orificios variable.
Fuente: Pastia, Luca, Chira, Rosca, 2005.

Sack and Patten, usaron un actuador hidráulico con orificios controlables en un puente modelo de un solo carril con el objetivo de demostrar que podía reducir las vibraciones debidas al tráfico. La primera implementación de este sistema a escala real se realizó en un puente localizado en la interestatal I35 en Oklahoma.



Figura 33a: Primera implementación del amortiguador de orificios variables. Figura 33b: Amortiguador de orificios variables.
Fuente 33a y 33b: Spencer, 2002.

Amortiguadores semiactivos de rigidez variable (SAVS: semi-active variable stiffness system):

Son sistemas que permiten variar la rigidez y la frecuencia natural de vibración de la estructura en la que se encuentran.

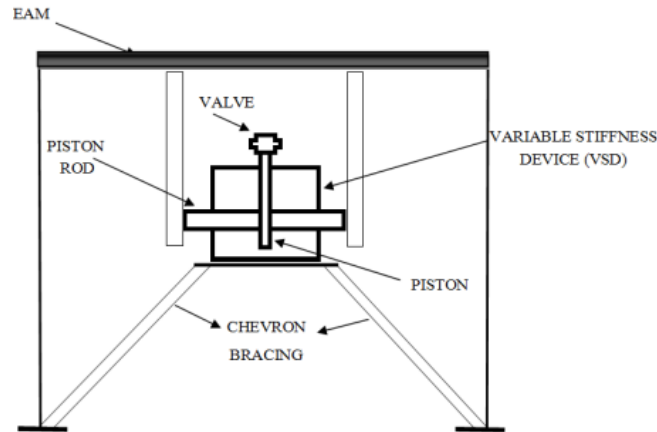


Figura 34: Esquema de la disposición del amortiguador semiactivo de rigidez variable.
Fuente: Pourzeynali, Jooei, 2013.

Estos dispositivos poseen un cilindro hidráulico equilibrado con una válvula solenoide de control que suele estar cerrada y que está insertada en el tubo que une las dos cámaras. Esta válvula es controlada por un motor, el cual la abre o cierra según la rigidez que se desee en ese momento. Cuando la válvula está cerrada, el fluido no puede pasar y bloquea las vigas a las abrazaderas de abajo. Si la válvula se abre, el fluido pasa y las vigas se mueven. Esto requiere algo de energía externa, pero no supone un problema el que haya un corte eléctrico, pues en cuanto ocurre, el dispositivo se activa dándole una rigidez inmediata a la estructura.

Una implementación de este sistema se realizó en el Instituto de Investigación Kajima. Este dispositivo se implementó junto con un amortiguador de orificio variable realizado por Kobori y Kamagata, usando el algoritmo de control ON-OFF (Spencer, Nagarajaiah, 2003), con el cual podían estudiar el control semiactivo del edificio.

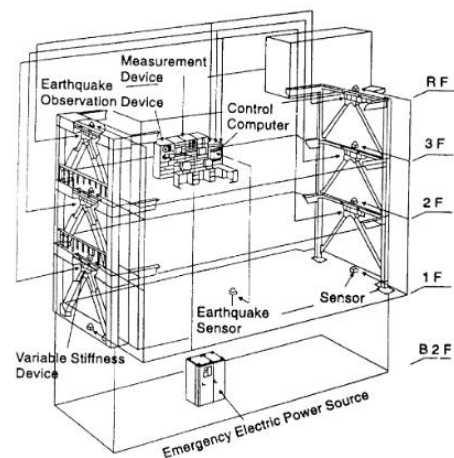


Figura 35a: Instituto de Investigación Técnico Kajima. Figura 35b: configuración del sistema SAVS.
Fuentes: 35a) Spencer, Nagarajaiah, 2003; 35b) Soong, Spencer, 2002.

Los SAVS se instalaron a ambos lados de la estructura, en la dirección transversal, como puede observarse en la figura 35b. Dado que el amortiguador de coeficientes variables no puede variar su rigidez continuamente frente a diferentes estados de rigidez, el investigador Nagarajaiah, desarrolló un sistema de rigidez semiactivo, continuo e independientemente variable, el cual podemos ver en la figura 36. En un estudio realizado por el mismo y Mate, demostraron la efectividad de este dispositivo en un sistema estructural a escala, variando de forma continua su rigidez.

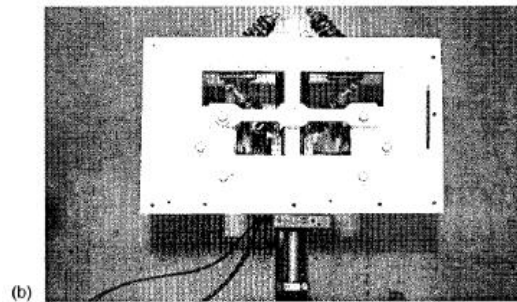


Fig. 2. SAVS device (a) implemented as a STMD; (b) small-scale SAVS device

Figura 36: Sistema semiactivo de rigidez variable (SAIVS).
Fuente: Spencer, Nagarajaiah, 2003.

Otras variedades en este tipo de dispositivos se han propuesto en el pasado, estudiando el reajuste de los SAVS, su activación o incluyendo una fuerza de deslizamiento variable en los SAVS (Lago, Trabucco, Wood, 2019). Otros estudios se centran en cómo un algoritmo de control determinado puede aumentar o reducir su eficacia, como el trabajo realizado por Pourzeynali y Jooei, quienes hacen hincapié en el uso del Controlador de Lógica Difusa Semiactiva (SFLC: *semi-active Fuzzy Logic Controller*) frente al método de control ON-OFF y demostrando que el primero es mucho más efectivo para reducir la respuesta de un edificio alto frente a cargas sísmicas que el segundo.

Otro sistema muy parecido instalado en el edificio Kajima Shizuoka, es un sistema que utiliza amortiguadores semiactivos hidráulicos, localizados en los extremos del edificio en la dirección transversal, dentro de las paredes, donde suponen una seguridad estructural en caso de colapso de la estructura principal. Cada amortiguador posee una válvula de control del fluido, una válvula de retención y un acumulador.

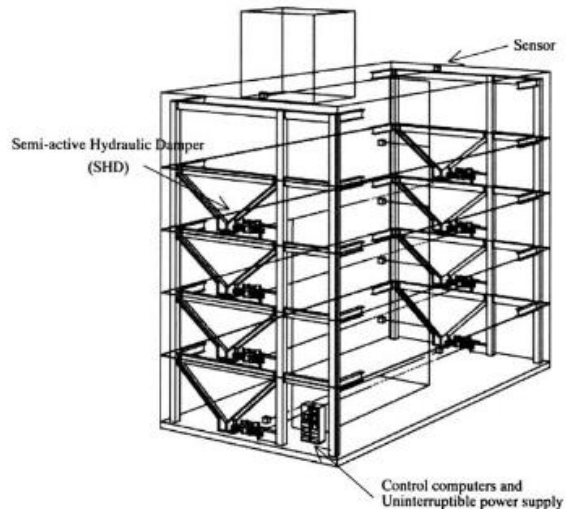


Figura 37a: Edificio Kajima Shizuoka. Figura 37b: Implementación del sistema.
Fuente: Soong, Spencer, 2002.

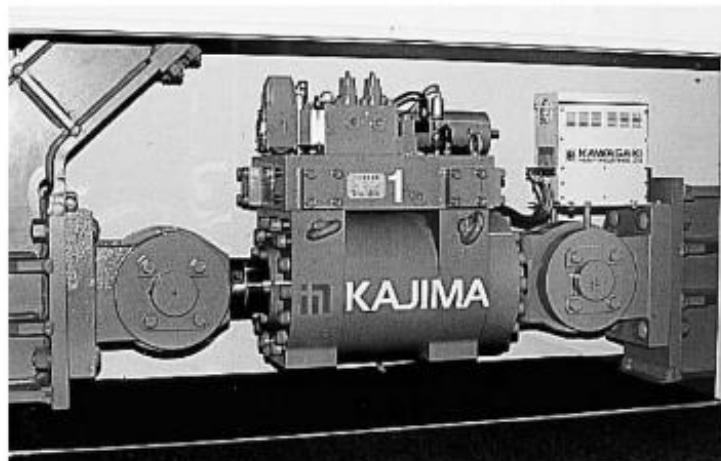


Figura 38: Amortiguador hidráulico semiactivo.
Fuente: Soong, Spencer, 2002.

Amortiguadores semiactivos de fricción variables:

Son sistemas que absorben y disipan las vibraciones de una estructura, debidas a cargas dinámicas, mediante la fuerza que se produce por fricción superficial entre dos cuerpos sólidos. La mayoría de estos sistemas se controlan ajustando la fuerza en su interfaz de control, donde mediante los actuadores se establece la fuerza con la que el dispositivo deslizara más o menos, variando la rigidez. Suelen presentar mejores resultados que los sistemas pasivos a la hora de absorber la energía sísmica, dado que son capaces de adaptarse en tiempo real y según la respuesta estructural y sísmica. Como hemos comentado antes, los sistemas semiactivos también presentan numerosas ventajas frente a los sistemas activos desde el punto de vista económico, funcional y energético.

Se ha propuesto su uso con el objetivo principal de reducir vibraciones en coches, mejorando su estabilidad y confort, en las hélices de un helicóptero y se ha implementado sobre todo en sistemas mecánicos de diversas industrias, ya que las maquinas cada vez son más ligeras lo que supone un aumento de su flexibilidad y con ello un aumento de las vibraciones. En cuanto a estructuras, se propone su uso para sustituir otro tipo de dispositivos como los amortiguadores viscosos, ya que los primeros son capaces de amortiguar tanto estructuras grandes como pequeñas sometidas a velocidades de vibración altas o bajas, e incluso con un comportamiento no lineal.

En un estudio reciente realizado por Braga dos Santos, Coelho, Neto y Mahfoud, podemos ver cuáles son las características más importantes a considerar de estos dispositivos y cómo variar su funcionamiento para conseguir su máximo rendimiento. Disipan energía gracias a sus ciclos de histéresis, donde en cada oscilación se busca disipar la máxima cantidad de energía mediante la variación de la fuerza normal.

Se probaron cinco estrategias de control para estudiar el comportamiento y la eficacia de los amortiguadores de fricción variable. Las estrategias se basaban en usar tres ciclos de histéresis diferentes utilizando el Método de Balance Armónico (MBA), un análisis numérico y uno experimental. Estas estrategias se centran sobre todo en establecer una fuerza de control según el desplazamiento que experimente el dispositivo, ya sea en el momento en el que varía su posición de la posición de equilibrio, por el último pico de desplazamiento registrado o tratando de predecir el comportamiento que experimentará el sistema, según su velocidad y su aceleración, así como de sus propiedades físicas.

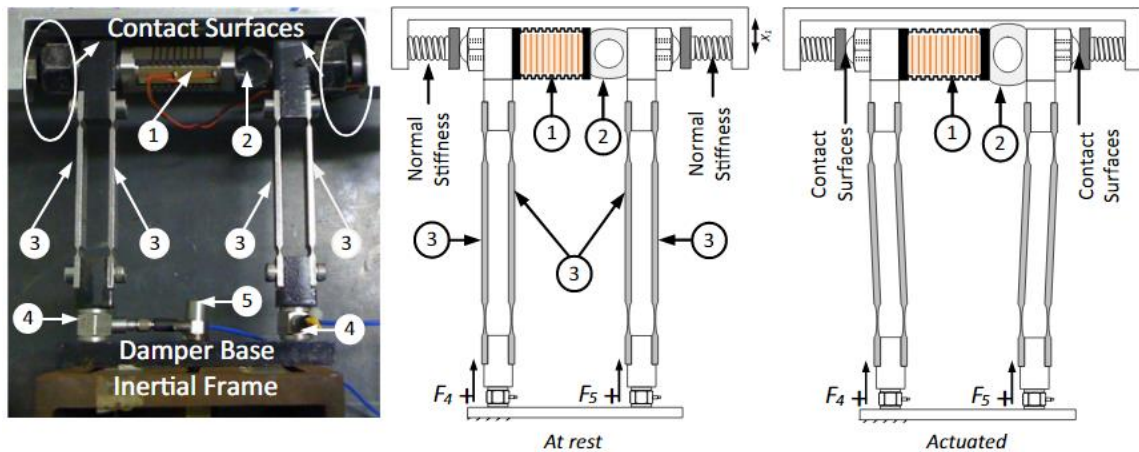


Figura 39a: detalle del amortiguador friccional. Figura 39b: esquema del amortiguador cuando está en reposo y cuando está actuando, respectivamente. Partes del amortiguador: 1. Actuador piezoeléctrico, 2. Célula de carga de la fuerza normal, 3. Vigas con bisagras de flexión en la suspensión del amortiguador, 4. Células de carga de la fuerza friccional, 5. Acelerómetro base del amortiguador.

Fuente: Braga dos Santos, Coelho, Neto, Mahfoud, 2017.

El sistema de amortiguación de fricción variable incluye un actuador piezoeléctrico y una célula de carga que da una señal de retroalimentación al controlador. Estos sensores y actuadores permiten controlar el valor de la fuerza normal.

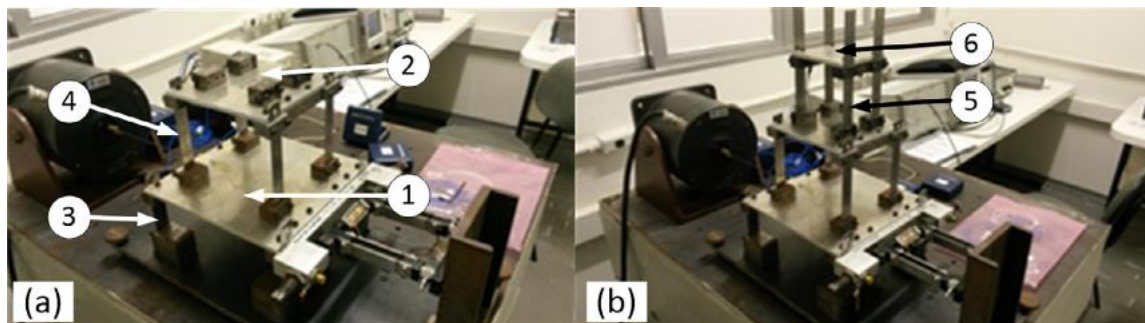


Figura 40a: Instalación para las pruebas, sistema de dos grados de libertad. Figura 40b: Instalación para pruebas, sistema de tres grados de libertad.

Partes: 1. Grado de libertad del 1º piso, 2. Grado de libertad del 2º piso, 3. Suspensión del grado de libertad del 1º piso, 4. Suspensión del grado de libertad del 2º piso, 5. Suspensión del grado de libertad del 3º piso, 6. Grado de libertad del 3º piso.

Fuente: Braga dos Santos, Coelho, Neto, Mahfoud, 2017.

Con las diferentes estrategias de control, se buscó aquella que producía una gran atenuación de las vibraciones, maximizando la energía disipada por cada oscilación en el ciclo de histéresis pero también aquella cuyo nivel de fuerza normal fuera reducido, es decir, que el esfuerzo de control para realizar dicha atenuación fuera la menor posible. La mejor estrategia fue la MLBL (Modified Linear Boundary Layer, capa de límite lineal modificada) la cual alcanzaba no solo una atenuación elevada, sino que además usó una fuerza normal reducida. También se demostró que es un sistema eficaz para reducir las vibraciones de sistemas de distintos grados de libertad como puede verse en la figura 40.

Dado que en estos sistemas se requiere un control muy preciso de la fuerza de amortiguación, lo que eleva el coste de implementación, se ha propuesto un innovador sistema que combina un amortiguador de fricción pasivo tradicional con una palanca con un pivote central móvil, conocido como amortiguador de fricción controlable por palanca (LCFD: *leverage type controllable friction*)

damper). Controlando la posición del pivote, se controla la fuerza de amortiguación generada, en tiempo real, en lugar de controlar la fuerza de ajuste en la interfaz de fricción.

