

Capítulo 2

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

El control estructural ante acciones sísmicas se está planteando como una alternativa al diseño sismorresistente convencional, basado en la ductilidad y el hiperestatismo estructural. Los sistemas sismorresistentes avanzados tienen por objetivo el control de los desplazamientos de una estructura haciendo uso de alguno (o varios) de los siguientes recursos: i) la modificación de las propiedades dinámicas del edificio, de forma que éste reduzca su 'input' energético o evite actitudes resonantes; ii) la disipación de energía introducida al sistema a partir de dispositivos mecánicos; iii) el control con dispositivos que ejerzan fuerzas que contrarresten la acción sísmica.

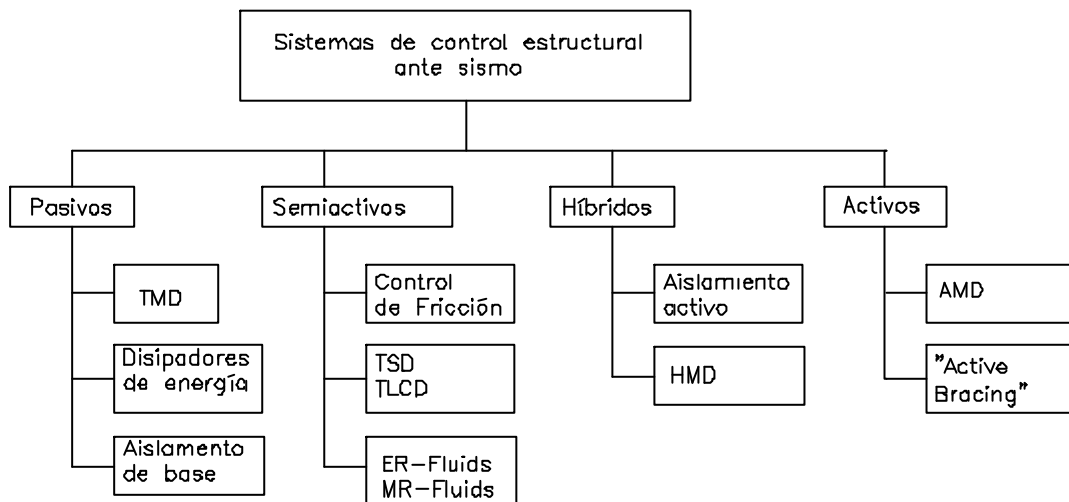


Figura 2.1 Sistemas de control estructural ante acción sísmica

Una primera clasificación permite hablar de sistemas de control pasivo, sistemas de control activo, sistemas de control semiactivo y sistemas de control híbrido, tal como se indica en la figura 2.1. Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica y, a diferencia del

resto de sistemas, no precisan de aporte energético para su funcionamiento. Los sistemas activos, semiactivos e híbridos están formados por actuadores de fuerza y/o elementos pasivos, controladores a tiempo real y dispositivos sensores instalados en la estructura. Estos elementos trabajan conjuntamente a través de un algoritmo de control de la respuesta estructural en bucle cerrado.

Los sistemas pasivos se clasifican en sistemas de aislamiento de base, de disipación de energía y en osciladores resonantes (Jara, 1994). Los aisladores de base, situados sobre la cimentación y soportando el edificio, desacoplan parcialmente el edificio del movimiento del terreno, disminuyendo el "input" energético transmitido a la superestructura y consecuentemente su respuesta estructural. Los disipadores de energía no alteran el "input" energético, que depende básicamente del período fundamental y de la masa del edificio, manifestando su eficiencia maximizando la energía disipada y disminuyendo la respuesta estructural. Los sistemas inerciales acoplados o "tuned mass dampers" (TMD) introducen masas adicionales, normalmente situadas en la parte alta de los edificios, cuya excitación absorbe parte de la energía cinética introducida por el terremoto. Las propiedades más valiosas de los sistemas pasivos son su robustez (no dependen de fuentes de energía y son mecánicamente simples) y el coste competitivo de los edificios que los utilizan en comparación con los construidos de forma convencional. Existen en la actualidad unos centenares de edificios construidos en el mundo con estos sistemas, algunos sometidos a terremotos severos como el de Kobe.

Los sistemas activos contrarrestan los efectos del sismo directamente mediante actuadores situados en el seno estructural. La gran demanda de energía que comporta su actuación ante un sismo severo y la complejidad de los algoritmos de control los convierte en sistemas poco robustos. Ante la necesidad de una respuesta efectiva ante excitaciones dinámicas comprendidas en una banda amplia de frecuencias y de un menor consumo energético, se desarrollan los sistemas híbridos y semiactivos. Los sistemas híbridos son muy similares a los sistemas activos, sin embargo en ellos intervienen elementos pasivos que permiten reducir el consumo energético del sistema ante un evento sísmico. Los sistemas semiactivos emplean dispositivos de control pasivo, sin consumo energético, cuyas características resistivas permiten ser modificadas y controladas a tiempo real mediante actuadores de bajo consumo (por ejemplo, válvulas de caudal variable) a través de sistemas y algoritmos de control parecidos a los empleados en los sistemas activos e híbridos.

2.2 SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL ANTE ACCIONES SÍSMICAS

2.2.1 Sistemas de control pasivo

Los dispositivos pasivos son elementos de carácter reactivo cuya respuesta no es controlable y depende únicamente de las condiciones de trabajo (o de contorno) en que se encuentren. Son sistemas que intervienen alterando las propiedades dinámicas del edificio, provocando una reducción de su respuesta estructural. Entre sus ventajas

se encuentra su competitividad económica y la robustez de su comportamiento. Los sistemas de control pasivo pueden clasificarse en: i) sistemas de aislamiento de base, ii) sistemas disipativos y iii) sistemas inerciales acoplados.

Control pasivo con aislamiento de base

El aislamiento de base es una estrategia de diseño que se fundamenta en el desacoplamiento de la estructura del movimiento del suelo para proteger a ésta del efecto de los terremotos. Se consigue a partir de dispositivos flexibles al movimiento horizontal y rígidos al desplazamiento vertical, situados entre los cimientos y la superestructura. Su presencia alarga el período fundamental del conjunto, con lo cual desacopla de forma parcial la superestructura del movimiento del terreno y limita su "input" energético. Es frecuente la introducción de amortiguamiento estructural para limitar los desplazamientos de la superestructura a valores aceptables.

Si bien éstos no se pueden considerar antecesores de los sistemas modernos, existe constancia de la protección por el aislamiento de base ya desde la antigüedad. Kirikov (1992) describe varios procedimientos empleados por los sumerios, griegos, romanos y bizantinos entre otros, para proteger sus construcciones frente a los terremotos. El sistema más usual consistía en ubicar una capa fina de arena debajo de la cimentación, actuando en forma de aislamiento de base.

El aislamiento de base es más recomendable en estructuras rígidas sobre terrenos firmes. El principal inconveniente que se presenta en estructuras con una elevada relación altura - anchura son los elevados momentos de vuelco que pueden suponer la pérdida del equilibrio. Además, al incrementarse la altura las ventajas obtenidas al variar el período de vibración disminuyen.

Los primeros aisladores de base utilizados en edificios en su concepción actual fueron de neopreno, en una escuela de primaria en Skopje, Macedonia, terminada en 1969. El principal inconveniente de estos dispositivos era su elevada flexibilidad vertical, razón por la cual no se han vuelto a emplear.

Los aisladores de neopreno zunchado intercalan placas delgadas de acero en un bloque cúbico o cilíndrico de neopreno. Su rigidez vertical aumenta considerablemente, manteniendo su flexibilidad lateral. Estos aisladores se han combinado con algunos de los sistemas disipadores de energía, para tener, en conjunto, una estructura flexible con disipación en la base (Skinner et al. 1975a y b; Skinner y McVerry 1975; Kelly et al. 1977). En el año 1978 se fabricaron los primeros sistemas de neopreno reforzado de uso práctico. En el año 1991, en Japón, ya existían más de 58 edificios construidos con sistemas de neopreno reforzados de varios tipos (SMIRT11 1991).

Los dispositivos de neopreno zunchado dotan de flexibilidad al edificio pero su capacidad disipativa resulta baja. Robinson y Tucker (1977) y Robinson (1982)

realizaron pruebas con un disipador de neopreno zunchado con núcleo de plomo (su geometría puede se apreciada en la figura 2.2), logrando un aumento de la capacidad disipativa de su precursor que permite un mejor control en el desplazamiento de base.

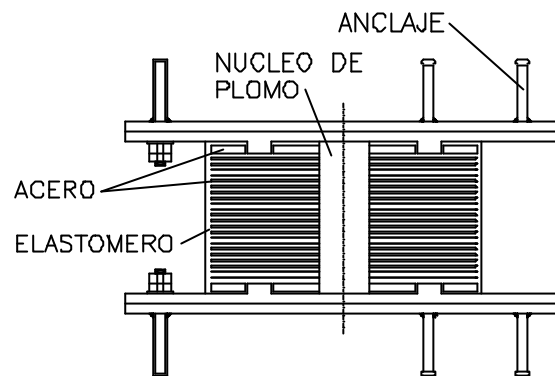


Figura 2.2 Disipadores de neopreno zunchado con núcleo de plomo

Un segundo grupo de aisladores de base corresponde a los de fricción. Éstos trabajan de forma distinta a los aisladores de neopreno, al limitar la fuerza máxima transmitida a la estructura mediante el coeficiente de fricción. Su principal ventaja es el coste y no tener prácticamente limitación en la carga vertical que puede transmitir. Un inconveniente de estos sistemas es la modelización de la fricción a lo largo del tiempo y en función de la velocidad de deslizamiento y de la presión actuante.

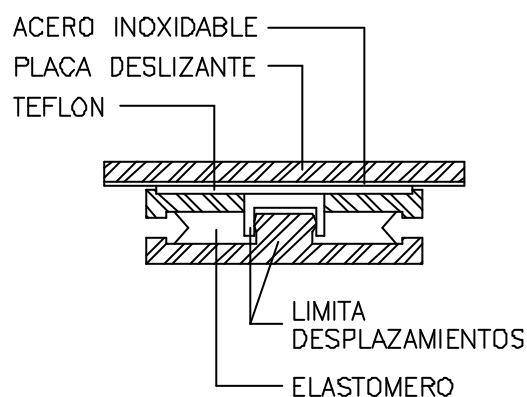


Figura 2.3 Aislador de base de fricción

En este sentido, Constantinou et al. (1987) determinaron experimentalmente la variación de la fricción en una interfase de teflón y acero. Posteriormente, Mokha

et al. (1990 a y b) realizaron estudios experimentales de aisladores con superficies de teflón, determinando que este material reduce la transferencia de frecuencias altas a la estructura. Kelly (1981) e Ikonolmou (1982) proponen el uso de placas de teflón en los aisladores de base, tal como se indica en la figura 2.3.

Zayas et al. (1987) proponen un sistema de aislamiento basado en el movimiento pendular del edificio sobre las superficies cóncavas de los aisladores de base (figura 2.4). El período del péndulo (convertido en modo de vibración fundamental de la estructura) depende solamente del radio de curvatura de la superficie deslizante del aislador. El aislador proporciona una rigidez relativa al desplazamiento lateral directamente proporcional al peso de la estructura e inversamente proporcional al radio de curvatura. Uno de los elementos de interés de este dispositivo es su capacidad en proporcionar períodos y desplazamientos largos manteniendo su capacidad portante (Zayas et al. 1998), de utilidad ante la presencia de terremotos del tipo "near-fault", caracterizados por la presencia de pulsos largos.

