SISTEMAS DE CONTROL DE VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS DE GRAN ALTURA

(VIBRATION CONTROL SYSTEM IN VERY HIGH STRUCTURES)

Msc. Ing. Maria Inés Montanaro
Facultad de Ingeniería, Universidad Nac. del Centro de la Pcia. de Buenos Aires

ARGENTINA

Fecha de recepción: 30-VII-2001

407-7

RESUMEN

El aumento de la densidad poblacional y de las grandes urbes ha incrementado la necesidad de las torres de edificios de gran altura, las cuales tienden a ser muy livianas y delgadas, por lo tanto poseen un amortiguamiento natural muy pequeño, lo que los hace más propensos a las oscilaciones del viento y los sismos. Dichas oscilaciones pueden causar daño a la estructura, afectar su funcionalidad y/o causar incomodidad. Una solución planteada para reducir el riesgo estructural de experimentar deformaciones excesivas o aceleraciones es la disipación de energía vibracional en los amortiguadores estructurales.

El objetivo de este trabajo es brindar una clasificación clara y completa de todos los sistemas de aislación y control de vibraciones existentes hasta al momento, además de una descripción de los mismos y sus principales campos de aplicación. La definición de los sistemas incluye gráficos, características y ejemplos de estructuras. Esta clasificación permitirá una conveniente interpretación de beneficios y desventajas de todos los sistemas de aislación y control de vibraciones para las aplicaciones estructurales.

SUMMARY

The increasing of big cities with a great population density, flows to the multiplication of light and thin towers in very high buildings, with an small natural damping. So, those buildings are exposed to the wind oscillations and to the earthquakes. Those oscillations could produce damages in the structure, affect its functionality and/or to be a cause of discomfort. In order to reduce the structural risk of excessive deformations or accelerations, we want to bring up here a solution lied with the dissipation of vibrational energy in the structural dampers.

The objective of this work is to bring a clear and complete classification and description of all isolation and vibration controls known till the moment and their main application fields. The definition of those systems is completed with graphics, characteristics and structures examples. This classification will allow a real interpretation of advantages and disadvantages of all isolation and vibration controls concerning structural applications.

INTRODUCCIÓN

En el diseño de estructuras, en principio se consideran los efectos gravitatorios y las cargas adicionales debidas a las sobrecargas según el uso del edificio. Cuando la estructura demanda una protección adicional para fuerzas ambientales como el viento, mareas y sismos, la solución para la tipología estructural empleada se puede encontrar en los sistemas de aislación y control de vibraciones. Las cargas de viento y/o los sismos, las cuales nunca son estáticas o unidireccionales, y cuyas magnitudes son más difíciles de predecir que las cargas gravitacionales, se deben considerar y modelar tal que reproduzcan la situación real. Por lo tanto, el estudio de la respuesta estructural debe tener en cuenta estos efectos. El uso de estos sistemas se ha incrementado y desarrollado notablemente en los últimos años en el área de la ingeniería estructural, habiendo en el mundo una enorme cantidad de edificios construidos con estas técnicas.

En muchos casos la carga predominante de diseño de estructuras esbeltas son las cargas de viento. En estructuras muy altas (más de 70 m), las vibraciones causadas por el viento provocan problemas en la estructura principal, los

Informes de la Construcción, Vol. 53, nº 477, enero-febrero 2002

revestimientos, equipamiento y ocupantes. Las aceleraciones, causadas por las vibraciones, que se producen en los pisos superiores son perceptibles por las personas provocando incomodidad y algunas veces conduciendo al abandono del lugar de trabajo por algunas horas. La percepción de las vibraciones también se presenta en las torres de observación de los aeropuertos, que se construyen a una gran altura, donde trabajan los controladores del tráfico aéreo en el piso superior. La percepción humana del movimiento de una estructura se debe casi enteramente a la componente fluctuante del movimiento. La percepción está ligada a la vibración de la estructura, ya sea por flexión o por torsión, y no a la deflexión. El tratamiento cuantitativo de este problema es complejo porque la sensibilidad humana a las vibraciones depende de la posición de las personas (parada, caminando, sentada o acostada), la atención que dedica a su actividad, ruidos del viento o de la estructura misma, y visualización de movimientos (por ejemplo, el movimiento del agua de una pecera). Los efectos torsionales inducidos por el viento provocan una distribución de presión no equilibrada sobre la superficie del edificio. Los efectos de la carga de viento son amplificados si el edificio es de forma asimétrica porque son más sensibles dinámicamente. Por lo tanto no sólo es necesario realizar un diseño basado la seguridad estructural sino también incluir el punto de vista del confort de los ocupantes. (1)

El control de vibraciones en zonas sísmicas no sólo se limita a edificios de altura, sino a todas las estructuras (principalmente hospitales) que necesariamente deben seguir funcionando después de un sismo severo. El mejoramiento de la seguridad sísmica de edificios ya construidos, constituye un problema de enorme envergadura económica. Por un lado, puede suceder que existan edificios que hayan sido dañados por terremotos anteriores o, por otro lado, la nueva evidencia sismológica demuestra que no son aptos para resistir los terremotos esperados en la zona durante su vida útil. La alternativa para lograr un aumento de la seguridad estructural, son los disipadores pasivos de energía, que constituyen una forma económicamente viable de encarar estos problemas. Tradicionalmente, el diseño sismorresistente se basa en satisfacer la ecuación de demanda externa y capacidad de la estructura. La demanda considera las fuerzas externas y deformaciones generadas en la estructura por el sismo; la capacidad considera la resistencia y deformabilidad que puede ser desarrollada por la estructura sin comprometer su estabilidad. Así, un diseño seguro es el que cumple con Capacidad > Demanda. El diseño sismorresistente convencional ha tratado siempre de satisfacer esta desigualdad a través de aumentar la capacidad de los elementos estructurales. Lo que aportan los sistemas de aislación al diseño sismorresistente convencional, es satisfacer la ecuación Capacidad > Demanda reduciendo la demanda. Esto no significa que alteremos la excitación, pero sí lo que percibe el sistema estructural a través de modificar sus propiedades dinámicas de rigidez y amortiguamiento, de modo que las vibraciones inducidas sean considerablemente menores.