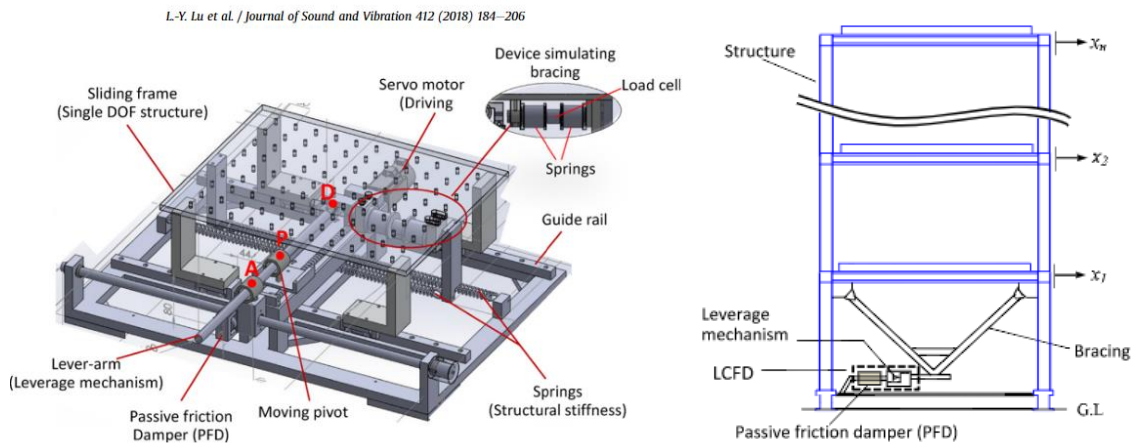


Figura 4.1a: Prototipo del sistema LCFD para experimentos con una mesa de vibración. Figura 4.1b: Esquema de la disposición de un sistema LCFD en una estructura.

Fuente: Lu, Lin, Jheng, Wu, 2018.

En la figura 4.1, podemos ver el prototipo que se diseñó y que, junto a una mesa vibratoria, se sometió a su comprobación frente a acciones dinámicas para ver su funcionalidad y viabilidad. Está compuesto por cuatro partes: el sistema deslizante, el sistema de la palanca, el amortiguador de fricción pasivo y el sistema de conducción y control de la posición del pivote.

Los resultados muestran que es capaz de disipar energía y de adaptarse a fuerzas sísmicas de diversas intensidades, con resultados muy similares a algunos sistemas pasivos.

Un amortiguador de fricción normal tiene la desventaja de que solo disipa energía cuando supera su nivel de deslizamiento máximo. Por lo tanto, para poder hacer frente a un sismo no muy elevado debería tener un nivel de deslizamiento bajo, que sea fácilmente superado con un desplazamiento no tan elevado y ser más eficaz. En un estudio se propuso el uso de un algoritmo de control, el cual puede ser usado en un sistema estructural con múltiples grados de libertad, con el objetivo de crear una fuerza que haga al dispositivo superar el nivel de desplazamiento y tener un rendimiento más óptimo. Su eficacia se demostró teórica y experimentalmente.



Figura 4.2: Experimento de simulación de una estructura de tres pisos, con un amortiguador localizado en el primer piso.

Fuente: Nishitani, Nitta, Ishibashi, 2000.

Su control se basaba en el hecho de superar el nivel de deslizamiento del dispositivo para conseguir una amortiguación, ya que, si no se supera, únicamente se proporciona cierta rigidez al sistema estructural. Una vez superado el nivel de deslizamiento, el amortiguador sufre un ciclo de histéresis que provoca una amortiguación en el sistema estructural. De modo que la clave está en llevar el dispositivo al límite, controlando únicamente su nivel de deslizamiento para formar un ciclo de histéresis apropiada para cada situación sísmica.

Para ello, idearon un algoritmo de control que provocase una fuerza de deslizamiento cada vez que se alcanzase la velocidad máxima de desplazamiento. El algoritmo se usó en un sistema de un grado de libertad sometido a aceleraciones propias de un sismo real, comprobando que el algoritmo funcionaba provocando un deslizamiento cuando la velocidad era máxima, para posteriormente comprobarlo en un sistema de múltiples grados de libertad. En este último caso, se instaló un dispositivo en el primer piso de un edificio modelizado y se aplicó el mismo algoritmo de control.

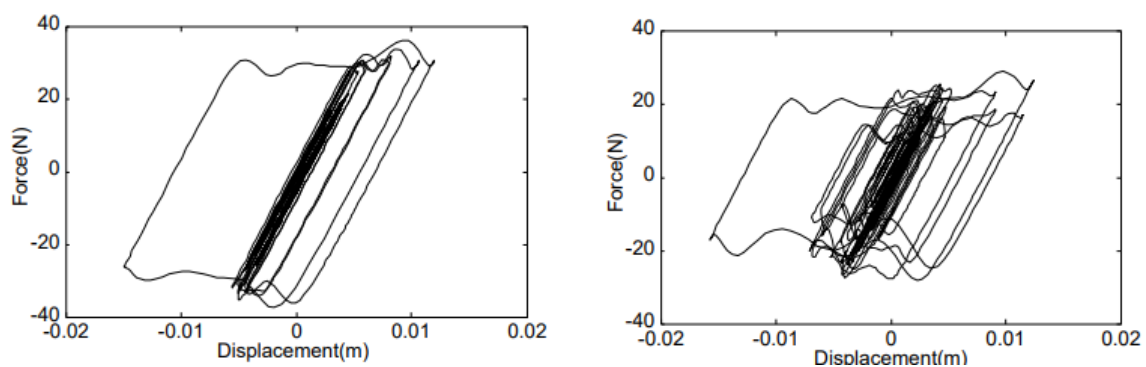


Figura 43a: ciclo histérico de un amortiguador de fricción pasivo. Figura 43b: ciclo histérico de un amortiguador de fricción variable.

Fuente 43a y 43b: Nishitani, Nitta, Ishibashi, 2000.

Tras numerosas simulaciones y experimentos, se realizó una comparación entre el uso de un sistema pasivo y de un sistema semiactivo, comparando el ciclo de histéresis entre ambos. La conclusión fue que, aunque el sistema pasivo ofrecía un buen resultado, el uso de un sistema semiactivo con un algoritmo de control tan sencillo también ofrecía muy buenos resultados de control. Como podemos ver en las gráficas representadas en la **figura n**, la fuerza necesaria aplicada se reduce y el desplazamiento es mayor en el sistema semiactivo. Con un mayor estudio y mejora de este algoritmo podrían conseguirse resultados más eficientes (Nishitani, Nitta, Ishibashi, Itoh, 2000).

Amortiguadores semiactivos de masa sintonizada (SATMD: *semi-active tuned mass damper*):

Como veremos más adelante, los amortiguadores de masa sintonizada no poseen la capacidad de adaptarse a diversas frecuencias. Cuando se diseñan solo son capaces de absorber las vibraciones que se producen en un modo de vibración determinado de la frecuencia, el cual normalmente suele ser la frecuencia natural del edificio para reducir su respuesta, no pudiendo cambiarse a posteriori. Esto hace que sean ineficientes en ciertos casos y además tras el trascurso de varios sismos estos pueden llegar a cambiar de frecuencia. En algunos casos esto se ha resuelto estableciendo más de un dispositivo en los últimos pisos para que uno se encargue de absorber una determinada frecuencia. No es una mala idea, pero el espacio ocupado es mayor y el coste de cada sistema aumenta los gastos generales del edificio. Si le añadimos a este sistema pasivo un controlador podemos ajustar su rigidez y su amortiguación usando un único dispositivo, mediante la adaptación de su periodo de vibración. La diferencia con un amortiguador de masa activa o

con un amortiguador de masa híbrido, es que la masa de este sistema se mueve por inercia y no por una fuerza aplicada sobre la masa como ocurre en el sistema activo.

La amortiguación de este sistema también puede ser controlada de modo que, si la masa experimenta un desplazamiento excesivo, el valor del amortiguador también puede incrementarse controlando mejor la masa. El control semiactivo se encarga de controlar la frecuencia sintonizada de la masa sintonizada pasiva.

Nagarajaiah y Varadarajan desarrollaron un SATMD (Spencer, Nagarajaiah, 2003), en el cual combinaron un TMD junto a un amortiguador semiactivo de rigidez variable. Esto les permitió variar la rigidez del sistema completo con la ventaja además de reajustar constantemente su frecuencia gracias a su control en tiempo real y haciéndolo más resistente a los cambios de rigidez y amortiguación del edificio. Estos demostraron su efectividad experimental y analítica en varios modelos obteniendo que, además de tener un rendimiento similar al de un sistema de amortiguación de masa activa, su energía consumida era menor.

Otros sistemas con un funcionamiento algo parecido a los SATMD, son los **amortiguadores de columna de líquido sintonizado controlable** (CTLCD: *controllable tuned liquid column damper*), y los **amortiguadores de balanceo sintonizado controlable** (CTSD: *controllable tuned sloshing damper*). Estos utilizan el movimiento del agua para generar una amortiguación que reduzca la respuesta de la estructura. Al tener un diseño fijo no son tan efectivos para absorber una amplia gama de frecuencias, pero numerosos estudios tratan de buscar cómo mejorar su eficacia. En uno de ellos se probó a variar en tiempo real la longitud del tanque de balanceo de un CTSD, adaptándolo a las cargas externas, mientras que en otro estudio se probó un CTLCD semiactivo donde el TLCD poseía un orificio variable.

Amortiguadores semiactivos de fluido controlable:

La mayoría de los amortiguadores vistos hasta el momento han usado algún mecanismo o válvula de control eléctrico. Estos elementos pueden ser un problema en términos de certeza y mantenimiento (Spencer, Nagarajaiah, 2003), por lo que se propone el uso de amortiguadores de fluido controlable, los cuales presentan una estructura muy simple donde lo único que se mueve es el pistón.

Dos tipos de amortiguadores de fluido controlable se han desarrollado hasta ahora: los que usan fluido magneto-reológico (MR) y los que usan fluido electro-reológico (ER). Estos fluidos tienen la capacidad de cambiar sus propiedades en solo unos milisegundos, pasando de un fluido viscoso lineal a un semisólido con una fuerza controlable aplicada por un campo eléctrico para fluidos ER, o magnética para fluidos MR. La fuerza de resistencia de estos fluidos se puede controlar variando la intensidad del campo magnético o eléctrico aplicado, sin requerir de una gran cantidad de energía. En caso de que se produjese un corte de electricidad éstos actuarían como un amortiguador de fluido pasivo no dejando sin protección al edificio.

Considerando el coste de estos dispositivos, no es económico establecer uno en cada piso, por lo que la elección del lugar de la estructura donde se instalará es muy importante para conseguir una reducción óptima de la respuesta de la estructura.

Dado que los amortiguadores semiactivos de fluido controlable MR, están más extendidos que los otros, se procederá realizar una breve descripción de los mismos.

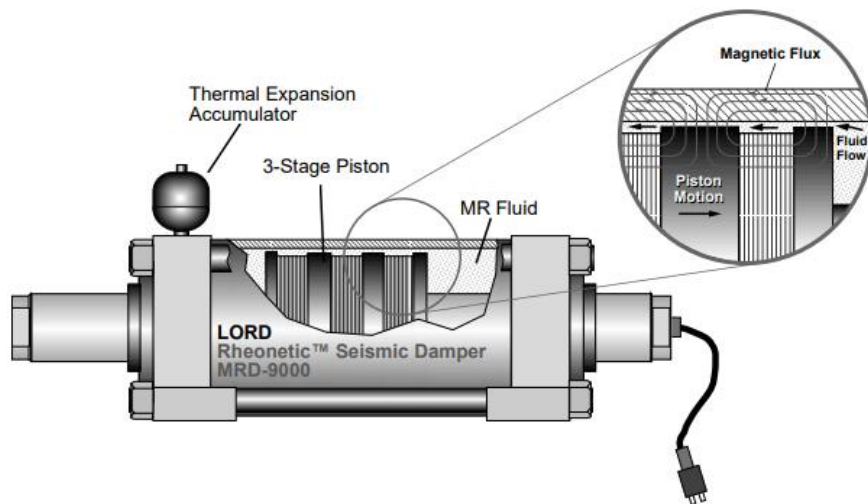


Figura 44: esquema de un amortiguador de fluido controlable MR.
Fuente: Spencer, Sain, 1997.

Los amortiguadores con fluido MR, presentan una interfaz mucho más sencilla y resistente y poseen válvulas de contacto rápido y fiable, las cuales son necesarias para el funcionamiento de los sistemas de control de vibraciones semiactivos (Spencer, Sain, 1997). También presentan una resistencia elástica mayor, algo importante ya que esto hace que el tamaño del dispositivo sea menor. Estos fluidos no se ven afectados por temperaturas extremas, ni por contaminantes. Este tipo de fluido tiene muchas ventajas incluso algunas más que los ER, lo que no hace menos interesantes a estos últimos.

Los amortiguadores semiactivos basados en el fluido MR, creados con el objetivo de proteger edificios críticos frente a cargas sísmicas han resultado ser muy eficientes, ya que son capaces de cambiar su resistencia en un factor de 20 en pocos milisegundos (Forni, Antonucci, Arcadi, Occhiuzzi, 2004) o incluso en un factor mayor. Pueden cambiar sus características con muy poca energía externa y, además poseen propiedades pasivas, lo que proporciona cierto nivel de protección en caso de un fallo del sistema de control.

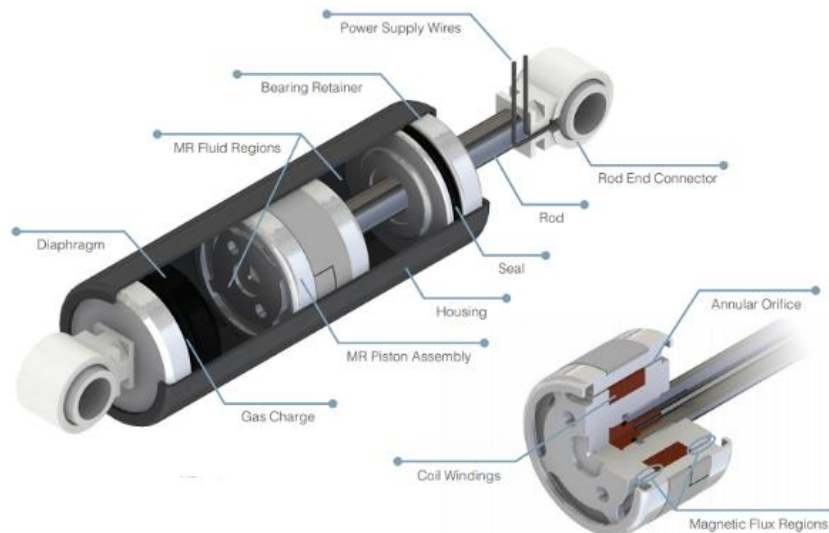


Figura 45: interior de un amortiguador con fluido magneto-reológico.
Fuente: <https://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/industrial-suspension-systems/how-does-mr-damper-work>.

Estos dispositivos son muy interesantes y tienen un funcionamiento similar a los amortiguadores hidráulicos pasivos cuyo fluido pasa de un lado a otro a través de pequeños orificios situados en el pistón, convirtiendo la energía en calor. La diferencia es que estos contienen en su fluido unas partículas magnéticas, normalmente de hierro, las cuales al entrar en un campo magnético convierte el fluido en un semisólido en milisegundos, lo que provoca que el amortiguador ofrezca una mayor resistencia a la hora de que dicho fluido tenga que atravesar los orificios del pistón. Como consecuencia, la resistencia del amortiguador puede cambiarse en tiempo real, variando según las circunstancias.

5.3.5. Sistemas de control pasivos:

Son los más utilizados y tienen dos grandes ventajas: tener un coste reducido y que en caso de sismo no necesitan una fuente de energía externa, ya que se activan con la propia energía de la excitación. Pueden ser usados tanto en edificios de nueva construcción como en edificios existentes que tienen una baja rigidez lateral.

Dentro de este sistema encontramos dos tipos de amortiguadores, los aislamientos sísmicos y los disipadores de energía. La diferencia entre ambos se encuentra en cómo ayudan a disipar la energía sísmica en la estructura sobre todo por el lugar en el que se ubican. En el caso de los aislamientos sísmicos, éstos evitan la entrada de la mayor cantidad posible de energía sísmica al edificio situándose entre la cimentación y la estructura. Mientras que los disipadores de energía se colocan en determinados lugares clave, normalmente en los últimos pisos del edificio, donde ayudan a que la respuesta sísmica de la estructura sea menor absorbiendo éstos gran parte de los esfuerzos.