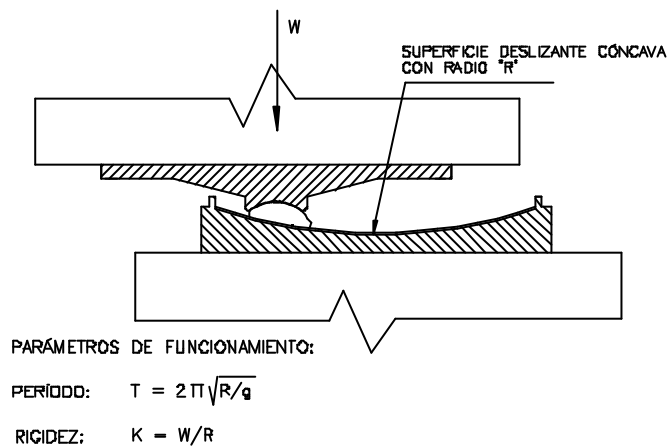


Figura 2.4 Aislador pendular

Control pasivo con disipadores de energía

Dado que la presente tesis se desarrolla en el ámbito de control con disipadores de energía, se ha creído conveniente desarrollar su estado del arte de forma más amplia en los apartados específicos posteriores 2.3 y 2.4.

Control pasivo mediante sistemas inerciales acoplados ("Tuned mass dampers")

El "Tuned mass damper" (TMD), tal como se indica en la figura 2.5, consta de los siguientes componentes: i) un oscilador de un grado de libertad, ii) un mecanismo de muelle y iii) un mecanismo de amortiguamiento. Habitualmente se

instala en la parte superior de los edificios, y la masa y la rigidez del muelle se determinan de forma que la frecuencia de oscilación sea la misma que la frecuencia fundamental de la estructura.

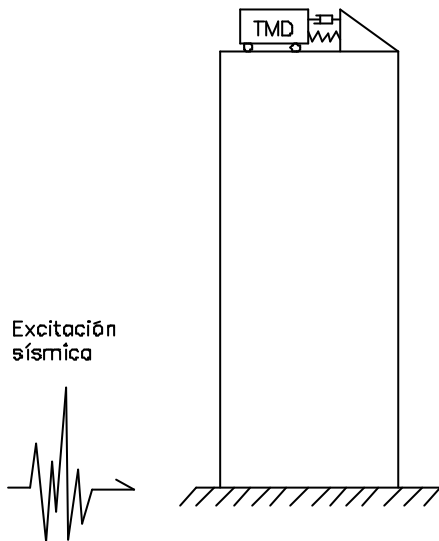


Figura 2.5 TMD en su concepción clásica

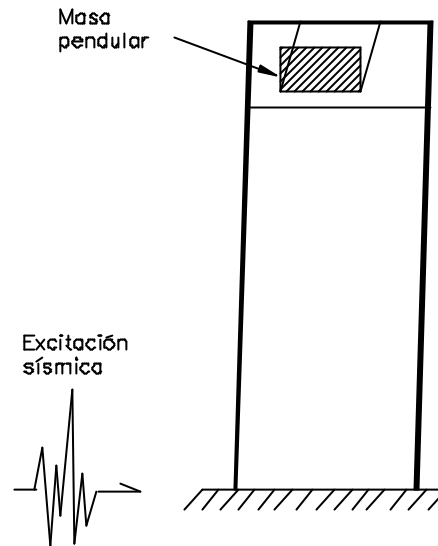


Figura 2.6 TMD basado en el empleo de tanques de agua (Nagase, 2000)

El TMD se ha demostrado efectivo para reducir la vibración del viento (McNamara, 1977; Kenny, 1984) y también para resistir fuerzas sísmicas (Kaynia et al. 1981). La mayor desventaja del TMD es que requiere una gran masa e importante disponibilidad de espacio para su instalación. Para compensar este problema, recientemente se ha propuesto el uso de cubiertas con aislamiento respecto a la estructura inferior (Villaverde, 1998) o tanques de agua (Nagase, 2000) tal como se indica en la figura 2.6, para ser usados como masas pendulares. Otro inconveniente del sistema es que su efectividad se reduce a una banda estrecha de frecuencias cercanas al período fundamental del edificio, y pueden presentarse situaciones en las que el edificio se sitúe fuera de su período fundamental: i) en un edificio esbelto se pueden manifestar con distinta intensidad modos de vibración diferentes al fundamental, en función de las características de la excitación, ii) durante terremotos severos la estructura puede llegar a comportarse plásticamente, alargando el período de la estructura y comportando una pérdida de sintonía con el TMD.

2.2.2 Sistemas de control activo

Un sistema de control estructural activo tiene la configuración básica mostrada en la figura 2.7. Consiste en: i) sensores situados en la propia estructura empleados para medir variables correspondientes a la excitación externa, o variables

de la respuesta estructural, o de ambos tipos; ii) sistemas controladores que, basándose en las medidas de los sensores y a través de un algoritmo de control, calculan la fuerza a aplicar por los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos; y iii) actuadores, habitualmente alimentados por fuentes de energía externas, para ejercer las fuerzas (Soong et al. 2000).

Cuando se miden únicamente variables correspondientes a la respuesta estructural, la configuración de control se denomina "feedback control", ya que la respuesta estructural sirve para hacer correcciones continuas de las fuerzas aplicadas. Se entiende por "feedforward control" el proceso que determina las fuerzas de control a partir de la excitación medida. Si son empleadas para el control medidas de ambos tipos, el proceso es denominado "feedback-feedforward control" (Suhardjo et al. 1990).

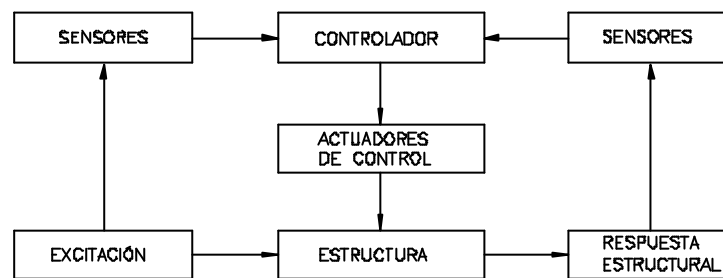


Figura 2.7 Esquema de funcionamiento de un sistema de control activo "feedback-feedforward"

Un ejemplo de control activo es el amortiguador de masa activo (AMD, "Active Mass Damper"). Una masa auxiliar, móvil, usualmente inferior al 1% de la masa total de la estructura, es instalada en una de las últimas plantas del edificio, con un actuador conectado a ella (tal como se muestra en la figura 2.8). Si el algoritmo es adecuado, la fuerza inercial que presenta la masa oscilante debe contrarrestar los efectos de la acción sísmica y reducir la respuesta estructural a valores aceptables (Spencer y Sain 1998).

En comparación con los sistemas pasivos, los sistemas activos presentan numerosas ventajas. Entre ellas: i) mayor efectividad en control de la respuesta estructural; ii) efectividad menos sensible a las condiciones locales del suelo y a las características del terremoto; iii) aplicación ante sollicitaciones diversas: un sistema activo puede ser usado tanto para control estructural ante vientos fuertes como terremotos; y iv) selección de los objetivos de control; lo cual permite enfatizar, por ejemplo, el confort humano sobre otros aspectos del movimiento estructural en momentos no críticos, e incrementar la seguridad estructural ante una acción dinámica severa (Soong et al. 2000). Sin embargo, también presenta serios

inconvenientes: i) elevado coste en mantenimiento, ii) dependencia respecto a fuentes de alimentación externas, iii) la respuesta dinámica de edificios con muchos grados de libertad y un posible comportamiento no lineal resulta imprevisible, y su control a partir de un número limitado de sensores y actuadores plantea un problema dinámico complejo.

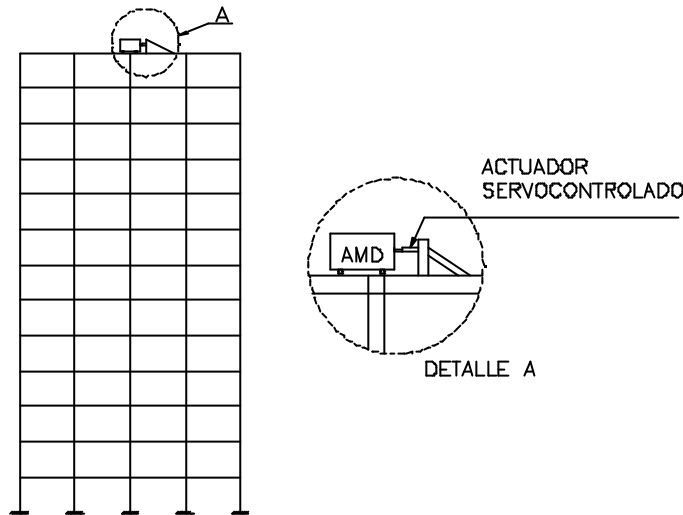


Figura 2.8 Edificio con control de desplazamientos mediante AMD

2.2.3 Sistemas de control híbrido

Los sistemas híbridos son la combinación de sistemas activos y pasivos, tal como se indica en la figura 2.9. Debido a que el control se consigue a partir de la actuación de un dispositivo pasivo, los sistemas híbridos suponen mejoras con relación a los activos: i) en caso de fallo del componente activo, y aunque de forma menos efectiva, el sistema pasivo sigue ejerciendo funciones de control y ii) los requerimientos energéticos son inferiores. Dos de los sistemas híbridos que han despertado mayor interés son el HMD ("Híbrid Mass Damper") y el aislamiento de base con control activo del desplazamiento de base.

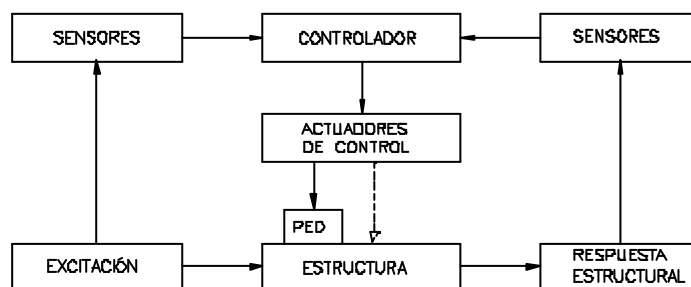


Figura 2.9 Esquema de funcionamiento de un sistema de control híbrido

El HMD dispone de una masa oscilante pasiva que por sí misma reduce la respuesta del edificio ("Tuned Mass Damper"), y de un actuador activo, el cual mejora la eficiencia del sistema y además le da mayor robustez frente a cambios dinámicos de la estructura (Spencer y Sain 1998).