Hace algunos años no se colocaban los sistemas de aislación y control de vibraciones en forma más generalizada por una razón económica. A medida que se comiencen a utilizar y sean mundialmente aceptados, el costo de estos sistemas irá disminuyendo progresivamente y la relación costo-beneficio es cada vez mayor. Generalmente el costo de estos sistemas no supera el 1% del costo total de la obra.

CLASIFICACIÓN GENERAL

Los sistemas de reducción de vibraciones se pueden dividir en dos grandes grupos:

1-Sistemas de aislación
2-Sistemas de control de vibraciones

El campo de aplicación de los sistemas de aislación se restringe a la aislación sísmica y los sistemas de control de vibraciones se aplican principalmente para controlar las oscilaciones producidas por el viento, la disipación de energía en este caso se produce bajo deformación cíclica y su efecto de reducción de respuesta es significativo en casos donde existe una acumulación energética durante varios ciclos de vibración. En forma adicional, su efecto es despreciable en el caso de una solicitación impulsiva de duración mucho menor que el período de vibración de la estructura.

a) Carga Sísmica

Los movimientos horizontales del suelo en un sismo producen deformaciones que causan daño al edificio, si fuera posible "sostener" el edificio y permitir que los movimientos pasen por debajo, se conseguiría, de esta forma, que el daño estructural se redujese en gran medida. El sistema de aislación de la base reduce la energía que recibe el edificio durante los sismos. El concepto principal en la aislación de la base es reducir la frecuencia fundamental de la vibración estructural a un valor más bajo que las frecuencias que contiene la energía predominante de los movimientos sísmicos. El otro objetivo de los sistemas de aislación es proporcionar un medio para la disipación de energía, reduciendo así la aceleración transmitida a la superestructura. Una de las desventajas de las aislaciones de base es que, en la mayoría de los casos, deben ejecutarse antes de la construcción del edificio, mientras que los sistemas de control de vibraciones se pueden colocar después si se dan las condiciones de espacio necesarias para su instalación.

b) Carga de viento

Los sistemas de control se puedan dividir en 2 grandes grupos: los sistemas pasivos y los sistemas activos. Los

sistemas activos, básicamente, registran la respuesta estructural y en tiempo real aplican fuerzas contrarias al movimiento, necesitando energía externa para funcionar, siendo ésta su principal desventaja. Los sistemas pasivos, en cambio, se ponen en funcionamiento utilizando la energía excitadora de la carga externa. Existen otros amortiguadores que no son ni pasivos, ni activos son los llamados *semiactivos o híbridos*, que poseen los beneficios de los sistemas activos optimizados, pero no necesitan energía externa para comenzar a funcionar. Estos sistemas de control de vibraciones se instalan en todo el edificio o en el piso superior.

En la Figura 1 se muestran los subgrupos de cada clasificación respectivamente, que se ampliarán y desarrollarán en las secciones siguientes.

SISTEMAS DE AISLACIÓN

La totalidad de los sistemas de aislación desarrollados en este apartado se instalan entre cada base y columna del edificio a aislar.

Los *apoyos de goma laminada con capas de acero* transmiten las cargas verticales del edificio y absorben la energía sísmica, además de evitar las vibraciones producidas por el viento. El propósito de las capas de acero es acotar los desplazamientos verticales de la goma. El amortiguador en conjunto son láminas de acero que se intercalan entre las láminas de goma. Se muestra un aislador de esta clase en la Figura 2. Estos aisladores son de sección cuadrada o circular, de diámetro aproximado de 50 a 80 cm. La sección cuadrada presenta algunas desventajas frente a