En los aisladores sísmicos podemos distinguir dos tipos:

- Aisladores elastoméricos
- Aisladores deslizantes

En cuando a los disipadores de energía, actualmente están comenzando a clasificarse de la siguiente manera:

- Dispositivos de histéresis:
 - Amortiguadores metálicos.
 - Amortiguadores de fricción.
- Dispositivos viscoelásticos.
- Amortiguadores de masa sintonizados.
- Amortiguadores viscosos.
- Dispositivos de rigidez magnética negativa.
- Dispositivos de restablecimiento de la rigidez pasiva.

5.3.5.1. Aislamiento sísmico de estructuras:

La energía sísmica podemos o bien dejar que entre en la estructura donde los sistemas de amortiguación colocados en determinados puntos estratégicos se encarguen de absorber la mayor cantidad de energía posible, o bien absorberla parcialmente antes de que entre en la estructura mediante los aisladores sísmicos.

En el último caso ayudamos a que la estructura experimente únicamente pequeñas deformaciones reduciendo los daños que se puedan ocasionar tanto en elementos estructurales, como no estructurales y en el propio contenido del edificio. Así, la respuesta del edificio se reduce considerablemente lo que permite el uso de materiales y sistemas constructivos más variados e

incluso de menores dimensiones permitiendo reducir el coste de construcción, lo que compensa el uso de este dispositivo.

Es una técnica que nos permite reducir las distorsiones de pisos, así como las aceleraciones de la estructura, pero sobre todo es un sistema que basa su eficacia en aislar la estructura de los movimientos del suelo potencialmente peligrosos. Reduce con ello la energía que entra en la estructura y sus efectos, especialmente en el rango de frecuencia natural del edificio, donde provoca un aumento del periodo natural de la estructura a un rango de frecuencia superior, normalmente de 2-4 segundos (Chan, Lin, Tagawa, 2019). Si el edificio ya de por sí posee un periodo largo de vibración, como ocurre en el caso de los edificios de gran altura, el uso de estos sistemas no sería muy práctico dado que no estaría aportando un aumento significativo en el periodo del edificio. Sin embargo, la incorporación de diversas estrategias como el refuerzo de la estructura o la amortiguación adicional en la estructura, han permitido su uso con éxito en más de 200 edificios de entre 60-180 metros, localizados en Japón. Las preocupaciones derivan ahora en la necesidad de poder evitar el desplazamiento de un edificio de tales características sin suponer el colapso del propio sistema y de evitar su vuelco por una excesiva compresión y tensión del aislamiento sísmico.

La implementación de este sistema en edificios de gran altura puede verse en edificios sobre todo localizados en Japón como el edificio Shinagawa (155 metros), el edificio Shiodome Sumitomo (120 metros), la torre este Tokio Skystree (158 metros) o el Nakanoshima Festival Tower, de 200 metros de altura, completada en 2012, **figura n**. Posee un sistema de aislamiento sísmico que usa 16 rodamientos cuadrados de goma de plomo con amortiguadores de aceite.

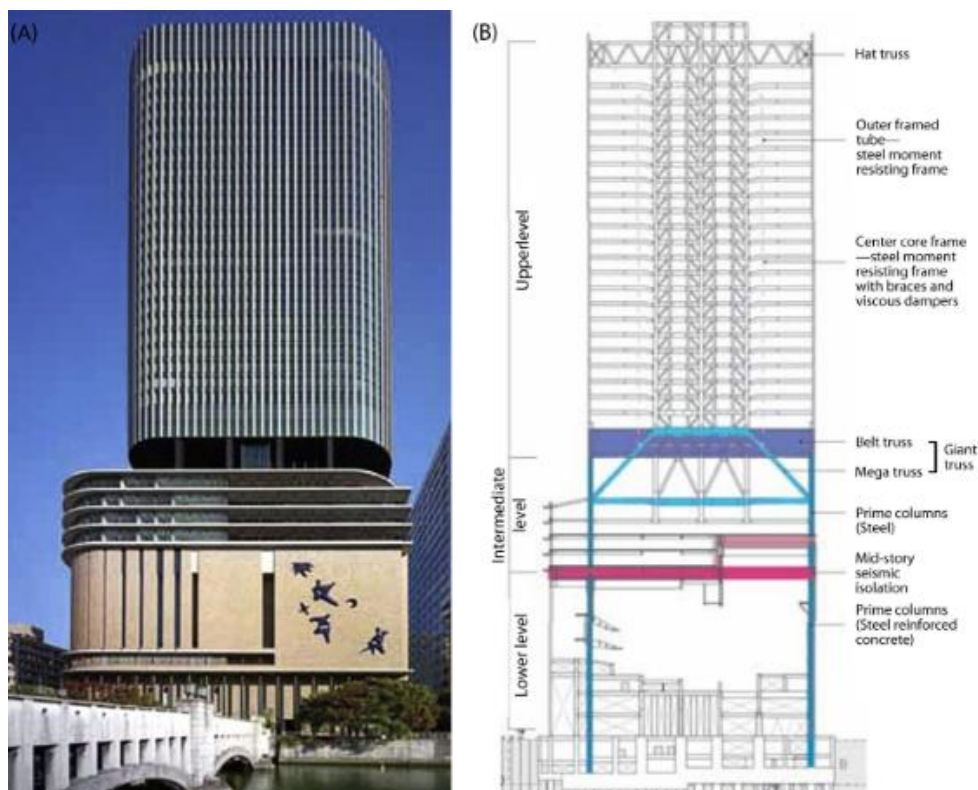


Figura 46a: Torre Nakanoshima Festival. Figura 46b: sección del edificio donde se observa la implementación del aislamiento sísmico.

Fuente: Lago, Trabucco, Wood, 2019.

Se puede introducir tanto en edificios de nueva construcción como en edificios existentes y su eficacia se basa en la flexibilidad horizontal que ofrece, de modo que este dispositivo es el que

experimenta el desplazamiento o la deformación manteniéndose la estructura en la misma posición, como podemos observar en la figura n.

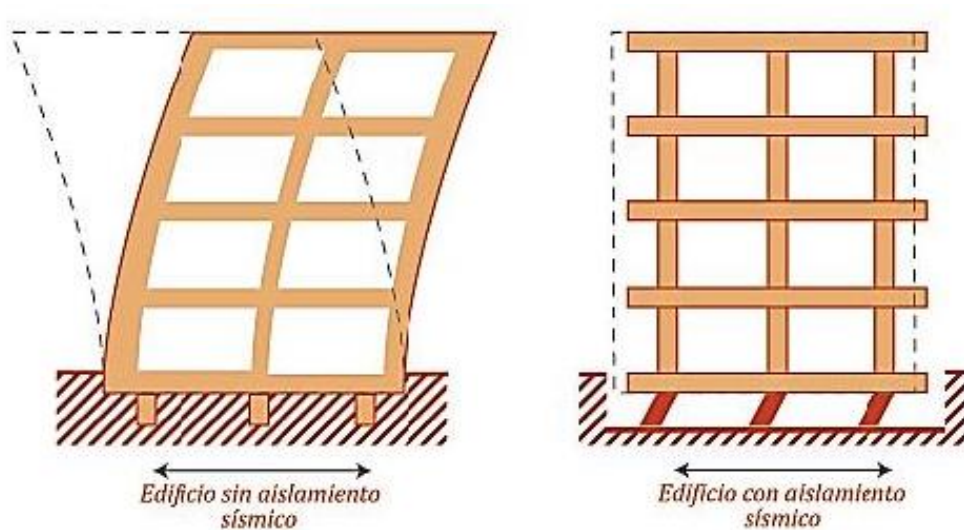


Figura 47: comparación entre un edificio sin aislamiento sísmico y con aislamiento sísmico.

Fuente: Genatios, Lafuente, 2016.

Dado que estos sistemas se encuentran entre la estructura y la cimentación, no solo se encargan de reducir la energía que entra en la estructura, sino que también deben tener suficiente rigidez vertical para poder ser capaces de transmitir las cargas verticales a la propia cimentación. Forman parte de la cimentación y con ello de la estructura, por lo que su resistencia supone evitar el colapso de la misma.

Se debe tener en cuenta que se deben disponer en lugar accesibles para su posterior mantenimiento e incluso donde puedan ser sustituidos en caso del colapso del dispositivo.

Este sistema ha sido muy estudiado y comercializado por su reducido coste. Se pueden dividir principalmente en dos tipos: los aisladores elastoméricos y los aisladores de fricción deslizantes o basculantes. Dentro de estos dos tipos tenemos varios tipos organizados en el siguiente esquema:

- Aisladores elastoméricos:
 - Apoyos de goma natural (NRB: *natural rubber bearing*)
 - Apoyos de goma de baja amortiguación (LDRB: *low-damping rubber bearing*)
 - Apoyos de goma de alto amortiguamiento (HDRB: *high-damping rubber bearing*)
 - Apoyos con núcleo de plomo (LRB: *lead-plug rubber bearing*)
- Aisladores deslizantes:
 - Sistema friccional de péndulo (FPS: *friccional pedulum system*)
 - Apoyos basculantes

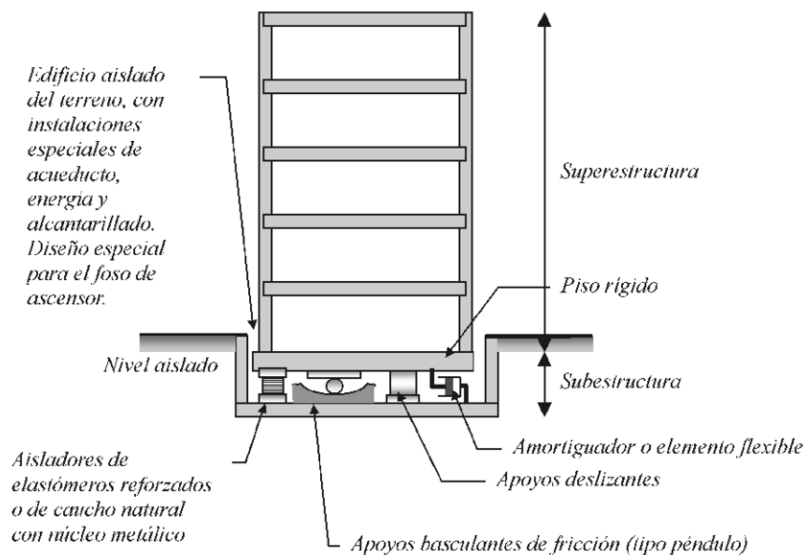


Figura 48: tipos de amortiguadores sísmicos.
Fuente: Genatios, Lafuente, 2016.

Los aisladores de tipo elastomérico:

Son unos dispositivos que combinan capas cilíndricas de material flexible, elastómeros naturales o sintéticos, con capas de acero. Así, las capas de material elástico proporcionan la deformación horizontal necesaria, mientras que las capas de acero ofrecen resistencia frente a las cargas verticales, añadiéndole rigidez vertical al dispositivo.

Los amortiguadores de goma natural, NRB, así como los de bajo amortiguamiento, LDRB, no suelen ofrecer una gran amortiguación por lo que se suelen combinar junto con otros sistemas amortiguadores complementándolos, ya que su coste de producción no es elevado y además son sistemas sencillos de producir. Entre los más usados están los LRB y los HDRB para conseguir una amortiguación elevada.

En la figura 49 podemos ver un aislador elastomérico con un núcleo de plomo. Son como los LDRB pero poseen un núcleo de plomo que les otorga ciertas propiedades que ayudan a aumentar la energía disipada debido a que acepta mayores deformaciones. Posee un comportamiento elastoplástico, una capacidad de mantener la resistencia durante múltiples ciclos de deformaciones plásticas y ofrece altos valores de disipación de energía (Genatios, Lafuente, 2016), lo que lo hacen muy atractivo para el control de la respuesta sísmica de un edificio. Los núcleos de plomo pueden amortiguar en forma de calor entre un 25-30% del amortiguamiento crítico, a diferencia de otros núcleos como los de goma los cuales producen un amortiguamiento del 12% aproximadamente. Se han usado sobre todo en Nueva Zelanda, Japón y en los EEUU.



Figura 49: aislador sísmico de capas de goma y acero, con núcleo de plomo.
Fuente: Genatios, Lafuente, 2016.

Los aisladores de apoyos de goma de alto rendimiento HDRB, se crearon añadiendo aditivos como resinas y aceites al caucho natural, lo que incrementó su capacidad para disipar energía hasta un 10-20%. Su comportamiento histerético es el que proporciona unos resultados mayores de amortiguación. A continuación, podemos ver un dispositivo que se encuentra en el mercado actual, de la empresa Structurae, el cual se denomina LASTO®HDRB.

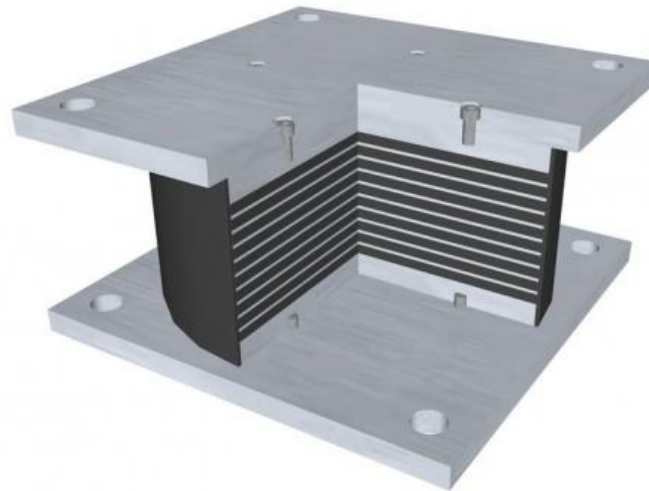


Figura 50: LASTO®HDRB high damping rubber bearings

Fuente: <https://structurae.net/en/products-services/lasto-hdrb-high-damping-rubber-bearings>

Este sistema está compuesto por capas alternadas de material elastomérico y placas de acero reforzado vulcanizadas. Proporcionan una amortiguación de hasta el 16% pues presentan un compuesto de goma químicamente mejorado, lo que mejora su capacidad de amortiguación y desplazamiento. Las placas de acero como se ve en la imagen se encuentran dentro del material elastomérico, estando sellas y protegidas frente a la corrosión.

Aisladores de deslizadores friccionales o basculantes:

Son el segundo tipo de aisladores sísmicos que existe y su funcionamiento se basa en reducir las aceleraciones y las fuerzas externas mediante un elemento deslizante con un coeficiente de fricción dado y que como el resto de aisladores se localiza entre la estructura y la cimentación. Dentro de este sistema hay dos tipos: el amortiguador de péndulo de fricción y el de apoyos basculantes, cuya diferencia puede verse en la siguiente figura 51.



Figura 51a: amortiguador deslizante. Figura 51b: amortiguador tipo péndulo de fricción.

Fuente: Lago, Trabucco, Wood, 2019.

Ambos sistemas consisten en dos planchas, las cuales se sujetan a la base de la estructura y a la cimentación, entre las que se produce el deslizamiento. Las planchas pueden ser rectas o curvas, las segundas se pueden apreciar en la figura 51 y son las más usadas pues las rectas pueden dar problemas a la hora de recolocarse el sistema en su posición inicial tras el paso de las cargas dinámicas.

En el segundo caso, las planchas curvas funcionan muy parecido a un péndulo, de ahí su nombre de sistemas de péndulos de fricción (FPS: friccional pedulum system). Está formado por unas planchas cóncavas, normalmente de acero inoxidable pulido, las cuales están recubiertas de un material de baja fricción, sobre las que se apoya un cojín esférico en el que se asienta la plancha de la base de la estructura. Cuando se produce un sismo, la estructura se eleva un poco debido a la geometría de la plancha inferior y por su propio peso vuelve a su posición inicial, considerándose por ello autocentrantes.

El amortiguamiento depende del valor de la fuerza de fricción que se le haya dado al sistema y la cual se ajusta según las propiedades del material de cubrición usado. Así se pueden alcanzar valores de 10-30% del amortiguamiento crítico (Genatios, Lafuente, 2016).



Figura 52: Plancha inferior de un aislador sísmico de tipo deslizante.
Fuente: Genatios, Lafuente, 2016.

