aumento en el número de los permisos para construir edificios aislados, incluyendo muchos apartamentos y condominios.

Otros investigadores como Kiev, quien con su grupo de colaboradores estudiaron un marco de acero de cinco niveles, con aisladores de base, a escala 1/3, en el laboratorio de la Universidad de California en Berkeley. Se adicionó un sistema de seguridad que entra en funcionamiento al presentarse la falla de los aisladores y consiste en apoyos adicionales que disipan energía por fricción y limitan los desplazamientos, aunque incrementan las aceleraciones transmitidas a la estructura.

Tyler y Robinson encontraron satisfactorio el comportamiento de aisladores de base con corazón de plomo, para deformaciones unitarias por corte mayores que el 100%. Estudios posteriores, realizados por Rodwll, han corroborado el buen comportamiento del aislador, para un gran número de ciclos de carga.

Fujita revisó los sistemas desarrollados en Japón para aislar equipos. Los sistemas se han combinado con amortiguadores de aceite y fricción y/o disipadores. Las ventajas del uso de aisladores de base han quedado demostradas por Constantinon y Tadjbakhsh, quienes realizaron un estudio analítico mediante la teoría de vibraciones aleatorias y modelaron la excitación como un proceso no estacionario. Este modelo permitió analizar un gran número de casos, en que se concluye que los desplazamientos y las fuerzas cortantes se reducen de manera muy importante, al incorporar los aisladores.

Kelly y su grupo de investigadores estudiaron la superestructura de un puente sobre aisladores con y sin corazón de plomo. El aislador con plomo resultó efectivo para disipar energía y limitar los desplazamientos laterales. Encontraron también adecuado el método lineal equivalente, para el análisis de la estructura.

Otros investigadores como Tadjbakhsh y Lin estudiaron el uso de aisladores con fricción proporcional al desplazamiento. La variación en la fricción se logra mediante la colocación de dos cables que producen un incremento de la fuerza axial sobre las placas, al desplazarse lateralmente los aisladores. Los resultados muestran que el incremento de fricción reduce la respuesta de manera importante.

Griffith junto con su grupo de colaboradores, valiéndose de un modelo experimental de siete niveles, a escala 1/5, estructurado con muros de concreto sobre aisladores de base, formados de placas de acero y hule. El modelo fue sometido a varios temblores, entre los que se encuentra la componente E-W de la estación SCT del temblor del 19 de septiembre de 1985, de México. Ante la acción de temblores de gran magnitud la estructura se separó de los apoyos. Para evitar tal separación se propuso implantar un aislador con un dispositivo en el centro, que le permita trabajar en tensión y reducir los desplazamientos. La efectividad del dispositivo se comprobó al estudiar sobre un modelo de nueve niveles, sometido a varios temblores.

Nagarajaiah, alrededor de la segunda mitad de la década de los ochenta, junto con su grupo de colaboradores, desarrollaron un programa de computadora para análisis tridimensional de estructuras aisladas y gracias a eso lograron calibrar los resultados con estudios experimentales de otros investigadores. Posteriormente, aplicaron este programa y demostraron que el comportamiento biaxial tiene mayor importancia en los aisladores con fricción, que en los aisladores con corazón de plomo.

Un aspecto poco estudiado es el relacionado con la fatiga de los aisladores, afortunadamente investigadores como Roedor, quien realizó varias pruebas de laboratorio con aisladores de hule y acero para determinar la importancia de los parámetros que intervienen en el fenómeno. De acuerdo con los resultados, la variación de la temperatura y la amplitud de los ciclos de histéresis son las variables que más contribuyen al fenómeno, que puede llegar a representar un aspecto importante en el diseño.

Otros investigadores como Zayas y Bozzo, han propuesto y estudiado un sistema de aislamiento de superficie cóncava, basado en el movimiento de un péndulo, conocido como *sistema péndulo de fricción*, el cual consiste en un sistema articulado, deslizante sobre una superficie cóncava esférica, con una cara de acero. La superficie deslizante se cubre con teflón; esto se hace para minimizar la fricción entre las dos superficies en contacto. Debido a esta fricción, la estructura que se encuentra sobre este sistema responde, ante fuerzas pequeñas, como si estuviera empotrada en su base. Una vez superada la fuerza de fricción, la estructura responde como un péndulo, cuya respuesta

dinámica está controlada por el periodo natural del péndulo, y su amortiguamiento por las fuerzas de fricción. Similarmente, mientras se alcanza el umbral de cedencia y se mueve sobre la superficie esférica, la fuerza restitutiva de gravedad ayuda a traer de vuelta al péndulo a su posición de equilibrio. Así que, la fuerza restitutiva es proporcionada por la forma del dispositivo.