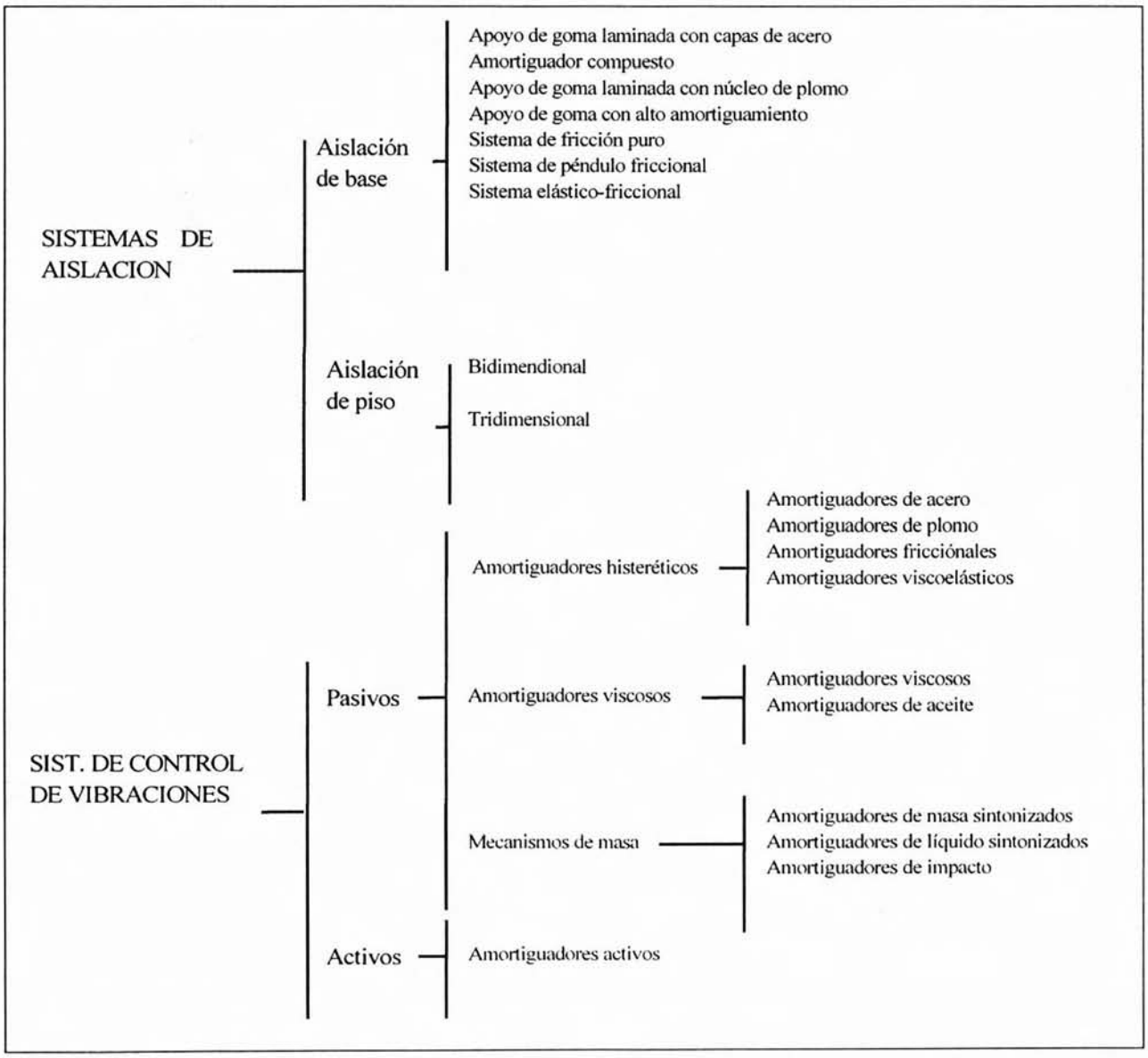
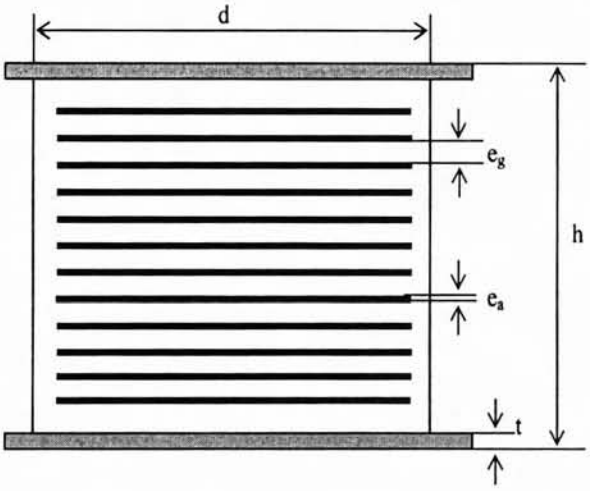


Figura 1.- Sistemas de reducción de vibraciones.



d: diámetro del aislador
e_g: espesor de la capa de goma
e_a: espesor de la capa de acero
h: altura del aislador
t: placa de acero

Figura 2.- Apoyos de goma laminada con capas de acero.

la circular debido a que, en la primera, pueden ocurrir, en las esquinas del aislador, concentraciones de deformaciones locales. Por otra parte, las distribuciones de tensiones en el aislador cuadrado son más complejas y dependen de la dirección del movimiento. Ambos aspectos se evitan con el uso de aisladores circulares. (2)

Los *amortiguadores compuestos* o también llamados *aislación de base híbrida* se componen de amortiguadores viscoelásticos y de acero combinados con láminas de goma. El comportamiento de un material es viscoelástico si acumula elásticamente parte de la energía de deformación y disipa el resto a través de fuerzas viscosas. Son adecuados para evitar las vibraciones verticales producidas por el tránsito vehicular, que tienen la característica de ser de alta frecuencia. Una aplicación es en hospitales y hoteles que están ubicados en las proximidades de líneas ferroviarias o autopistas.

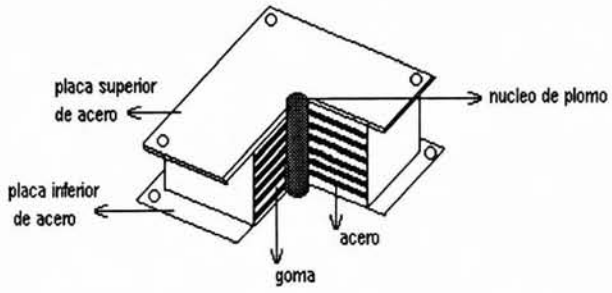


Figura 3.- Aislador de goma con un núcleo de plomo.