Numerosos estudios e innovaciones se han llevado a cabo en estos sistemas con el objetivo de resolver sus desventajas, como por ejemplo la baja rigidez lateral que ofrecen frente a cargas laterales, siendo ésta una de las principales desventajas que poseen y por la que ofrecen cierta incomodidad a los ocupantes de un edificio durante fuertes cargas laterales debidas a vientos o tifones. Mejorar sus propiedades también es un objetivo ya que, mediante la incorporación de otros dispositivos como amortiguadores hidráulicos, amortiguadores de fluido o incluso la incorporación de actuadores los convierte en un sistema híbrido de mejores cualidades como ya hemos visto anteriormente. A continuación, se expone un estudio en el que combina estos sistemas con la tecnología, pero no para crear precisamente un sistema activo o híbrido.

Sistema mecatrónico inteligente de aislamiento de base:

El mayor problema que presenta el uso de estos sistemas es que al aislar la estructura en su base, no tienen resistencia frente a cargas de viento, su rigidez lateral es baja, lo que puede provocar un movimiento lateral o unas vibraciones que provoquen cierta incomodidad entre los ocupantes del edificio, si no daños más graves y sobre todo en estructuras ligeras. Para remediarlo se han propuesto el uso de amortiguadores de líquido sintonizado, de amortiguadores de fluido viscoso, amortiguadores MR semiactivos, incluso se ha llegado a hablar de sistemas de aislamiento

de base "inteligentes" que se usan junto a amortiguadores magneto-reológicos. Como hemos visto el uso de sistemas de aislamiento de base controlados activamente pueden traernos diversos problemas a la hora de su implementación práctica, por el uso de actuadores hidráulicos, los cuales necesitan estar encendidos constantemente y que supone un gasto de energía.

El desarrollo del sistema de Alerta Temprana de Terremotos (EEW: *earthquake early warning*), es un sistema que, gracias a su sofisticada red de trabajo formada por sismómetros y estaciones sísmicas, captan las ondas P que son las primeras ondas en llegar a un lugar, avisando de que en unos minutos llegarán las ondas S, las más destructivas. Esto permite un tiempo de reacción lo que puede ayudar a evitar daños y pérdida de vidas, gracias a la parada de algunas industrias, de máquinas, de trenes y a la evacuación de la gente de los edificios.

Debido a que este sistema de alerta nos permite prevenir un sismo, se ha pensado en realizar un sistema de aislamiento de base que únicamente entre en funcionamiento cuando reciba una señal de alerta del EEW. Así, se consigue resolver el problema, ya que mientras que no hay un sismo la estructura es capaz de resistir a los esfuerzos laterales generados por el viento y cuando se produce un sismo, el aislamiento sísmico es activado, protegiendo al edificio de los movimientos laterales del terreno.

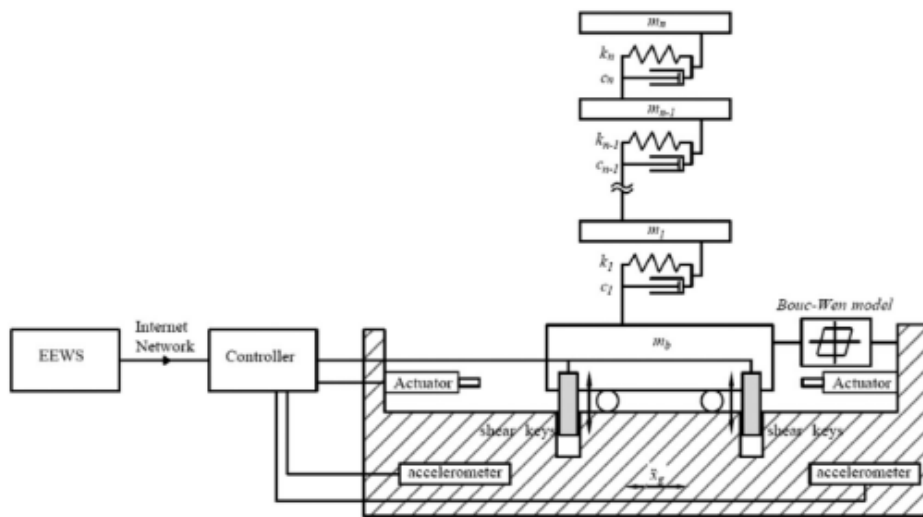


Figura 53: esquema del sistema mecatrónico de aislamiento de base inteligente.
Fuente: Chan, Lin, Tagawa, 2019.

Se trata de la versión más simple de los sistemas de aislamiento de base inteligentes. El sistema está compuesto por el sistema convencional de aislamiento sísmico, que separa físicamente la estructura del suelo. Unas llaves a cortante, sujetan la estructura dándole rigidez y fuerza contra las cargas laterales de viento. Cuando se detecta el sismo gracias al sistema EEW, se manda una señal a un microcontrolador que hace que las llaves dejen de sujetar el edificio convirtiéndose en un sistema de aislamiento pasivo y permitiendo su libre movimiento lateral. Se ha pensado en incluir otros sistemas de alerta en caso de fallo del principal para que se active el sistema pasivo. Cuando el sismo ha pasado, las llaves vuelven a sujetar el edificio.

Esta especie de llaves son ligera en comparación con el edificio y además son mecanismos simples y que no requieren de un gasto excesivo a la hora de su compra. Este sistema no requiere ningún control estratégico a diferencia de los sistemas activos y semiactivos, lo que implica una reducción en el coste de implementación. Tampoco requiere un gran mantenimiento. El sistema es completamente automático y tiene varias ventajas con respecto a los sistemas pasivos de aislamiento:

- Posee una mayor rigidez frente a cargas laterales, por lo que el viento no será un problema.
- Se reajusta mecánicamente, no dependiendo de la rigidez de los elastómeros de los amortiguadores ni de su superficie cóncava.
- No requiere del uso de controles en tiempo real, lo que simplifica su implementación.

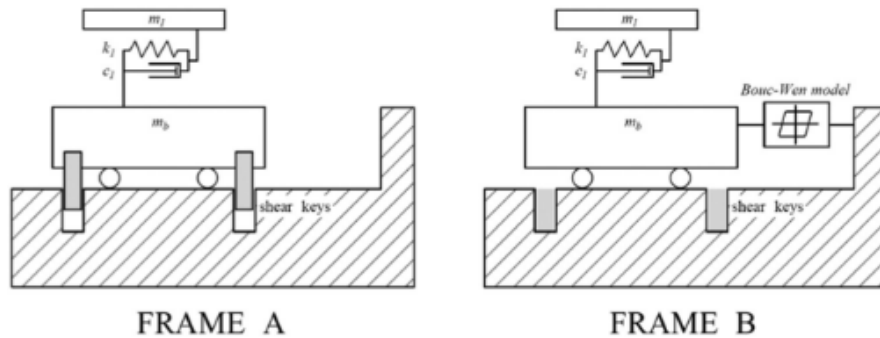


Figura 54: esquema de la configuración de la estructura con y sin llaves, respectivamente.
Fuente: Chan, Lin, Tagawa, 2019.

A pesar de estos estudios, algunos investigadores también remarcan los graves daños de algunos edificios dotados de aisladores sísmicos que no han podido hacer frente a las acciones muy elevadas, debido a su cercanía al epicentro u otro tipo de situaciones. Las normas exigen que estos sistemas sean capaces de soportar desplazamientos máximos cada vez más elevados, así como sismos de mayores intensidades.

Algunos de las desventajas encontradas en estos dispositivos, aunque poseen características muy interesantes, son las siguientes:

- Pueden ser usados en edificios de nueva planta e incluso existentes, pero en edificios de gran altura presentan ciertas complicaciones.
- El hecho de aislar su base, hace que el edificio pierda rigidez lateral frente a cargas de viento, que provoca cierta reducción en el confort de los usuarios.

Ventajas:

- No necesitan demasiada energía externa.
- Pueden funcionar como sistemas pasivos en caso de fallo eléctrico.

5.3.5.2. Disipadores de energía Amortiguadores de fricción pasivos (PFD: passive friction damper)

Son dispositivos muy usados en sistemas mecánicos de diversas industrias con el objetivo de reducir vibraciones e impactos. También se usan como una forma pasiva de reducir la acción sísmica sobre los edificios, absorbiendo y disipando parte de la energía.

Estos dispositivos tienen la capacidad de disipar energía mediante la fricción, transformando la energía cinética del sismo en energía térmica. Están formados por una o varias interfaces de fricción, donde se aplica la fuerza normal constante que produce el deslizamiento de éstas, cuando se supera la fuerza de fricción estática máxima con la que ha sido diseñado el amortiguador. No requieren energía externa.

Tiene una gran desventaja que como ocurre con el resto de los sistemas pasivos, no son sistemas adaptables a distintas fuerzas o frecuencias, no son sistemas que varíen sus propiedades o que se ajusten a las cargas dinámicas exteriores, de modo que cuando se diseñan y construyen, ya no se pueden alterar. Estos dispositivos se diseñan para que funcionen cuando se supera un único valor fijo de fuerza deslizante, establecido previamente según una carga sísmica dada especificada en las normativas sismorresistentes. Si este valor no se supera, el dispositivo no se activa con la consecuencia de que no funcione frente a algunos sismos que no hayan sido especificados en la norma. Así, si el sismo tiene una intensidad menor que la intensidad con la que ha sido diseñado el dispositivo o si tiene una intensidad muy superior, el dispositivo puede no disipar la suficiente cantidad de energía para reducir la respuesta del edificio o incluso no ponerse en funcionamiento.

Entre los dispositivos de fricción podemos encontrar los conocidos amortiguadores de fricción tipo Pall y los innovadores amortiguadores de fricción cilíndrico, los cuales mediante experimentos numéricos y prácticos buscan demostrar que un buen diseño puede ayudar a reducir las vibraciones debidas a cargas dinámicas.

Algunas innovaciones llevadas a cabo en los últimos años, las cuales incorporan esta manera de disipar energía, demostraron ser capaces de reducir las vibraciones de una estructura sometida a cargas sísmicas, como por ejemplo el amortiguador de fricción cilíndrico (CFD: *cylindrical friction damper*), propuesto por Mirtaheri, Zandi, Samadi y Samani.

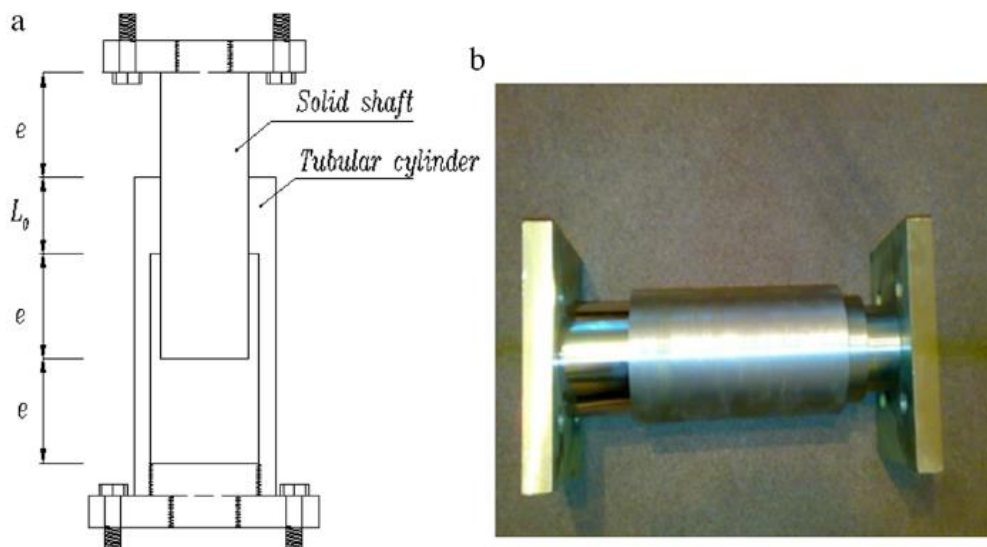


Fig. 2. The CFD: (a) Longitudinal section of CFD; (b) Assembled CFD.

Figura 55a: sección del amortiguador CFD. Figura 55b: amortiguador de fricción cilíndrico.
Fuente 55a y 55b: Mirtaheri, Zandi, Samadi, Samani, 2011.

El dispositivo como vemos en la figura 55, consta de dos partes: un eje interior y un cilindro exterior. Ambas partes se ensamblan de modo que cuando se aplica una fuerza axial en sus extremos, se produce una fricción entre ellas al moverse el eje dentro del cilindro, lo que produce una fuerza que permite reducir la energía. El bucle de los ciclos de histéresis estables del sistema, permite reducir considerablemente la energía debida a sismos en la estructura.

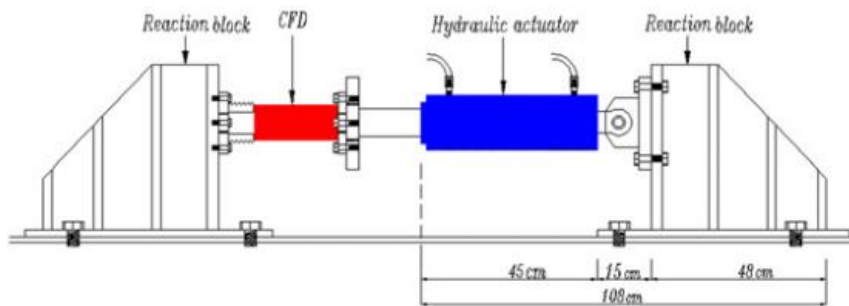


Figura 56a: Amortiguador de fricción cilíndrico para experimentos. Figura 56b: esquema del amortiguador
Fuente 56a y 56b: Mirtaheri, Zandi, Samadi, Samani, 2011.

A diferencia de otros amortiguadores de fricción, estos no utilizan pernos de alta resistencia para inducir una fricción entre las superficies de contacto, lo que reduce los costes de construcción, simplifica el cálculo de diseño y aumenta la fiabilidad en comparación con otros tipos de amortiguadores de fricción (Mirtaheri, Zandi, Samadi y Samani, 2011).

La implementación de este tipo de amortiguadores pasivo de fricción se ha realizado en más de 100 edificios de diversas características, como en la Torre de oficinas Sonic City o el Ashabi Beer Tower, así como en edificios existentes. Entre sus ventajas hay que destacar su reducido coste y mantenimiento, su fácil implementación, así como sus sencillas características y funcionamiento. No se ve afectado por la amplitud, la frecuencia o el número de cargas cíclicas.

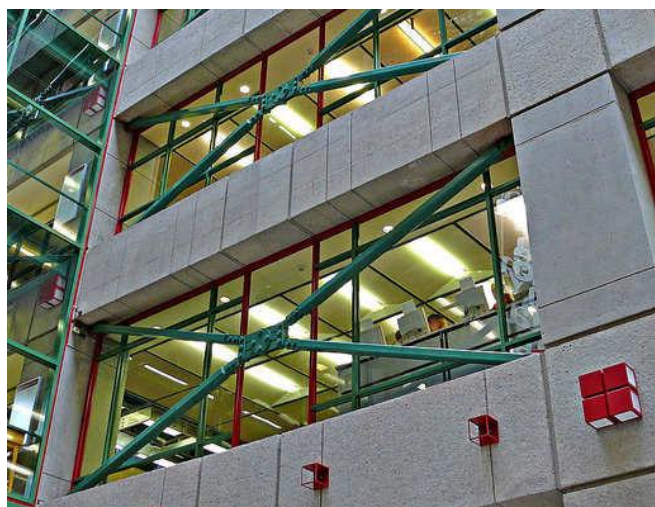


Figura 57: disposición de un amortiguador friccional de tipo Pall en la Biblioteca Universitaria de Concordia.
Fuente: <http://frictionaldampers.blogspot.com/2011/08/concordias-library-building-lb.html>

Amortiguadores histéricos metálicos:

Estos sistemas se encargan de disipar la energía de edificios sometidos a cargas dinámicas mediante la deformación inelástica de los materiales metálicos. A través de la evaluación de los ciclos de histéresis de fuerza-deformación que experimenta el material sometido a determinadas cargas se puede cuantificar la energía que es capaz de absorber y disipar, obteniendo su rendimiento. Con ello podemos determinar qué tipo de material metálico es más adecuado para nuestro edificio.

Pero ¿cómo se comporta un material metálico bajo cargas cíclicas? Para entender a que nos referimos con ciclos histéricos veamos la figura n.

