

01181

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

201



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

TESIS DOCTORAL

**Comportamiento de estructuras con masas  
resonantes y disipadores de energía**

PRESENTADA POR:

**JOSÉ MANUEL JARA GUERRERO**

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTOR EN INGENIERÍA**  
(ESTRUCTURAS)

CIUDAD UNIVERSITARIA  
1998

265466

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# INDICE

	Página
1.- Introducción.....	1.1
2.- Objetivos.....	2.1
3.- Estado del arte de dispositivos para reducir daños provocados por temblores.....	3.1
3.1 Dispositivos de control pasivo.....	3.2
3.1.1 Disipadores de energía.....	3.3
3.1.2 Aisladores sísmicos.....	3.29
3.1.3 Osciladores resonantes.....	3.47
3.1.4 Cables de presfuerzo.....	3.49
3.2 Dispositivos de control activo.....	3.50
3.3 Comentarios finales.....	3.53
3.4 Referencias.....	3.57
4.- Comportamiento analítico de estructuras con disipadores de energía.....	4.1
4.1 Sistema de un grado de libertad.....	4.3
4.1.1 Parámetros para el análisis.....	4.6
4.1.2 Descripción del estudio paramétrico.....	4.7
4.1.3 Resultados de los análisis.....	4.8
4.1.4 Estados límite.....	4.27
4.1.5 Comentarios finales.....	4.36
4.2 Modelos estructurales de varios grados de libertad.....	4.41
4.2.1 Descripción de los modelos.....	4.41
4.2.2 Señales Sísmicas.....	4.44
4.2.3 Análisis Elástico.....	4.46
4.2.4 Análisis Inelástico.....	4.48
4.2.5 Marcos de seis niveles.....	4.51
4.2.5.1 Comportamiento como función de la rigidización de los modelos...	4.76
4.2.5.2 Indices de daño.....	4.84
4.2.5.3 Comentarios finales.....	4.93

4.2.6 Marcos de quince niveles.....	4.96
4.2.6.1 Comportamiento como función de la rigidización de los modelos....	4.113
4.2.6.2 Índices de daño.....	4.118
4.2.6.3 Comentarios finales.....	4.124
4.2.7 Marcos de treinta niveles.....	4.127
4.2.7.1 Comportamiento como función de la rigidización de los modelos...	4.141
4.2.7.2 Índices de daño.....	4.144
4.2.7.3 Comentarios finales.....	4.154
4.2.8 Comparación del modelo contraventeado y del modelo con disipadores...	4.157
4.3 Curvas de energía.....	4.162
4.4 Espectros de ductilidad y desplazamientos de sistemas con disipadores de energía.....	4.181
4.5 Referencias.....	4.215
Conclusiones.....	4.217
Recomendaciones de estudios a futuro.....	4.225

## INTRODUCCIÓN

Los daños provocados por temblores han sido objeto de numerosos estudios por parte de investigadores en todas las épocas. Se ha buscado insistentemente la manera de construir estructuras que tengan un comportamiento adecuado ante estos fenómenos naturales.

La mayor parte de la energía transmitida a las estructuras por eventos sísmicos intensos, se disipa por amortiguamiento y por comportamiento inelástico de las conexiones viga columna. Este comportamiento está íntimamente relacionado con los daños estructurales, por lo que en las últimas décadas se han intensificado los estudios de dispositivos que, incorporados en las estructuras, buscan concentrar en ellos la mayor parte de la disipación de la energía producida por los temblores.

Los dispositivos se han agrupado en sistemas de control pasivo y sistemas de control activo. La eficiencia de los sistemas de control pasivo depende de las características dinámicas de los temblores y de las estructuras en que se incorporen. Con base en estos dos parámetros y en estudios económicos, se elige el tipo de dispositivo más conveniente.

Los estudios analíticos y experimentales de modelos estructurales con sistemas de disipación se llevan a cabo considerando los eventos sísmicos que con mayor frecuencia se presentan en los lugares donde se realizan las investigaciones. Para la aplicación en México, es importante que se realicen estudios considerando el tipo de estructuras que más se construyen y las características propias de los eventos sísmicos registrados en el país. El temblor de septiembre de 1985 puso de manifiesto la vulnerabilidad de algunas estructuras localizadas en suelo blando de la Ciudad de México. Por este motivo, es necesario buscar soluciones alternativas que permitan reducir los posibles daños ante temblores futuros.

Para que estos sistemas puedan llevarse a la práctica en estructuraciones alternativas, es necesario determinar el intervalo de aplicación de cada uno. Los dispositivos que más se han utilizado en estructuras reales, son los aisladores de base; su uso se ha extendido como una consecuencia de la enorme cantidad de estudios realizados, lo que ha permitido también obtener recomendaciones incorporadas en códigos de diseño. Aunque todavía queda mucho por estudiar para comprender adecuadamente el comportamiento de estructuras sobre aisladores de base, existen mayores incertidumbres con respecto a la utilización de disipadores de energía. Adicionalmente, los grandes periodos asociados a la zona de terreno flexible de la Ciudad de México y los posibles asentamientos diferenciales, hacen poco atractiva la utilización de aisladores de base.

El presente trabajo pretende contribuir con las investigaciones que actualmente se realizan para determinar la aplicabilidad de dispositivos de control pasivo en la Ciudad de México. El estudio se enfoca a la posible utilización de disipadores de energía en estructuras localizadas en el suelo blando de la Ciudad de México. Especial énfasis se pone en separar la contribución de los principales parámetros que intervienen en la respuesta sísmica de estas estructuras.

## OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como principal objetivo evaluar la aplicabilidad de sistemas disipadores de energía en la reducción de la respuesta sísmica de edificaciones regulares de mediana altura, situadas en terreno blando del valle de México.

Se analizan las principales variables que contribuyen en la respuesta de los modelos estructurales y con base en los resultados obtenidos, se determinarán los parámetros para la obtención de las propiedades geométricas de disipadores de energía, como función de las características dinámicas de las estructuras.

## **ESTADO DEL ARTE DE DISPOSITIVOS PARA REDUCIR DAÑOS PROVOCADOS POR TEMBLORES**

### **INTRODUCCIÓN**

El intento por reducir los daños provocados por temblores ha llevado al desarrollo de elementos que se incorporan en las estructuras para modificar sus propiedades dinámicas y, en algunos casos, incrementar su capacidad de disipación de energía.

A partir de la última década el número de dispositivos fabricados en el mundo ha crecido considerablemente. Paralelamente, las instituciones de investigación han dedicado cada vez mayor tiempo al estudio analítico y experimental de estructuras con estos sistemas. Los dispositivos se han agrupado como función de su forma de trabajo en dispositivos de control pasivo y dispositivos de control activo.

### 3.1 DISPOSITIVOS DE CONTROL PASIVO

Existen cuatro sistemas -principales desarrollados en la actualidad:

- Disipadores de energía
- Aisladores de base
- Osciladores resonantes
- Cables de presfuerzo

Los disipadores de energía modifican la rigidez de la estructura y buscan concentrar en ellos la mayor parte de la disipación de energía. Para su funcionamiento dependen fundamentalmente de los desplazamientos relativos de entrepiso. Los aisladores de base son elementos que se colocan comúnmente entre la cimentación y el edificio para intentar aislar a la superestructura del movimiento del terreno. Un oscilador resonante es una o varias masas adicionales, generalmente sobre el último nivel de la estructura, con ciertas propiedades dinámicas que reducen la respuesta de la estructura; y los cables de presfuerzo rigidizan a la estructura e incrementan la carga axial en las columnas reduciendo, en algunos casos, los giros en sus extremos.

### **3.1.1 DISIPADORES DE ENERGÍA**

Estos dispositivos se ubican generalmente en contravientos, y tienen como finalidad disminuir o eliminar la disipación de energía histerética en los elementos estructurales. Han sido usados también en combinación con aisladores de base. Se pueden agrupar, de acuerdo con la manera en que disipan energía, en los siguientes:

- Dispositivos de materiales con comportamiento elastoplástico
  
- Por extrusión
  
- Por fricción
  
- Dispositivos de materiales con comportamiento viscoso y viscoelástico

### **COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO**

Su comportamiento idealizado es semejante al mostrado en la fig 3.1. La pendiente de la zona inelástica depende de las características de cada dispositivo y la disipación de energía es mayor conforme se incrementa el área bajo la curva.

El dispositivo mostrado en la fig 3.2 fue estudiado por Skinner, Kelly y Heine (1975-b). Consiste en dos placas en forma de U que disipan energía al desplazarse una cara con respecto a la otra. La parte central del dispositivo se une a un nivel de la estructura y las partes extremas al nivel inmediato superior mediante barras. Los desplazamientos relativos entre los niveles ocasionan el

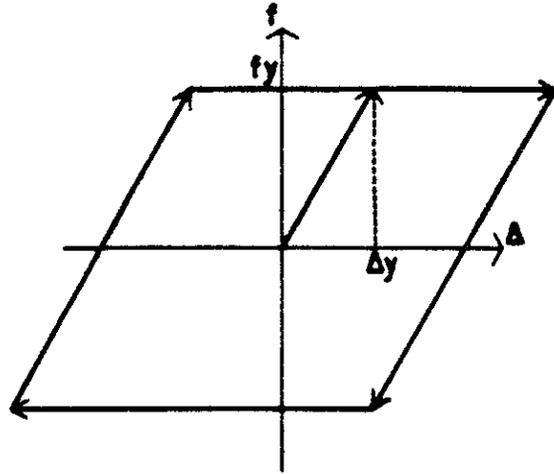


Figura 3.1 **COMPORTAMIENTO ELASTOPLASTICO**

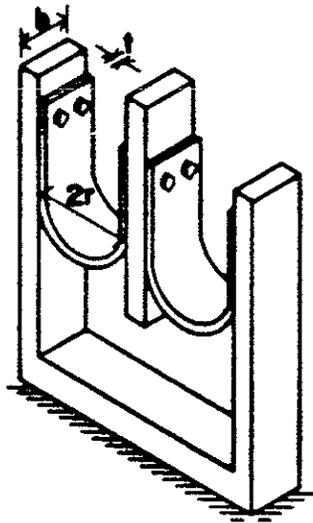


Figura 3.2 **DISPOSITIVOS EN FORMA DE U**

movimiento conocido como rolado por flexión mediante el cual se disipa energía.

Aguirre y Sánchez (1989 y 1990) probaron experimentalmente soleras también en forma de U (fig 3.3). Su comportamiento histerético es estable (fig 3.4) y por la manera en que se deforman alcanzan la fluencia en casi toda la sección transversal al mismo tiempo. El número de ciclos de carga y descarga que soportan depende de la amplitud de deformación (fig 3.5). El Instituto de Ingeniería de la UNAM (Chávez y González, 1989) realizó pruebas experimentales en mesa vibradora con un marco de una cruz y dos niveles uniendo dos de estos dispositivos (para dar la forma de una oruga de tractor). Jara y col (1992) estudiaron la respuesta analítica de una estructura de acero de diez niveles y una estructura de concreto de nueve con este dispositivo, sometidas a temblores con las características de los que ocurren con mayor frecuencia en la ciudad de México. Al someter a las estructuras al temblor de Michoacán de 1985 registrado en SCT, se obtuvieron resultados alentadores sobre la reducción de la respuesta en la zona blanda del Distrito Federal, sobre todo para la estructura de acero. Estudios posteriores del análisis paramétrico de un sistema de un grado de libertad con disipadores de energía y demandas de ductilidad de dos y cuatro, mostraron que el intervalo de aplicación de este sistema en la zona blanda de la ciudad, se limita a periodos de las estructuras inferiores a 1.6 seg (Gómez, Rosenblueth y Jara, 1993).

Urrego, Ruiz y Silva (1993) estudiaron la variación de la respuesta sísmica de marcos de concreto reforzado con tres cruces y diez niveles para diferentes ubicaciones de disipadores con respecto a la altura del edificio. Los resultados muestran la inconveniencia de colocar distribuciones asimétricas de disipadores en la elevación de las estructuras.