Para lograr niveles más altos de amortiguamiento (20% al 40%) se utiliza el aislador de goma con un núcleo de plomo que también se conocen como sistemas de goma Nueva Zelandia. Este aislador es idéntico al apoyo de goma laminada con capas de acero salvo que en el centro se le adiciona el núcleo de plomo confinado por las láminas de acero y goma. En la Figura 3 se observa un esquema del mismo. Este núcleo cumple dos funciones primordiales. La primera es aumentar el amortiguamiento del aislador a través de la fluencia bajo deformación lateral del núcleo de plomo. Y la segunda, es la de rigidizar la estructura lateralmente para cargas de servicio y eventuales como el viento. Para lograr un buen funcionamiento mecánico del núcleo de plomo en el aislador se requiere un ajuste preciso entre éste y las placas intermedias de acero. Esto se logra haciendo que el volumen de plomo sea ligeramente mayor (1%) que el volumen del orificio, lo que produce una extrusión del plomo en las capas de goma y así el ajuste deseado. Es importante también que el núcleo de plomo se encuentre confinado por las placas intermedias de acero y las placas superior e inferior para garantizar una fluencia uniforme. (3)

Los *apoyos de goma con alto amortiguamiento* no necesitan de capas de acero debido a sus características de alto amortiguamiento, para un amplio rango de frecuencias y deformaciones típicas de diseño. El material de este aislador sigue siendo goma que contiene adiciones que modifican su composición química y un tratamiento especial.

Los *sistemas de fricción puros* se basan esencialmente en los mecanismos de deslizamiento fricciónales. La fuerza horizontal friccional ofrece la resistencia al movimiento y disipa la energía. El uso de capas de arena o rodillos en las fundaciones de los edificios es el más simple ejemplo de fricción pura para aislación de la base.

El *sistema del péndulo de fricción* consiste en una articulación de deslizamiento o "slider" que se mueve sobre una superficie esférica cóncava. Una vista y un corte del mismo se muestran en la Figura 4. Cualquier movimiento de

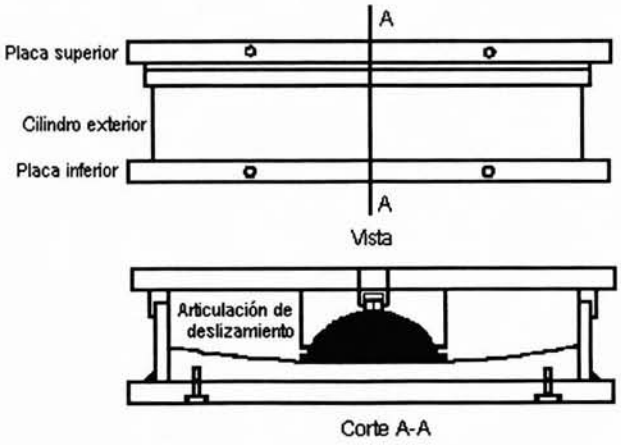


Figura 4.- Péndulo de fricción.

la base producirá un desplazamiento del "slider" a lo largo de esa superficie disipando energía por fricción. Sin embargo este deslizamiento al ser sobre una superficie curva hace que la carga vertical transmitida por el «slider» provoque una componente tangencial que tienda a centrar el sistema. Este aislador puede ser colocado tanto en su posición basal como invertida, mejorando así la posibilidad de mantener limpia la superficie esférica, a pesar de que existe un sello de goma alrededor del aislador que evita el ingreso de polvo y agua. Este sistema usa la gravedad y su geometría para alcanzar la aislación sísmica deseada.

Los *sistemas elásticos–friccionales* consisten en capas concéntricas de placas de teflón que están en contacto friccional unas con otras, y poseen un núcleo central de goma. Combinan el efecto de amortiguamiento friccional con la elasticidad de la goma. El núcleo de goma distribuye los desplazamientos y velocidades en toda la altura del amortiguador.

Su et. al. (4) realizaron un estudio comparativo de los diferentes sistemas de aislación de base, bajo 5 sismos de características diferentes, concluyendo que todos los sistemas analizados son adecuados para atenuar las aceleraciones del suelo y la deformación estructural. Los picos de aceleración son más bajos para los sistemas de apoyos de goma laminada con capas de acero y los sistemas de apoyos de goma laminada con núcleo de plomo, mientras que el desplazamiento de la base es más bajo para los sistemas de fricción puros. La presencia de elementos fricciónales en los sistemas de aislación permiten una respuesta menos sensible a los cambios de frecuencias e intensidad de las excitaciones sísmicas.

Los *pisos aislantes* (5) se utilizan cuando se desea aislar sólo una habitación del edificio y su principal ventaja es su menor costo con respecto a los aisladores de base. Estos sistemas se usan para aislar máquinas, computadoras y instrumental de precisión durante sismos. Los sistemas de pisos aislantes pueden ser bidimensionales o tridimensionales. Los sistemas tridimensionales consisten en un piso aislado donde se instalan las computadoras y instrumental de precisión, aisladores de goma laminada con capas de acero para controlar los movimientos horizontales, resortes especiales para controlar el movimiento vertical y amortiguadores de aceite para reducir los desplazamientos. En la Figura 5 se observa una foto del aislador de piso desarrollado por la empresa Mitsubishi Steel MFG. CO., LTD. Las principales características de los pisos aislantes son:

- Su gran efectividad tanto para movimientos horizontales como verticales.
- Sus excelentes características de recuperación después de un sismo.