El material con que se fabrica el péndulo es acero y en la zona de deslizamiento, cromo. Esto se puede ver en la figura 3.18.

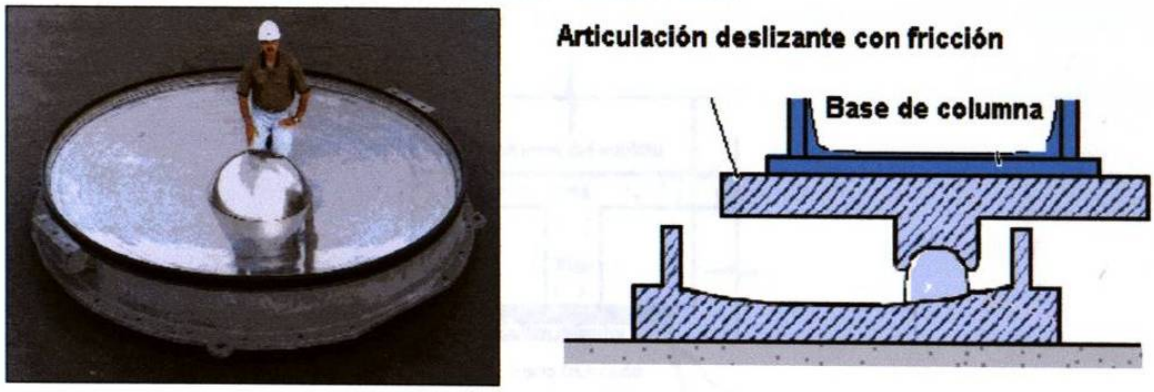

Fig. 3.18 Péndulo de fricción.

Debido a la geometría misma del aislador, el periodo no depende de la carga vertical aplicada y su rigidez es directamente proporcional a la carga, lo que hace que las torsiones provocadas por las concentraciones de masa en la estructura disminuyan en el nivel de aislamiento. Su principal desventaja es que el cromo, al igual que el teflón, se adhiere con el tiempo.

En México también se han hecho propuestas para utilizarlas como aislamiento de base. A mediados de los 60, el Ing. Manuel González Flores desarrolló un

sistema de aislamiento de base con placas de acero y balines (figura 3.19). Este sistema se incorporó a dos edificios de cinco niveles, que hasta la ahora han mostrado un buen comportamiento. La limitante principal de estos dispositivos es que carecen de un mecanismo disipador de energía que reduzca la demanda de disipación de la estructura. Sosa y Ruiz (1992) determinaron el comportamiento analítico de uno de los edificios de cinco niveles, incorporando disipadores de energía de solera en forma de "U".

Los resultados muestran un adecuado comportamiento para edificios con periodos intermedios, ubicados sobre terreno duro.

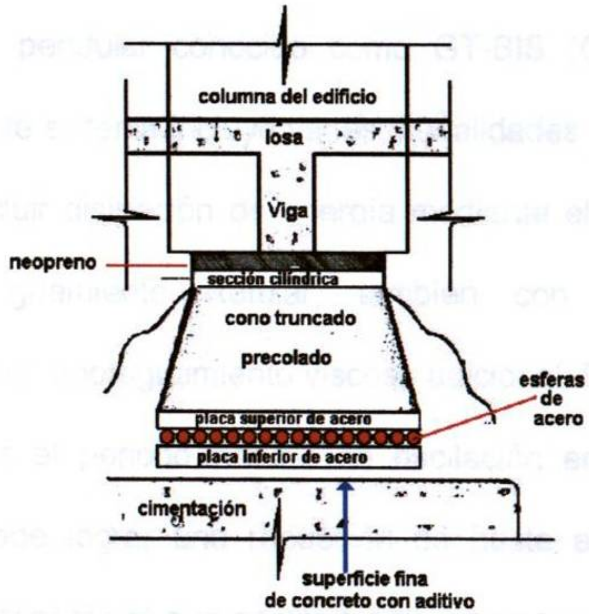

Fig. 3.19 Aislador de base, del Ing. Manuel González Flores.

Anderson propuso un sistema similar al del Ing. González, sólo que le incluyó dispositivos para el control de desplazamiento. Este sistema se aprecia en la figura 3.20. Según las pruebas hechas a un marco de diez niveles, reforzado con este sistema, gracias a este dispositivo se reducen en un 30 por ciento la

aceleración y los efectos P-Δ, con respecto a otro marco que no se refuerza con este sistema.