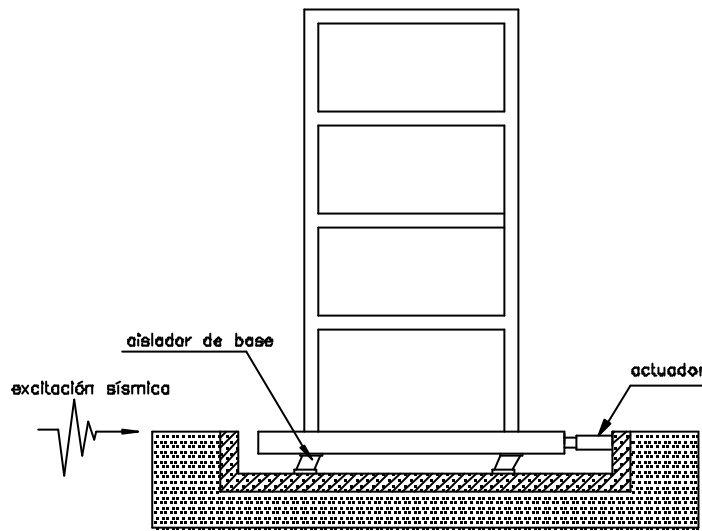


Figura 2.10 Aislamiento de base con control activo del desplazamiento

En el sistema de aislamiento de base con control activo (figura 2.10), su componente pasivo desacopla parcialmente la estructura del terreno, a costa de un desplazamiento significativo entre subestructura y superestructura. El objetivo del componente activo es el de controlar este movimiento mediante un actuador. Desde un punto de vista práctico, es importante que el control se consiga con una única fuerza, y que la demanda energética de ésta se encuentre dentro de unos límites aceptables. Sin embargo, la evaluación de dicha fuerza de control entraña una cierta dificultad relacionada tanto con el comportamiento no lineal del aislamiento con las incertidumbres asociadas a la modelización del sistema global estructura - aislamiento y de la excitación (Barbat et al. 1993; Barbat et al. 1995).

2.2.4 Sistemas de Control semiactivo.

Los sistemas semiactivos tienen un esquema de funcionamiento (figura 2.11) muy similar a los sistemas activos, diferenciándose de éstos en que el control estructural se obtiene a partir de dispositivos de carácter reactivo, cuyas características mecánicas (rigidez o amortiguamiento) son controlables, lo cual permite modificar las propiedades dinámicas de la estructura con costes energéticos muy reducidos.

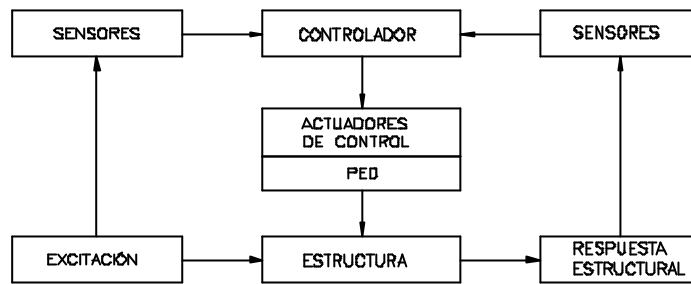


Figura 2.11 Esquema de funcionamiento de un sistema de control semiactivo

Algunas de las técnicas de control empleadas por los sistemas semiactivos son: i) la fricción variable, ii) el movimiento de masas de líquido en el interior de tanques ("Tuned Sloshing Dampers") o columnas dentro del edificio ("Tuned Liquid Column Dampers"), iii) la incorporación de dispositivos hidráulicos o oleodinámicos de rigidez o amortiguamiento variable, y iv) amortiguadores con fluidos de viscosidad controlable a partir de campos eléctricos o magnéticos.

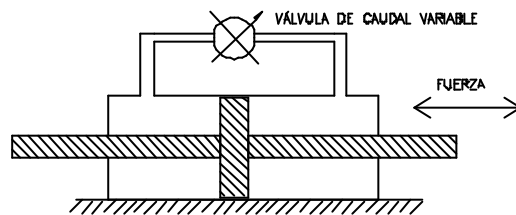


Figura 2.12 Dispositivo para control semiactivo

Dentro del tercer grupo, Koberi et al. (1993) realizan un estudio de aplicabilidad de un dispositivo hidráulico, formado por un pistón que se desplaza en el seno de un cilindro, cuyas dos cámaras pueden estar conectadas en circuito abierto o cerrado. El dispositivo, denominado VSD ("Variable Stiffness Device"), permitía introducir o liberar la actuación de un brazo rigidizador entre dos plantas. Kajima Corporation construyó un edificio prototipo en Tokio con tres plantas, equipado con este dispositivo, capaz de resistir fuertes vientos y terremotos extremos. En esta misma línea, Serino y Ruso (1997) desarrollan y construyen, con la ayuda de FIP Industriale, un dispositivo que permite modificar la rigidez entre dos plantas a través de su conexión con un "K-brace". Kurata et al. (1994, 1996) desarrollan un dispositivo de amortiguamiento variable, VHD ("Variable Hydraulic Damper"), a través de una válvula de flujo variable, la cual permite modificar la pérdida de carga entre ambas cámaras de un cilindro hidráulico, tal como se indica esquemáticamente en la figura 2.12.

Los líquidos controlables tienen la propiedad de variar sus características reológicas ante campos eléctricos ("electrorheological fluids" o fluidos ER) o ante

campos magnéticos ("magnetoreological fluids" o fluidos MR). La característica esencial de estos líquidos es su reversibilidad de fluido con viscosidad lineal a estado semisólido en milisegundos cuando están expuestos a un campo eléctrico (para fluidos ER) o a un campo magnético (para fluidos MR). En la figura (2.13) se puede observar un dispositivo basado en el comportamiento de un fluido magnetoreológico. Se trata de un pistón de doble efecto, soportado por eje con doble apoyo sobre la carcasa. El cilindro tiene la particularidad de formar parte de un circuito magnético. Entre pistón y cilindro se abre un paso entre ambas cámaras. El estado que presenta el fluido permite un desplazamiento restringido o relativamente libre, en función de que el campo magnético esté o no activado. Una posible integración del dispositivo en el seno estructural sería la que se indica en la figura 2.14 (Spencer y Sain 1998).

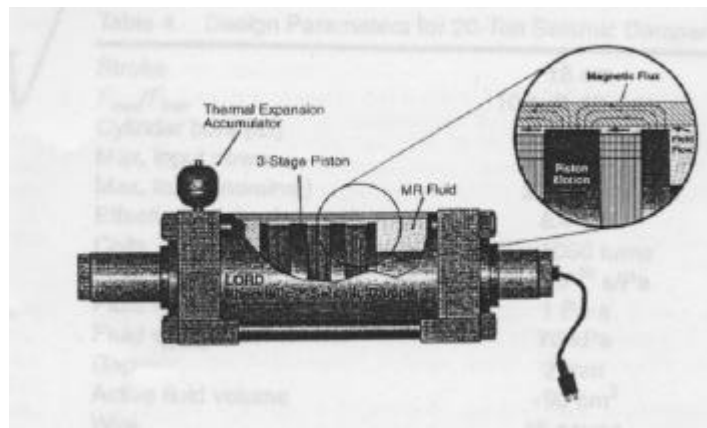


Figura 2.13 Esquema de un amortiguador MR (Spencer y Sain, 1998)

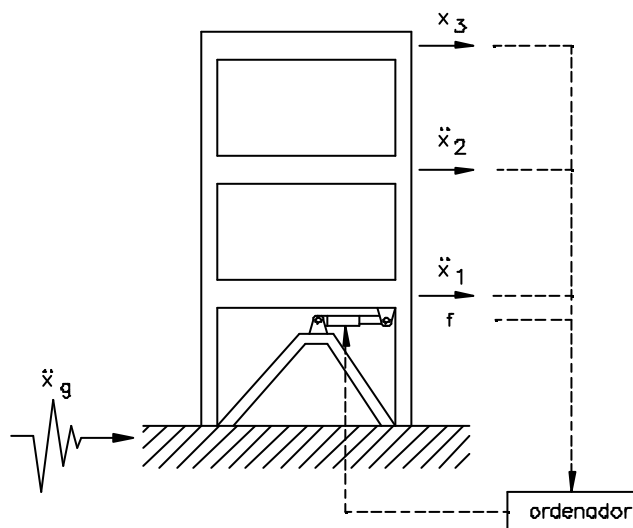


Figura 2.14 Control estructural semiactivo mediante un amortiguador MR

2.3 DISIPADORES DE ENERGÍA

Una primera clasificación distingue entre disipadores histeréticos y viscoelásticos. Los dispositivos histeréticos se basan en: i) la plastificación de metales por flexión, torsión, cortante o extrusión y ii) fricción entre superficies. Son dispositivos que dependen básicamente del desplazamiento. Los disipadores viscoelásticos pueden basarse en: i) sólidos viscoelásticos, ii) fluidos conducidos a través de orificios y iii) fluidos viscoelásticos. Su comportamiento depende fundamentalmente de la velocidad.

2.3.1 Disipadores histeréticos

2.3.1.1 Disipadores por plastificación de metales

La plastificación de metales en disipadores se puede producir a partir de esfuerzos estructurales o bien a partir del proceso de extrusión. Cualquier esfuerzo, sea de torsión, flexión, cortante o axial puede conducir a procesos de plastificación en metales. El acero ha sido sin duda el metal más empleado en disipadores. Entre sus virtudes están las posibilidades constructivas que ofrece (fácil mecanizado y soldabilidad), su bajo coste y su elevada ductilidad.

Resultados experimentales indican que el acero ensayado bajo condiciones cuasiestáticas puede llegar a manifestar valores del límite de fluencia y de tensión máxima de rotura inferiores en un 17% y 3% respectivamente a los obtenidos con velocidades de deformación del 10%/s (Wakabayashi 1986). Pese a estos resultados, la caracterización de los disipadores se ha venido realizando a partir de ensayos cuasiestáticos. Probablemente, dada la alta variabilidad de la acción sísmica, y observado el buen comportamiento de los modelos adoptados basándose en la caracterización estática, la observación de una caracterización dinámica aumenta la complejidad del problema de forma desproporcionada.

Investigaciones realizadas por Nakashima et al. (1996) concluyen que, para reducir la respuesta estructural, es preferible disipar energía a partir de rangos bajos de fuerza y desplazamiento. En esta dirección se han ensayado disipadores con aceros de bajo límite elástico y con gran capacidad de alargamiento en relación a los aceros de construcción convencionales (Nakashima 1995a) y de determinadas aleaciones de aluminio (Rai et al.1998). Estos disipadores se han basado en la plastificación por esfuerzo cortante, dando como resultado dispositivos de elevada rigidez, esfuerzos de plastificación de valores reducidos y gran uniformidad en la distribución de deformación plástica.

Disipadores por flexión

Se han desarrollado numerosos dispositivos que plastifican debido a esfuerzos flectores. Skinner et al. (1975b) estudiaron el comportamiento de dos placas en forma de U que disipan energía por flexor puro al enrollarse por efecto del desplazamiento relativo entre sus extremos (figura 2.15). Su comportamiento histerético se demostró muy estable.