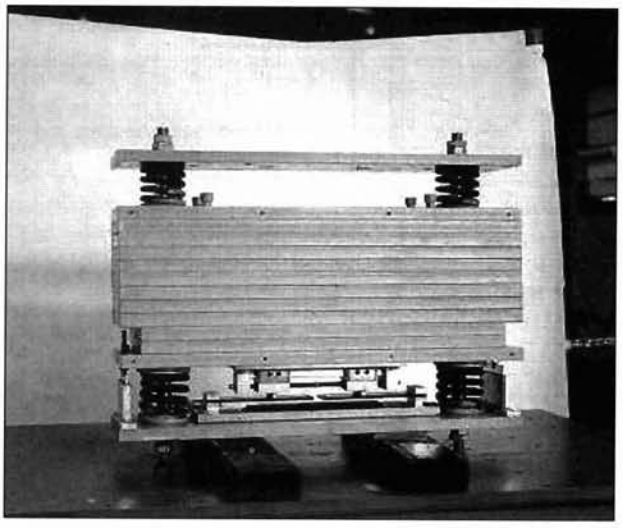


Figura 5.- Aislador de piso.

- Los resortes pueden resistir los desplazamientos causados por los sismos.

SISTEMAS DE CONTROL DE VIBRACIONES

Los sistemas de control de vibraciones se colocan en la estructura misma, y no en la base de las columnas como los sistemas de aislación. En los sistemas de control de vibración, la diferencia principal entre los sistemas activos y pasivos es que los primeros necesitan energía eléctrica externa para comenzar a funcionar.

Los *amortiguadores histeréticos* utilizan las características de amortiguamiento histerético de los materiales y sistemas. Son *los amortiguadores de acero, amortiguadores de plomo, amortiguadores fricciónales* y *los amortiguadores viscoelásticos*. Uno de los mecanismos más efectivos para la disipación de energía en una estructura metálica es a través de la deformación inelástica de sus componentes. La idea de la utilización de amortiguadores metálicos es que la mayor disipación de la energía sísmica se produzca en los mismos, disminuyendo la adsorción en la estructura. Para los amortiguadores viscoelásticos, los materiales usados en aplicaciones estructurales son típicamente polímeros o sustancias vidriosas las cuales disipan energía cuando están sujetas a deformación por corte. El comportamiento mecánico de los amortiguadores viscoelásticos es dependiente de la frecuencia de excitación, la temperatura de operación y el nivel de deformación del material. Estas variables deben ser consideradas dentro del análisis y diseño de una solución basada en amortiguadores viscoelásticos. En la Figura 6 se muestra un amortiguador viscoelástico que consiste en capas viscoelásticas entre placas de acero y en la Figura 7 se presenta la disposición de los mismos en la estructura. (6)

Por otra parte, se encuentran los *amortiguadores viscosos* que son *los amortiguadores viscosos propiamente dichos*

Informes de la Construcción, Vol. 53, nº 477, enero-febrero 2002

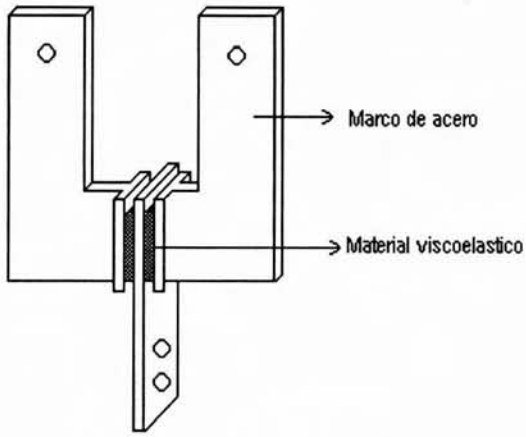


Figura 6.- Amortiguador viscoelástico.

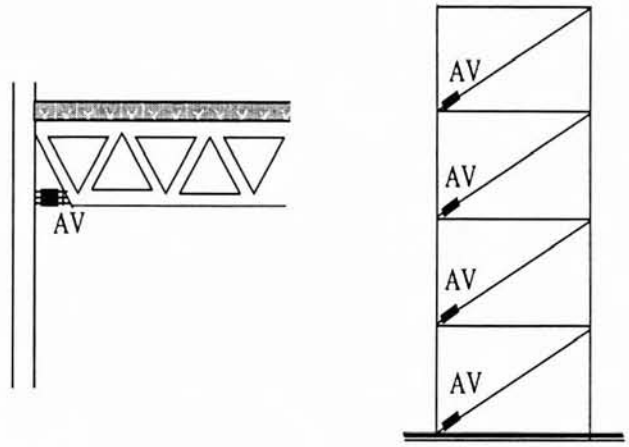


Figura 7.- Opciones de instalación de amortiguadores viscoelásticos (AV).

y *los amortiguadores de aceite*. En los amortiguadores viscosos, la disipación de la energía se produce en el fluido viscoso que contiene el recipiente donde se desliza el pistón, similar al funcionamiento del amortiguador del automóvil. Los amortiguadores de aceite consisten en una esfera de acero dentro de una cubeta con aceite y disipan la energía a través del impacto de las esferas con las paredes de la cubeta y el movimiento viscoso de la esfera en el aceite. *Koss et. al.* (7) realizaron estudios experimentales con diferentes tipos de cubetas (rectangulares y circulares), aceites con distinta viscosidad y esferas de tamaños distintos para hallar los parámetros óptimos. Para comparar los resultados definen la relación de amortiguamiento (una expresión que es función de la masa de la esfera, la masa de la estructura, viscosidad del aceite, desplazamiento inicial y frecuencia). En todos los casos se produce un aumento del amortiguamiento superior al 10 por ciento.