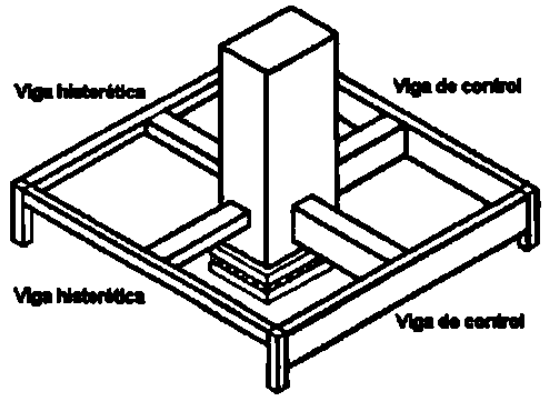

Fig. 3.20 Aislador con control de desplazamientos.

El Ing. Federico Garza Tamez, también mexicano, desarrolló un sistema de aislamiento sísmico pendular conocido como GT-BIS (Garza Tamez Base Isolator System). Este sistema incluye varias modalidades y tiene la ventaje de que se le puede incluir disipación de energía mediante el sistema que se ha denominado Amortiguamiento Rotular, también con dos modalidades, incluyendo y sin incluir amortiguamiento viscoso adicional. Este sistema tiene la facilidad de escoger el periodo natural de oscilación en los aisladores de manera que se puede lograr una reducción de hasta el 96 por ciento del cortante basal con respecto al que se produciría en una edificación empotrada en su base, además de que los efectos PΔ no producen en este sistema efecto dañino alguno Garza, F. (2001). El sistema GT-BIS es un sistema de aislamiento cuyo funcionamiento se basa en la acción pendular y en el añadido de elementos que proporcionen el amortiguamiento previamente graduado considerado más conveniente; en este sistema no existe ningún tipo de daño asociado con grandes deformaciones. Se ha visto que el sistema GT-BIS es

por lo general más efectivo en reducir el cortante basal durante un sismo que otros tipos de aisladores. Garza, F. y Silva, F. L. (1999). Este sistema se ha usado para aislar la nave de prensa del periódico REFORMA en la ciudad de México y se han obtenido excelentes Resultados. Garza, F. y Silva, F. L. (1999).

Kaneko y su grupo de colaboradores estudiaron la efectividad de cuatro tipos de aisladores de base, colocados en estructuras reales, en Japón. Ellos analizaron dos aisladores de hule laminados, combinados con dispositivos amortiguadores viscosos y con disipadores formados por placas de acero; los aisladores de hule eran de alto amortiguamiento y los aisladores de hule, con corazón de plomo. Dos de los edificios son de concreto reforzado de tres y cuatro niveles y uno de acero de ocho niveles. Estudiaron su comportamiento, según las solicitaciones de los sismos ocurridos en Japón, entre 1986 y 1989, con un intervalo de magnitudes entre 3.4 y 6.8. El comportamiento observado para estos eventos muestra reducciones de entre el 40 y el 67 por ciento, en la máxima aceleración de la azotea, normalizada con respecto a la registrada en la cimentación.

Algunos otros investigadores, entre ellos Buckle y Mayes determinaron analíticamente el comportamiento de un puente continuo de cuatro claros, colocando aisladores de base con corazón de plomo en los estribos. Se encontraron reducciones en los desplazamientos y fuerzas cortantes del 40% y 50% respectivamente.

Poco se ha avanzado en estudios que muestren la factibilidad económica de los sistemas aisladores de base. Kelly, junto con otros investigadores, hicieron una

estimación para una estructura aislada y otra sin aislar, según los métodos desarrollados por Ferrito (Jara, M. 1994). Las apreciaciones de los costos así obtenidas no pueden generalizarse, lo que reafirma la necesidad de realizar futuros estudios con este objetivo.

Como es bien sabido, la principal ventaja del aislamiento de base es que tiene la capacidad de reducir la respuesta de una estructura ante los sismos. Lo más importante es que el sistema de aislamiento de base reduce las aceleraciones que el terreno transmite hacia el edificio, lo que minimiza el daño a lo que este contiene. También el sistema de aislamiento de base es relativamente fácil de instalar y puede usarse en las estructuras como un sistema de refuerzo. Esto es particularmente ventajoso en el reforzamiento de los edificios históricos y los monumentos debido a que es mínimo su impacto en las formas arquitectónicas. Su principal desventaja consiste en que es funcional sólo para estructuras de periodo corto, desplantadas en suelos que no presentan periodos dominantes largos y para las cuales las fuerzas del viento no dominan el diseño.

Un sistema de aislamiento de base requiere cierta rigidez para los diferentes grados de libertad que puede presentar la estructura. Como consecuencia de esto, en lugares donde no hay suficiente claridad para los requerimientos de rigidez, una estructura aislada está siempre en peligro de que su aislamiento no sea suficiente en alguna dirección y eso, para pulsos impredecibles en la aceleración, puede generar que la estructura sea vulnerable. En realidad, poco se sabe acerca de los efectos de plastificación de los aisladores, de cómo sus

propiedades físicas y químicas pueden variar al pasar el tiempo y de cómo estas propiedades se ven afectadas por los factores de ambientales.