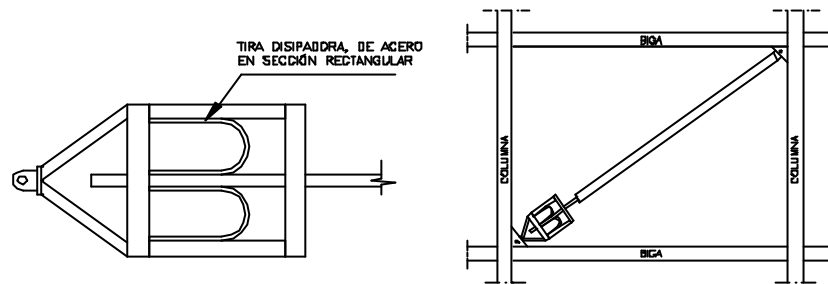


Figura 2.15 Disipador por flexión (Skinner et al. 1975a)

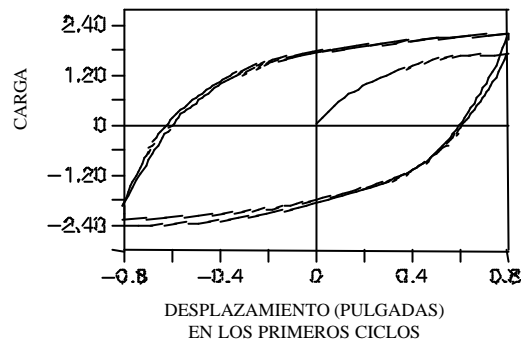
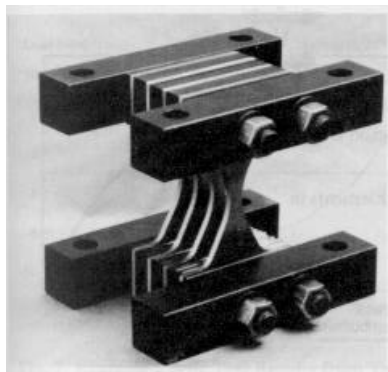


Figura 2.16 (a) Sistema ADAS. (b) Respuesta histerética en los primeros ciclos de carga

Uno de los disipadores más conocidos y estudiados (Alonso 1989, Hittaker et al. 1989, Scholl 1990, Su y Hanson 1990, Bergman y Hanson 1990) es el conocido con el nombre de ADAS (Added Damping And Stiffness). Es un dispositivo formado por un conjunto de chapas en paralelo, de espesor constante y sección variable en X, tal que, frontalmente, es similar a dos trapecios unidos por la base menor (figura 2.16a). El número de chapas en paralelo resulta variable, permitiendo ajustar el disipador a las necesidades de la estructura a la cual se incorpora. Cada placa del dispositivo se encuentra impedida de giro en ambos extremos, de forma que un

desplazamiento relativo entre éstos en dirección perpendicular al plano de la placa produce una distribución de momentos flectores lineal, simétrica y con doble curvatura. El ancho del disipador se proporciona linealmente con la distribución de momentos flectores, lo cual deriva en una generalización de la plastificación en un corto intervalo de desplazamiento. La plastificación se produce de forma uniforme y estable, optimizando el proceso de disipación de energía. La figura 2.16b muestra su respuesta histerética en sus primeros ciclos, manifestando una notable flexibilidad en comportamiento elástico.

El dispositivo indicado en la figura (2.17) es conocido como sistema TADAS. Al igual que el ADAS, está formado por un conjunto de placas trapezoidales de acero paralelas y de espesor constante. El hecho de que las placas se encuentren con un extremo empotrado y el otro articulado, condiciona la forma trapezoidal, que posibilita también una distribución global de la plastificación. La base mayor de la placa se conecta al nivel de viga a una estructura porticada, mientras que la otra se articula con una unión de bulón a dos contravientos dirigidos a la base de los pilares del pórtico. Con un desplazamiento relativo entre extremos de la placa perpendicular a su plano, se consigue la plastificación por flexión por curvatura simple. Al incorporar este sistema en un pórtico de acero a escala natural se ha observado que las reducciones en la respuesta son similares a las obtenidas con el ADAS (Tsai et al. 1993).

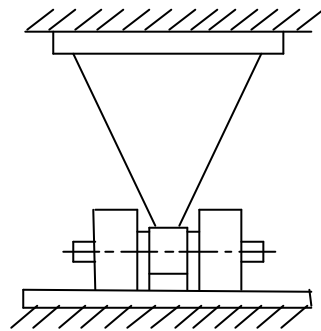


Figura 2.17 Sistema TADAS (Tsai 1993)

Kobori et al. (1992) investigan el comportamiento de un disipador construido en una placa de acero mecanizada con la geometría indicada en la figura 2.18a. Debido a los espacios vacíos que deja entre disipadores se le conoce genéricamente como disipador de tipo panel, y se comercializa con el nombre de "Honeycomb". Su geometría tiene como objeto una plastificación lo más uniforme posible en la zona disipativa. Su comportamiento histerético (figura 2.18b) se ha revelado muy estable y de forma casi rectangular, con una respuesta más próxima a la rígido-plástica que en el caso del ADAS, la cual es más flexible.

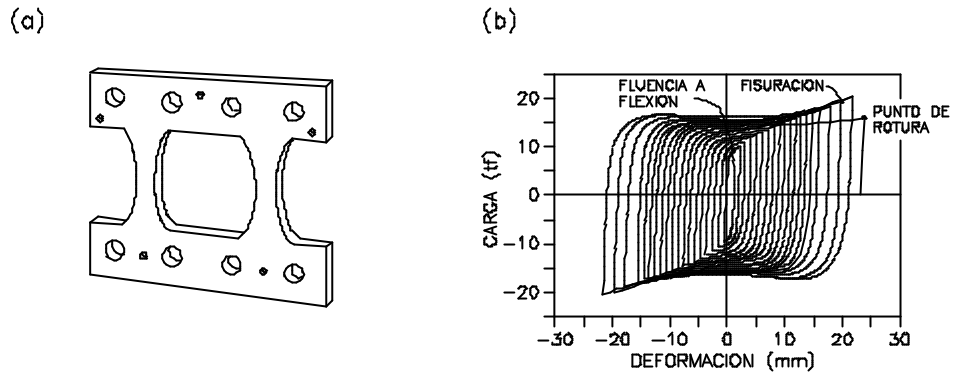


Figura 2.18 (a) Disipador Honeycomb. (b) Respuesta histerética (Kobori y al. 1992)

Benavent et al. (1997a, 1998) desarrolla dos disipadores, uno establecido a partir de la flexión de pernos (figura 2.19) y el otro basado en la plastificación por cortante, que permiten ser colocados como diagonales de arriostramiento, logrando así unos elementos prácticamente independientes de las acciones verticales y que resultan muy fáciles de instalar. Los disipadores están avalados por una amplia campaña de ensayos, a partir de la cual se establecen modelos de predicción del comportamiento y de su capacidad última disipativa bajo la acción sísmica.

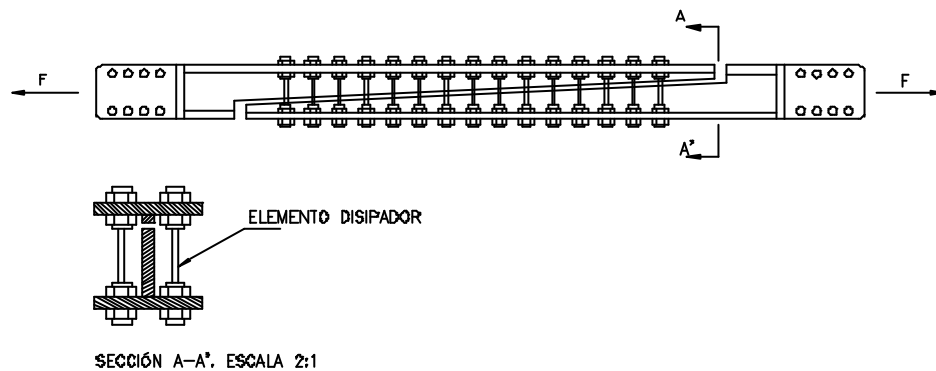


Figura 2.19 Sistema DUR (Dissipator Using steel Rods) (Benavent et al. 1997a)

Dispositivos a cortante

El sistema estructural de los brazos excéntricos (Popov 1980) es el precursor de los disipadores a cortante. La mayoría de los disipadores adoptan una geometría similar: sección en doble T con alma rigidizada. Popov observó que este sistema era

de una gran ductilidad (la UBC97 considera a las estructuras que lo incorporan de máxima ductilidad), y que permitía ciclos histeréticos estables y de gran capacidad disipativa siempre que la rigidización fuera correcta. Kasai y Popov (1986) establecían criterios simples para determinar la aparición de abolladura en el alma, los cuales han sido posteriormente validados para dispositivos disipadores (Rai et al. 1998, Tsai et al. 1998).

Los paneles de cortante son placas de acero rigidizadas (figura 2.20). Su estructura, con rigidizadores distanciados, obliga a espesores relativamente importantes para evitar el problema de la abolladura. Los aceros de alta ductilidad y bajo límite elásticos (80 Mpa, 40-60% de alargamiento) se muestran de gran interés para permitir espesores mayores a igualdad de esfuerzo cortante, con una inferior necesidad de rigidización (Nakashima 1995a).

Cahís et al. (1997) ensayan un diseño preliminar del disipador de cortante sobre el que versa la presente tesis doctoral. Su cuerpo disipativo está construido a partir de un solo bloque de acero de construcción (figura 2.21) mecanizado por fresado, lo que permite incluir rigidizadores de pequeñas dimensiones y sin necesidad de soldadura en la zona de plastificación. Los primeros resultados obtenidos señalaban una elevada rigidez bajo comportamiento elástico, un desplazamiento de inicio de plastificación pequeño (0.5 mm) y disipación de energía a partir de ciclos histeréticos estables.

Tsai et al. (1998) analizan el comportamiento de un dispositivo de cortante con sección en doble T y alma rigidizada (figura 2.22), diseñado para actuar como nexo entre un pórtico y su arriostramiento en A. Su unión con los brazos de arriostramiento, mediante bulones, admite sólo la acción horizontal, libre de momento y de acción vertical. Con ello se consigue desacoplar el sistema rígido del sistema flexible y reducir sollicitaciones de montaje.

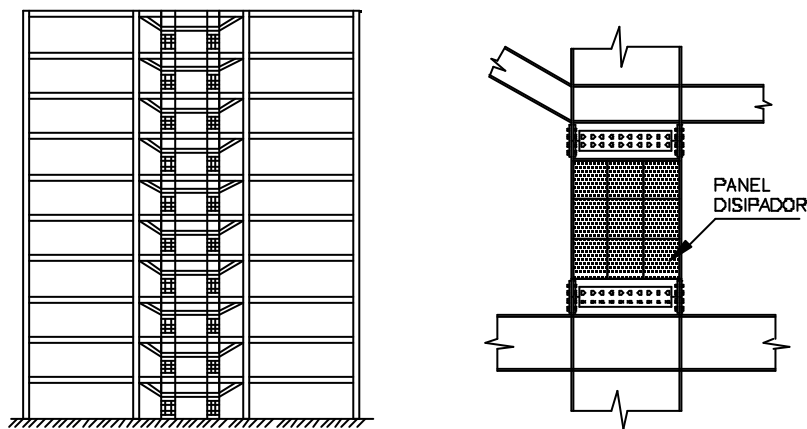


Figura 2.20 Disposición de paneles de cortante en una estructura metálica porticada (Nakashima 1995a)