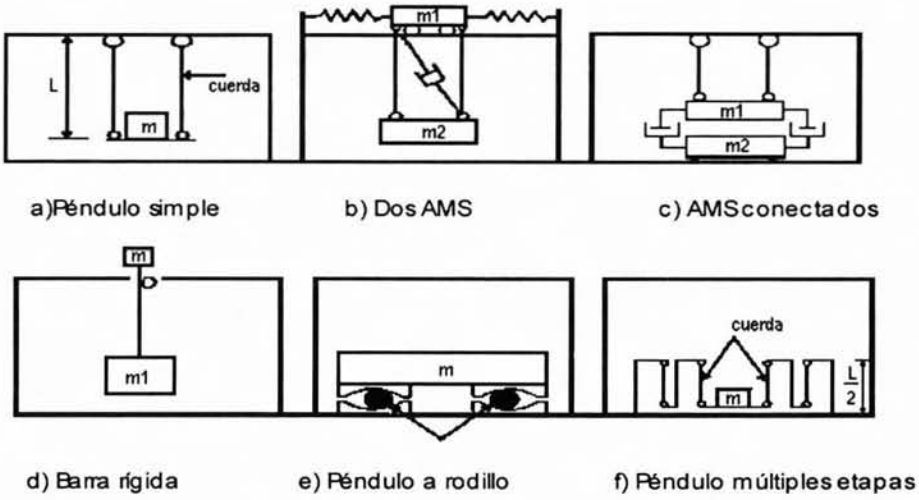
Dentro de *los mecanismos de masa* se encuentran los *amortiguadores de masa sintonizados (AMS)* y *los amortiguadores de líquido sintonizados (ALS)* y sus subgrupos, como *los múltiples amortiguadores de masa sintonizados (MAMS)* y *los amortiguadores de columna de líquido sintonizados (ACLS)*.

El amortiguador de masa sintonizado (AMS) es una herramienta ingenieril clásica consistente en una masa, un resorte y un amortiguador viscoso colocados en el sistema vibrante principal para atenuar la vibración no deseada a una frecuencia determinada. La frecuencia natural del amortiguador se *sintoniza* cerca de la frecuencia natural del sistema principal provocando que el amortiguador vibre en resonancia, disipando la energía absorbida a través de los mecanismos de amortiguamiento del AMS. Los parámetros de diseño del AMS que se deben hallar para lograr la máxima eficiencia del mismo, son la relación de frecuencia (frecuencia del amortiguador/frecuencia de la estructura), la relación de amortiguamiento y la relación de masa (masa AMS/masa de la estructura). Los AMS sólo pueden ser sintonizados a una sola frecuencia estructural.

Como es de esperarse, para sistemas de *n* grados de libertad, la efectividad es mayor cuando la estructura oscila alrededor de un modo predominante. Puede ocurrir que los desplazamientos correspondientes al primer modo de la respuesta se reduzcan considerablemente, mientras que los desplazamientos de los modos altos se incrementen cuando el número de pisos aumenta. Esta dificultad se soluciona colocando varios AMS que cubren una banda de frecuencias (MAMS). Los AMS instalados en edificios pueden ser de formas diferentes. La ubicación del AMS es en el último piso del edificio. En la Figura 8 se muestran las implementaciones más usuales. En el caso a) es un simple péndulo, cuyo período de vibración depende sólo del largo de mismo, siendo su principal desventaja el gran espacio requerido para su instalación, en algunos casos más de la altura de un piso. En el caso b), c), y d) la cuerda del péndulo es una barra rígida y se utilizan dos masas, una de las cuales está apoyada en el piso. Cuando hay limitaciones de espacio se puede utilizar un amortiguador de péndulo de rodillo (caso d). Otra solución es el péndulo múltiples etapas como el mostrado en la figura e), que reduce el espacio vertical necesario a la mitad. En la Figura 9 se muestra una foto del amortiguador de masa sintonizado.

Los MAMS consisten en un gran número de pequeños osciladores con frecuencias naturales distribuidas alrededor de la frecuencia natural del modo principal de la estructura. Una de las desventajas de los AMS es su sensibilidad a un error en la frecuencia natural de la estructura y/o la relación de amortiguamiento del AMS, disminuyendo su efectividad. Para disminuir este problema, se propuso la utilización de más de un AMS con diferentes características dinámicas para mejorar la robustez, y ser menos afectada la eficiencia por las incertidumbres del sistema principal o del AMS. Los MAMS se distribuyen en toda la altura de la estructura.

El ALS (amortiguador de líquido sintonizado) es, en el caso más general, un tanque que contiene líquido, que, en



m, m1, m2: masa
L: longitud de la cuerda

Figura 8.- Configuraciones de AMS.

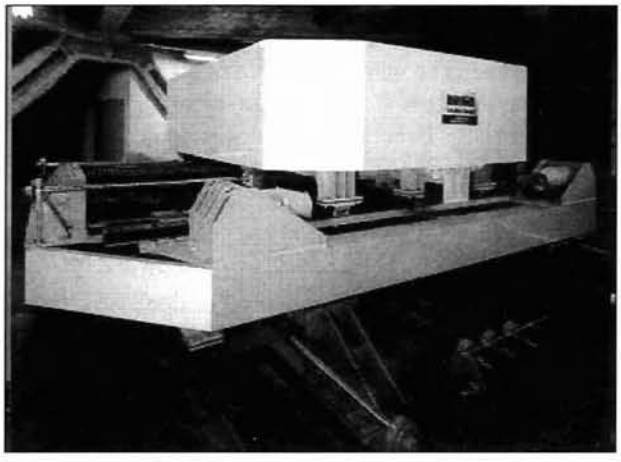


Figura 9.- Amortiguador de masa sincronizado.