La integridad de un sistema de aislamiento de base depende totalmente de la integridad de los aisladores. El coeficiente de fricción de los sistemas deslizantes no puede determinarse con certeza; en particular, después de un periodo de inactividad. Las estructuras aisladas en su base necesitan ser analizadas para dos niveles de fuerzas símicas. Una que corresponda a las máximas fuerzas, antes de que el sistema empiece a trabajar y otra para la máxima intensidad sísmica, para la cual el sistema de aislamiento se supone completamente operativo.

Para los edificios con aislamiento sísmico, el modo fundamental de torsión está más cercano al modo fundamental de traslación de la estructura que su correspondiente caso de la estructura empotrada en su base. El aislamiento de base puede acercar los modos superiores de la estructura, a las frecuencias dominantes del movimiento del terreno que las excita. Como resultado de eso, puede incrementarse la respuesta de la estructura en estos modos superiores; también pueden afectarse las frecuencias altas de los elementos no estructurales. Debido a su comportamiento no lineal, los elementos amortiguadores añadidos a los sistemas aislantes para controlar los desplazamientos laterales pueden inducir aceleraciones altas en los pisos del edificio y puede que entonces ocurran daños en el interior.

Debido a la no linealidad de los sistemas de aislamiento y sus consideraciones para fuerzas grandes y pequeñas, el análisis para estructuras aisladas en su base se hace un tanto más complicado que el análisis convencional.

Presumiblemente, los edificios aislados son más caros que si se consideran empotrados. Como una generalidad se ha encontrado que no hay suficientes ahorros en el diseño de la superestructura para compensar los costos de los aisladores; pues el costo de una estructura con aislamiento es alrededor de un cinco por ciento más caro que lo que costaría una estructura empotrada.

Existe excepción en aquellas estructuras en las que se requieran dispositivos especiales para asegurar sus componentes no estructurales; por ejemplo, el edificio de dos niveles del Departamento de Bomberos en los Angeles resultó un seis por ciento más barato que lo que hubiera costado con un diseño convencional; sin embargo, los ahorros se compensan al no haber requerido dispositivos especiales para los componentes eléctricos o mecánicos.

Villaverde (1993), hace una revisión crítica de los sistemas de control activo y pasivo, y describe las principales estructuras en las que se han implantado. Del estudio se concluye que la aplicación de cada dispositivo depende de las propiedades dinámicas de los sismos y de las características propias de la estructura. Los costos actuales de estos sistemas deberán disminuir en un futuro, cuando su utilización se extienda de manera generalizada.

3.1.3 Osciladores resonantes

Un oscilador resonante está compuesto por una o varias masas adicionales, generalmente colocadas sobre el último nivel de la estructura o cercanas a éste, con ciertas propiedades dinámicas, cuyo propósito es reducir la respuesta de la estructura ante cargas dinámicas. La frecuencia de este sistema se escoge de tal forma para que se parezca a uno de lòs modos naturales del sistema. Se supones que estos dispositivos deben reaccionar y ser efectivos para excitaciones pequeñas.

El principio de operación de un sistema oscilador se basa en el hecho de que igualando su frecuencia a una de las frecuencias naturales de la estructura, ésta siempre se oponga al movimiento de la estructura y así desaparezca o disminuya la vibración de la estructura. Se ha aceptado que un sistema tal puede ser efectivo para reducir la respuesta de las estructuras sujetas a excitaciones de tipo armónico y también para contrarrestar las fuerzas de viento. Desafortunadamente no se puede extrapolar esto para los efectos que producen las cargas sísmicas.

La inclusión de una o varias masas adicionales, con propiedades dinámicas conocidas, sobre un edificio, puede reducir considerablemente su respuesta ante eventos sísmicos.

Den Hartog fue uno de los primeros investigadores interesados en el tema de sistemas con osciladores resonantes y demostró que con ciertos parámetros dinámicos del conjunto estructura- oscilador, pueden obtenerse reducciones

importantes de la respuesta. En un sistema de dos grados de libertad, si el periodo de la carga coincide con el periodo de vibrar del segundo nivel (piso adicional), el movimiento del primer nivel es nulo y el segundo se ve sometido a una fuerza de igual magnitud y sentido contrario a la fuerza de excitación. Debido a la existencia del amortiguamiento, ambas masas se mueven, pero los desplazamientos de la primera pueden reducirse de manera importante al elegir adecuadamente las propiedades dinámicas de la segunda masa. Cuando el sistema es elástico y las frecuencias están bien separadas, Den Hartog obtuvo expresiones para evaluar los parámetros del oscilador.