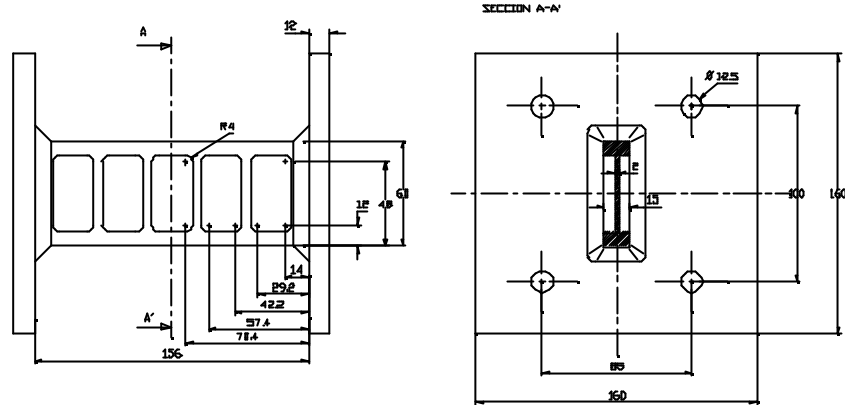
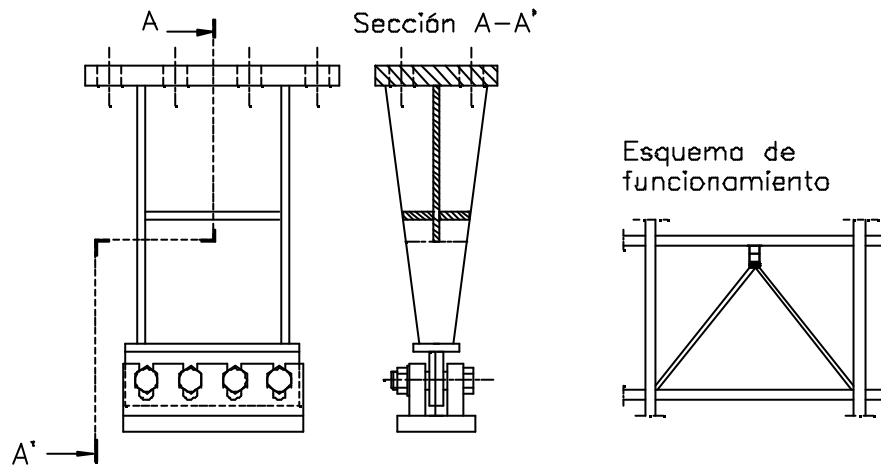


Figura 2.21 Disipador por cortante con su cuerpo disipador construido a partir de un proceso de fresado (Cahís et al. 1997)



2.22 Disipador por cortante (Tsai et al. 1998)

Ray y Wallace (1998) desarrollan un dispositivo (figura 2.23) a partir de placas soldadas de aluminio mediante procedimiento TIG. El disipador permite cargas de plastificación reducidas con espesores superiores a los necesarios con acero dúctil. Para evitar problemas de fragilidad, los rigidizadores del alma están únicamente soldados a las alas, practicándose además un normalizado final de tensiones. El resultado más significativo es la elevada ductilidad que se consigue con algunas de las aleaciones usadas, que llega incluso al 30 % en ensayo a tracción. Debido a una insuficiente rigidización, los dispositivos manifiestan abolladura del alma, la cual deriva en una disminución de su capacidad disipativa. Durante la misma investigación confirman el buen comportamiento del modelo propuesto por Kasai y Popov (1986) para la predicción de la abolladura.

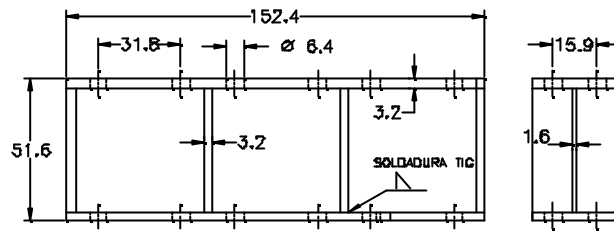


Figura 2.23 Disipador por cortante con aleaciones de aluminio y soldadura TIG (Rai y Wallace 1998)

Disipadores basados en la extrusión de metales

Robinson y Greenbank (1975, 1976) diseñan ‘Penguin Vibration Damper’ (PVD), el cual permite disipar energía a partir de la extrusión del plomo. La figura 2.24 representa un esquema de este sistema, en el cual el plomo pasa por un orificio y, forzado a un cambio de sección, disipa energía. Su respuesta histerética resulta muy estable, tras muchos ciclos de desplazamiento. Un modelo de 200 KN, apto para desplazamientos de hasta 10 mm y que disipa desde 0.05 mm, mantiene su curva histerética sin modificaciones apreciables tras 144000 ciclos a una amplitud de ± 4 mm (Monti et al. 1998).

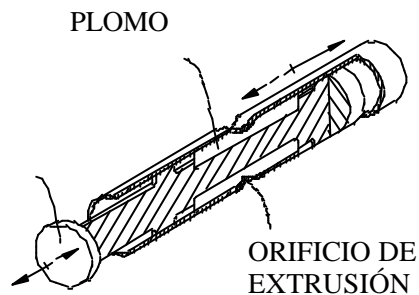


Figura 2.24 (a) Disipador por extrusión.

2.3.1.2 Disipadores por fricción

Los sistemas de fricción disipan energía, basándose en el rozamiento existente entre dos superficies en contacto bajo presión y en el deslizamiento entre ellas. La fuerza de fricción en cada conexión es igual al producto de la fuerza normal por el coeficiente de rozamiento.

Existen diversos dispositivos basados en la disipación por fricción. Pall y Marsh (1982) proponen un sistema (figura 2.25a) que permite ser emplazado en la intersección de un arriostramiento en X. Sus curvas histeréticas son prácticamente

rectangulares (figura 2.25b) con lo cual la energía disipada por ciclo es máxima para un determinado valor de la fuerza de deslizamiento. El mecanismo desliza ante una carga predeterminada, regulable a partir de la presión ejercida por pernos a través de una llave dinamométrica. Filiatrault y Cherry (1987, 1990) desarrollan un método simplificado de diseño sísmico para estructuras que incorporan este sistema disipativo. A partir de un estudio paramétrico determinan la distribución en altura de la fuerza umbral óptima de deslizamiento y establecen un espectro de diseño para su determinación práctica. Rao et al. 1996) plantean un dispositivo de fricción para ser empleado como conector entre una estructura porticada y un muro de mampostería armada (figura 2.26), y establecen también un método de determinación de la fuerza umbral que proporciona la respuesta estructural óptima.

El mayor inconveniente que presentan estos disipadores es que el coeficiente de fricción, durante el desplazamiento, depende de la velocidad, de la presión normal y de las condiciones de las superficies en contacto. Consecuentemente, resulta difícil garantizar un coeficiente de fricción independiente del tiempo y de las condiciones de los disipadores. Sin embargo, se ha observado que la variación del coeficiente de fricción durante el desplazamiento no afecta significativamente a la respuesta estructural si la estructura permanece en rango lineal elástico, mientras que esta influencia puede ser significativa si ésta entra en rango no lineal (Bozzo y Barbat 1995).

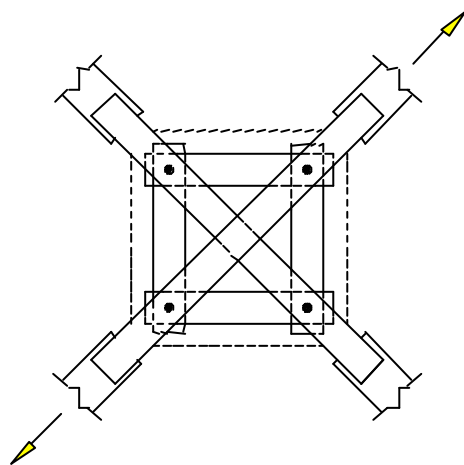


Figura 2.25 (a) Disipador por fricción (Pall y Marsh 1982)

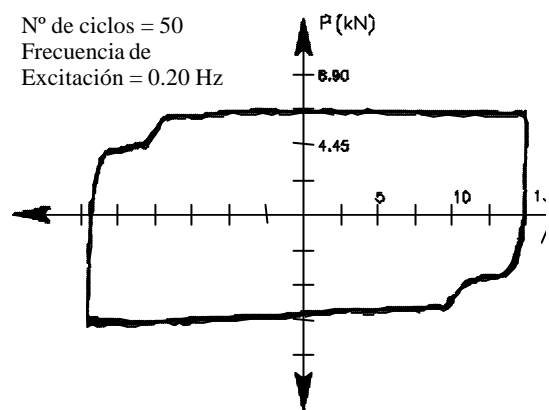


Figura 2.25 (b) Respuesta histerética

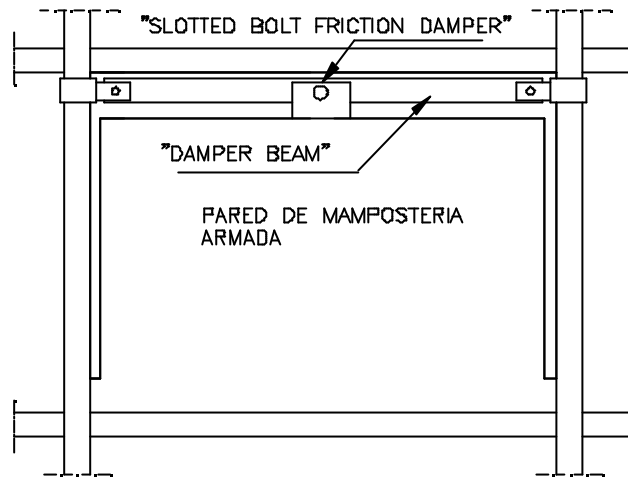


Figura 2.26 'Slotted Bolt Friction Damper' (Rao y White 1996)

Kar et al. (1998) diseñan un disipador de fricción de concepción distinta a los dos anteriormente descritos. Mientras que los primeros generan las fuerzas de fricción a través de uniones atornilladas, este disipador las obtiene a partir del deslizamiento entre una serie de anillos interiores y exteriores (figura 2.27). El deslizamiento va acompañado de un aumento progresivo de la presión entre las superficies en contacto de los anillos, debido a la interferencia que se produce entre éstos durante su desplazamiento. Resultados de los ensayos efectuados mostraron que el comportamiento histerético (figura 2.27b) resulta estable, repetible y predecible. Su acción sobre la estructura es autocentradora ("self-centering"), y su respuesta fuerza - desplazamiento resulta prácticamente independiente del contenido frecuencial de la excitación sísmica. Sus características mecánicas y geométricas permiten la incorporación del disipador en una diagonal rigidizadora o en un arriostramiento en X.

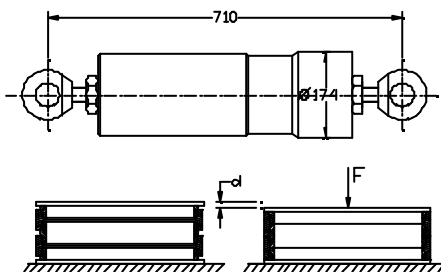


Figura 2.27 (a) Disipador Shapia (Kar et al.1998)

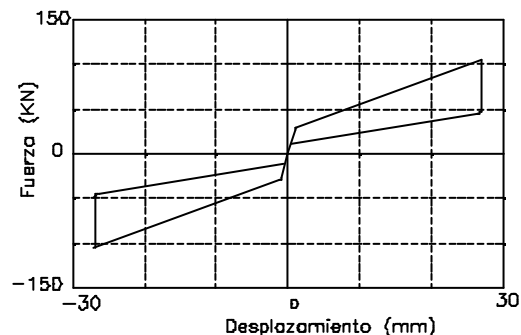


Figura 2.27 (b) Relación carga - desplazamiento

2.3.2 Disipadores con comportamiento viscoelástico

Los disipadores viscoelásticos han sido empleados con éxito, durante los últimos treinta años, para reducir la respuesta de edificios altos ante la acción del viento (Mahmoodi et al. 1987). De forma más reciente se ha estudiado su utilización con fines sismorresistentes. Los disipadores viscoelásticos sólidos están formados por chapas metálicas unidas por capas finas de material viscoelástico (figura 2.28a), y presentan unos ciclos histeréticos característicamente elípticos (figura 2.28b).