muchos casos, es agua que, como el AMS, debe ser sintonizado para que absorba las vibraciones y disipe energía. Los ALS absorben la energía de la vibración por el movimiento oscilante del líquido contenido en el recipiente y la disipan a través de la fricción intrínseca del líquido y la fricción con la superficie de las paredes. Se ha utilizado para aumentar la disipación de energía piezas cilíndricas de polietileno que flotan en el líquido. La frecuencia del ALS, que se ajusta con la altura del agua y la dimensión de los recipientes, *se sintoniza* con la frecuencia natural del edificio. También, dentro de este grupo, podemos citar los ACLS (amortiguadores de columna de líquido sintonizados), que pueden tener forma de V o U, sección horizontal diferente a la vertical y, en algunos casos, una placa transversal con orificios ubicada en la sección horizontal que proporciona el amortiguamiento necesario. Los ALS son utilizados principalmente para disminuir las vibraciones producidas por el viento en estructuras muy altas. Sus ventajas son: su bajo costo inicial, que no necesita ningún mecanismo de activación y el bajo mantenimiento requerido. La cantidad de recipientes, sus dimensiones, números de capas, la altura del líquido cambian enormemente de acuerdo al edificio que se analice. Generalmente están ubicados en el piso más alto de la estructura. (6)

En este grupo también podríamos mencionar los *amortiguadores de impacto* (cadenas colgantes). Un *amortiguador de cadenas colgantes* consiste en una cadena que cuelga desde la parte superior de la estructura que esta vibrando y cuando la estructura se mueve, se incrementa la amplitud del movimiento del extremo libre de la cadena. Si la amplitud es suficientemente grande se produce un impacto entre la cadena y la estructura y si la cadena esta dentro de un cilindro, de un determinado diámetro, se puede producir más de un impacto por ciclo. El impacto no sólo ocurre en el extremo libre de la cadena, si la vibración es severa se produce también a lo largo de la misma. Los mecanismos de disipación de energía son dos: la pérdida de energía debida al impacto ineslástico de las cadenas contra las paredes de cilindro y la fricción interna entre los eslabones de las cadenas de goma. En la Figura 10 se observa un esquema de amortiguador de impacto. (8)

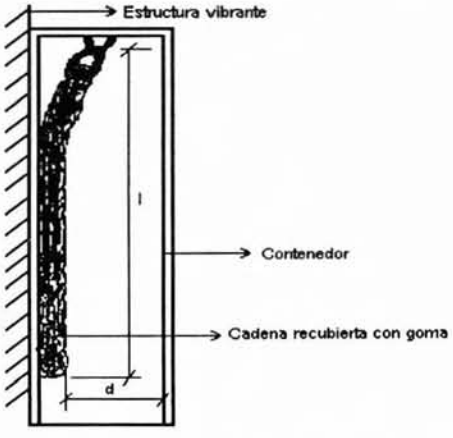


Figura 10.- Amortiguador de impacto.

Informes de la Construcción, Vol. 53, nº 477, enero-febrero 2002

Los *amortiguadores activos* son diseñados de tal manera que puedan eliminar la fuerza exterior aplicada, lo cual no siempre es posible. Para lograr lo dicho anteriormente se colocan sensores al edificio, siendo su ubicación y cantidad un tema de estudio, enviando señales a un procesador que calcula la fuerza que deben aplicar los gatos hidráulicos y manda la orden para su activación. Es muy difícil predecir, por ejemplo, la fuerza exterior producida por el viento y aplicar en tiempo real la fuerza para reducir los efectos de esa carga exterior. Hay en el mundo aplicaciones de amortiguadores activos, pero en menor proporción que los sistemas pasivos. (9)

IMPLEMENTACIONES ESTRUCTURALES

1) Chimeneas de acero. En la ciudad de Kimitsu, en Japón, en el año 1980, se construyeron 2 chimeneas de acero iguales de 120 m de altura con un diámetro de 9 m en la base y 3,8 m en el extremo superior. Están ubicadas a 200 m de distancia una de la otra. En una de las chimeneas se instaló un AMS tipo péndulo de forma circular de 5.000 Kg de peso para suprimir la oscilación del viento. Durante un período de tiempo, se observó las amplitudes de vibración en ambas chimeneas. La máxima amplitud medida en la chimenea sin AMS fue de 22 cm, mientras que en la que poseía un AMS fue de 2,7 cm. Demostrada la utilidad del AMS, se instaló en la otra chimenea. (6)

2) **Torre Crystal.** Este edificio esta ubicado en Osaka, Japón. Es una estructura de 157 m de altura con una planta de sección rectangular de 28 m *x* 67 m, con las bases de hormigón reforzado y la estructura sobre el nivel de piso de acero. El peso total del edificio es de 44.000 t. El período fundamental del edificio en la dirección norte–sur es de 4,7 seg. y en la dirección este-oeste de 4,3 seg. El amortiguador instalado es un amortiguador de masa sintonizado de tipo pendular, que posee diferentes masas en las 2 direcciones. Un dato importante es que las masas de los péndulos son los tanques del sistema de acondicionamiento ambiental que posee el edificio. Se observó, para un tifón en particular, una buena correlación entre los desplazamientos simulados y medidos, reduciéndose la respuesta de lo simulado sin AMS. (10)