En la República de Armenia, investigadores como Korencv, Reznikov y Khachian, se han estudiado analítica y experimentalmente edificios de varios grados de libertad, con un piso adicional, sometidos a eventos sísmicos con características dinámicas diversas, obteniéndose reducciones de la respuesta a la mitad de la obtenida sin este (Jara, M. 1994).

Paniagua, es otro de los investigadores que han estudiado modelos matemáticos de un sistema de dos grados de libertad, considerando como masa adicional un tinaco con agua. La mayor reducción de la respuesta se encontró para excitaciones correspondientes a registros de la zona blanda del valle de México (temblores de banda angosta).

Generalmente, la masa y el amortiguamiento del piso adicional difieren considerablemente del resto de la estructura. Esto dificulta el análisis debido a la carencia de modos clásicos de vibrar. El problema ha sido tratado por varios

investigadores entre los que se encuentran: Warburton quien ha trabajado con Soni; Villaverde en colaboración con Newmark, Yang; Chen con ayuda de Soong, así como Ibrahim e Igusa. (Jara, M. 1994).

En la década pasada, se llevó a cabo un estudio analítico de un sistema de dos grados de libertad, en el que el primero representa a la estructura y el segundo a la masa adicional (Aguíñiga y Jara, 1993). Los resultados del análisis elástico permiten ver que una limitación importante para aplicar estos sistemas es que el oscilador se ve sometido a demandas de desplazamientos que resultan inalcanzables, desde un punto de vista práctico. No obstante, de acuerdo con lo hasta ahora obtenido, si se permite que la estructura tenga demandas de ductilidad moderadas, los desplazamientos del oscilador disminuyen considerablemente, lo que podría hacer aplicable al sistema. Los resultados no son todavía concluyentes, por lo que el estudio sigue en proceso.

Este tipo de dispositivos parecen ser una manera efectiva para añadirle amortiguamiento a una estructura y controlar así su respuesta dinámica. En comparación con otros sistemas de control de vibración, éstos ofrecen dos grandes ventajas: una es que su impacto en el diseño de la estructura es mínimo, debido a que una estructura en la que se utilicen estos medios no requiere procedimientos especiales de diseño y la otra es que son fáciles de diseñar y construir, no se requieren técnicas especiales y su construcción tampoco requiere personal muy calificado.

Como ventaja adicional, se tiene la particularidad de no depender de fuentes externas para su operación, que no interfieren con la trayectoria de cargas en la estructura, y que, además, pueden responder a pequeños niveles de excitación, sus propiedades pueden ser ajustadas en el campo, pueden ser considerados como sistemas de reforzamiento y una sola unidad puede ser efectiva para reducir las vibraciones inducidas por los sismos, el viento y el tráfico, requieren poco mantenimiento y pueden resultar costeables. La desventaja que puede presentar es que normalmente una masa grande requiere gran espacio para su instalación y su efectividad depende de su buena calibración.

Estos dispositivos son solamente efectivos para controlar la respuesta de uno de los modos de la estructura. Se requieren varias masas para controlar la respuesta de varios modos y su efectividad está limitada por la magnitud del máximo peso que pueda colocarse sobre la estructura.

3.1.4 Cables de presfuerzo

Éstos se usan para rigidizar a la estructura e incrementar así la carga axial en las columnas, lo que se traduce en una reducción, sólo en algunas ocasiones, los giros en sus extremos. Estos sistemas tienen como objetivo aislar la cimentación, de la superestructura. Al colocarlos se alarga considerablemente el periodo fundamental de vibración de la estructura.

Los cables se han aplicado fundamentalmente en lugares donde los principales temblores que ocurren tienen gran contenido de frecuencias altas; de esa forma, la estructura se aleja de los periodos con amplificaciones importantes del

terreno. Los enormes daños provocados por los temblores de septiembre de 1985 obligaron a buscar sistemas alternativos de reparación y reforzamiento de las estructuras. Uno de los sistemas propuestos y usados en el reforzamiento de escuelas fue la inclusión de cables de presfuerzo, como contravientos de la estructura para incrementar su resistencia y rigidez, este sistema fue propuesto por Rioboo quien se ha preocupado por estudiar este tipo de fenómenos.

Se han llevado a cabo estudios analíticos y experimentales del comportamiento de estos sistemas, que muestran reducciones importantes en la respuesta al incorporar los cables. Aunque no es propiamente un sistema de disipación, el comportamiento de las estructuras analizadas con este dispositivo, lo hacen particularmente atractivo como una posible fuente para la reducción de daños sísmicos.