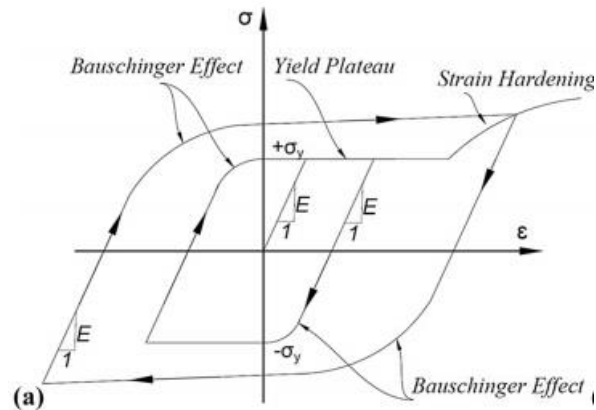


Figura 58: Comportamiento histérico idealizado de los metales.
Fuente: Javanmardi, Ghaedi, Ghadim, Hanif, 2019.

En la figura 58 podemos ver el ciclo de histéresis de un metal que se somete a fuerzas positivas y negativas, experimentando lo que se conoce como efecto Bauschinger. Cuando la carga aplicada se reduce, este recupera su modulo elástico inicial, pero cuando se le aplica una carga en la dirección opuesta cede y tiende a ablandarse a niveles inferiores al límite elástico, lo que se conoce como efecto Bauschinger. Este comportamiento histérico permanece mientras no se superen los límites de fluencia y los límites elásticos del material. En algunas ocasiones cuando el efecto es más fuerte, el material adquiere cierta rigidez. Según los materiales y la geometría que se le de al dispositivo tendremos unos ciclos de histéresis determinados, aunque los metales usados en estos dispositivos poseen ciclos muy similares. Existe una aleación con memoria de forma, SMA (Shape memory alloys), que posee un comportamiento algo mas diferente como podemos ver en la siguiente figura 59.

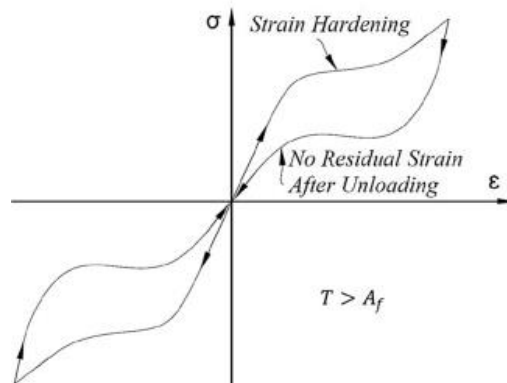


Figura 59: Comportamiento histérico de un dispositivo SMA.
Fuente: Javanmardi, Ghaedi, Ghadim, Hanif, 2019.

Estos basan su eficacia en la disipación de energía a través de la temperatura que adquiere el material de modo que, si la temperatura de este aumenta sobrepasando un valor determinado Af (Javanmardi, Ibrahim, Ghaedi, Ghadim, Hanif, 2019) y luego se reduce, se disipa gran cantidad de energía y sin dejar tensiones residuales, conocido como super elasticidad. Lo curioso es que, si la temperatura no supera dicho valor, se forman tensiones residuales las cuales se eliminan cuando la temperatura supera el valor nuevamente y es por ello que se dice que tiene memoria de forma.

Visto esto, tenemos que los amortiguadores metálicos se pueden clasificar en:

- Amortiguadores de acero
- Amortiguadores de aluminio
- Amortiguadores de cobre
- Amortiguadores de plomo
- Amortiguadores de aleación con memoria de la forma, SMA: shape memory alloys

Entre sus ventajas tenemos que no dependen de la velocidad, son resistentes a la temperatura ambiente y además su material ha sido muy estudiado y sus características y propiedad son ampliamente conocidas en la actualidad. Son fáciles de fabricar y además su coste es reducido. Se suelen usar ya que proporcionan una adecuada disipación de energía.

Amortiguadores de acero:

Estos dispositivos se han ido ampliando e innovando desde 1970. Entre ellos tenemos el amortiguador de barra en U, el amortiguador de viga a flexión, el amortiguador de eje único, todos ellos diseñados con el objetivo de que experimenten grandes desplazamientos en su rango inelástico y disipen energía a través de la deformación plástica del metal.

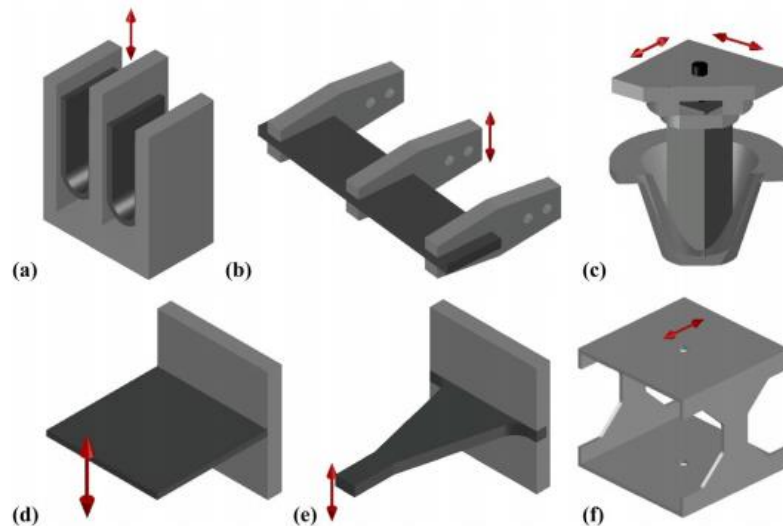


Figura 60: Amortiguadores histeréticos metálicos.
Fuente 60: Javanmardi, Ghaedi, Ghadim, Hanif, 2019.

Se tratan de sistemas que tienen una geometría pensada con una serie de placas metálicas dispuestas en zonas estratégicas con el objetivo de conseguir de que puedan deformarse en una o en las dos direcciones, que soporten tensiones y/o esfuerzos a flexión. Algunos de ellos como el amortiguador de viga torsional o el amortiguador de viga de un solo eje, poseen una gran capacidad de carga y pueden disponerse por ejemplo en la base de la estructura, evitando su levantamiento.

Otro tipo de amortiguador histerético es la riostra de pandeo restringido (BRB: buckling restrained brace). Se trata de un dispositivo que posee un núcleo de acero, que puede tener diversas formas, en cruz, circular (CBRB) u otras y el cual está restringido al pandeo por su confinamiento en un tubo metálico relleno de mortero. El núcleo posee en su entorno un material especial para evitar que se adhiera al mortero y así poder deslizarse con respecto a él. El núcleo de acero se encarga de soportar las cargas axiales, a flexión o cortantes (Oviedo, Duque, 2006), mientras que el material de confinamiento elimina esfuerzos a cortante transferidos por las cargas a compresión y también es el encargado de restringir el pandeo.

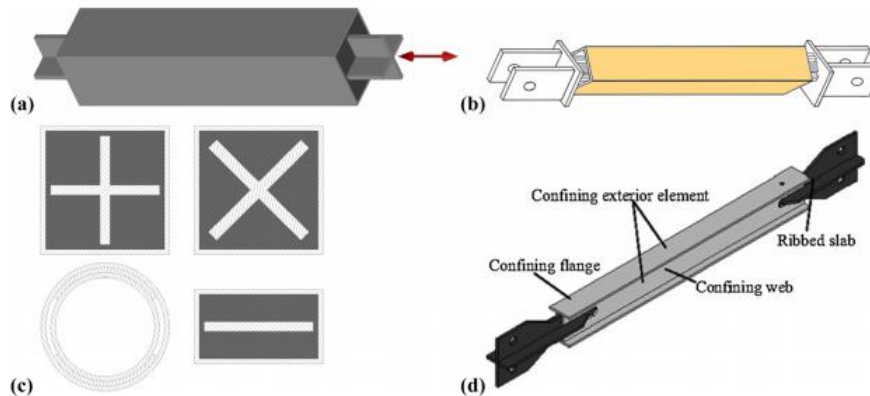


Figura 61a: Amortiguador de riostra de pandeo restringido. Figura 61b: Amortiguador de tipo ARBRB. Figura 61c: configuraciones del núcleo del amortiguador posibles. Figura 61d: amortiguador SUB.
Fuente: Javanmardi, Ghaedi, Ghadim, Hanif, 2019.

Estos se han utilizado sobre todo en EEUU y en Japón, y algunos estudios han demostrado que son más efectivos y más fiables que los arriostramientos convencionales. Entre sus ventajas podemos destacar que son fáciles de instalar en la estructura, poseen un comportamiento histerético estable y una alta capacidad de disipar energía, no son apenas sensibles a las condiciones medioambientales, diseño flexible, es resistente a compresión y tensión, no suele requerir del fortalecimiento de partes estructurales y ni de la cimentación, etc. Se han realizado algunas implementaciones de estos dispositivos en puentes y edificios ya que son capaces de disipar energía sísmica. A pesar de ello presentan algunos inconvenientes como el comportamiento inconsistente del material, dificultad a la hora de detectar y buscar daños, las imperfecciones geométricas del núcleo metálico, las cuales han llevado a intentar modificar su geometría dando lugar a los ABRB, que son BRB, pero con una riostra de pandeo angular restringido formada por cuatro placas metálicas unidas en los extremos como puede verse en la figura 61b, o el SUB, una riostra restringida cuyas placas forman una H, figura 61d.



Figura 62: amortiguadores de tipo riostra de pandeo restringido a escala real.
Fuente na: Takeuchi, Wada, Matsui, Sitler, Lin, Sutcu, Sakata, Qu, 2017. Fuente nb: Surendran, Varma, 2017.

Otro tipo de amortiguador metálico muy famoso es el conocido como tipo ADAS, formado por un conjunto de placas con forma de X, dispuestas a flexión conectadas en paralelo a la placa base mediante pernos que añaden amortiguación y resistencia adicional a la estructura. Estos dispositivos disipan energía mediante la deformación plástica de su zona más delgada.

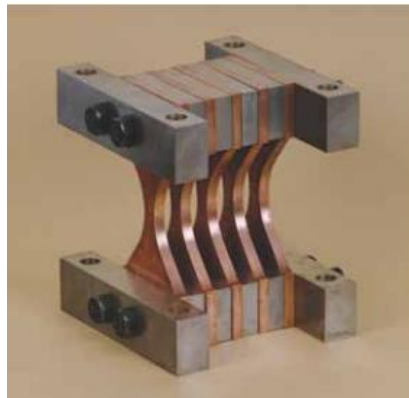


Figura 63: Amortiguador tipo ADAS.
Fuente: Oviedo, Duque, 2006.

Posteriormente otros investigadores dieron lugar a los TADAS, otro dispositivo que añade amortiguación y rigidez a la estructura, cuyo funcionamiento es similar al anterior, pero con la diferencia de que sus placas tienen forma triangular. Su uso se recomienda para aumentar la amortiguación y la rigidez en estructuras resistentes a momentos.

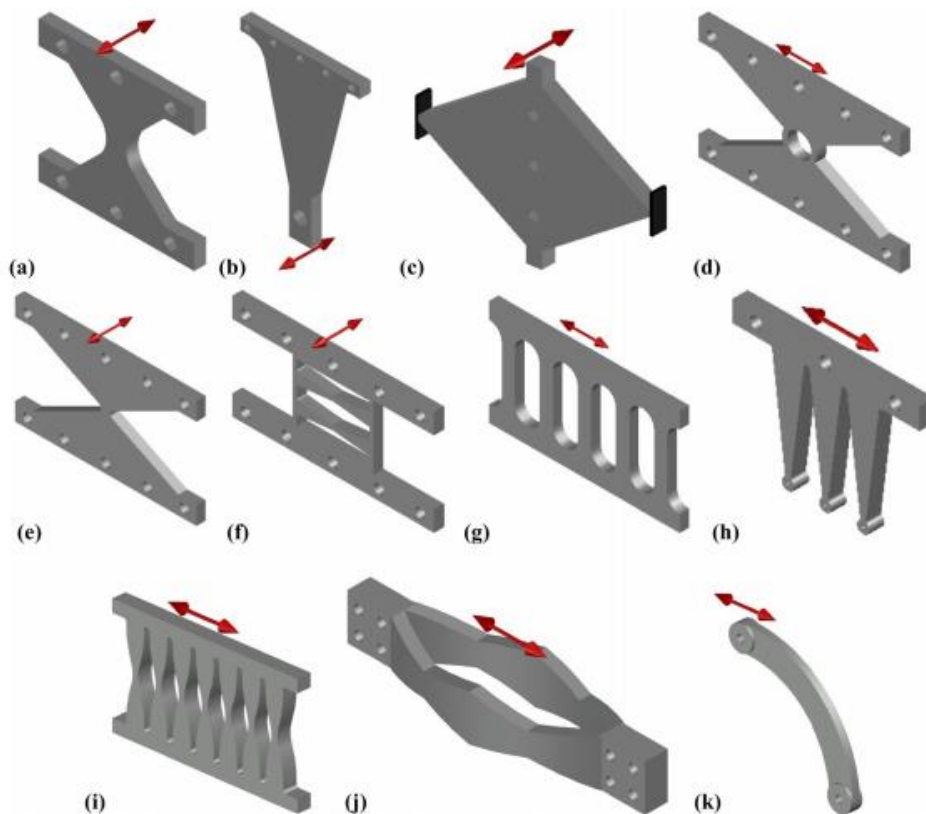


Figura 64: Amortiguadores metálicos de diversas geometrías
Fuente: Javanmardi, Ghaedi, Ghadim, Hanif, 2019.

Otros investigadores desarrollaron otros tipos con un funcionamiento similar, como el amortiguador rómbico ADAS, **figura nc**, en el que usaron acero de bajo límite elástico, el cual impide el problema de tener fracturas locales y pusieron como soportes unas bisagras situadas en ambos extremos, las cuales eliminan fuerzas axiales desfavorables. Como podemos ver en la **figura n**, numerosas geometrías se han planteado con el objetivo de mejorar el rendimiento, evitar concentraciones de esfuerzos en determinadas partes del sistema y principalmente poseer una gran cantidad para disipar energía.



Figura 65: Implementación de amortiguadores histeréticos metálicos en estructuras.
Fuente: <http://article.sapub.org/10.5923.c.jce.201402.33.html>

Otro tipo interesante por su forma son los amortiguadores con forma de J. Se tratan de un conjunto de placas con forma de J fijadas a una placa en el centro y con soportes de rodillos en los extremos. Debido a esta geometría son muy eficaces bajo grandes deformaciones dado que trabajan a flexión, por lo que disipan una gran cantidad de energía. Estas placas también se probaron con forma de U, como se puede ver en la figura n, y su disposición ayudo a evitar la concentración de tensiones en una placa, y a mejorar su rendimiento. Su disipación depende en este caso, de la altura y del espesor de las placas.

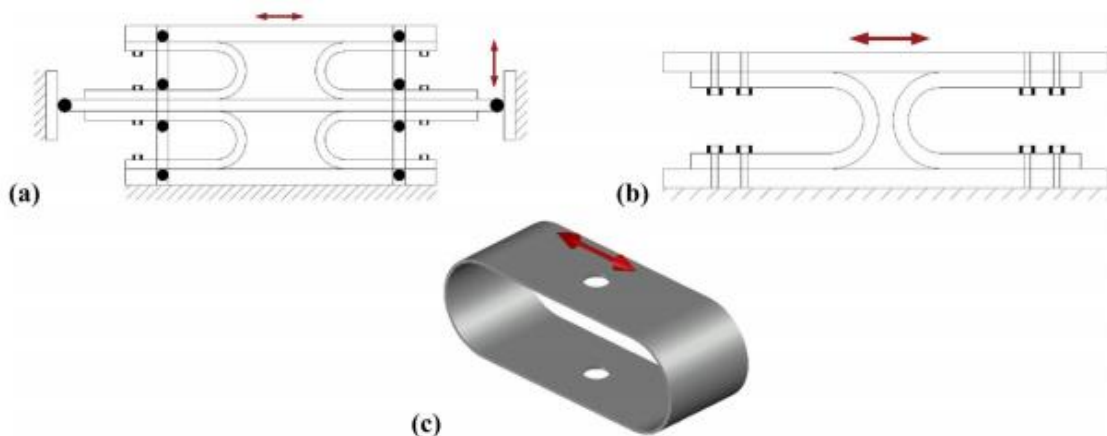
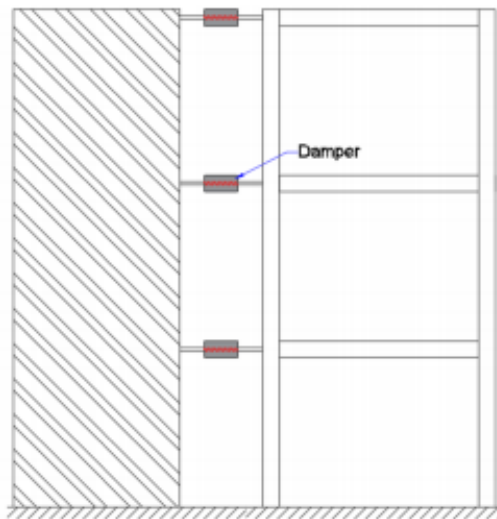


Figura 66a: Amortiguador metálico con forma de J. Figura 66b: amortiguador de vibraciones. Figura 66c: Deralle plancha metálica usada.