3) Petronas Twin Towers. Estas torres gemelas tienen 451 m de altura y están ubicadas en Kuala Lumpur, Malasia y son las más altas del mundo hasta este momento. Estas torres poseen en la cima, donde se encuentra la estructura metálica del mástil, amortiguadores de cadenas colgantes. Existe un puente que une las torres a 170 m sobre el nivel del suelo, este puente apoya sobre 4 brazos en las torres y es, en esos brazos, donde se colocaron los amortiguadores de masa sintonizados. (11)

4) Yokohama Marine Tower. Esta torre de acero posee una altura de 101,3 m y su sección transversal es decagonal. La frecuencia fundamental de la estructura en las direcciones *x* e *y* es 0,55 Hz. El amortiguador de líquido sintonizado es un conjunto de 39 cilindros de acrílico de 0,5 m de diámetro. Cada cilindro tiene 10 capas de 0,05 m de altura y la altura de agua en cada capa es 0,021 m. La masa total del ALS es aproximadamente el 1% de la masa generalizada de la torre. La aceleración para todo el rango de prueba de velocidad del viento se redujo con la colocación del ALS. La relación de amortiguamiento de la torre aumento 7 veces con la colocación del ALS. (12)

5) Shin-Yokohama Prince Hotel. Este edificio tiene una altura de 149,35 m y su sección transversal es circular de diámetro 38,2 m. En la Figura 11 se muestra una fotografía de la estructura. La frecuencia fundamental es 0,31 y 0,32 en las direcciones *x* e *y* respectivamente. El ALS esta ubicado en el último piso y es un conjunto de 30 cilindros de 2 m de diámetro y 2 m de altura. Cada cilindro tiene 9 capas de 0,22 m con una altura de agua de 0,124 m. En la Figura 12 se muestra una fotografía de un aislador. Cada capa esta dividida en 12 secciones por salientes radiales para aumentar la disipación de energía. La masa del líquido es el 1% de la masa generalizada fundamental de la estructura. Se alcanza una reducción del 50 % en la aceleración cuando la velocidad del viento es 25 m/seg. Cuando la velocidad de viento aumenta, la reducción de la aceleración es mayor. (12)

Figura 11.- Fotografía del edificio Shin-Yokohama Prince Hotel.

Figura 12.- Fotografía de un ALS.

CONCLUSIONES

Se presenta una clasificación de fácil interpretación y concisa de los sistemas de aislación y control de vibraciones existentes, con las ventajas y desventajas de cada uno. Los ejemplos de las implementaciones estructurales muestran un buen respuesta de los sistemas de control de vibraciones. Se encuentran en la literatura, descripciones de una enorme cantidad de edificios que poseen sistemas de aislación y control de vibraciones.

Los sistemas de aislación de base tienen gran aceptación para las zonas sísmicas, pues son una solución económicamente viable y proporcionan una solución importante para hospitales y plantas nucleares que necesitan funcionar después de un sismo severo. Ya en Estados Unidos existe un código para estructuras aisladas, el UBC 97 (Uniform Building Code).

Los sistemas de control de vibraciones, principalmente los mecanismos de masa, se implementan en mayor medida es estructuras de gran altura para el control de vibraciones producidas por el viento.

Debido al gran desarrollo que experimenta constantemente este área de la ingeniería estructural, es muy posible que aparezcan nuevas técnicas, dispositivos y procedimientos cada vez más adecuados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Blessman, J., Introducao ao estudo das acoes dinâmicas do vento, Editora da Universidade, Universidade Federal du Rio Grande du Sul, Brasil, 1998.

2. Jangid, R.S., Datta, T.K., Seismic behaviour of base-isolated buildings: a state-of-the-art review, Proc. Instn Civil Engrs. Structs & Bldgs., vol. 110, págs. 186-203, 1995.

3. De la Llera, J. C., Inaudi, J. A., Lüders, C., Análisis y diseño de sistemas de aislación sísmica y disipación de energía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, 1998.

4. Su, L. ,Ahmadi, G., Tadjbakhsh, I., A comparative study of perfomances of various base isolation systems, part II: sensitivity analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol 19, págs. 21-33, 1990.

5. Kumagai Gumi Co., Ltd., Seismic isolation and vibration control system, Special issue for the *II International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technol (SMIRT II)*, August 18-23, Tokyo, Japan, 1991.

6. Soong, T.T., Dargush, G.F., Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley & Sons, Estados Unidos, 1997.

7. Koss, L.L., Fredericks, S., Oil-Ball dampers for reduction of tower vibrations, Second Internacional Conference on Motion and Vibration Control, págs. 101-107, 1994.

8. Koss, L.L., Melbourne, W.H., Chain dampers for control of wind-induced vibration of tower and mast structures, Engineering Structures, vol 17, No.9, págs. 622-625, 1995.

9. Tamura, K., Application of damping devices to suppress wind-induced responses of buildings, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, vol. 74-76, págs.49-72, 1998.

10. Nagase, T., Hisatoku, T., Tuned-Pendulum Mass Damper installed in Crystal Tower, The structural design of tall buildings, vol. 1, págs. 35-56, 1992.

11. Thormton, Charles H., Design of the World's Tallest Buildings- PETRONAS Twin Towers at Kuala Lumper City Centre. Conferencia Plenaria, Congreso de Ingeniería 2000, 5-8 de setiembre del 2000, Buenos Aires, Argentina.

12. Tamura, Y., Fujii, K., Ohtsuki, T., Wakahara, T., Kohsaka, R., Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation, Engineering Structures, vol. 17, No 9, págs. 609-621, 1995.

* * *