Los estudios anteriores se han limitado a estructuras pequeñas, con estructuraciones típicas de escuelas, sujetas a excitaciones sísmicas de registros cercanos a los epicentros (costa del pacífico de México) y alejados de ellos (Ciudad de México). Uno de los parámetros considerados en los análisis fue la variación de las fuerzas cortantes de entrepiso con la inclinación de los cables. Para los casos estudiados se concluye que, al graficar la fuerza cortante contra desplazamiento relativo del entrepiso, cuando se ha implantado el uso de los cables, el comportamiento lateral es prácticamente elástico, por lo que los edificios deben diseñarse para una demanda de ductilidad de uno.

La bondad del sistema se ha comprobado en estudios de edificios de uno y de dos niveles. La solución, sin embargo, es seductora para edificios pequeños y de mediana altura. Esto se comprueba en los estudios analíticos de Jara, *et. al.* (1992) y algunos otros investigadores como Gómez, donde se muestra que para edificios diseñados originalmente con demandas de ductilidad de dos y cuatro, éstas pueden reducirse de manera apreciable, al incluir los cables de presfuerzo (Jara, M. 1994).

3.2 Dispositivos de control activo

El control activo es un sistema que controla o modifica el movimiento de una estructura mediante fuerzas controladas externamente. En general, un sistema de control activo se haya compuesto por cuatro elementos: la estructura, los sensores, la unidad de control y los actuadores. Los sensores detectan la respuesta de la estructura y a la vez las características del movimiento del terreno que la excita.

La computadora procesa la información de los sensores, de acuerdo con un algoritmo, determina las fuerzas de control necesarias para contrarrestar el movimiento y activa los actuadores, los cuales, impulsados por una fuente de energía externa, inducen las fuerzas requeridas para compensar las fuerzas símicas o el cambio en las características dinámicas de la estructura.

Hasta la fecha, se han desarrollado dos tipos de control activo. En el primero, las fuerzas de control externo se usan directamente para balancear las fuerzas

símicas y en el segundo se utilizan para cambiar las propiedades dinámicas de las estructura, de tal forma que no pueda presentarse el fenómeno de resonancia de la estructura y el terreno. Así, el control activo se basa en el principio de eliminar las vibraciones de una estructura mediante la aplicación de fuerzas externas.

Se describen a continuación los principales sistemas desarrollados en la actualidad.

3.2.1 Masa activa

Este sistema es una extensión del sistema pasivo con osciladores resonantes. El movimiento de la masa sobre el último nivel de la estructura se controla por medio de una computadora que detecta el movimiento del edificio a través de los sensores y envía a los actuadores el movimiento que se debe aplicar a las masas.

A diferencia del sistema pasivo, el activo controla el movimiento del edificio para temblores de banda angosta y de banda ancha.

La primera aplicación de este sistema se hizo en Japón, para un edificio de acero de 11 niveles, este proyecto fue desarrollado por Toyama. Las mediciones de la respuesta ante la acción del viento mostraron que el movimiento lateral del edificio es de alrededor del 30% del que tendría, si no existiera la masa activa.

La imagen de modelo a escala con dispositivos de masa activa se aprecia en la figura 3.21.

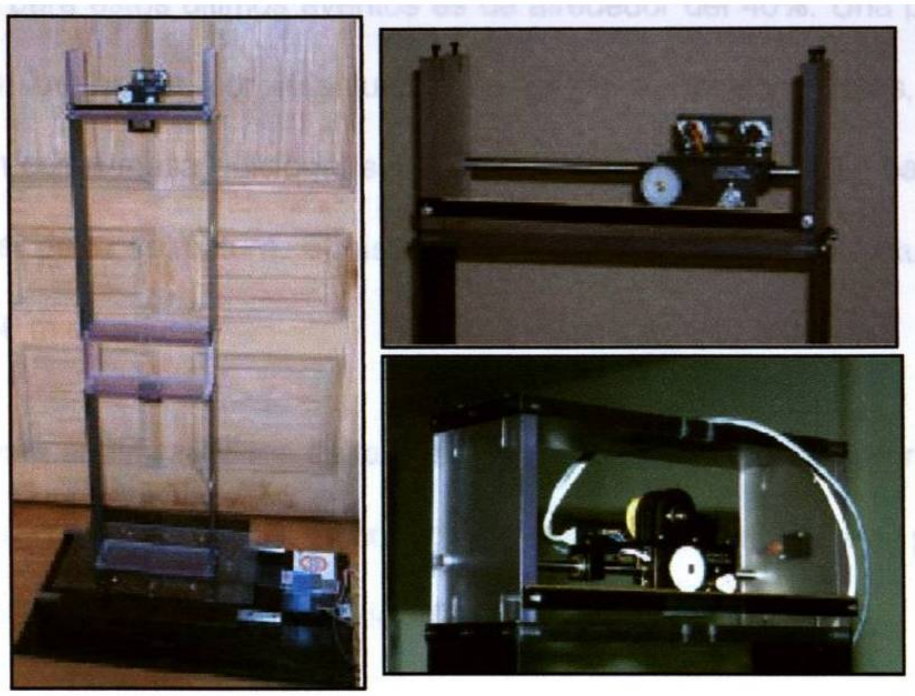

Fig. 3.21 Modelos a escala, de masa activa.