Su acción disipativa se basa en el aumento del amortiguamiento estructural. Presentan algunas ventajas con relación a los disipadores histeréticos: i) no precisan de una fuerza umbral para disipar energía; y ii) no cambian de forma significativa los períodos de vibración, con lo cual resulta posible linealizar el comportamiento estructural y realizar una modelización más sencilla. Como inconvenientes están: i) la poca variación del período fundamental no evita el comportamiento resonante; ii) los materiales viscoelásticos, en general, son sensibles a los cambios en temperatura, frecuencia y deformación, y resulta necesario minimizar la influencia de estas variables en sus rangos de servicio en estructuras sismorresistente para que su comportamiento resulte predecible; iii) para conseguir un aumento del amortiguamiento estructural a valores que reduzcan significativamente la respuesta estructural ante un sismo severo es necesaria una gran cantidad de dispositivos.

En un estudio experimental llevado a cabo por Aiken et al. (1990) se analizaba la actuación de disipadores viscoelásticos en una estructura de 9 plantas, en escala 1/4, solicitada en mesa vibrante por señales procedentes de diversos terremotos. Entre sus conclusiones destacaban: i) que las características dinámicas del edificio no varían de forma muy significativa: la frecuencia fundamental pasaba de 2.04 Hz a 2.76 Hz. para un aumento de la fracción de amortiguamiento del 0.74% al 8.07% con dispositivos (Aiken y al. 1990), ii) el incremento en temperatura del dispositivo debido a la acción sísmica apenas afectaba alas propiedades dinámicas del sistema y iii) que la teoría de viscoelástica lineal se puede aplicar para describir el comportamiento de los disipadores.

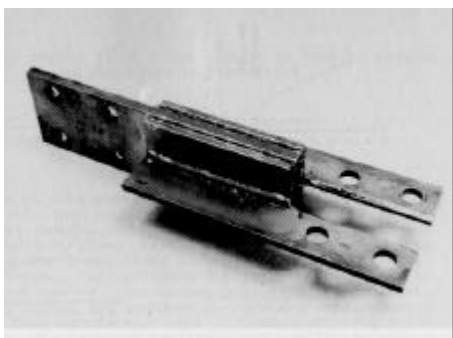


Figura 2.28 (a) Disipador viscoelástico (Aiken y al. 1990)

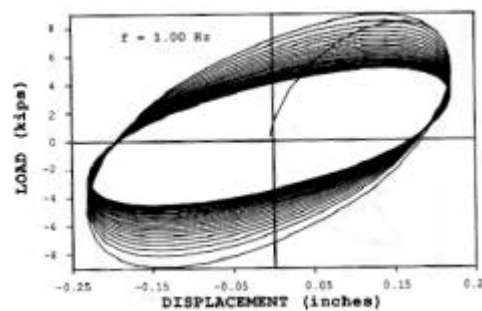
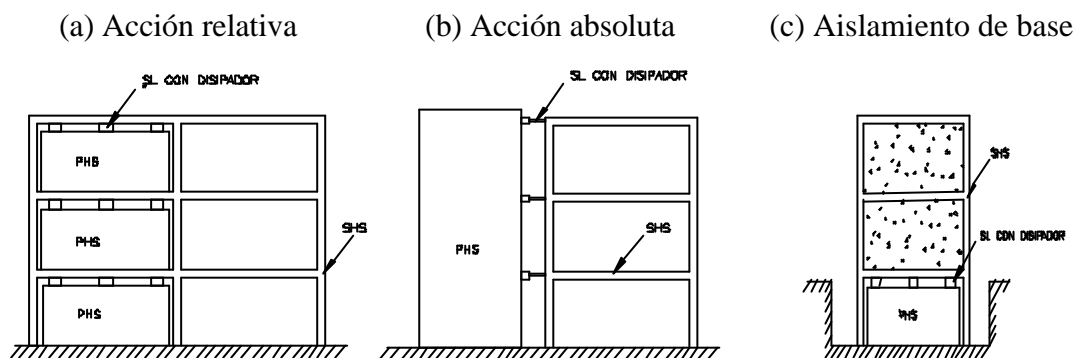


Figura 2.28 (b) Respuesta histerética (Bergman 1990)

2.4 DISEÑO SISMORRESISTENTE CON DISIPADORES DE ENERGÍA

2.4.1 Disposiciones constructivas.

Las estructuras sismorresistentes con disipadores cuentan con los siguientes elementos (Dorka et al. 2000): i) un sistema principal que concentra las acciones horizontales ("primary horizontal stiffening system" o PHS), ii) un sistema secundario ("secondary horizontal stiffening system" o SHS) que soporta la mayor parte de las cargas verticales; iii) elementos de unión entre el sistema primario y secundario ("seismic links" o SL), donde se sitúan los disipadores histeréticos (= "Hysteretic devices" o *Hydes*). En la figura 2.15 se ilustran varias disposiciones posibles. La efectividad del sistema es tanto mayor cuando mayor es la rigidez del sistema primario en relación al sistema secundario.



2.29 Tres aplicaciones de sistemas sismorresistentes con disipadores (Dorka et al. 2000)

El sistema sismorresistente con disipadores investigado de forma más extensiva es el de acción relativa (figura 2.29 a). Consiste en una estructura principal flexible porticada, la cual soporta acciones gravitatorias, y un sistema más rígido resistente a las acciones horizontales, el cual concentra el proceso disipativo y del que forman parte los disipadores de energía. A esta configuración se la ha denominado "energy concentration type flexible-stiff mixed structure" (Akiyama 1985), y algunos investigadores la consideran como un sistema dual no estándar (Rakicevic et al. 2000).

Normalmente, los disipadores se colocan cuando la estructura principal porticada ya soporta la mayor parte de la carga vertical, de forma que el sistema disipativo se limita a resistir las acciones horizontales (Ruiz et al. 1995).

Tal como se indica en la figura 2.30, el sistema dual no estándar (con disipadores), a efectos de análisis del comportamiento y dimensionamiento, se divide en dos subsistemas: uno constituido por la estructura porticada convencional

(subsistema flexible) y otro consistente en el sistema disipativo (subsistema rígido). Establecer que los dispositivos no están condicionados por las acciones verticales es una hipótesis adoptada con frecuencia, y que se cumple, en mayor o menor grado, en función de la configuración adoptada por el conjunto del sistemas disipativo. En la figura (2.31) se representan las configuraciones más recurridas. En los casos C, E y F resulta conveniente efectuar el montaje del sistema disipativo con la mayor parte de la carga vertical presente, pues ésta pueden afectar negativamente al comportamiento de las diagonales y al de los propios disipadores.

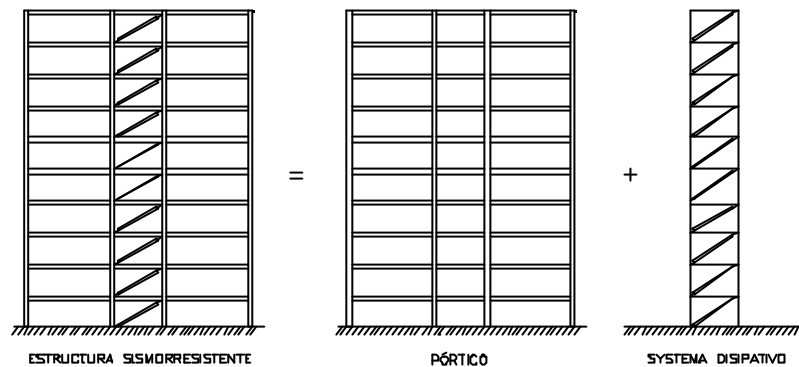


Figura 2.30 Subsistemas estructurales de una estructura sismorresistente con disipadores de energía.

El sistema A se ha propuesto o utilizado con los siguientes disipadores: i) disipadores tipo viscoelástico (Aiken et al. 1990; Soong y Mahmoodi 1990), ii) para disipadores con lámina curvada a flexión (Skinner et al. 1975b), iii) sistema DUR (Benvanent et al. 1997a), iv) sistemas de fricción (Kar et al. 1998). El sistema B se emplea básicamente en el dispositivo de fricción de Pall y Marsh (Pall y Marsh 1982; Filiatrault y Cherry 1990). Ambos sistemas presentan como ventajas: i) independencia de las cargas verticales, ii) menor inclinación de las barras que en el arriostramiento en A, lo cual supone menores cargas en las diagonales y menores componentes verticales en los disipadores. Como inconvenientes respecto a los arriostramientos en A se cuentan: i) la pérdida de diafanidad y poca capacidad de incluir aberturas y ii) la mayor longitud de las diagonales y su mayor propensión al pandeo.

El sistema C se ha propuesto o empleado para la sujeción de una amplia variedad de dispositivos: i) del sistema ADAS (Su y Hanson 1990; Foti et al. 1998), con el dispositivo TADAS (Tsai et al. 1993) y ii) en varios tipos de disipadores por plastificación por cortante (Tsai et al. 1998; Rai y Wallace 1998). El sistema C facilita la inclusión de un paso en su seno, sin embargo supone inconvenientes: i) las diagonales y los disipadores pueden verse afectados por cargas verticales debidas a flechas diferidas en el hormigón o debidas a cargas posteriores a la fijación del sistema, o por acciones verticales de origen sísmico y ii) la mayor inclinación de las diagonales produce mayores componentes verticales en los disipadores.

El sistema E impone una carga vertical considerable a los propios dispositivos, por lo cual deben manifestar una determinada resistencia respecto a este componente. Este sistema se ha propuesto, en el caso de los disipadores tipo panel o "honeycomp", por la misma empresa que los comercializa, Kajima Corporation.

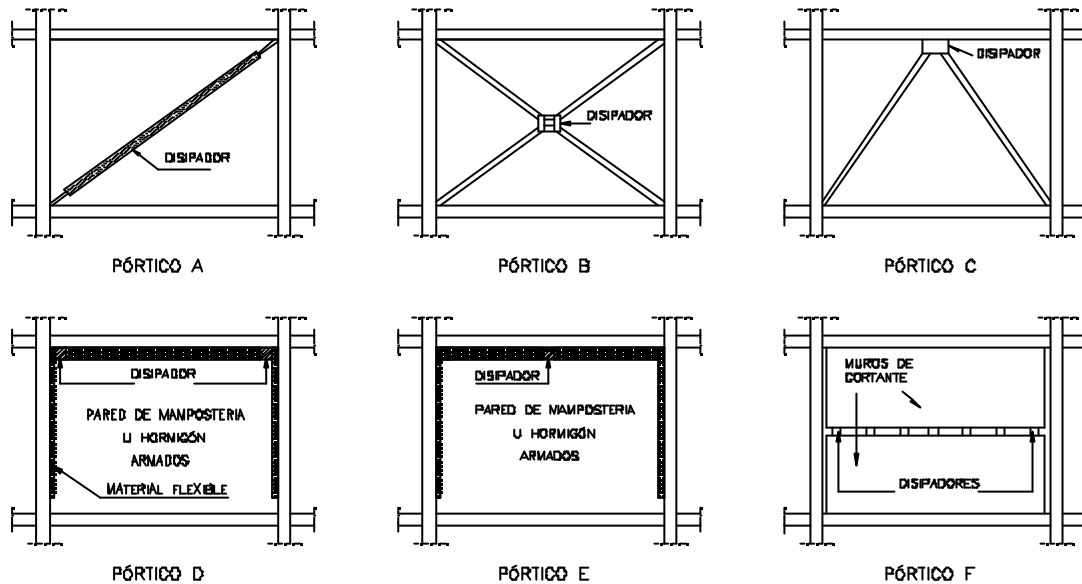


Figura 2.31 Sistemas de conexión entre disipadores y la estructura porticada
 (a), (b), (c), (f): soluciones adoptadas
 (d) y (e): soluciones propuestas

Las configuraciones D y E se proponen para la rehabilitación de edificios porticados con particiones de mampostería, reforzando adecuadamente las mismas o partiendo de su capacidad real para su aprovechamiento como elementos estructurales frente a acciones sísmicas (Bozzo et al. 1998). Es este último caso, los disipadores actuarían además limitando el valor máximo de las acciones transmitidas a los cerramientos de acuerdo con su capacidad. Para compatibilizar las deformaciones de la estructura porticada y los cerramientos, se habilitarían espacios entre ambos rellenos con material flexible, tal como se aprecia en la figura 2.31.