Skinner y col (1975-a y b) y Skinner y McVerry (1975) estudiaron experimentalmente elementos sometidos a flexión en cantilíver, que se colocan en la cimentación como se muestra en la fig 3.6. Al ocurrir un desplazamiento relativo entre la superestructura y la cimentación se disipa energía debido al comportamiento histerético del cantilíver. Los ciclos son estables y sus parámetros

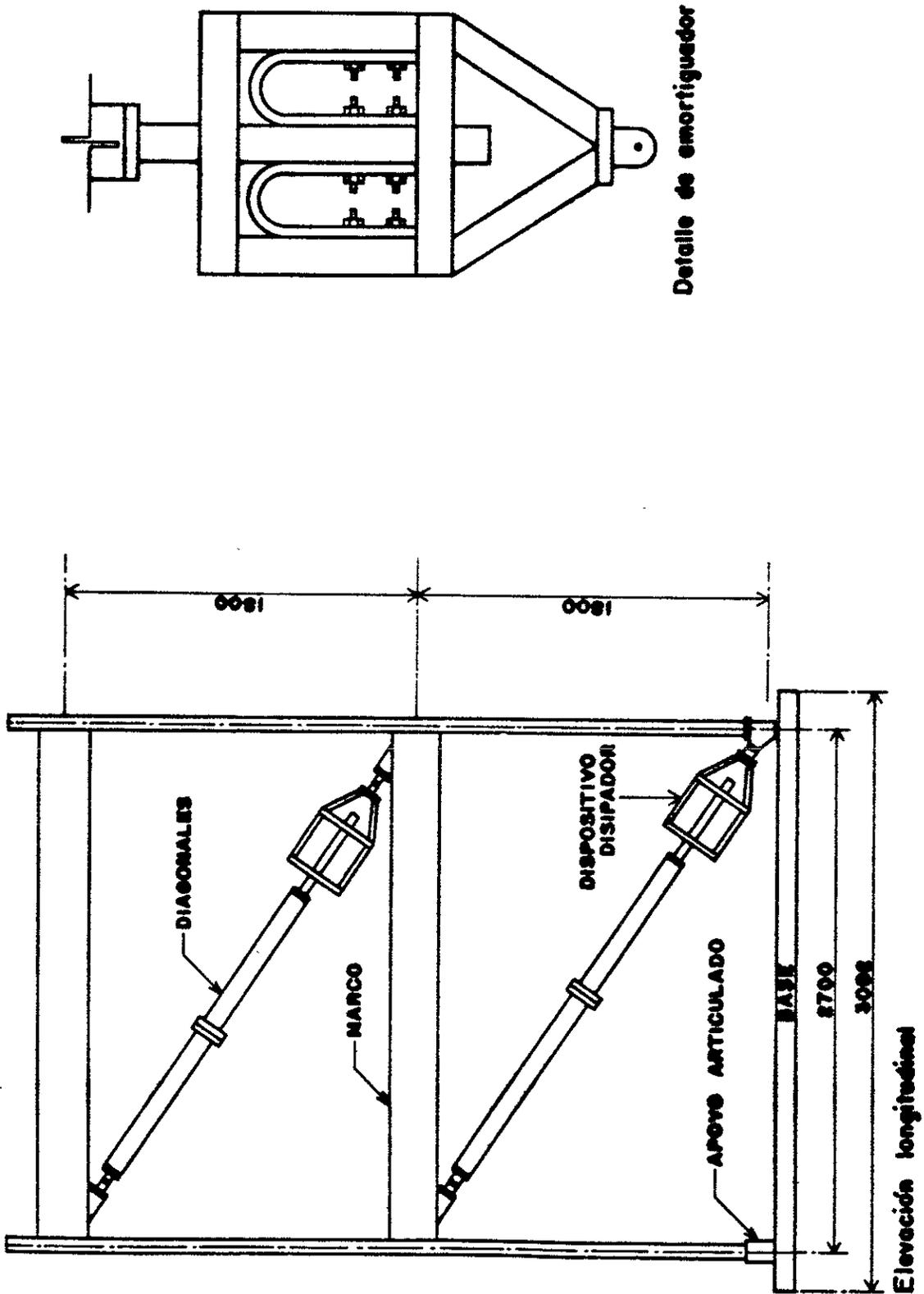


Figura 3.3 DISPOSITIVO EN FORMA DE U

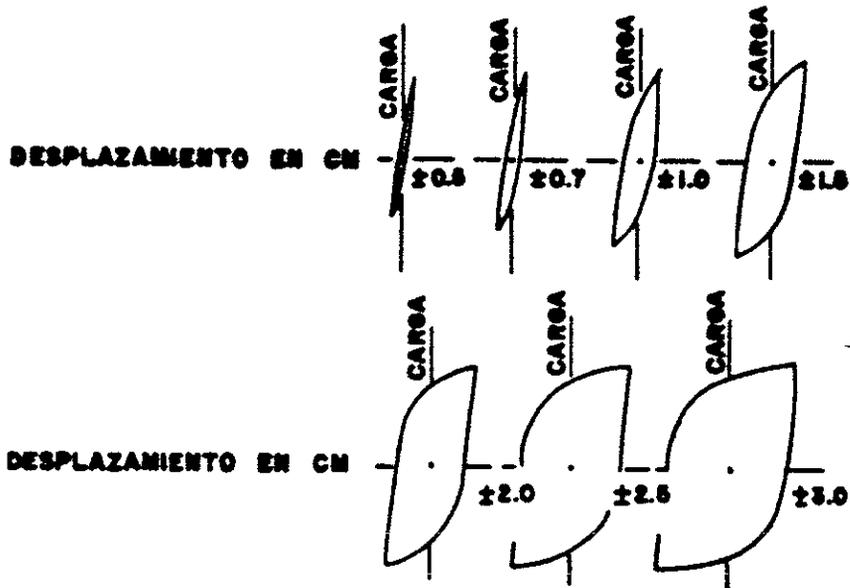


Figura 3.4 COMPORTAMIENTO HISTERETICO DE LOS DISPOSITIVOS EN FORMA DE U

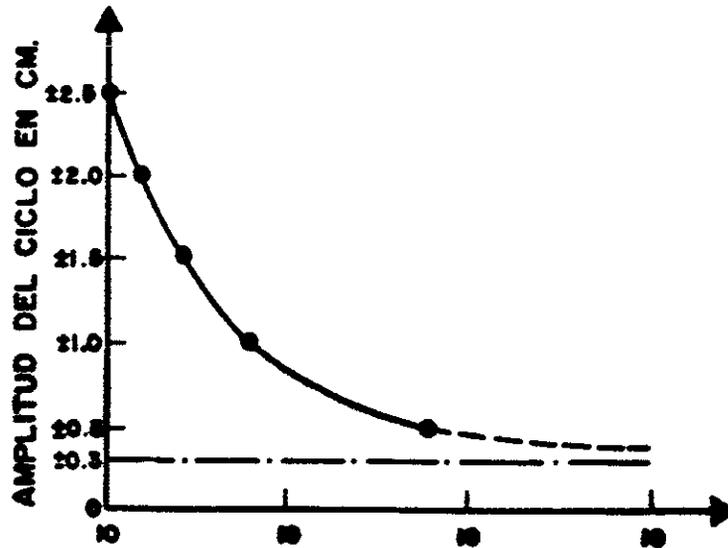


Figura 3.5 NUMERO DE CICLOS A LA FALLA CURVA DE FATIGA DE DISPOSITIVOS U



fueron determinados experimentalmente por Skinner, Kelly y Heine (1975-b). Por el lugar en que se colocan se pretende que se incorporen combinados con aisladores de base.

Kelly (1988) usó un dispositivo semejante al anterior en un edificio de la corporación Kajima en Japón, de tres niveles, construido sobre aisladores de base (fig 3.7). Los resultados analíticos mostraron que la respuesta es del orden de la tercera parte de la respuesta obtenida para la estructura original sometida a temblores con contenidos altos de frecuencias altas.

A este mismo tipo pertenece el dispositivo formado por una placa de sección trapezoidal (fig 3.8) usado en la base de una chimenea construida en Nueva Zelanda (Skinner y col, 1980). Los parámetros que determinan su geometría son proporcionados en gráficas que relacionan la altura de las placas con su espesor obtenidos con base en pruebas experimentales. Al sistema se adicionaron barras de acero dobladas (para permitir desplazamientos horizontales) que combinados con aisladores de base incrementan el amortiguamiento (fig 3.9). El comportamiento de la chimenea bajo las cargas reales a que se ha visto sometida no se ha publicado en la literatura.

El elemento que se muestra en la fig 3.10, usado en la construcción de un puente (Skinner y col, 1980), está formado por una barra circular de acero que se deforma, por la acción de dos brazos, hacia arriba y hacia abajo disipando energía por flexión; en la figura se muestran también los ciclos histeréticos del disipador que resultan casi rectangulares, lo que lo hace muy eficiente en la disipación de energía. Los dispositivos se colocaron entre la superestructura y el estribo de apoyo fijo.

Alonso (1989), Whittaker y col (1989), Scholl (1990), Su y Hanson (1990-a y 1990-b) y Bergman y Hanson (1990) estudiaron un dispositivo compuesto por placas de acero, con sección transversal en forma de "X" (figs 3.11 y 3.12), llamadas ADAS (Added Damping and Stiffness).