Fuente: Javanmardi, Ghaedi, Ghadim, Hanif, 2019.

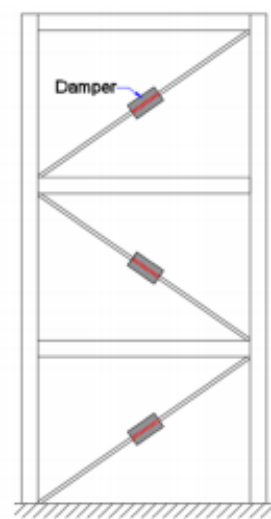
Muchos otros tipos se han propuesto variando sus formas y tamaños y buscando la máxima eficiencia y rendimiento. Son que presentan numerosas ventajas como un comportamiento histerético estable, insensible a la temperatura ambiente, son materiales muy usados en la actualidad en diversas disciplinas por lo que su comportamiento y sus características son muy conocidas, tienen un bajo coste lo que hace que sean muy usados. Sin embargo, entre sus desventajas la más destacada es el hecho de que una vez ha pasado el sismo si experimentan una deformación no se recuperan, de modo que tienen que ser sustituidos



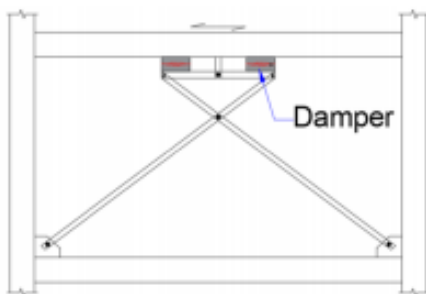
(a) Separated tower+frame



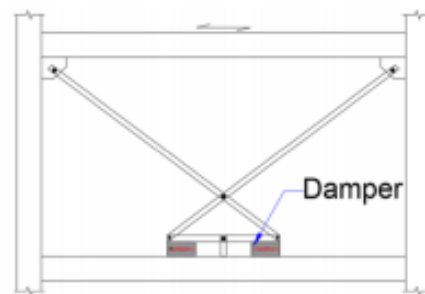
(b) Base isolated structure



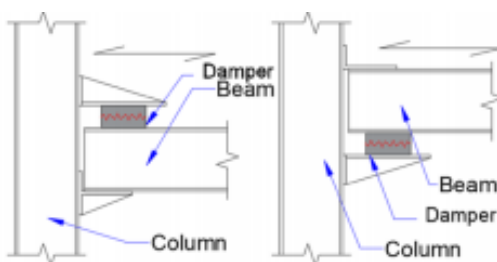
(c) Diagonal bracing



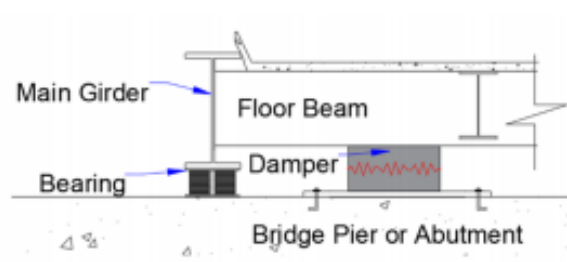
(j) Seesaw energy dissipation system (top)



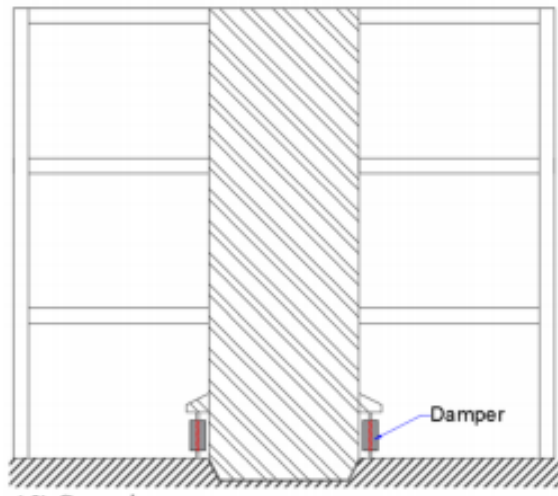
(k) Seesaw energy dissipation system (bottom)



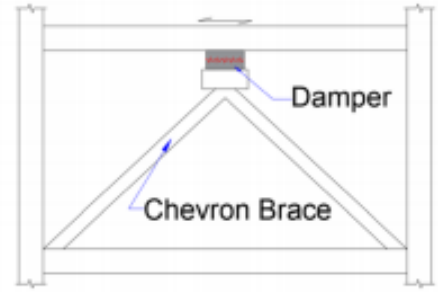
(l) Beam-to-column connection



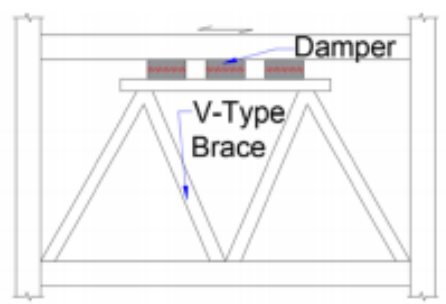
(m) Bridge



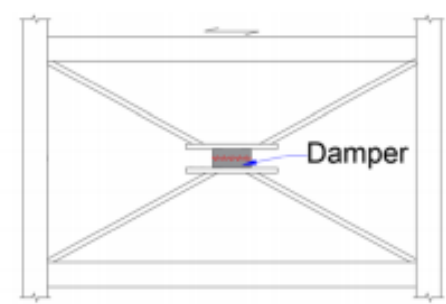
(d) Stepping tower



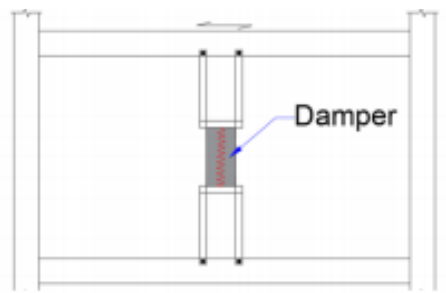
(e) Chevron (inverted V-type) brace system



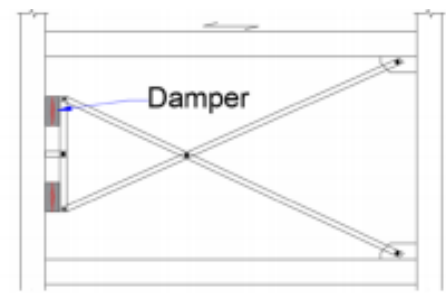
(f) V-Type brace system



(g) X-Type brace system



(h) Inner column-type system



(i) Seesaw energy dissipation system (vertical)

Figura 67: Diversas disposiciones y usos de estos amortiguadores.
Fuente: Javanmardi, Ghaedi, Ghadim, Hanif, 2019.

Amortiguadores de aleación con forma de memoria, (SMA: shape memory alloys):

Como hemos comentado estos amortiguadores tiene varias ventajas entre ellas, la capacidad de recuperar su forma original tras sufrir una gran tensión mediante su aumento de temperatura, que produce el efecto memoria de forma, o mediante la eliminación de la tensión, por lo que se dice que es super elástico. También tienen una buena resistencia a la corrosión y a la fatiga. Soporta grandes tensiones sin que se llegue a producir ninguna tensión residual en la mayoría de los casos. Por sus propiedades ha provocado cierta curiosidad para su uso como elementos para la disipación de energía ya sea como amortiguadores de control pasivos o como aisladores sísmicos o limitadores del desplazamiento.

Son sistemas que presentan una buena capacidad para reducir vibraciones en comparación con algunos dispositivos, no necesitan energía externa y se pueden recentrar bien. Sin embargo, hoy en día, aunque se usan para complementar algunos sistemas de arriostamiento o amortiguación, no se han comercializado y todavía les queda un largo camino de estudios y experimentos para que comiencen a ser usados en este ámbito. Aunque hay que volver a destacar que presentan propiedades que podrían llegar a crear un nuevo amortiguador con un nivel de rendimiento brillante.

En un estudio se propuso el uso de un amortiguador que consistía en el uso de tres columnas de acero unidas por una viga SMA, para la disipación de energía en un puente. Los pilares externos se anclaban al puente mientras que el central se anclaba al suelo. Los resultados eran buenos, demostrando una buena ductilidad.

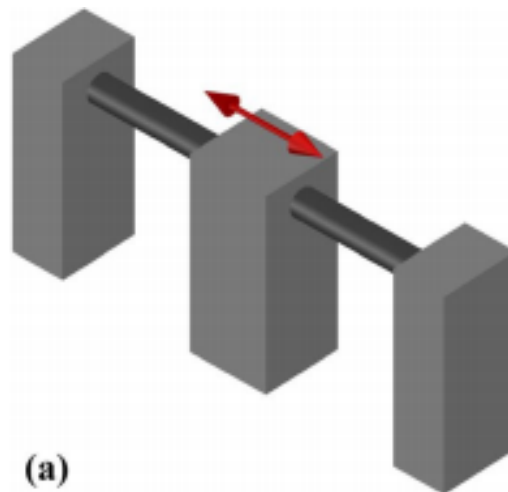


Figura 68: Esquema de una estructura con un amortiguador SMA.
Fuente: Javanmardi, Ghaedi, Ghadim, Hanif, 2019.

En otro estudio se investiga un amortiguador SMA, compuesto por cables super elásticos de SMA pretensados y dos resortes pre-comprimidos. Este conjunto tiene el objetivo de actuar como un sistema que es capaz de recentrarse, lo cual se produce gracias a los resortes que aplican una fuerza de restablecimiento y de disipar de energía, que se produce por los cables tensados y por los rodillos. Los resultados parecen favorables mientras se mantengan ciertos parámetros, mostrando una buena capacidad de disipar energía, así como de un centrado total.

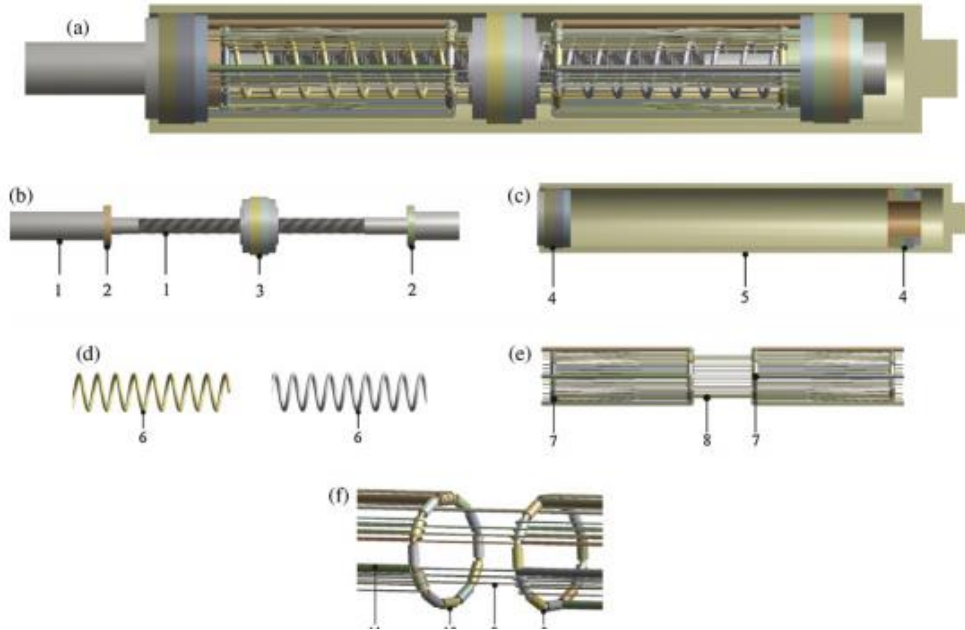


Figura 69: Esquema de un amortiguador SMA con capacidad de autocentrado y sus diversas partes.
Fuente: Ma, Cho, 2007.

Amortiguadores viscoelásticos, VE:

Su primera aplicación fue en una aeronave para reducir las vibraciones. Posteriormente se incorporó su uso en el World Trade Center, donde se usaron hasta 10.000 dispositivos para reducir los efectos debidos al viento. Para su implementación en estructuras sísmicas, se requería que estos aumentasen su rango de amortiguación y que además pudieran afrontar un amplio rango de frecuencias, para que fueran eficaces. Es por ello que este dispositivo se ha usado en la mayoría de los edificios con el objetivo de reducir las cargas debidas al viento, aunque también se sabe que se han usado en una menor cantidad de edificios frente a sismos sobre todo en EEUU.

Son sistemas muy efectivos a la hora de reducir la respuesta estructural sometida tanto a fuerzas de viento como sísmicas, destacando su uso en edificios altos donde debido a su gran capacidad de disipar energía, reducen las aceleraciones en la estructura y evitan que entre en resonancia, pudiendo absorber una amplia gama de frecuencias.

Son sistemas cuyas fuerzas dependen de la velocidad y del desplazamiento. Basan su eficacia en la transformación de energía mecánica en térmica a través del material viscoelástico, copolímeros

o sustancias vidriosas, el cual disipa energía al someterse a esfuerzos cortantes. Se activan mediante el movimiento, aunque éste sea bajo, lo que favorece un funcionamiento óptimo frente a cargas de viento y además por ello no necesitan ninguna fuente externa para entrar en funcionamiento.

El amortiguador viscoelástico más conocido es el dissipador de riostras diagonales VE:

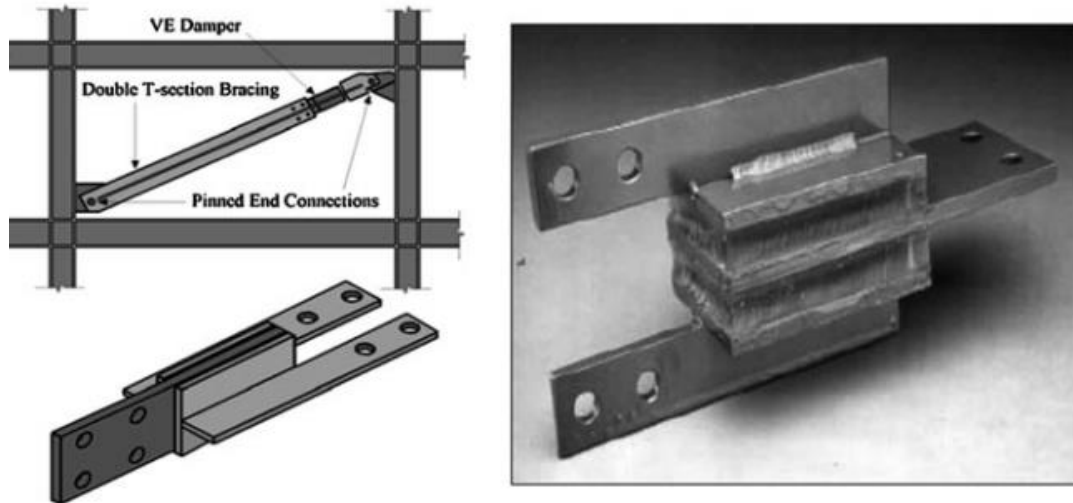


Figura 70: Amortiguador VE de riostras diagonales.
Fuente: Castaldo, 2014.

Como podemos ver en la figura este compuesto por varias capas sólidas de material VE, unidas con placas de acero. Al vibrar o al intentar desplazarse la estructura debido a cargas dinámicas, se produce una deformación en el sistema que genera un movimiento relativo entre las bridas de acero exteriores y la placa central con las capas VE, lo que genera unos esfuerzos cortantes que disipan energía.