Una de las principales desventajas de estos sistemas es la gran demanda de energía que se requiere para aplicar las fuerzas de control. Encaminados a ampliar la aplicación de estos dispositivos, se han propuesto diversos sistemas, como el descrito por Maebayash, quien propone un sistema de control similar al anterior, pero con el uso del sistema de masa tanto activa como pasiva, con lo que se logra disminuir la energía necesaria a la tercera parte, para el control de viento y sismos moderados. El sistema se encuentra instalado en Japón en un edificio de siete niveles (Jara, M. 1994).

Similar al anterior, Fujita, es otro investigador quien describe el estudio experimental de un modelo a escala natural, de seis niveles, en el que se

incorporó una masa de control activo para viento y temblores moderados, que se convierte en pasiva para temblores de gran magnitud. La reducción de la respuesta para estos últimos eventos es de alrededor del 40%. Una propuesta similar es fue hecha por Kitaniura y su grupo de colaboradores, quienes incorporan como masa adicional seis tanques sobre aisladores de base, en el último nivel de la estructura. El sistema se incorporó en una estructura de 21 pisos y 130 m de altura.

La respuesta analítica de los desplazamientos con control activo representa el 35 % de la estructura sin control, cuando la masa actúa como sistema pasivo, la máxima reducción encontrada es del 10 %.

3.2.2 Tendones activos

Los tendones son contravientos colocados diagonalmente en forma de "X", que abarcan uno o varios niveles de la estructura. Las fuerzas que se requiere aplicar a los tendones se obtienen de manera similar al sistema anterior.

Se han desarrollado también tendones activos para modificar las propiedades dinámicas de la estructura, cuyo objetivo es alejar el periodo fundamental de la estructura, de las frecuencias dominantes del temblor, para cada instante a fin de evitar el efecto de resonancia. Una de las posibles alternativas es la de modificar la inclinación del tendón, con el tiempo, lo que permite cambiar la rigidez de los marcos.

3.2.3 Dispositivos de fricción activos

Akbay y Aktan, en la década de los noventas, propusieron un sistema de control activo, que disipa energía por fricción, similar al pasivo de Pali. El sistema puede controlar la fuerza umbral de deslizamiento de los dispositivos, en condiciones de servicio y en condiciones últimas.

Además de los sistemas descritos, existen también los del tipo "híbridos", que combinan las bondades de los sistemas activo y pasivo. Tales sistemas híbridos son capaces de superar algunas de las limitaciones de los sistemas activos y pasivos, actuando cada uno por separado, esto se traduce en una gran bondad, si se compara contra los sistemas convencionales activos; la principal ventaja es que reducen los requerimientos de fuerza que debe proporcionar el actuador y la fuente de poder. Ejemplos de este tipo de sistemas híbridos son: el amortiguador de masa oscilante y el sistema activo de aislamiento de base.

El concepto de control activo es interesante. Debido a que este tipo de sistema constantemente está monitoreando las características de la excitación y la respuesta estructural; en principio, la efectividad es independiente de las características de excitación y las condiciones del sitio, lo único que lo limita es la capacidad de los actuadores. En principio, es efectivo para reducir las vibraciones inducidas por las excitaciones pequeñas, moderadas o de gran intensidad. Además, puede usarse para proteger a la estructura de acciones tan fuertes como los sismos y los vientos fuertes; pero, al mismo tiempo, para

eliminar las vibraciones constantes inducidas por el viento y el tráfico. Sin embargo, tiene también sus desventajas.

Debido al equipo tan sofisticado que se requiere, este tipo de sistemas resultan muy caros; su mantenimiento tienen que ser continuo y es de suma importancia que siempre esté bien calibrado; en particular, cuando el sistema se usa con frecuencia. Un sistema de control activo depende mucho de la fuente de poder; sin embargo, éstas son vulnerables a sismos severos y es posible que lleguen a fallar cuando más se les necesite; así que es conveniente que se tenga una fuente de poder de reserva, para considerar esta posibilidad; sin embargo, tener esa fuente de reserva aumenta el costo considerablemente.