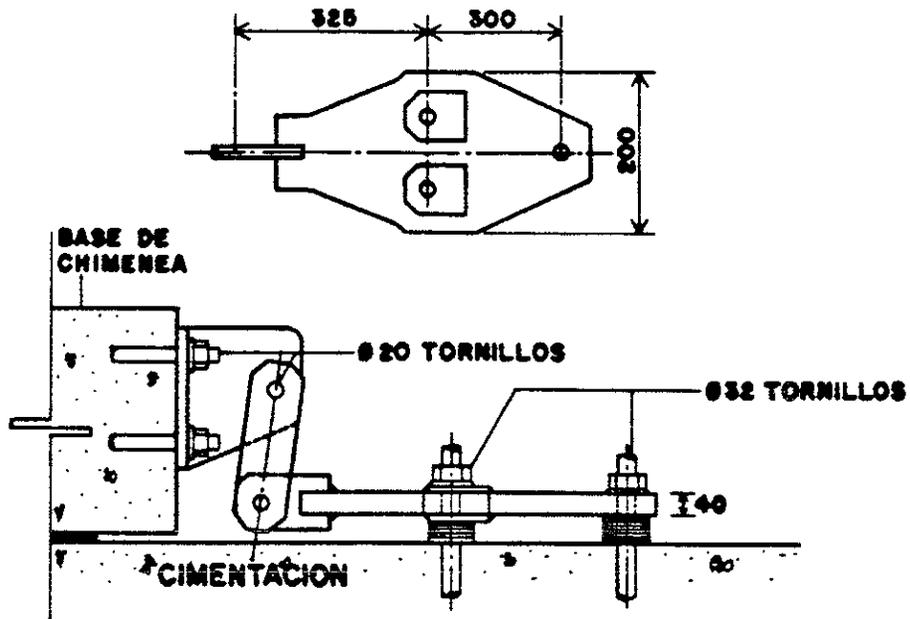


Figura 3.8 AMORTIGUADOR EN LA BASE DE UNA CHIMENEA

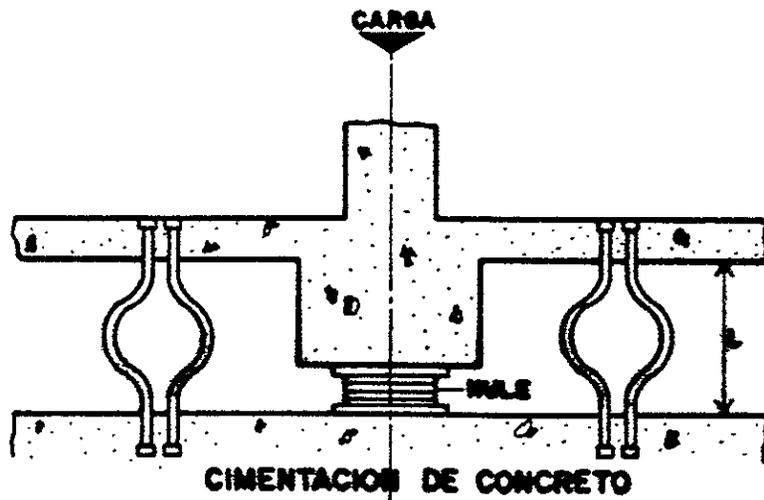


Figura 3.9 AISLADOR DE BASE Y AMORTIGUADORES DE BARRAS DOBLADAS

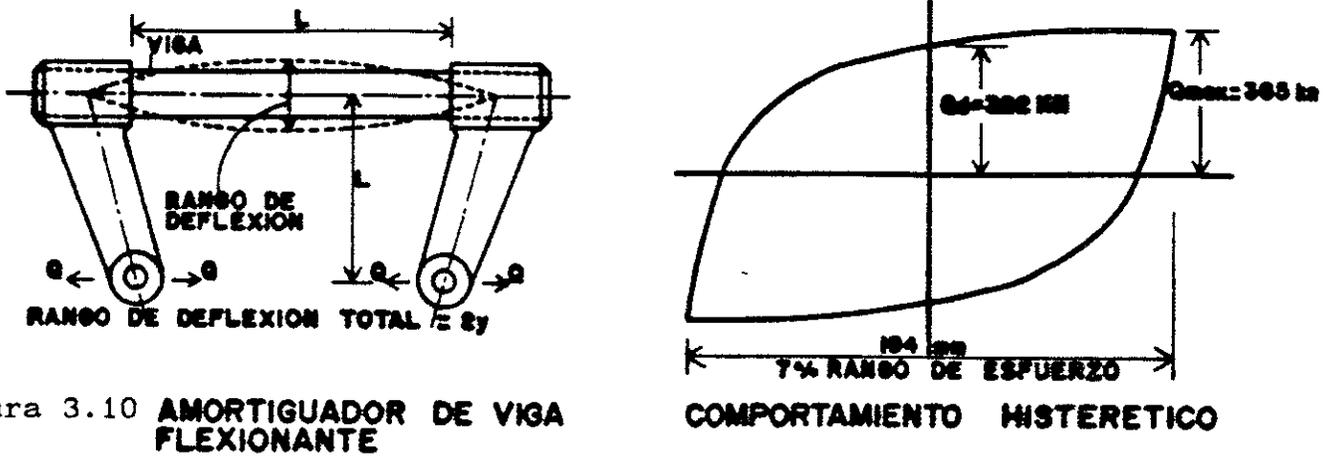


Figura 3.10

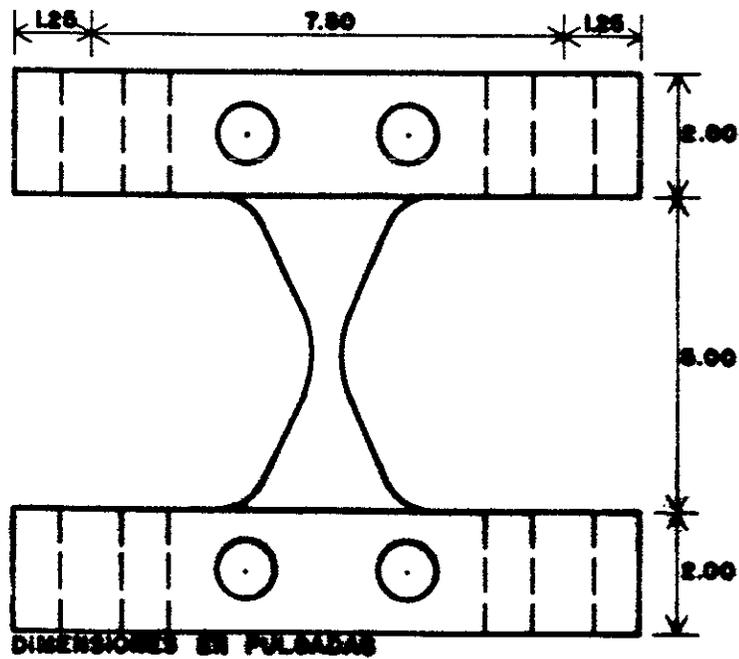


Figura 3.11 **DISPOSITIVO ADAS**

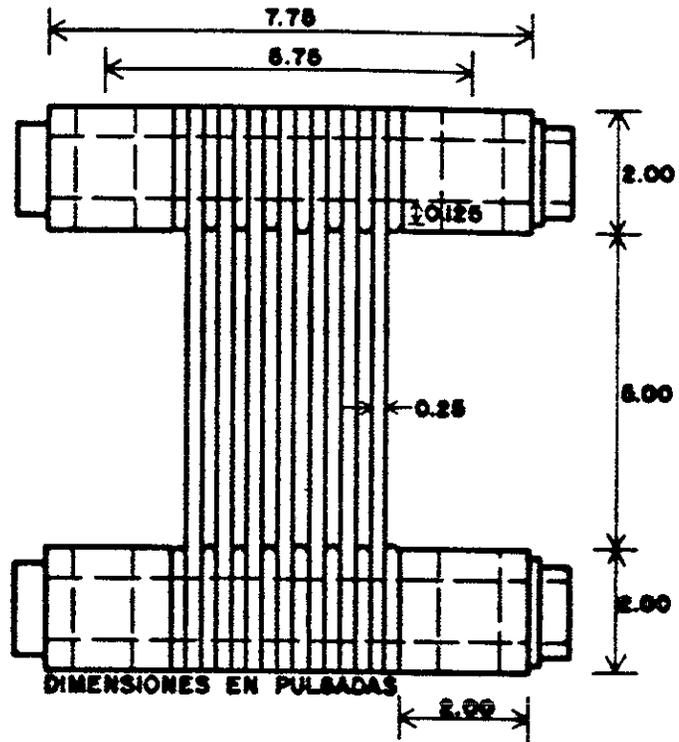


Figura 3.12 **DISPOSITIVO ADAS DEL MARCO EXPERIMENTAL EN EL PRIMER NIVEL**

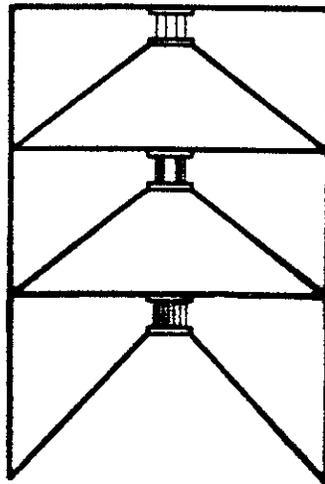


Figura 3.13 **MARCO EXPERIMENTAL CON LOS DISPOSITIVOS ADAS**

La variación de la sección transversal obedece a que al desplazarse un nivel respecto al otro, las placas se deforman en doble curvatura, así que, si se empotran las placas, se genera un diagrama de esfuerzos casi uniforme en todo el peralte que cambia de signo en el eje neutro. Esto ocasiona que el esfuerzo de fluencia se alcance prácticamente en todo el volumen al mismo tiempo. Se han probado también placas de sección transversal rectangular; dado que la distribución de esfuerzos por flexión sigue siendo triangular, en este caso los esfuerzos de fluencia se alcanzan sólo en pequeñas zonas extremas lo que reduce radicalmente la disipación de energía con respecto a la sección transversal variable. La rigidez lateral que proporcionan los dispositivos ADAS se obtiene en Whittaker y col (1989) y Tena (1995) determina también la rigidez de placas con esa sección transversal.

Las placas ADAS se pueden colocar como se señala en las figs 3.13 y 3.14 en marcos y muros de rigidez con trabes de acoplamiento, respectivamente. El comportamiento histerético de las placas se muestra en la fig 3.15. Estos dispositivos fueron sometidos, en laboratorio, a más de cien ciclos de carga y descarga, mostrando un comportamiento estable sin degradación. De estos resultados se desprende la recomendación que en su diseño se consideren valores de ductilidad máxima de seis.

Estos dispositivos se usaron como solución estructural en la reparación de dos edificios de la ciudad de México dañados por los temblores de septiembre de 1985 (Martínez, 1990).

Tsai y col (1993) estudiaron una placa triangular (similar a la mitad de una placa de ADAS) llamada TADAS. Las placas se empotran en uno de sus lados a otra placa de acero que se conecta al nivel superior del entrepiso. En el vértice del triángulo se colocan pernos que se conectan a contravientos que parten del nivel inferior del entrepiso (fig 3.16). Este tipo de conexión ocasiona que las placas se deformen en curvatura simple. Al incorporar este sistema en un marco de acero a escala natural se pudo comprobar que las reducciones en la respuesta son