El comportamiento dinámico de estos materiales no solo depende de la frecuencia del movimiento sino también de factores como la temperatura ambiente, su propia temperatura interna y e incluso al esfuerzo cortante al que es sometido. Así, algunos estudios experimentan con amortiguadores VE con diversos tamaños con el mismo material elástico o con amortiguadores de diversos materiales para ver comprobar comportamiento frente a estos factores, como el realizado por Chang (Castaldo, 2014). Los resultados exponen que estos amortiguadores aumentan su eficacia frente a elevadas frecuencias y son vulnerables al incremento de la temperatura, conforme ésta aumenta, la rigidez y la amortiguación se reducen, aunque a temperatura ambiente en su ciclo de histéresis se puede ver una eficaz disipación de la energía, dos desventajas. También se observa que la tensión de un material elástico está linealmente relacionada con la deformación y la velocidad del esfuerzo en un movimiento armónico, así se produzca una deformación o un ligero incremento en la velocidad, se producirá un incremento en la tensión del material.

El material VE tiene una alta capacidad de deformación, incluso a niveles microscópicos, según la velocidad de deformación y se ha llegado a usar en más de 250 edificios (Lago, Trabucco, Wood, 2019), sin embargo, también existe otro material, el caucho de alta resistencia, que se puede incluir en este apartado. Este tipo de caucho tiene una fuerza de restauración elastoplástica la cual es distinta según el nivel de deformación, una gran ventaja a tener en cuenta.

Ambos tienen la capacidad de disipar energía en proporción a su ciclo de histéresis, sea cual sea la carga sísmica. Es por ello que se consideran fiables y adecuados para su uso frente incluso a deformaciones pequeñas. Se busca además que presenten una durabilidad buena al envejecimiento y a la fatiga.

Entre sus ventajas por lo tanto podemos destacar:

- Pueden tener fuerzas de restauración, según el material usado.
- Poseen un comportamiento lineal, lo que los hace más sencillos a la hora del cálculo.
- Son capaces de amortiguar pequeñas deformaciones.

Entre sus desventajas:

- Tienen propiedades que dependen de la variación de la frecuencia y de la temperatura.

Amortiguadores viscosos:

En un inicio al igual que los amortiguadores viscoelásticos estos sistemas se usaban para maquinaria, industria aeroespacial u otras aplicaciones con el objetivo de reducir las vibraciones y disipar energía. Posteriormente su funcionamiento los hizo atractivos para absorber y disipar la energía producida por cargas dinámicas sobre una estructura. La diferencia entre ambos es que estos sistemas dependen únicamente de la velocidad mientras que los anteriores dependían de la velocidad y de la deformación.

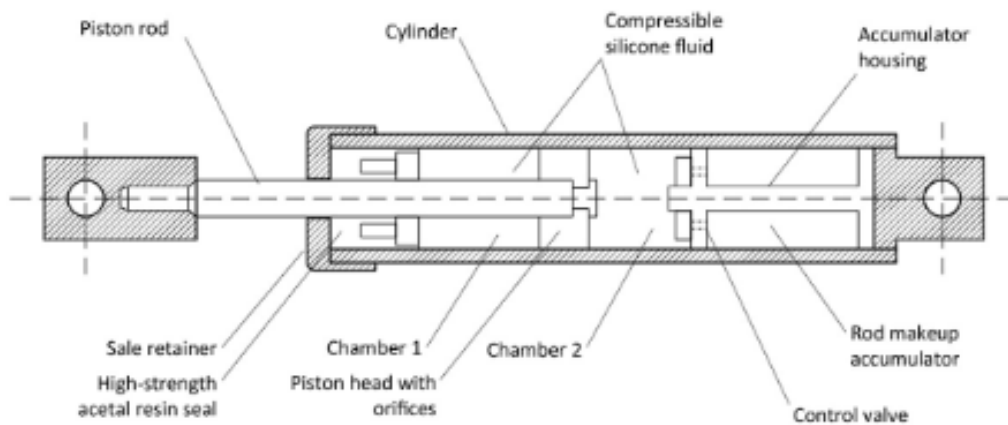


Figura 71: esquema de un amortiguador de fluido viscoso.
Fuente: Lago, Trabucco, Wood, 2019.

Son dispositivos que disipan la energía mediante la resistencia que ofrecen cuando entran en movimiento. No añaden rigidez a la estructura y no soportan cargas estáticas (Lago, Trabucco, Wood, 2019). Para entenderlo mejor, haremos una breve descripción del dispositivo. Un amortiguador de fluido viscoso, consiste en un pistón dentro de un cilindro relleno de un material viscoso, un compuesto de silicona o similar. El pistón posee unos pequeños orificios a través de los cuales pasa el fluido cuando se mueve de un lado a otro. Conforme se produce un movimiento axial en el sistema, el fluido es obligado a pasar por los orificios o por los laterales del pistón, produciéndose una diferencia de presión entre ambos lados del pistón, lo que genera fuerzas que se oponen al movimiento del amortiguador. El fluido se mueve a una velocidad elevada, lo que genera fricción entre las partículas y el pistón, disipándose así energía en forma de calor.

Se ha implementado su uso para disipar vibraciones debidas al viento en edificios con el Rich Stadium, Nueva York o en las torres gemelas Petronas, en Kuala Lumpur.

5.3.5.3. Colocación de una masa adicional:

El objetivo es introducir una masa que tenga la misma frecuencia natural de vibración que la del edificio, de modo que cuando se producen vibraciones ya bien sea por sismo o por viento, que en el caso de edificios muy altos hacen que en la zona alta se produzca un mayor balanceo por la esbeltez de este tipo de edificios, el edificio que tiende a balancearse mantiene su posición debido a que esta masa de toneladas de peso absorbe la energía, moviéndose al lado contrario del edificio. En este caso podemos distinguir principalmente:

Amortiguador de masa sintonizada, TMD o *tuned mass damper*:

Tras su invención en 1909 por Hermann Frahm, los amortiguadores de vibración sintonizado fueron objeto de investigación en numerosos campos de la ingeniería debido a su sencillo sistema basado en una masa, un muelle y un amortiguador, que permitía reducir y controlar notablemente las vibraciones sobre el sistema primario al que estuviese vinculado. No solo se encarga de absorber parte de la energía sísmica, sino que además también puede usarse para reducir los efectos torsionales que se puedan ocasionar en edificios asimétricos. Este sistema ha permitido mitigar el movimiento dinámico de puentes, edificios y muchos otros sistemas mecánicos, con un coste reducido, algo muy importante sobre todo en grandes construcciones que poseen un elevado presupuesto. Pueden instalarse tanto en estructuras existentes con problemas de vibración excesivas, como en estructuras nuevas (Aravena, 2009). Físicamente comenzaron a construirse en 1970. Los primeros edificios en los que se incorporaron fueron la Torre Park en Chicago, y en el segundo edificio más alto el Taipei 101, con una masa de 660 toneladas métricas de acero.

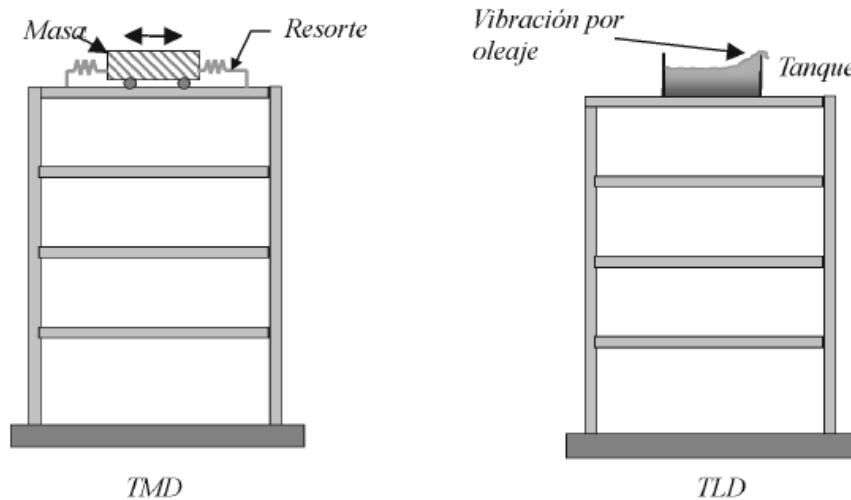


Figura 72: esquema de un amortiguador de masa sintonizada, TMD y de un amortiguador de líquido sintonizado, TLD.

Fuente: Oviedo, Dque, 2006.

Actualmente los amortiguadores de masa sintonizados, AMS, o también conocidos con el nombre de "absorbentes dinámicos de vibración" (tuned vibration absorbers, TVA), es un sistema compuesto por una masa, un muelle y un amortiguador, este sistema se adhiere a la estructura de modo que modifica la respuesta dinámica de la estructura si se somete a vibraciones, ya bien sea por sismo o viento.

El amortiguador se sintoniza a una frecuencia particular de la estructura de modo que cuando esta frecuencia es excitada, el amortiguador resonará fuera de fase con el movimiento estructural. La energía se disipa por la fuerza de inercia del amortiguador actuando sobre la estructura (Jerome J. Connor, 2003).

Los amortiguadores dinámicos de vibración o también conocidos como amortiguadores de masa sintonizada, o TVA amortiguadores de vibración sintonizados. Los sismos que son vibraciones rápidas, pueden provocar una excitación en la estructura de frecuencia baja que da lugar a movimientos largos lo que pueden ocasionar daños muy graves. Los TVA o más conocidos como amortiguadores de masa sintonizada, TMD, se sintonizan para que tengan una frecuencia similar o igual a estas bajas frecuencias e incluso pueden incrementar la amortiguación general de la estructura.



Figura 73: esquema de un amortiguador de masa sintonizada apoyado, TMD, de la marca nüyün_tek.
Fuente: <http://www.nuyuntek.cl/producto/amortiguador-de-masa-sintonizada-ams/>

El objetivo a la hora de introducir la masa es reducir el movimiento de la estructura durante la vibración, el edificio no debe entrar en resonancia con el sismo. Como sabemos también, en un edificio hay muchos elementos, que debido a su construcción o por su materialidad, poseen una frecuencia natural propia. Éstos pueden entrar en algún momento en resonancia con la frecuencia natural de la estructura provocando el fenómeno de la resonancia, que supone una amplificación de la respuesta, un hecho que puede provocar daños muy graves en dichos elementos. Si además la frecuencia del sismo entra en resonancia con la del edificio los daños son incontables. Es por ello que el amortiguador se ajusta para tener la frecuencia natural del sistema, de modo que cuando ocurre un sismo, el amortiguador al poseer dicha frecuencia tiende a absorber la energía, dirigiéndose al lado contrario al movimiento de la estructura, contrarrestando estos esfuerzos.

Además, es el edificio el que tiende a permanecer estático y es el amortiguador el que, mediante su movimiento, va disipando la energía del sismo. Los sismos tienen un rango de frecuencia de los 0.5–2 Hz (J.A. Peralta, P.R. López, A.G. Muñoz, 2009), son frecuencias bajas, los edificios que poseen una gran masa tienden a tener también frecuencias bajas, de modo que no es difícil que el edificio entre en resonancia con el sismo, si éste es de larga duración, lo que hace como hemos comentado que la amplitud del edificio tienda a ser cada vez mayor hasta la ruptura de edificio.

Den Hartog, demostró que, para sistemas de un grado de libertad, si el dispositivo poseía la misma frecuencia que el sistema primario al que estaba acoplado, en este caso la estructura, al producirse una vibración el sistema primario, éste permanecía con una amplitud de vibración nula dado que la energía era absorbida por el amortiguador.

Los parámetros de diseño del AMS, que se deben controlar para conseguir un trabajo óptimo del dispositivo son la relación entre la frecuencia del dispositivo y del edificio, la relación entre la

masa del dispositivo y la del edificio, así como la relación entre los distintos parámetros del propio amortiguador, variando la constante del muelle, o la masa, o la longitud del colgante del péndulo, etc.

- Los AMS solo se pueden sintonizar a una única frecuencia.
- Se suelen disponer en el último piso y acoplados a la estructura.
- Fácil mantenimiento, suele estar en un lugar visible.
- Coste reducido.
- Pueden instalarse tanto en estructuras existentes como en estructuras nuevas.

Amortiguador de masa sintonizada de tipo pendular:

Es una variación de los amortiguadores de masa sintonizada, pero en este caso se trata de una masa que cuelga de unos tensores y suele estar sujeta a una serie de amortiguadores hidráulicos, que evitan el excesivo movimiento de la masa y a su vez controlan su frecuencia y su dirección, devolviéndola a su posición inicial una vez han concluido las vibraciones.

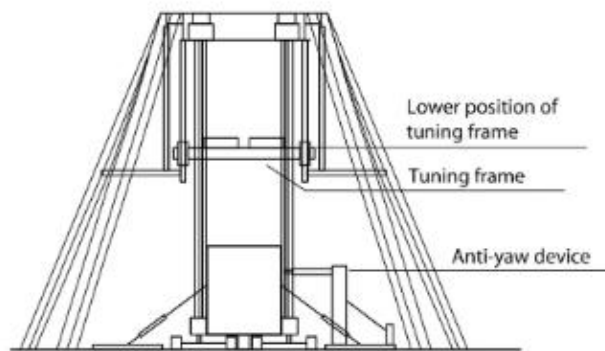


Figura 74: esquema de un amortiguador de masa sintonizado tipo péndulo.
Fuente: Lago, Trabucco, Wood, 2019.

Si imaginamos un péndulo y una fuerza externa genera un movimiento sobre él, éste adquiere un movimiento oscilatorio y de trayectoria circular, que es proporcional a su masa. La energía potencial gravitatoria se convierte en energía cinética cuando este comienza a moverse, contrarrestando los esfuerzos dinámicos que actúan sobre una estructura en caso de un sismo. Además, como hemos visto anteriormente una de las consideraciones generales de diseño sobre edificios sismorresistentes es tener en cuenta la influencia de la carga muerta pues la fuerza lateral que se genera en el edificio es directamente proporcional a dicha carga muerta.

Para conocer qué parámetros se tienen en cuenta de estos amortiguadores pasaremos a fijarnos en sus cálculos. Para que estos se simplifiquen se suele considerar un sistema sencillo con un grado de libertad, con la constante del resorte y su frecuencia natural, la que depende de la longitud del colgador.

$$K_d = \frac{m_d g}{l}; \quad f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l_d}}; \quad l_d = \frac{g}{4\pi^2 f_d^2}$$

Figura 76: Cálculos de un sistema de un grado de libertad
Fuente:

Siendo:

- K_d : la constante del resorte
- f_d : frecuencia del muelle
- l_d : longitud del péndulo
- g : aceleración debido a la gravedad

Se puede o bien calcular la longitud del péndulo, y posteriormente obtener la constante del resorte K_d o si tenemos ya disponemos de una longitud determinada por así establecerlo la empresa que lo vende, podemos obtener directamente la constante del sistema de amortiguación. Si hiciera falta la ayuda de otro sistema tendríamos que usar amortiguadores hidráulicos o de tipo friccional y su máximo periodo de oscilación.

Por lo tanto, podemos ver que este tipo de amortiguador depende de la longitud del colgador y de la masa del propio péndulo, una combinación entre ambas nos puede dar la frecuencia del dispositivo que más nos convenga para absorber las oscilaciones del edificio ante un sismo.

Un ejemplo de este tipo de amortiguador lo encontramos en el famoso caso del edificio Taipei 101, de 508 metros de altura, 92 pisos en total. Este edificio que posee una gran esbeltez y tiene que someterse a fuertes tifones que pueden llegar a alcanzar rachas de 200 km/h provocando grandes vibraciones en la zona más alta. La solución ha radicado en la necesidad de disponer de una esfera con una masa de 680 toneladas, con un diámetro de 5.5 metros, compuesta por 41 capas de 12.5 cm de ancho de acero. Esta esfera está colgando en el piso 92, de unos tensores, y sujeta en su parte inferior por unos suspensores hidráulicos, que evitan un balanceo incontrolado. De modo que al intentar el edificio balancearse hacia un lado, la masa lo hace al lado contrario estabilizándolo.