Otro aspecto a considerar dentro de las disposiciones constructivas es la distribución vertical del sistema disipativo. En la figura 2.32 se pueden observar disposiciones con arriostramientos en A y en diagonal. Si bien es cierto que los arriostramientos resultan eficientes para reducir los desplazamientos laterales, resulta que, en comportamiento elástico, aumentan notablemente el cortante de base. La introducción de mecanismos disipativos en el sistema de respuesta horizontal permite controlar de forma efectiva los desplazamientos de entre piso con valores aceptables del cortante de base (Foti et al. 1998). Sin embargo, disposiciones como las de los pórticos 3 y 6, efectivas en la reducción de desplazamientos de entre piso y en cortante de base, distribuyen de forma no uniforme las acciones sobre los cimientos, acusando los pilares correspondientes a los pórticos arriostrados unas mayores acciones normales y cortantes. Esta situación podría resultar asumible en terrenos

firmes, pero puede resultar especialmente crítica en suelos blandos (Bozzo y Barbat 1999). Ruiz et al. (1995) analizaron numéricamente el comportamiento de los pórticos 4, 5 y 6, asumiendo un comportamiento elastoplástico bilineal en todas sus diagonales y a partir de los acelerogramas correspondientes a un suelo blando, presentando los pórticos 4 y 5 momentos de vuelco inferiores al 10 % a los obtenidos con la configuración del pórtico 6.

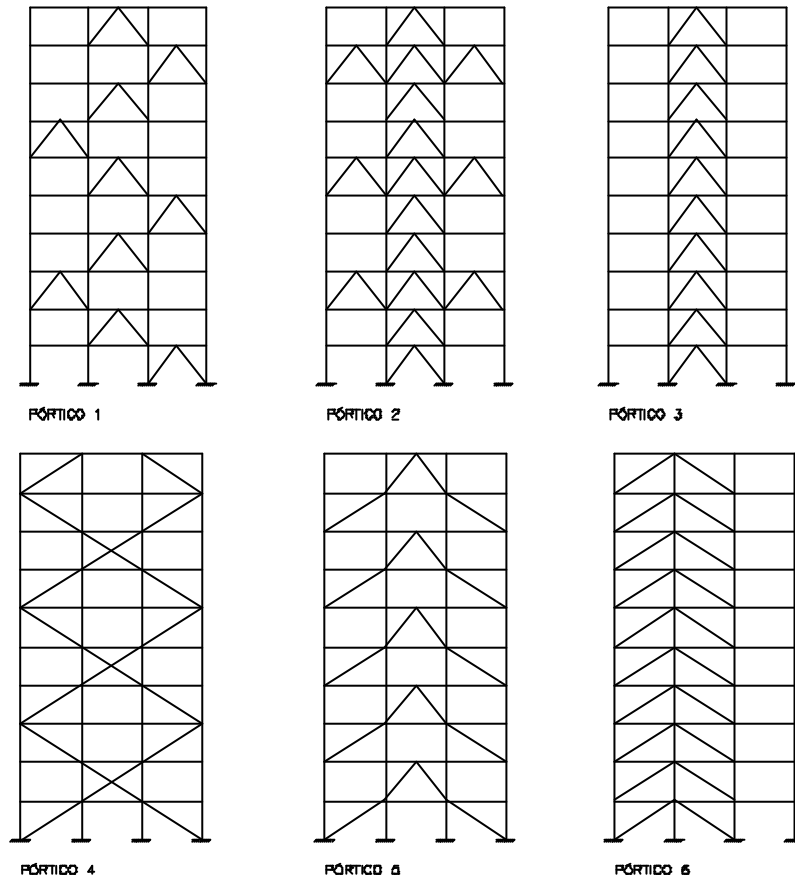


Figura 2.32 Distribución vertical sistema disipativo

Otro aspecto a considerar en la distribución vertical, en sí resulta más conveniente instalar disipadores en todas las plantas o sólo en algunas de ellas. Dorka y Bayer (2000) realizan un estudio comparativo a partir del análisis numérico (FEM) del comportamiento ante acción sísmica de edificios en ambas situaciones: i) con disipadores en cada planta y ii) con disipadores en cada 5 plantas y rigidización de la estructura en el resto de sus plantas. La comparación se realiza en tres edificios, de 5, 10 y 15 plantas, donde se adopta una configuración sismorresistente dual no estándar (figura 2.29a). Los resultados muestran un mejor comportamiento de las estructuras que presentan la segunda distribución, por varias razones: i) el "input" energético resulta notablemente inferior con la distribución de disipadores cada 5

plantas y ii) los disipadores concentrados en cada 5 plantas absorben un mayor porcentaje de la energía introducida al sistema.

2.4.2 Criterios de diseño sismorresistente con disipadores histeréticos

Se ha observado que la energía introducida por el sismo (E_i) depende básicamente de la masa total del edificio y de su período fundamental, resultando relativamente independiente de las características de las fuerzas restituyentes (Housner 1956; Akiyama 1985; Nakashima et al. 1996; Inoue et al. 1998). Este hecho sugiere que el daño en la estructura principal puede ser reducido de forma efectiva incorporando disipadores de energía a la estructura (Inoue et al. 1998).

La energía total introducida por un terremoto (E), puede ser disipada por amortiguamiento viscoso (W_h) y por amortiguamiento histerético (W_p). El resto se encuentra en forma de deformación elástica y energía cinética (W_e) en el instante en que se plantea el balance energético (Wakabayashi 1986). En forma de ecuación resulta:

$$E = W_p + W_h + W_e \quad [2.1]$$

Housner (1956) asumió que los sistemas dinámicos elastoplásticos cumplían la siguiente ecuación:

$$W_p + W_e \leq E_H \quad [2.2]$$

donde:

$$E_H = MV_{max}^2 / 2 \quad [2.3]$$

donde E_H es el "input" energético atribuible al daño estructural y V_{max} es la máxima velocidad alcanzada por el sistema en comportamiento elástico.

Akiyama (1980) corrobora a través de análisis numérico las suposiciones de Housner en sistemas estructurales más complejos, y establece un método de diseño sismorresistente basado en una comparación de la energía introducida al sistema y en su capacidad disipativa. También desarrolla modelos simples para la determinación y distribución del daño estructural. En junio del mismo año, una revisión del *Japan Building Code* incluyó métodos de diseño sismorresistentes compatibles con los propuestos por Akiyama.

Inoue (1998) investiga el comportamiento de estructuras mixtas rígido - flexibles, admitiendo que la plastificación se extienda también al sistema flexible. Realiza análisis numéricos suponiendo un comportamiento histerético trilineal, tal como se observa en la figura 2.33. Definido el parámetro β como el cociente entre el cortante de plastificación del sistema rígido y el cortante total al cual plastifica la

estructura flexible, Inoue obtiene, a partir del concepto de amortiguamiento viscoso equivalente (Jacobsen 1960) el valor óptimo del parámetro β para el cual se maximiza la energía disipada:

$$b_{opt} = 1 - \frac{1}{\sqrt{k+1}} \tag{2.4}$$

Donde k representa el cociente entre las rigideces elásticas del disipador (K_D) y de la estructura principal (K_f).

Inoue corrobora la anterior expresión a partir de análisis no lineales, observando además que cuanto mayor es el valor de K , menor es el daño estructural de la estructura principal, concentrándose el proceso de plastificación en el sistema rígido. A conclusiones similares había llegado con anterioridad Akiyama (1985) y Harada et al. (1995).

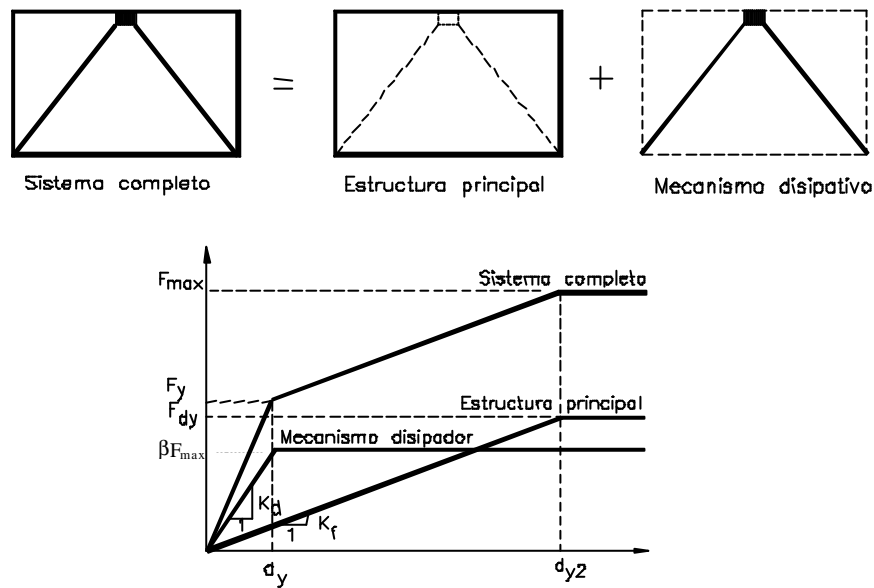


Figura 2.33 Respuesta trilineal de un sistema mixto rígido-flexible

Harada et al. (1995) investigó el comportamiento de un sistema estructural rígido - flexible con deformación plástica concentrada en el sistema rígido (figura 2.33), proponiendo la siguiente expresión:

$$\frac{f a_{max}}{a_e} = \frac{d a}{a_e} \left[\sqrt{64 + \frac{16}{K} + \frac{1}{\left(\frac{d a}{a_e}\right)^2}} - 8 \right] \tag{2.5}$$

Donde ${}_d\mathbf{a}$ representa el coeficiente del cortante de plastificación del sistema rígido (${}_d\mathbf{a} = {}_dQ_y/M$ g), ${}_f\mathbf{a}_{max}$ representa el coeficiente del cortante máximo en la estructura flexible (${}_f\mathbf{a}_{max} = {}_fQ_{max}/M$ g). El coeficiente α_e representa el coeficiente de cortante de base del sistema porticado actuando solo ($\mathbf{a}_e = {}_fQ/M$ g), el cual puede también ser expresado en función de la pseudovelocidad V_E ($\mathbf{a}_e = 2pV_E/gT_f$). El coeficiente de cortante de base total se puede obtener a partir de las relaciones anteriores: ${}_T\mathbf{a} = {}_d\mathbf{a} + {}_f\alpha_{max}$. En la figura 2.34 se representan las expresiones de los coeficientes de cortante para $K=5$ y $K=15$. Se observa que el mínimo cortante de base en ambos casos se obtiene cuando la relación ${}_d\mathbf{a}/\mathbf{a}_e$ es aproximadamente igual a 0.2.