El control de obras civiles requiere que fuerzas de gran magnitud sean aplicadas a altas velocidades; es por ello que la aplicación del control activo a estas estructuras requiere actuadores que sean capaces de desarrollar esas fuerzas. A causa de que la respuesta de los actuadores requiere tiempo para calcular y determinar la magnitud de las fuerza en ellos, siempre se tendrá un tiempo inherente al retardo entre el tiempo de lectura y el tiempo de respuesta. Un sistema de control activo puede resultar fatal si los actuadores no responden en el tiempo correcto. Se requiere de un algoritmo para calcular las fuerzas en los actuadores; sin embargo, este cálculo se hace basándose en la suposición de que el modelo se comporta linealmente, aseveración que no necesariamente es cierta.

3.3 Comentarios

Con base en el análisis presentado, es muy importante destacar que cada uno de los sistemas resulta una alternativa atractiva para utilizarse como solución para los problemas sísmicos; sin embargo, es necesario que cada uno de estos sistemas siga siendo estudiado y, sobre todo, aceptado como una alternativa más, para el diseño ante solicitaciones sísmicas, en la práctica profesional, siempre y cuando se compruebe su efectividad en cada caso en particular.

Además de que cada dispositivo tiene qué estudiarse para cada caso específico, por ejemplo, en el caso del aislamiento de base, es posible que los desplazamientos que resulten sean muy grandes y debido a esto pueda ocurrir que la estructura resulte vulnerable ante los efectos de torsión, estos son casos que no se han estudiado aún lo suficiente y por ello, todavía hay que ahondar en esa línea.

En el caso de los híbridos, como el sistema de masa activa controlada y el sistema activo de aislamiento de base, algunas preguntas permanecen sin respuesta, la efectividad o certidumbre en los algoritmos utilizados y lograr que los actuadores tengan la suficiente potencia para producir las fuerzas necesarias para oponerse al movimiento.

Para las masas resonantes, aún no se ha encontrado una solución satisfactoria para integrar la masa necesaria al diseño de la estructura, para minimizar las fuerzas de fricción debidas a la oscilación libre de esa masa y garantizar así que la masa permanezca calibrada todo el tiempo.

En el caso de los dispositivos ADAS, hay que asegurar que no ocurran corrimientos en las placas, definir el número óptimo de dispositivos y su localización así como la elección del adecuado umbral de cedencia, son algunas preguntas que siguen en el aire. La aplicación de los sistemas anteriores depende de parámetros, que involucran las características de los eventos sísmicos, la localización y el tipo de estructura.

Los disipadores de energía son una opción viable para la disminución de los daños provocados por temblores en la República Mexicana, para ciertas características de las edificaciones. Sin embargo, es necesario comparar su comportamiento con sistemas alternativos que permitan elegir el más adecuado económica y estructuralmente. Por la manera en que disipan energía (mediante desplazamientos relativos entre dos niveles consecutivos) y de acuerdo con los resultados hasta ahora obtenidos, su utilización resulta atractiva para edificios pequeños y de mediana altura.

El principal objetivo de los aisladores de base consiste en flexibilizar la estructura. La esbeltez es uno de los parámetros que restringe su uso, debido a los momentos de volteo y a los desplazamientos laterales. Las mayores reducciones de la respuesta se obtienen en estructuras con periodos pequeños, bajo excitaciones con grandes contenidos de frecuencias altas. Debido a lo anterior y a los posibles asentamientos diferenciales, no parece atractivo su uso en la zona blanda de la ciudad de México, aunque sí en otras partes de la República, como son las costas del Pacífico.

El oscilador resonante es un sistema promisorio para estructuras con comportamiento lineal. Los estudios que actualmente se llevan a cabo permitirán definir la aplicabilidad de este sistema. El incremento de la capacidad de disipación del sistema se podría lograr con la incorporación de disipadores de energía, o bien con un piso adicional de comportamiento elastoplástico y adecuada ductilidad. Otra posibilidad que hace atractivo al sistema es permitir demandas de ductilidad pequeñas en la estructura, cuando ésta se vea sometida a eventos sísmicos de gran magnitud.

Los cables de presfuerzo son una solución atractiva para estructuras pequeñas y de mediana altura y para cierto tipo de temblores. Aunque no modifican, de manera importante, la capacidad de disipación de energía de la estructura, incrementan su rigidez y resistencia, y mejoran el comportamiento sísmico, con la contribución de la estructura existente.

Los sistemas de control activo se encuentran en desventaja, en nuestro país, con respecto a los pasivos, por su elevado costo y la necesidad de mantenimiento periódico; aunque se sabe que pueden controlar más eficazmente el movimiento de la estructura.

Es de esperarse que en el futuro se desarrollen con mayor frecuencia combinaciones de sistemas pasivos y activos (sistemas híbridos) que disminuyan las limitaciones de los primeros y reduzcan las fuerzas de control necesarias, con la consecuente disminución del costo.