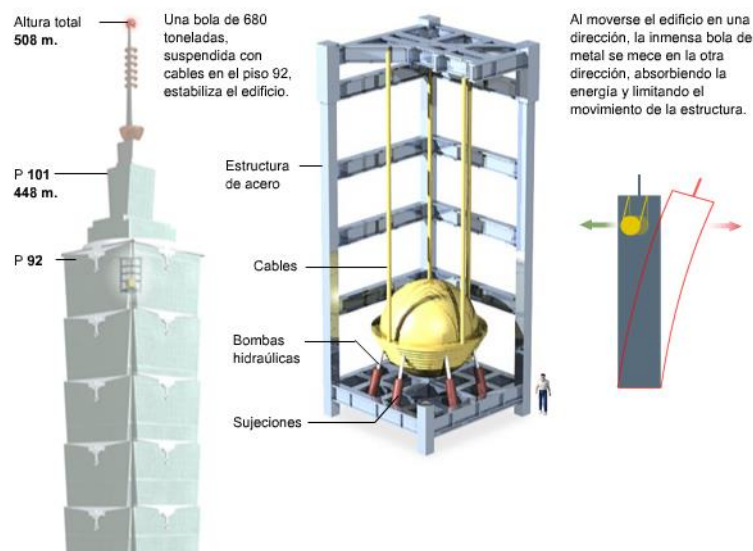


Figura 77: Amortiguador de masa sintonizado tipo péndulo.

Fuente: <http://www.blogodisea.com/taipei-101.html>

Otro ejemplo: el amortiguador de masa sintonizada usada en el edificio corporativo de la Cámara Chilena de la Construcción. Esfera de acero de 150 toneladas, 3,5 metros de diámetro sostenida por 12 cadenas en el piso 22 del edificio. Su función consiste en que ante un sismo contrarreste el movimiento del edificio. Conectado a dos amortiguadores viscosos de grandes dimensiones limitan su rango de movimiento y que transmiten las ondas del péndulo a la estructura de modo que disminuye el efecto del sismo en un 30 por cien. La esfera de 335 láminas de distintos diámetros y espesores cada una.



Figura 78: Amortiguador de masa sintonizado tipo péndulo.

Fuente: <https://www.diariodelaconstruccion.cl/la-cdt-ya-se-encuentra-instalada-en-sus-nuevas-oficinas/>

Amortiguador de líquido sintonizado, TLD, *tuned liquid damper*:

Los ALS son un sistema de amortiguación muy similar a los amortiguadores de masa, consistiendo en un tanque u otros depósitos que contienen un líquido, generalmente agua, en su interior y mediante el oleaje que se produce por las vibraciones externas genera una serie de frecuencias que disipan parte de la energía a la que se somete el edificio, reduciendo así su respuesta sísmica. El movimiento oscilante del líquido, se crea una fricción entre el líquido y las paredes del tanque, lo que disipa la energía. Se pueden introducir piezas cilíndricas de polietileno que al flotar en el líquido y mediante su choque entre unas y otras y el choque que puedan generar éstas contra las paredes, disipan la energía. Una variante de este tipo son los amortiguadores de columna de líquido sintonizados, *tuned liquid column damper*, los cuales disipan la energía al pasar el líquido de un lado del cilindro al otro atravesando unos orificios pequeños.

Al igual que en los AMS, estos se ajustan lo más cerca posible de la frecuencia natural del edificio, estableciendo uno o varios tanques y una altura determinada del líquido dependiendo de las características del edificio. Los ALS se suelen utilizar para reducir las vibraciones causadas por el viento en edificios altos.

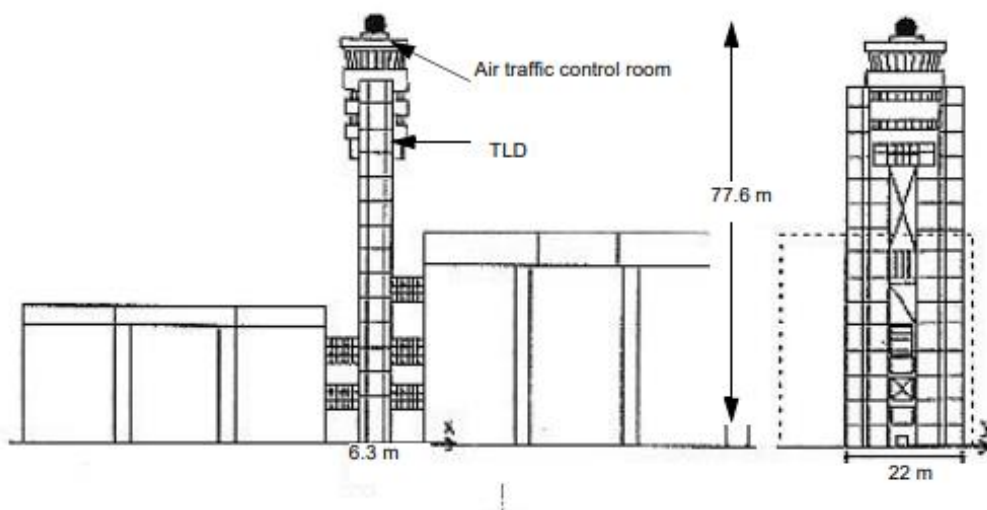


Figura 79: Amortiguador de líquido sintonizado, TLD, en la torre del aeropuerto Internacional de Tokio.

Fuente: Karee, Kijewski, Tamura, 1999.

Ventajas y características:

- Su coste al igual que los AMS es reducido
- No requieren mecanismo de activación
- Su mantenimiento es bajo
- Se sitúan normalmente en el último piso
- Fricción entre el líquido y las paredes
- Para que sea efectivo se deben usar grandes masas

Amortiguador de impacto, cadenas colgantes:

Consiste en una cadena que cuelga de la estructura. Cuando ésta comienza a vibrar, la cuerda que tiene el extremo inferior libre comienza a moverse, incrementando su amplitud. Si la vibración es muy grande el extremo puede incluso chocar contra la estructura. Podemos incrementar el número de choques colocando la cuerda dentro de un cilindro, según el diámetro de dicho cilindro se producirán más o menos choques. Los mecanismos de disipación de energía son dos: la pérdida de energía debida al impacto inelástico de las cadenas contra las paredes del cilindro y la fricción interna entre los eslabones de las cadenas de goma (Montanaro, 2001).

Actualmente no existen dispositivos con este tipo de sistema, en la teoría si lo pensamos la energía dinámica creada por el sismo se reparte entre el movimiento de la estructura y el movimiento de la cuerda, la cual para tener un gran impacto en la reducción de la respuesta sísmica del edificio y contrarrestar los esfuerzos, debería tener una masa notable, y una rigidez de gran magnitud y quizá incluso la longitud de la cuerda fuera necesario tenerla en cuenta.

6. Conclusiones:

A lo largo de este trabajo hemos podido ver que el control de la respuesta sísmica de una estructura se puede llevar a cabo mediante técnicas convencionales o técnicas avanzadas. Ambas han sido muy estudiadas a lo largo de estos últimos años y sobre todo las segundas han despertado un gran interés.

Las técnicas convencionales se refieren a la construcción tradicional, pero se han ido mejorando y añadiendo diversas estrategias, que recomiendan seguir ciertos conceptos básicos e incluso tener en cuenta ciertos sistemas estructurales que se consideran geoméricamente apropiados para resistir cargas dinámicas. Estas mejoras se centran en conseguir un equilibrio entre la rigidez y la ductilidad de la estructura. Se busca que el edificio sometido a cargas sísmicas, resista rígidamente hasta que sea superado su límite elástico si el sismo es muy severo y en ese momento, entre en juego su ductilidad, para evitar en la medida de lo posible llegar al colapso mediante las deformaciones inelásticas de la propia estructura. Se trata de un equilibrio porque si aumentamos demasiado la ductilidad podríamos no cumplir con requisitos mínimos sobre deformaciones establecidos en las normativas.

La desventaja es que estos sistemas no nos garantizan evitar el colapso de la estructura, sino que se estudian y calculan para alargar el tiempo de reacción con el objetivo de salvar vidas humanas si el sismo es muy severo. Se prevé que la estructura sufra daños, de modo que tras un sismo los gastos no se evitan. En países desarrollados esto supone un costo económico, pero, en países no desarrollados suponen más miseria.

El otro tipo de técnicas, son las técnicas avanzadas, donde podemos distinguir cuatro tipos de sistemas, los activos, los pasivos, los híbridos y los semiactivos. Tras un breve estudio de algunos de los dispositivos clasificados en estos sistemas, podemos nombrar cuales son las principales ventajas y desventajas de cada tipo.

Si pensamos en los sistemas pasivos, son los más usados por su reducido coste de implementación, pero, una vez diseñados para ajustarse a una frecuencia determinada, que suele ser la frecuencia natural del edificio, no pueden modificarse. Tras números sismos, la frecuencia a la que estaban diseñados puede variar de modo que poco a poco reducen su efectividad. Esto se puede solucionar con la disposición de más sistemas pasivos en el mismo edificio que se encarguen de disipar distintos modos de vibración, pero esto supone un aumento del coste de implementación y un aumento de espacio usado. No requieren de un elevado mantenimiento a diferencia del resto de dispositivos.

El resto de sistemas son más eficientes que los sistemas pasivos, pero como veremos a continuación algunos de ellos poseen grandes desventajas. Los sistemas activos, son dispositivos amortiguadores que poseen sensores, actuadores y un sistema computacional, de modo que son capaces de adaptar la respuesta de la estructura a las condiciones de carga externas, en tiempo real. El único inconveniente, pero muy importante que reducen su uso, es que necesitan una carga externa de energía para activarse y además elevada. Durante un sismo puede haber cortes de electricidad dejando inservible el sistema. Poseen un buen rendimiento, pero tienen un coste elevado de implementación.

Los sistemas híbridos y semiactivos suponen una variante frente a los sistemas activos. Ambos son una combinación entre sistemas pasivos y activos, pero al combinarse mejoran las limitaciones y restricciones de ambos sistemas, complementándose. Alcanzan rendimientos muy similares a los activos, y, además solucionan las desventajas de estos. Al ser un sistema combinado, los sistemas pasivos hacen que no se necesite tanta energía para el funcionamiento de la parte activa. De hecho, en un principio se comportan como sistemas pasivos y si la intensidad del sismo es muy elevada, la parte activa entra en funcionamiento. También requieren de una fuente externa, pero

si se produce un corte de electricidad no dejan desprotegido el edificio, comportándose como sistemas pasivos. La diferencia entre ambos es que los sistemas híbridos aplican una fuerza sobre la estructura para modificar su respuesta, lo que puede desestabilizarla mientras que los sistemas semiactivos lo que hacen es modificar las propiedades del propio dispositivo.

Podríamos decir que los sistemas mas apropiados son estos dos últimos, sin embargo, su coste es algo más elevado que los sistemas pasivos. Pero no solo debemos mirar el coste de implementación, sino que debemos fijarnos en el coste total, es decir, coste de la estructura con sistema amortiguador, costes de mantenimiento y posibles costes tras un sismo, para determinar cual nos conviene más.

Escojamos el que escojamos, será mejor que construir solo con técnicas convencionales. Estos se han probado en estructuras reales y han demostrados reducir la respuesta sísmica de forma efectiva en la mayoría de los casos. No solo supone salvar vidas, sino que supone reducir los daños en una estructura.

7. Referencias bibliográficas

- I.G.Gass, Peter J. Smith, R.C.L. Wilson, 1980, Introducción a las Ciencias de la Tierra, Barcelona, España, EDITORIAL REVERTÉ, S.A.
- L. M. Bozzo, A. H. Barbat, 2000, Diseño sismorresistentes de edificios, técnicas convencionales y avanzadas, España, EDITORIAL REVERTÉ, S.A.
- Instituto mexicano del cemento y del concreto, A.C., 1991, diseño de estructuras resistentes a sismos, México D.F., EDITORIAL LIMUSA, S.A.
- J. Ambrose, D. Vergun, 1999, Diseño simplificado de edificios para cargas de viento y sismo, México D.F., EDITORIAL LIMUSA, S.A.
- E. Bazán, R. Meli, 2010, Diseño sísmico de edificios, México D.F., EDITORIAL LIMUSA, S.A.
- E. de la Fuente Tremps, 2015, Fundamentos de dinámica estructural, Madrid, España, IBERGARCETA PUBLICACIONES, S.L.
- J. A. Oviedo, M. del Pilar Duque, 2006, Sistema de control de respuesta sísmica en edificaciones, *Revista EIA*, 6, 105-120.
- C. Genatios, M. Lafuente, 2016, Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras, CAF- Banco de Desarrollo de América Latina.
- J. Jia, 2017, Modern Earthquake Engineering, Offshore and Land-based Structures, Berlín, Alemania, Springer.
- Ricciardelli, F., Pizzimenti A.D., y Massimiliano M., 2003, Passive and active mass damper control of the response of tall buildings to wind gustiness. *Engineering Structures*, 25 (9), 1199-1209.
- A.A. Markou, G. Oliveto y A. Athanasiou, 2016, Response simulation of hybrid base isolation system under earthquake excitation, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 84, 120-133.
- M. Forni, R. Antonucci, A. Arcadi, A. Occhiuzzi, 2004, A hybrid seismic isolation system made of rubber bearings and semi-active magneto-rheological dampers, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, 2177.
- R. W. K. Chan, Y-S. Lin, H. Tagawa, 2019, A smart mechatronic base isolation system using earthquake early warning, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 119, 299-307.
- G. Senatore, P. Duffour, P. Winslow y C. Wise, 2017, Shape control and whole-life energy assessment of an 'infinitely stiff' prototype adaptative structure, *IOPscience*, 27.
- A. Nishitani, Y. Nitta, Y. Ishibashi y A. Itoh, 1999, Semi-active structural control with variable friction dampers, 2, *Conference: American control conference*, 1999.
- C. Pastia, S. G. Luca, F. Chira, V. O. Roşca, 2005, Structural control systems implemented in civil engineering, *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Constructions. Architecture*, Section LI, 1-2.
- S. Luca, C. Pastia, F. Chira, 2007, Recent Applications of Some Active Control Systems to Civil Engineering Structures, *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Constructions. Architecture*.
- M. Braga dos Santos, H. T. Coelho, F. P. L. Neto y J. Mahfoud, 2017, Assessment of semi-active friction dampers, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 94, 33-56.
- L. Y. Lu, T.K. Lin, R. J. Jheng, H. H. Wu, 2017, Theoretical and experimental investigation of position-controlled semi-active friction damper for seismic structures, *Journal of Sound and Vibration*, 412, 184-206.
- S. Pourzeynali, P. Joeei, 2013, Semi-active Control of Building Structures using Variable Stiffness Device and Fuzzy Logic, *IJE TRANSACTIONS A: Basics*, 26(10), 1169-1182.

- M. Mirtaheri, A. P. Zandi, S. S. Samadi, H. R. Samani, 2011, Numerical and experimental study of hysteretic behavior of cylindrical friction dampers, *Engineering Structures*, 33, 3647-3656.
- N. Surendran, A. Varma, 2017, Buckling Restrained Braces (BRB)- A Review, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 04(3), 2320-2324.
- H. Ma, C. Cho, 2007, Feasibility study on a superelastic SMA damper with re-centring capability, *Materials Science and Engineering: A*, 473(1-2), 290-296.
- T. T. Soong, B. F. Spencer, 2002, Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice, *Engineering Structures*, 24(3), 243-259.
- B. F. Spencer, S. Nagarajaiah, 2003, State of the art of structural control, *Journal of structural engineering*, 129(7), 845-856.
- Revista BiT, Protección sísmica. Aprendizaje en movimiento, Corporación de Desarrollo Tecnológico, número 105, noviembre-diciembre 2015.
- B. F. Spencer, 2002, Smart Damping Technologies for Dynamic Hazard Mitigation.
- A. Kareem, T. Kijewski, Yukio Tamura, 1999, Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications, *Wind and Structures An International Journal*, 2(3).
- A. Javanmardi, Z. Ibrahim, K. Ghaedi, H. B. Ghadim, M. U. Hanif, 2019, State-of-the-Art Review of Metallic Dampers: Testing, Development and Implementation, *Archives of Computational Methods in Engineering*.
- P. Castaldo, 2014, Passive Energy Dissipation Devices, *Intedrated Seismic Design of Structure and Control Systems*, 21-42.
- N- Shedbale, P. V. Muley, 2017, Review on Viscoelastic Materials used in Viscoelastic Dampers, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(7), 3375-3381.
- A. Kareem, T. Kijewski, Y. Tamura, 1999, Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples, *Wind and Structures An International Journal*, 2(3).
- B. F. Spencer, M. K. Sain, 1997, Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback, 17(6), 19-35.
- A. Lago, D. Trabucco, A. Wood, 2019, Chapter 4- An introduction to dynamic modification devices, *Damping technologies for Tall Buildings*, 107-234.

Videos de referencia:

- <https://vimeo.com/gennarosenatore>