Nakashima (1996) observa, a partir de investigaciones anteriores de aplicaciones prácticas de estructuras con disipadores, que la rigidez del sistema rígido raramente dobla el valor de la rigidez del sistema flexible. A partir de esta premisa, establece un estudio paramétrico donde estudia la influencia del parámetro $\mathbf{a} = \frac{k_f}{k_f + k_d}$ en la energía introducida y disipada por el sistema. El estudio se realiza partiendo de un sistema dual no estándar (con disipadores), donde la plastificación se concentra en su parte rígida, y adoptando un modelo de comportamiento histerético bilineal perfectamente plástico. A partir de los resultados obtenidos, concluye que el valor del parámetro \mathbf{a} no influye de forma apreciable en la energía introducida y disipada, si bien valores elevados del parámetro acentúan un comportamiento resonante y un ligero aumento de ambos términos energéticos en la zona del espectro donde se producen sus valores máximos. En el mismo trabajo, Nakashima comprueba, para estructuras de varios grados de libertad con distintos valores de \mathbf{a} (desde 0.25 a 0.75), que los "inputs" energéticos y la energía disipada en sistemas de varios grados de libertad son muy cercanos a los obtenidos en sistemas de un grado de libertad con la misma masa y período fundamental, reafirmando la validez de los postulados energéticos en diseño sismorresistente. Suponiendo un cortante de plastificación en los disipadores proporcional al cortante obtenido en respuesta elástica, observó también que cuanto más alto es el valor de α , más uniforme es la distribución del daño en los disipadores y menor la concentración de daño en caso de que uno de los disipadores tenga un valor del cortante de plastificación ligeramente inferior al calculado bajo la hipótesis mencionada.

Benavent (1997) desarrolla un método de diseño sismorresistente en estado límite, basado en criterios energéticos y para estructuras con disipadores elastoplásticos. Se centra en estructuras porticadas de acero, admitiendo que en su seno se produzca deformación plástica. A partir del "input" energético, propone expresiones que permiten determinar el daño estructural y su distribución, la distribución en altura del cortante máximo y los valores máximos del "interstory drift".

Foti et al. (1998) realizan un estudio comparativo entre la respuesta dinámica no lineal de edificios porticados con distintas alturas (3, 7 y 15 plantas), en sus

formas no rigidizada ("bare"), rigidizada ("braced") y con disipadores histeréticos en el seno de un sistema dual no estándar. Emplean dos tipos de disipadores: el CFSB (disipación por fricción) y el ADAS (disipación por plastificación por flexión del acero). Las fuerzas de plastificación y de inicio del desplazamiento de fricción fueron calculadas como una fracción de las fuerzas estáticas equivalentes definidas por la UBC-91, tomando valores del 50, 75 y 100%. Los autores concluyen que los dispositivos de fricción manifiestan una mayor efectividad, en cuanto permiten una mayor reducción del "interstory drift" con valores del cortante de base del mismo orden a los alcanzados con el ADAS, dando como explicación su acción disipativa desde pequeños desplazamientos. El criterio de distribución de las fuerzas de plastificación conduce a una relación entre la energía disipada y la fuerza de plastificación que se mantiene relativamente uniforme en las distintas plantas, con lo cual estiman que el criterio simplificado resulta satisfactorio.

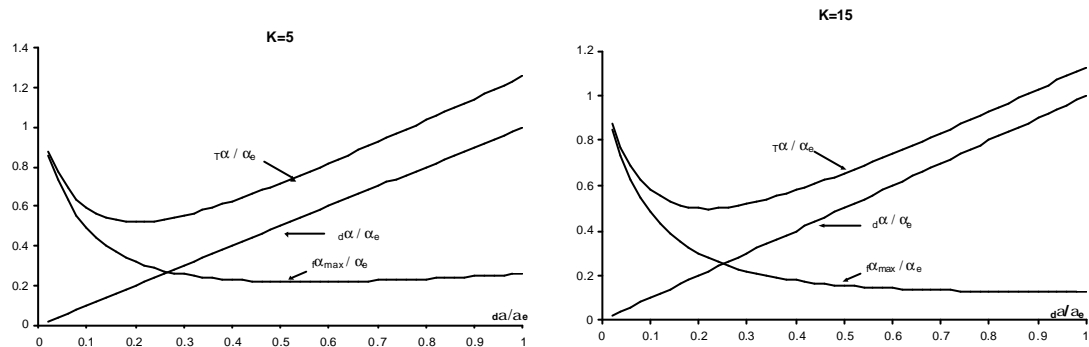


Figura 2.34 Relación entre coeficientes de cortante

2.4.3 Predicción de la capacidad disipativa en disipadores elastoplásticos

Una primera aproximación al problema de la determinación de la capacidad última disipativa se basa en la fatiga en bajos ciclos de deformación. Este tipo de fatiga se produce cuando las deformaciones son importantes y de carácter plástico, con lo cual los ciclos comportan un acusado comportamiento histerético. La curva que relaciona la amplitud de la deformación (de valor constante) y el número de ciclos que conducen a la fractura (figura 2.35) empieza en 1/4 de ciclo, a partir de los resultados obtenidos ante sollicitación monotónica. Se han concentrado muchos esfuerzos en ensayos de fatiga y como resultado se ha observado que se cumple la relación $\epsilon_p N^\alpha = \text{cte}$ por debajo de 10^5 ciclos de deformación y para la mayoría de los metales, con valores de α comprendidos entre 0.5 y 0.6 (Benham et al. 1995). La anterior relación, conocida como fórmula de Manson-Coffin resulta lineal si se enfrentan $\log \epsilon_p$ y $\log N$.

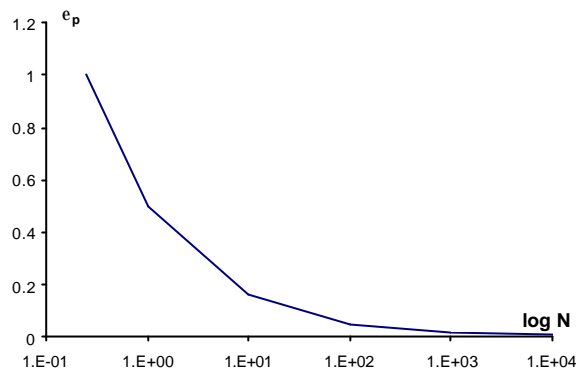


Figura 2.35 Relación entre amplitud de la deformación plástica y número de ciclos que conducen a rotura, a partir de la fórmula de Manson-Coffin.

Un criterio de fallo estructural se puede establecer a partir de la probabilidad P_f de que el daño acumulado en un miembro estructural o en un componente exceda un valor aceptable γ , permitiendo ser expresado matemáticamente como (Díaz - López et al. 2000):

$$P_f = P(D > g) \quad [2.6]$$

Entre las diversas funciones de daño presentadas hasta la actualidad, la teoría más simple y a la vez más recurrida se conoce como ley de Miner (1945), la cual se basa en la hipótesis que el daño acumulado es proporcional al número de ciclos realizados. El daño acumulado a partir de L grupos con n_i ciclos con la misma amplitud D_{e_i} puede ser evaluado, de acuerdo con la ley de Miner, de la siguiente forma:

$$I_D = \sum_{i=1}^L \frac{n_i}{N_{fi}} \quad [2.7]$$

Donde N_{fi} es el número de ciclos en que se produce el fallo estructural ante ciclos de una única y determinada amplitud. Si la hipótesis de linealidad del daño acumulado es correcta, $I_D = 1$. En realidad, los valores hallados en la práctica superan la unidad (Ballio et al. 1994).

Naoki et al. (1991) ensayaron disipadores de acero tipo panal de abeja bajo fatiga a cortos ciclos y concluyeron que la relación entre la amplitud del desplazamiento y la vida del disipador puede ser estimada a partir de la fórmula de Manson-Coffin. Ballio et al. (1994) llegaron a la misma conclusión, a partir de series de ensayos en perfiles en doble T en ménsula y a los que se imponían ciclos de amplitud constante en su extremo libre hasta el agotamiento, observando que los resultados se ajustaban a la siguiente ecuación:

$$N_F = a \left(\frac{\Delta v}{v_y} \right)^b$$

Donde N_F correspondía al número de ciclos correspondiente al colapso, Dn la amplitud de la deformación y n_y la deformación correspondiente al desplazamiento de fluencia. Los parámetros a y b dependían de la geometría del elemento estructural. A partir de la ecuación anterior y con la aplicación de la ley de Miner, plantearon un modelo de predicción de rotura a fatiga en bajos ciclos, validado experimentalmente con buenos resultados.

Otra línea de investigación en la predicción de la capacidad disipativa última es la iniciada por Kato y Akiyama (1973), en la que se asocia a un problema de fatiga dúctil. En esta aproximación, para establecer el criterio de rotura, el efecto de la acumulación de la deformación plástica hasta un valor crítico resulta más importante que el efecto de la fatiga. Observaron que la deformación acumulada en un proceso histerético se puede descomponer en zona esqueleto ('skeleton part') y en zona Bauschinger ('Bauschinger part') (figura 2.36). Asociaron la fractura dúctil con la deformación plástica acumulada en 'skeleton' y la fatiga con la deformación plástica acumulada en 'Bauschinger'. Postularon que el fallo ocurre cuando la deformación plástica acumulada en 'skeleton' alcanza la deformación máxima en ensayo monotónico. Bajo este criterio, la deformación absorbida por Bauschinger no se tenía en cuenta. Akiyama et al. (1995) articulan un modelo de predicción de la capacidad disipativa de pernos a flexión en el cual se tiene en cuenta la energía disipada por efecto Bauschinger y por "skeleton". Benavent (1997) aplica el modelo de Akiyama con éxito a un dispositivo disipador que plastifica bajo efecto del esfuerzo cortante.

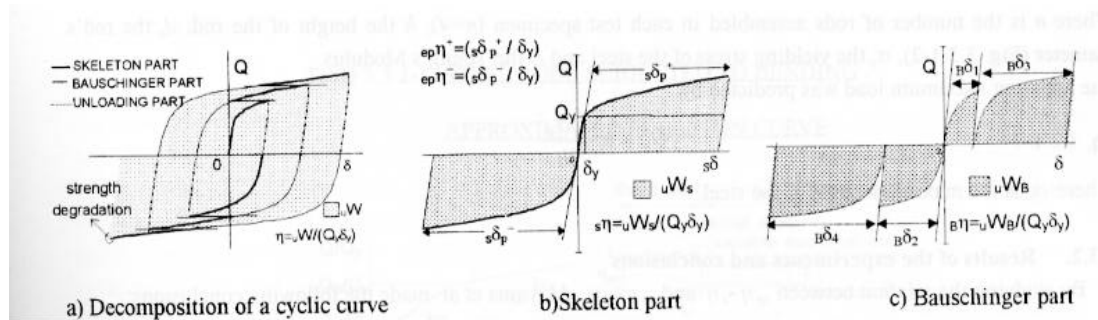


Figura 2.36 Descomposición de la curva histerética fuerza - desplazamiento (Benavent 1997)