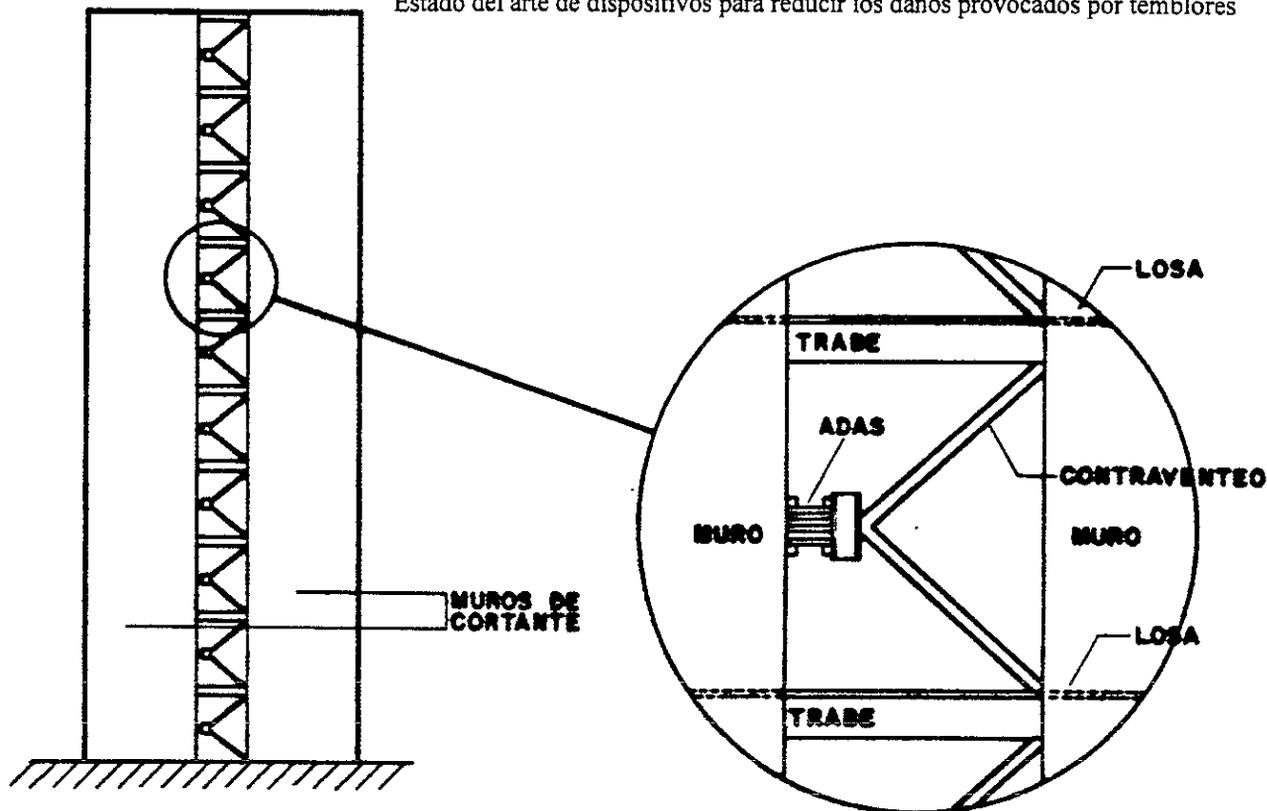


Figura 3.14 DISPOSITIVOS ADAS EN EDIFICIOS CON MUROS DE CORTANTE

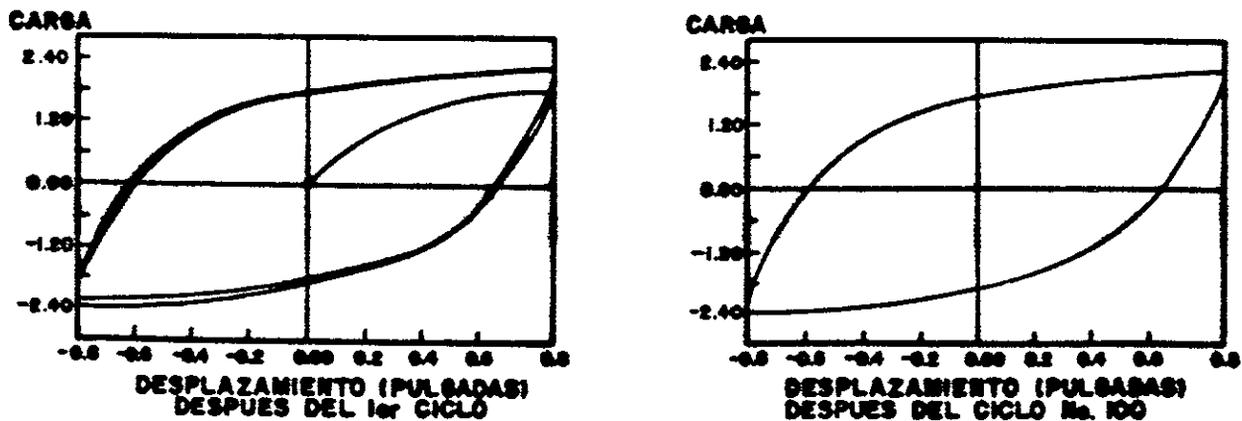


Figura 3.15 CURVAS DE HISTERESIS OBTENIDAS EXPERIMENTALMENTE

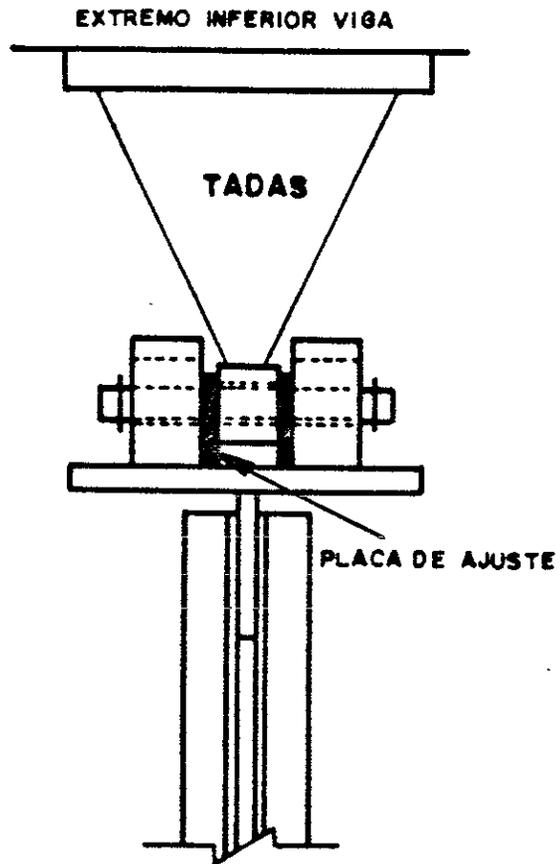


Figura 3.16 **DISPOSITIVO TADAS**

similares a las obtenidas con ADAS. Sin embargo, de acuerdo con los autores, los resultados del modelo analítico del marco se acercan más al modelo experimental con este dispositivo debido a que la rigidez lateral de las placas, por la forma de conectarlas, se predice con menor incertidumbre que con las placas ADAS, en las que la rigidez es fuertemente dependiente de la conexión con las placas de apoyo. Esta dependencia se señala también en el estudio de Whittaker y col (1989).

Ruiz, Mejía y Ruiz (1996) realizaron un estudio comparativo de la respuesta sísmica de un marco de concreto reforzado de veinte niveles con y sin disipadores del tipo TADAS, sometido a once acelerogramas simulados y a la componente este-oeste del temblor del 19 de septiembre de 1985 generado en las costas de Michoacán. Los resultados mostraron que cuando el marco en estudio tiene un periodo similar al periodo fundamental de la señal sísmica, no es posible mantener elásticos a los elementos estructurales del marco. Se concluye también que el costo de incorporar los disipadores es de alrededor de 23% del costo inicial de la construcción y que esto representa un incremento del 9% del costo del marco convencional.

Kobori y col (1992) estudiaron la respuesta experimental de placas de acero similares en sección transversal a los ADAS pero colocadas en su dirección perpendicular y unidas entre sí. Por el espacio que queda entre las placas, se le nombró de tipo panel (fig 3.17). Los ciclos histeréticos obtenidos son estables, con forma casi rectangular. El sistema se estudió analíticamente en una estructura de 29 niveles colocando el dispositivo entre un nivel y otro, a través de muros. Las reducciones en las respuesta fueron de hasta un 60%. Adicionalmente, los mismos autores, analizaron otro dispositivo de acero de sección circular variable empotrado en dos placas de acero (fig 3.18). Este dispositivo se analizó en el estudio analítico de una rampa de 98 m de altura máxima; la respuesta resultó 40% menor que aquella que se obtuvo sin incorporar la barra de acero.

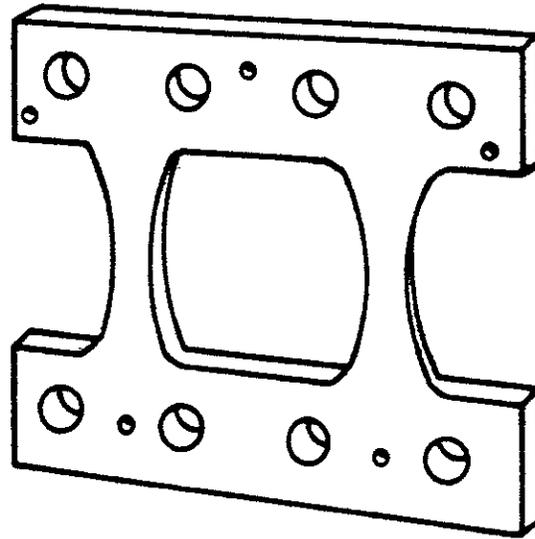


Figura 3.17 **DISPOSITIVO TIPO PANEL**

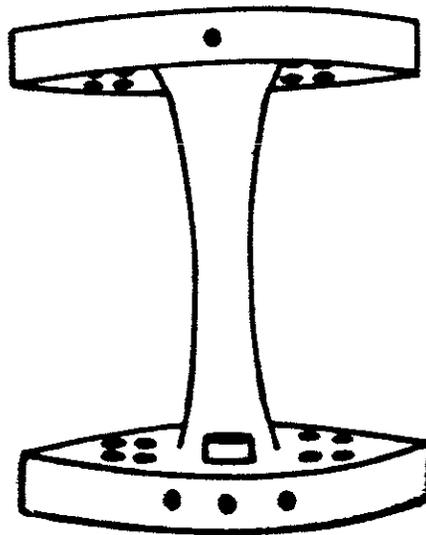


Figura 3.18 **DISPOSITIVO DE SECCION VARIABLE**

El comportamiento elastoplástico se logra también al someter una barra de acero a torsión (fig 3.19) (Skinner y col 1975-a y b, y Skinner y McVerry, 1975), que como sucede con los disipadores ADAS y en forma de U, alcanza el esfuerzo de fluencia al mismo tiempo en casi todo su volumen. La torsión se genera sobre la placa 5 al conectar los elementos 1 y 2 a la base y los brazos 3 y 4 a la cimentación. Este sistema fue usado en la construcción de un puente en Nueva Zelanda (Beck y Skinner, 1974).

Estudios posteriores (Kelly, Eindinger y Derham, 1977) muestran que una zona crítica en el diseño de estos elementos es la unión entre los brazos del dispositivo y la placa que trabaja a torsión. El estudio experimental consistió en probar un edificio de tres niveles provisto de aisladores de base (fig 3.20). Las vigas a torsión se comportan elásticamente, y se plastifican cuando la excitación sobrepasa cierto umbral, lo que modifica la rigidez del edificio en condiciones de servicio. Al disipar energía se incrementa también el amortiguamiento crítico equivalente, estimándose este en 30% para el modelo de tres niveles, lo que causa una fuerte reducción de la respuesta.

Medeot y Albajar (1992) hacen una descripción de los dispositivos incorporados en puentes y estudios llevados a cabo en Italia sobre estos sistemas. La mayor parte tienen forma y comportamiento similar a varios de los anteriores. Se hace mención también del buen comportamiento encontrado en sistemas híbridos.

Para que estos sistemas se usen en la práctica profesional, es necesario que se obtengan recomendaciones de diseño sencillas y de fácil aplicación. Con este propósito, Scholl (1993) y Whittaker y col (1993) sugieren criterios generales que deben considerarse para el análisis de estructuras con disipadores de energía. La incorporación de estos dispositivos en los reglamentos actuales requiere que se continúe con estudios experimentales y analíticos que permitan contar con un mayor número de resultados en que fundamentar las propuestas.

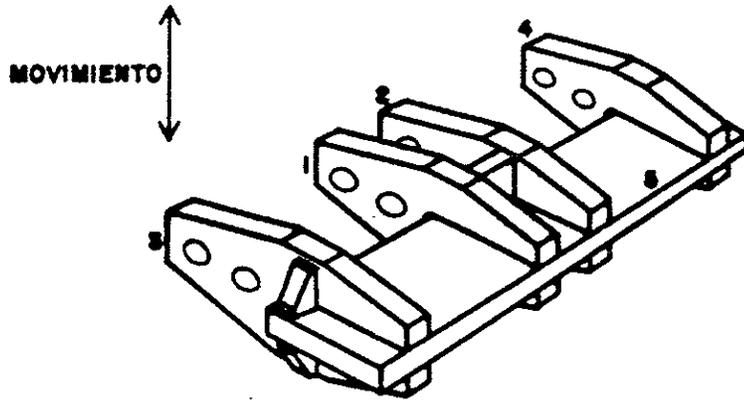


Figura 3.19 DISPOSITIVO A TORSION

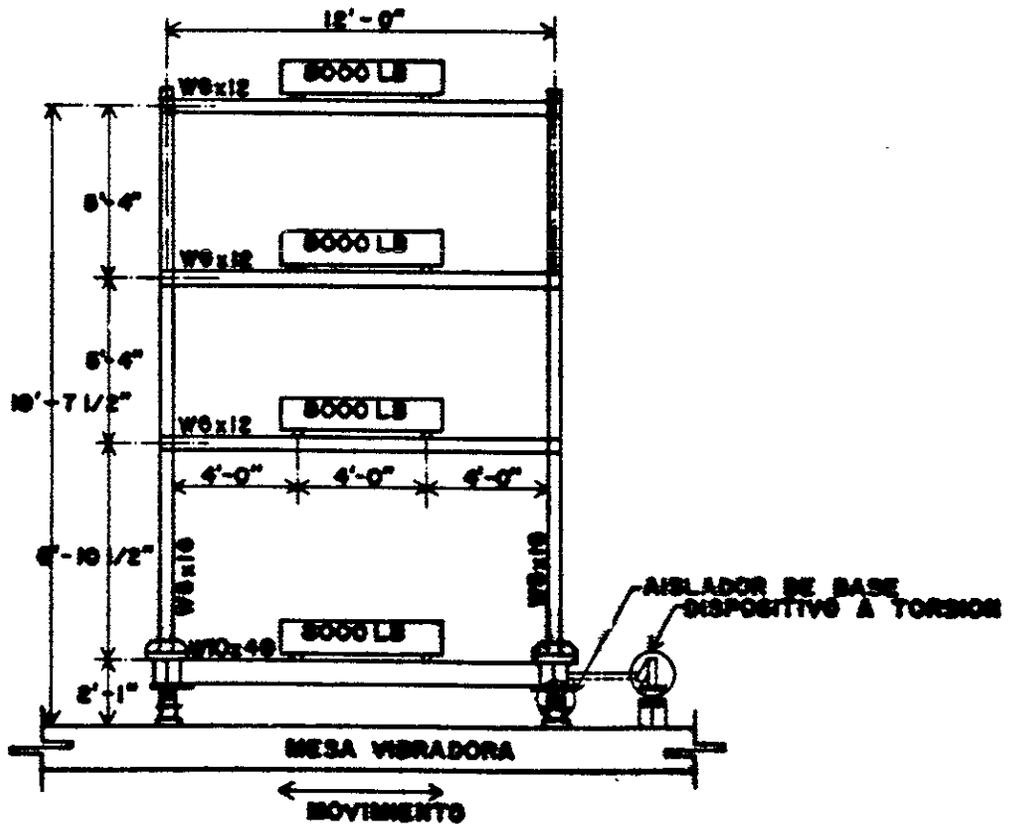


Figura 3.20 DIMENSIONES DEL MARCO EXPERIMENTAL

Otra forma promisorio de reducción de la respuesta con comportamiento elastoplástico, pero ahora en la estructura misma, sin necesidad de dispositivos especiales, consiste en colocar una barra diagonal desde el nudo del nivel inferior hasta a un punto distante del nudo del nivel superior, o dos barras desde los nudos del nivel inferior al centro de la viga superior sin que se conecten al mismo punto, como se muestra en la fig 3.21. Esto ocasiona que la parte de la viga ubicada entre la barra y el nudo o entre las dos barras fluya por cortante y disipe energía. Por la manera en que se conectan los elementos diagonales, a este sistema se le denomina de contravientos excéntricos (Ricles y Popov, 1987; Popov, Engelhardt y Ricles, 1989, y Ricles y Bolin, 1990).

### **DISIPACION POR EXTRUSIÓN**

En estos sistemas, la disipación se logra al deformar la sección transversal de una pieza. Esto ocurre cuando se mueve el material disipador, generalmente plomo, dentro de un tubo de sección variable (fig 3.22). El sistema fue propuesto inicialmente por Robinson y Greenbank (1975 y 1976) y Robinson y Cousins (1987) para su uso en la construcción de dos puentes en Nueva Zelanda.

El dispositivo está formado por un tubo de acero con plomo en su interior. Al deformarse plásticamente el plomo, se disipa energía y al recuperar su sección original, se recristaliza y recupera sus propiedades iniciales. El dispositivo fue sometido a ciento veintitrés ciclos de carga y descarga con ciclos histeréticos casi rectangulares y sin degradación apreciable (fig 3.23).

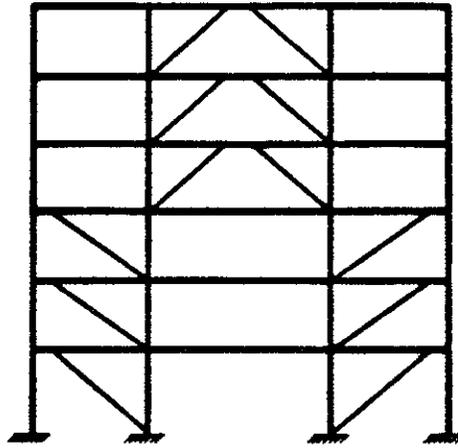


Figura 3.21 MARCO CON CONTRAVENTEOS EXCENTRICOS

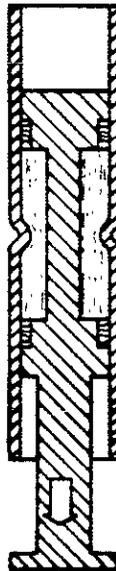


Figura 3.22 DISIPADOR POR EXTRUSION

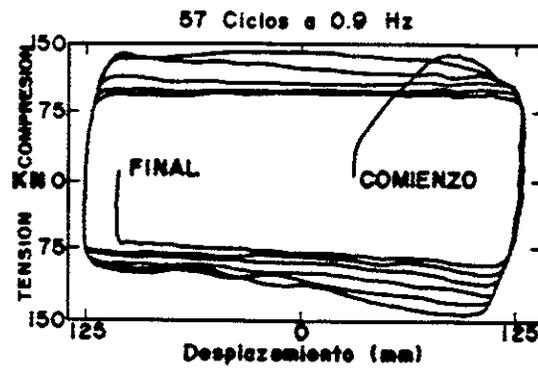


Figura 3.23 COMPORTAMIENTO HISTERETICO DEL DISIPADOR POR EXTRUSION

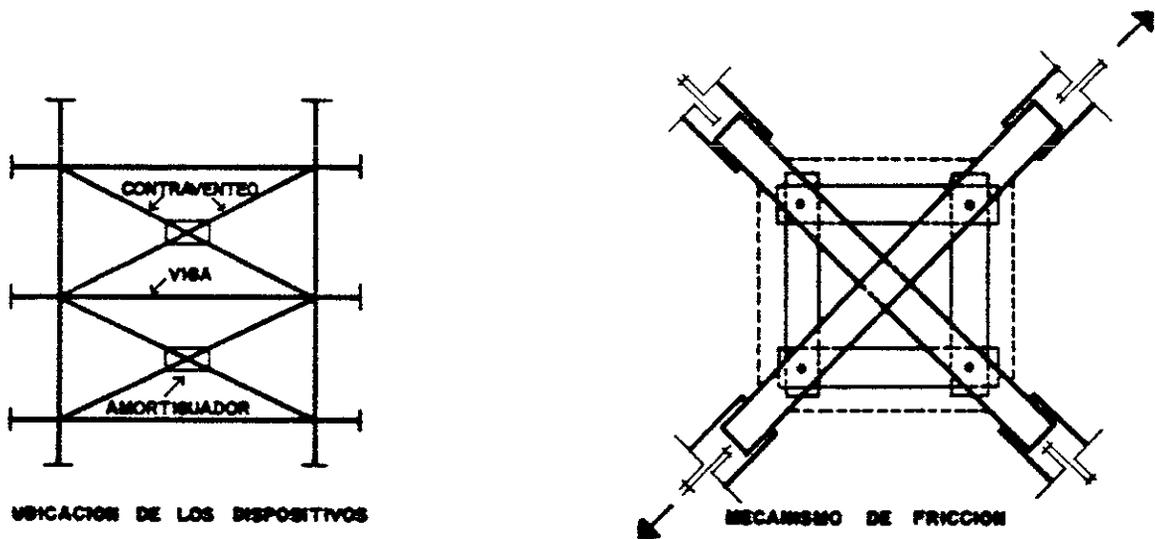


Figura 3.24 DISIPADOR DE ENERGIA POR FRICCIÓN

## DISIPACION POR FRICCIÓN

Los disipadores por fricción se logran al colocar dos placas en la intersección de contravientos en forma de cruz, de manera que al desplazarse lateralmente la estructura produzca esfuerzos de fricción en el contacto entre las placas.

El sistema mostrado en la fig 3.24 fue desarrollado por Pall y Marsh (1982). Se conecta al marco con barras que funcionan como diagonales y disipa energía por fricción al desplazarse los contravientos y deformar al dispositivo que se ubica en el centro. Su diseño busca evitar el deslizamiento bajo cargas de servicio, lo que da, bajo ciertas condiciones, rigidez adicional al marco y, una vez que sobrepasa un umbral, se inicia la disipación de energía por fricción. Estudios posteriores de este sistema se encuentran en Pall (1984) y refinamientos en su modelación analítica en Filiatrault y Cherry (1987 y 1990) y Filiatrault, Cherry y Byrne (1990). El comportamiento de los dispositivos se ilustra en la fig 3.25.

Pall y Pall (1993) incorporaron este dispositivo en estructuras de hasta diez niveles en Canadá. La modelación analítica de estas edificaciones muestra que los desplazamientos laterales de los marcos con los disipadores son del orden de la tercera parte de los marcos solos, al ser sometidos a registros sísmicos.

Scholl (1984) estudió un dispositivo desarrollado por Oiles Industry Co., Ltd of Tokio, Japón, fabricado con acero y hule (fig 3.26). Al igual que el anterior, el dispositivo se coloca, en la intersección de contravientos. El estudio experimental de un marco de un nivel con estos elementos, muestra incremento en el amortiguamiento y modificación en la rigidez con respecto al marco sin dispositivos; su principal desventaja es su alto costo relativo con otros sistemas.

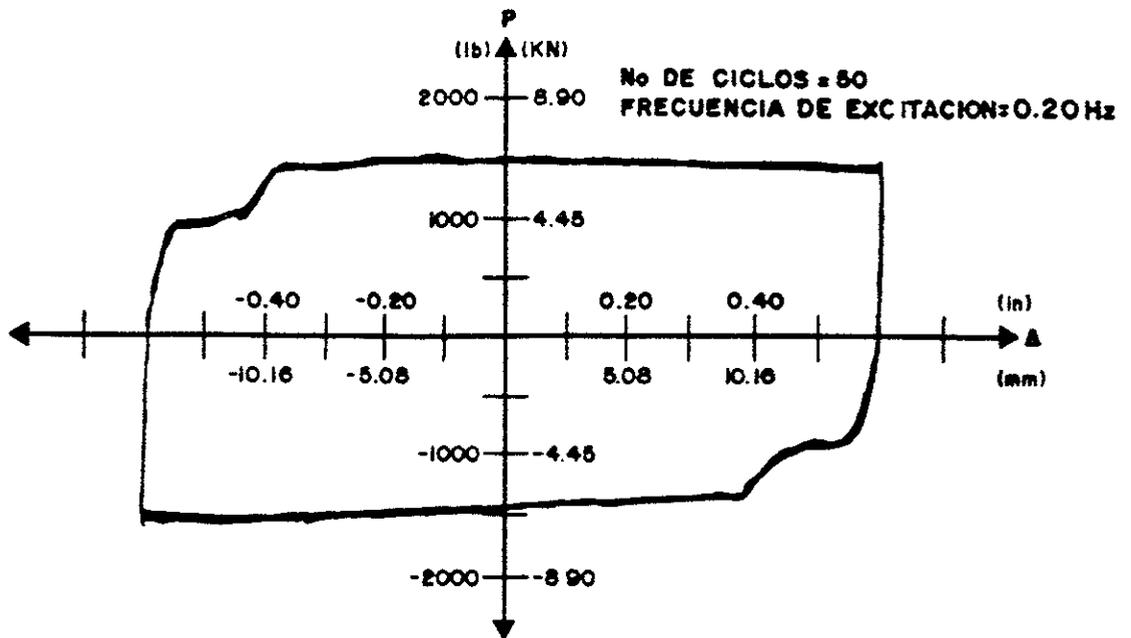


Figura 3.25 COMPORTAMIENTO HISTERETICO DEL DISPOSITIVO DE FRICCION

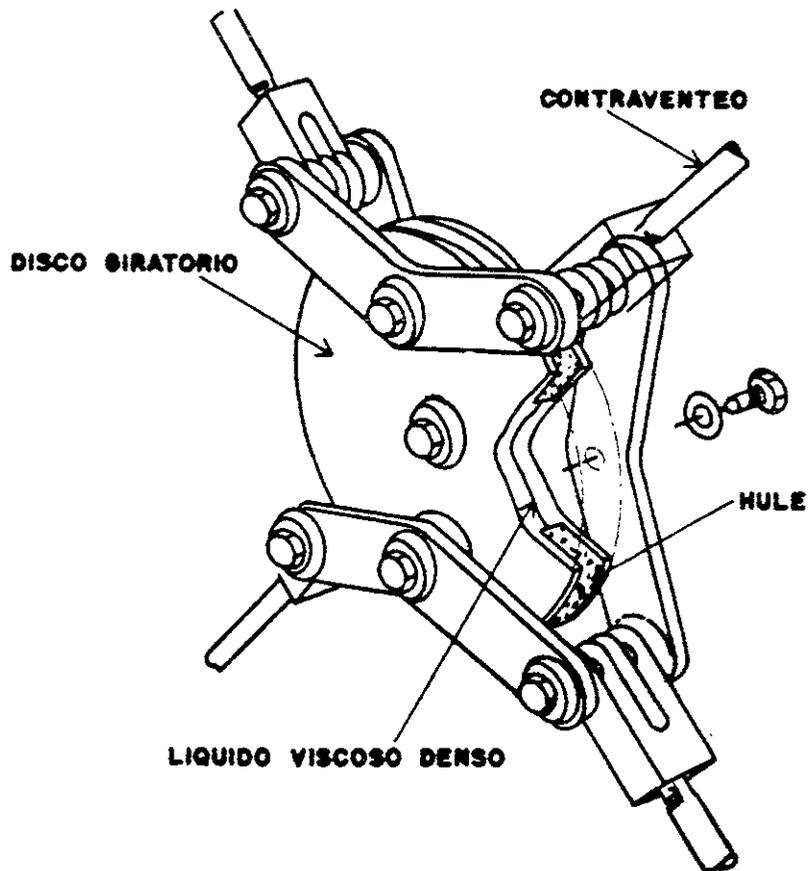


Figura 3.26 DISIPADOR DE ENERGIA

Nims y col (1993) determinaron la respuesta analítica de un marco de seis niveles escala 1/3 probado anteriormente en laboratorio, con un elemento disipador por fricción. La fuerza de fricción que se desarrolla se consideró proporcional al desplazamiento relativo entre sus extremos. El disipador está compuesto por un cilindro de acero que en su interior tiene resortes con bordes de bronce en los extremos. La respuesta analítica se comparó con la respuesta del marco solo y del marco con diagonales. Los desplazamientos del marco con el disipador son del orden de la mitad de los obtenidos para los otros dos modelos y los cortantes son prácticamente iguales para el marco solo y el marco con el dispositivo; el marco con diagonales genera fuerzas cortantes del orden del triple de los dos modelos anteriores.

Grigorian y Popov (1993) probaron dos tipos de dispositivos. En el primero, la fricción ocurre entre dos superficies de acero y en el segundo entre acero y latón. Las placas se unen por medio de un perno con un agujero para permitir el desplazamiento. Los elementos se colocan en diagonales de manera que si la carga axial sobre estos excede un umbral, el sistema se desliza y disipa energía por fricción. Los ciclos histeréticos de los dispositivos son estables y casi rectangulares. Los dispositivos se incorporaron en un modelo de tres niveles en los laboratorios de la Universidad de California en Berkeley. Los primeros resultados publicados muestran que el sistema no tuvo degradación después de ser sometido a varios temblores.

## **DISIPADORES CON COMPORTAMIENTO VISCOSO Y VISCOELÁSTICO**

Los disipadores de este tipo, se colocan en forma similar a los de fricción, pero su comportamiento es muy diferente, al depender la energía disipada de la velocidad. Los dispositivos de comportamiento viscoso de uso más frecuente, consisten en un fluido cuyo movimiento se produce por el desplazamiento de un pistón. Su diseño puede realizarse para que bajo una excitación armónica las fuerzas generadas en el dispositivo se encuentren fuera de fase

con respecto al movimiento de la estructura. Por su parte, los dispositivos de comportamiento viscoelástico son generalmente polímeros, en los que las fuerzas desarrolladas en ellos suelen contener componentes en fase y componentes fuera de fase del movimiento de la estructura, bajo excitación armónica.

Estudios experimentales de marcos con dispositivos con comportamiento viscoelástico, se han llevado a cabo por Lin y col, 1988 (fig 3.27). Los ciclos histeréticos se grafican en la fig 3.28. Los resultados obtenidos muestran un fuerte incremento del amortiguamiento del marco y reducciones importantes en la respuesta. Esta misma conclusión fue obtenida en el estudio de Aiken, Kelly y Mahmoodi (1990), donde se encontraron incrementos despreciables de temperatura en el material viscoelástico, generados durante la prueba.

Soong y Mahmoodi (1990) estudiaron el comportamiento de este sistema al variar la temperatura de 22° C a 35° C. Encontraron que existe una fuerte dependencia del amortiguamiento con este parámetro, por lo que se debe tener especial cuidado en su evaluación.

Kirekawa y Asano (1992) realizaron una prueba experimental sobre un marco de acero de un nivel con un disipador viscoelástico de acrílico. Las curvas histeréticas resultaron muy estables con buena capacidad de disipación. Sin embargo, se encontró que el amortiguamiento depende sensiblemente de la temperatura ambiente a la que se lleve a cabo la prueba.

Chang y col (1992) proponen un procedimiento de diseño para el análisis de estructuras con disipadores viscoelásticos. Las fórmulas propuestas se obtuvieron con base en resultados de estudios analíticos y experimentales de un modelo de laboratorio de cinco niveles de acero, escala 2/5.

Constantinou y col (1993) probaron un amortiguador consistente en un pistón de acero con un

Estado del arte de dispositivos para reducir los daños provocados por temblores

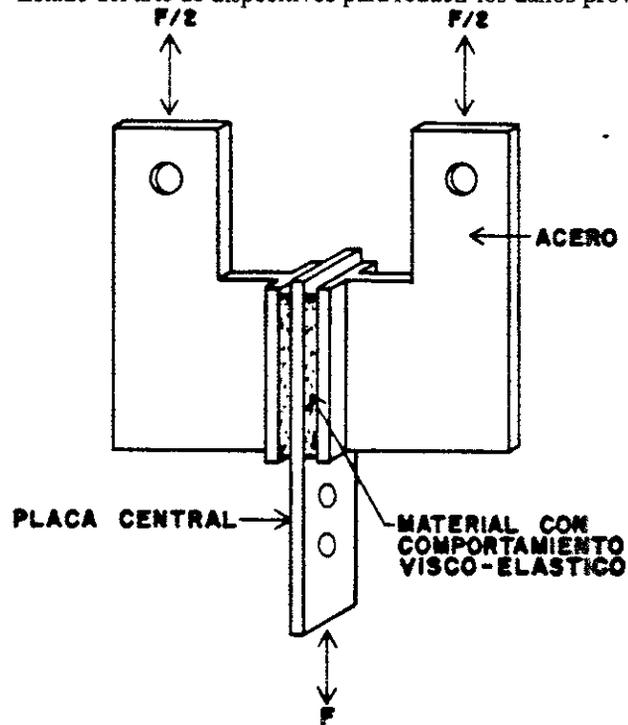
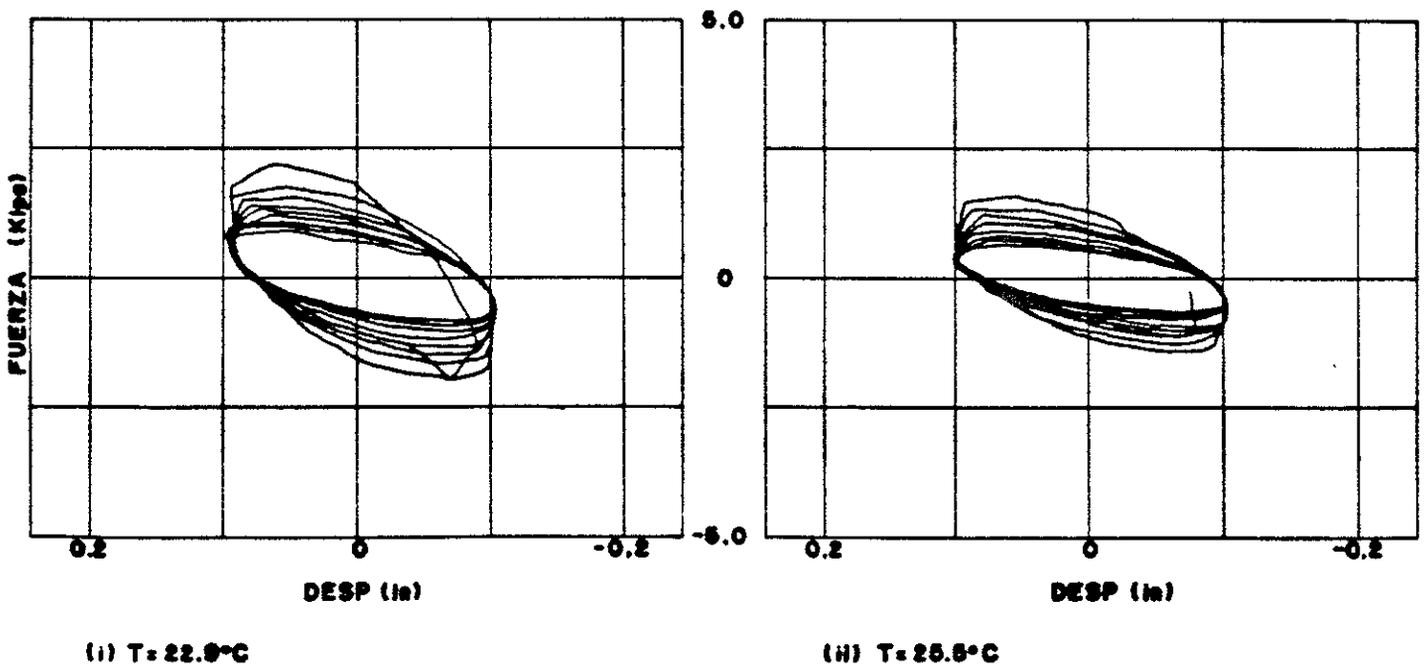


Figura 3.27 DISIPADOR CON COMPORTAMIENTO VISCOELASTICO



(i)  $T = 22.8^{\circ}\text{C}$

(ii)  $T = 25.5^{\circ}\text{C}$

Figura 3.28 COMPORTAMIENTO HISTERETICO DEL DISPOSITIVO VISCOELASTICO

orificio de bronce que contiene en su interior fluido viscoso con comportamiento viscoso. A diferencia de otros dispositivos del mismo tipo, este reduce los desplazamientos laterales y los momentos flexionantes sin introducir fuerzas axiales importantes. El análisis de un modelo de marco de acero de tres niveles mostró reducciones de la respuesta de dos a tres veces con respecto al marco sin los dispositivos, al someterse al registro del temblor de El Centro, 1940. Estos dispositivos se incorporaron también en un puente, apoyado sobre aisladores, para incrementar su capacidad de disipación. Los resultados muestran un incremento del amortiguamiento del sistema hasta un valor cercano al 50% del crítico. Una limitante de los dispositivos con este comportamiento es que su comportamiento histerético depende de la frecuencia de excitación.

Estudios analíticos y experimentales de estructuras con dispositivos de comportamiento viscoso, así como su implementación en edificaciones reales, se describen en Taylor (1996), Miyamoto y Scholl (1996-a), Miyamoto y Scholl (1996-b) y Elhassan y Ekwueme (1996).

Un uso importante de este tipo de dispositivos se ha dado en el refuerzo de puentes existentes como se describe en Delis (1996), Aiken y Kelly (1996) y Ingham, et al (1997).

Con la finalidad de comparar la efectividad de la utilización de dispositivos de comportamiento viscoelástico y viscoso, Fu (1996) estudia la respuesta analítica de una edificación de diez niveles en la que se incorporan dispositivos con ambos tipos de comportamiento. Los resultados le permiten concluir que ambos dispositivos incrementan la rigidez y amortiguamiento de la estructura original, logrando reducciones similares de la respuesta. Sin embargo, los disipadores de comportamiento viscoso generan mayor amortiguamiento y menos rigidez que los correspondientes de comportamiento viscoelástico, cuando son diseñados para la misma capacidad de disipación.

Al considerar que los dispositivos de comportamiento viscoso, suelen producir grandes reacciones relacionadas con los altos valores de amortiguamiento que proporcionan, para eventos sísmicos de gran magnitud y que los dispositivos de comportamiento elastoplástico pueden tener deformaciones permanentes después de un temblor grande, Takeshi, et al (1998) proponen un dispositivo compuesto por un amortiguador viscoso y un dispositivo de comportamiento elastoplástico en serie, que de acuerdo con sus resultados experimentales solucionan ambos problemas y también mejora la respuesta estructural para eventos sísmicos de magnitud pequeña.

### **3.1.2 AISLADORES SÍSMICOS**

Estos sistemas tienen como finalidad aislar la superestructura de la cimentación. La mayoría de los aisladores sísmicos desarrollados incrementan considerablemente el periodo fundamental de vibración de la estructura. Se han aplicado fundamentalmente en lugares donde los principales temblores que ocurren tienen gran contenido de frecuencias altas; así, la estructura se aleja de los periodos con amplificaciones importantes en los espectros.

Los primeros intentos por usar aisladores como los actuales se describieron en el Tercer Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica celebrado en 1965 (Katsuta y Mashizu, 1965, y Matsushita e Izumi, 1965-a y b).

Las primeras aplicaciones de los aisladores de base actuales fueron en puentes debido a que estas estructuras normalmente se apoyan sobre placas de neopreno para permitir el libre desplazamiento ocasionado por cambios de temperatura. Esto permitió la sustitución, sin mayores modificaciones, de las placas de neopreno por aisladores de base.

Entre los primeros aisladores de base fabricados comercialmente se encuentran los apoyos

rectangulares o circulares formados con placas de hule intercaladas con placas más delgadas de acero (fig 3.29). Este sistema es muy flexible horizontalmente pero tiene gran rigidez vertical. Su disipación de energía es pequeña y su objetivo fundamental consiste en flexibilizar lateralmente la estructura.

Estos aisladores se han combinado con algunos de los sistemas disipadores de energía mencionados anteriormente, para tener en conjunto una estructura flexible con disipación de energía en la base (Skinner y col, 1975-a y b, y Skinner y McVerry, 1975). En la Universidad de California, en Berkeley se realizaron estudios de laboratorio con una combinación como la que se muestra en la fig 3.20 (Kelly, Eidinger y Derhman 1977). Los estudios demuestran la conveniencia de adicionar disipadores de energía para limitar los desplazamientos y tener un comportamiento adecuado en condiciones de servicio. De acuerdo con la modelación analítica del marco, se demostró que la reducción de la respuesta experimental se predice adecuadamente si se considera que el disipador proporciona un porcentaje de amortiguamiento crítico equivalente adicional de alrededor del 30% para el primer modo de vibrar.

En el estudio anterior se destaca también que aunque en general una estructura aislada tiene un comportamiento similar al de un sistema de un grado de libertad, al incorporar disipadores de energía, pueden llegar a tener importancia los modos superiores de vibrar. Esto se comprueba en los estudios de Lee y Medland (1977 y 1978-a) y Priestley, Crosbie y Carr (1977).

Tyler (1977-a) realizó pruebas dinámicas con estos aisladores. Aunque el comportamiento histerético para un número elevado de ciclos de carga, en los que se alcanzó una deformación unitaria al corte de 50% es estable, la disipación de energía es pequeña.

Un sistema similar pero formado con placas de teflón y acero lubricadas y sin lubricar fue probado por Tyler (1977-b). Las áreas de las curvas histeréticas son bastante amplias, lo que hace

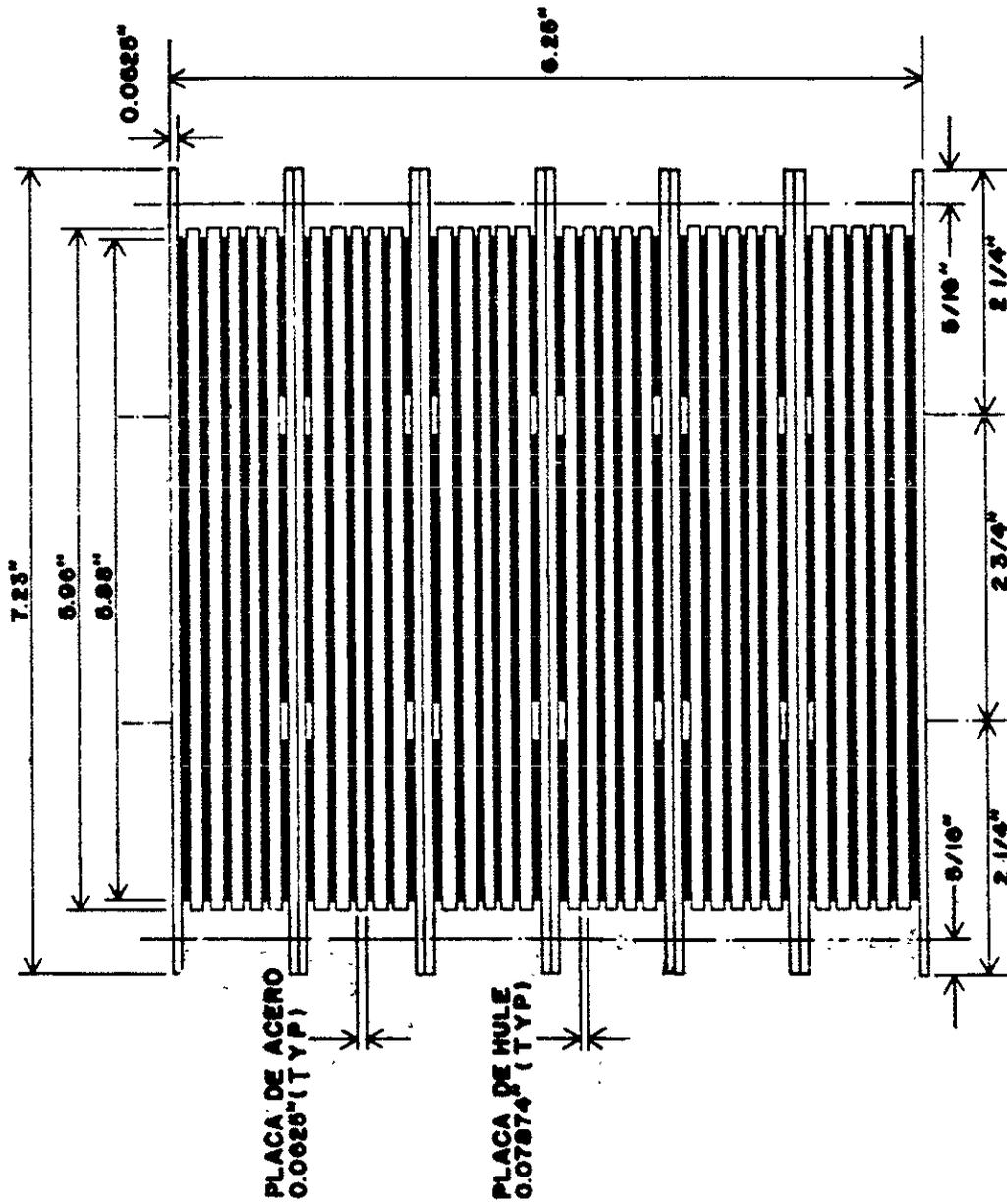


Figura 3.29 AISLADOR DE BASE

atractivo su uso como disipador de energía. Con estas placas Tyler (1977-c) propone un dispositivo para desligar elementos no estructurales que a su vez incrementa el amortiguamiento de la estructura.

Skinner, Tyler y Hodder (1976) estudiaron el comportamiento de una planta nuclear aislada, con dispositivos de acero en cantiliver que disipan energía por comportamiento inelástico. Encontraron reducción de las fuerzas y desplazamientos de diseño, de hasta diez veces.

Robinson y Tucker (1977) y Robinson (1982) realizaron estudios con un aislador en que se insertó un corazón de plomo (fig 3.30) con la finalidad de disipar energía. La principal ventaja sobre los aisladores anteriores es el incremento sustancial de la disipación de energía, como lo muestran los ciclos histeréticos (fig 3.31).

Para mejorar el comportamiento de los aisladores anteriores sometidos a aceleraciones moderadas, Shimoda, Irenaga y Takenaka (1992) proponen que se reduzca la sección del corazón de plomo en los extremos del aislador, al colocar placas de hule verticales entre el plomo y las placas horizontales. El comportamiento mejora sustancialmente para aceleraciones menores de 100 gales. Para valores mayores de la aceleración, el comportamiento es similar al del aislador original.

Con la misma idea de obtener disipación de energía con aisladores de base, Suzuki y col (1992) proponen un nuevo aislador de alto amortiguamiento, formado por placas de hule mezclado con ferrita. Las curvas histeréticas de este aislador son más amplias que las obtenidas con hule normal.

Al usar las propiedades calculadas en Lee y Medland (1978-a), estos autores (1978-b) estudiaron varias estructuras de seis niveles sometidas a 19 tipos de temblores con y sin aisladores. Los

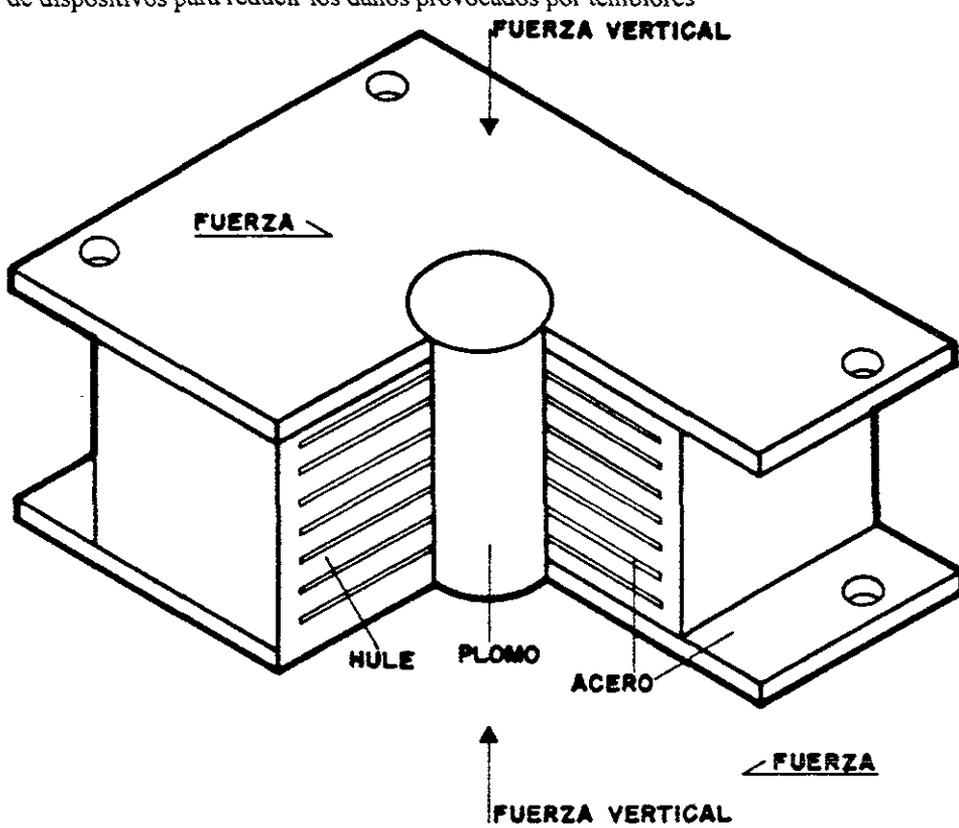


Figura 3.30 AISLADOR DE BASE CON CORAZON DE PLOMO

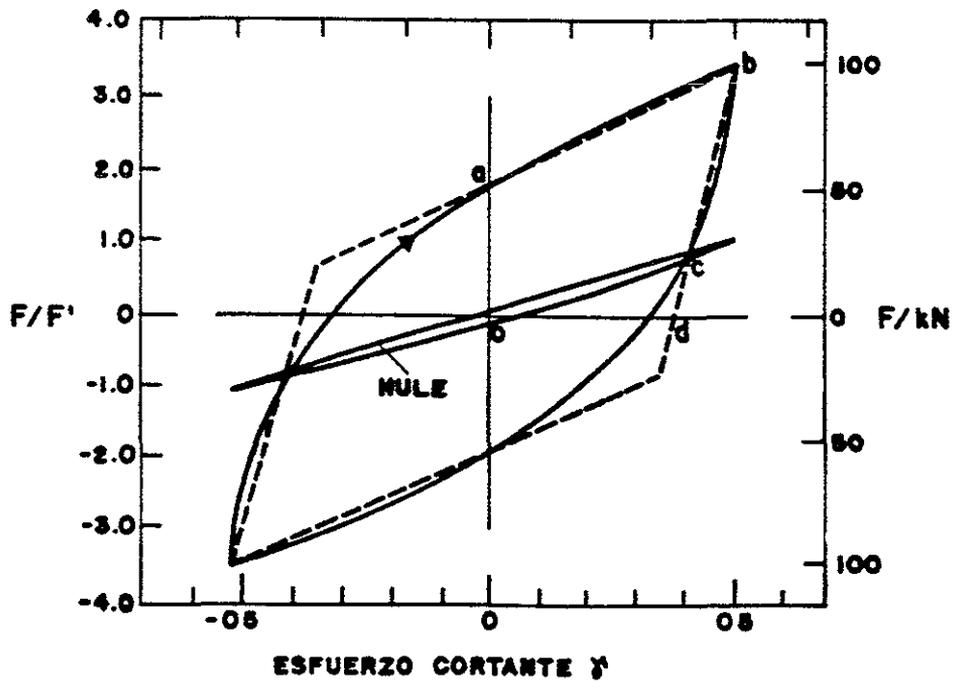


Figura 3.31 COMPORTAMIENTO HISTERETICO

resultados muestran reducciones de la respuesta de hasta 80%, con respecto a la estructura sin aisladores. Los autores dan también algunas recomendaciones de diseño para estructuras aisladas.

Megget (1978) realizó el estudio del primer edificio aislado en Nueva Zelanda. Consta de cuatro niveles con estructuración de marcos de concreto reforzado (fig 3.32). Para protegerlo, se usaron aisladores con corazón de plomo (Robinson y Tucker, 1977). El diseño se realizó con dispositivos lo suficientemente rígidos, para que el plomo se comportara elásticamente ante las máximas fuerzas esperadas producidas por viento. El costo de los aisladores representó el 3.5% del costo total del edificio y se estimó compensado con el costo que tendría el edificio bajo las mismas acciones de diseño, pero sin aisladores.

Kelly, Buckle y Skinner (1980) 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 (1984) encontraron satisfactorio el comportamiento de aisladores de base con corazón de plomo para deformaciones unitarias por corte mayores del 100%. Estudios posteriores corroboran el buen comportamiento del aislador para un gran número de ciclos de carga (Rodwell, Ehrman y Maeno, 1990)

Fujita (1985) hizo una revisión de los sistemas desarrollados en Japón para aislar equipos. Los sistemas se han combinado con amortiguadores de aceite y fricción y/o disipadores.

Constantinou y Tadjbakhsh (1984) muestran las ventajas del uso de aisladores de base en un estudio analítico mediante la teoría de vibraciones aleatorias y modelaron la excitación como un

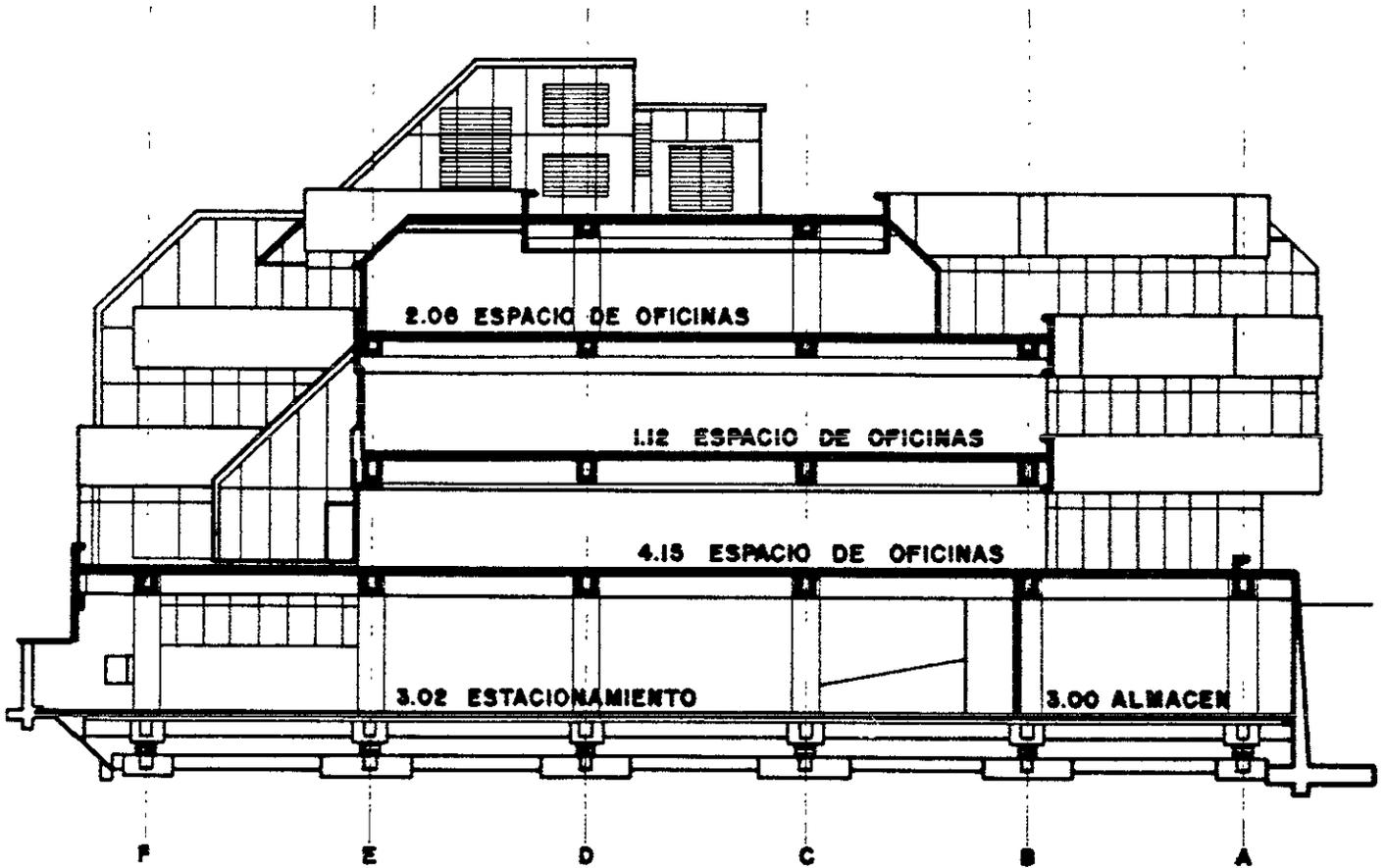


Figura 3.32 SECCION TRANSVERSAL DE UN EDIFICIO CON AISLADORES DE BASE DE CORAZON DE PLOMO.

proceso no estacionario. Esta modelación permitió analizar un gran número de casos; se concluye que los desplazamientos y fuerzas cortantes se reducen de manera muy importante al incorporar los aisladores.

Con la finalidad de contar con métodos que permitan probar un mayor número de estructuras con aisladores de base, Tagami y col (1990) desarrollaron un método de prueba pseudodinámico, para el análisis de estructuras aisladas, al recurrir a técnicas de subestructuración.

El efecto de la aceleración vertical sobre la respuesta, en un sistema de dos masas con aisladores que disipan energía por fricción, fue estudiado analíticamente, por Lin y Tadjbakhsh (1986). Los resultados bajo carga armónica muestran incrementos en la fricción y los desplazamientos relativos al incorporar la aceleración vertical. Sin embargo, su influencia fue prácticamente nula al someter al sistema al sismo del Centro, de 1940.

Kelly, Buckle y Tsai (1986) estudiaron la superestructura de un puente sobre aisladores con y sin corazón de plomo. El aislador con plomo resulto efectivo para disipar energía y limitar los desplazamientos laterales. Encontraron también adecuado el método lineal equivalente, para el análisis de la estructura.

Para el diseño de aisladores, se han desarrollado de criterios que permiten obtener recomendaciones prácticas como las de Priestley, Crosbie y Carr (1977), Kelly, Buckle y Tsai (1986), Mehrain y Clayton (1987), Chalhoub y Kelly (1990), Kelly (1990), Mayes, Jones y Buckle (1990), Kuntz (1990) y Griffith y col (1990-b).

Tadjbakhsh y Lin (1987) 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.

Anderson y Saunders (1987) estudiaron el uso de aisladores en la reparación y en el reforzamiento de edificios antiguos. Los elementos mecánicos y desplazamientos obtenidos bajo acciones sísmicas, corroboran los resultados de otros investigadores, con relación a los porcentajes de reducción de la respuesta.

Andriano y Carr (1987) colocaron aisladores de base en estructuras de muros de concreto. Comprobaron, con buenos resultados, la aproximación del método lineal equivalente y la distribución de fuerzas propuesta por Priestley Crosbie y Carr (1977).

Constantinou, Caccese y Harris (1987) determinaron experimentalmente la variación de la fricción en una interfase de teflón con acero. La fricción se incrementó al crecer la aceleración y disminuyó al aumentar la presión sobre las placas. Para frecuencias de la estructura menores a 0.5 Hz. y presiones bajas, el sistema proporciona un aislamiento eficiente para temblores moderados y grandes. Para otras combinaciones se carece de estudios experimentales que muestren el comportamiento.

Mokha, Constantinou y Reinhorn (1990-a y b) realizaron estudios experimentales de aisladores con superficies de teflón. Determinaron que este material reduce la transferencia de frecuencias altas a la estructura por la dependencia de la fricción con la velocidad de deslizamiento. Con base en estos estudios se dan propuestas para el modelado analítico de este material.

Kelly (1981) e Ikonolmou (1982) proponen la sustitución de las placas de acero por teflón en los aisladores de base. El sistema cuenta con una varilla de acero que conecta la superestructura con la subestructura diseñada para fallar cuando las fuerzas producidas por el temblor exceden de

cierto umbral (fig 3.33).

Griffith y col (1988) estudiaron un modelo experimental de siete niveles, 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 Griffith, Aiken y Kelly (1990-a) proponen un aislador con un dispositivo en el centro que le permite trabajar en tensión y reducir los desplazamientos (fig 3.34). La efectividad del dispositivo se comprobó al estudiar un modelo de nueve niveles sometido a varios temblores.

Nagarajaiah, Reinhorn y Constantinou (1989) desarrollaron un programa de computadora para analizar tridimensionalmente estructuras aisladas. Calibraron los resultados con estudios experimentales de otros investigadores. Posteriormente Nagarajaiah, Reinhorn y Constantinou (1990) 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. Roeder, Stanton y Taylor (1990) realizaron 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 sus 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 ser un aspecto importante en el diseño.

Zayas, Low y Mahin (1990) y Bozzo, Mahin y Zayas (1990) proponen un sistema de aislamiento de superficie cóncava basado en el movimiento de un péndulo. La fuerza restitutiva es proporcionada por la forma del dispositivo. El material con que se fabrica es acero y en la zona

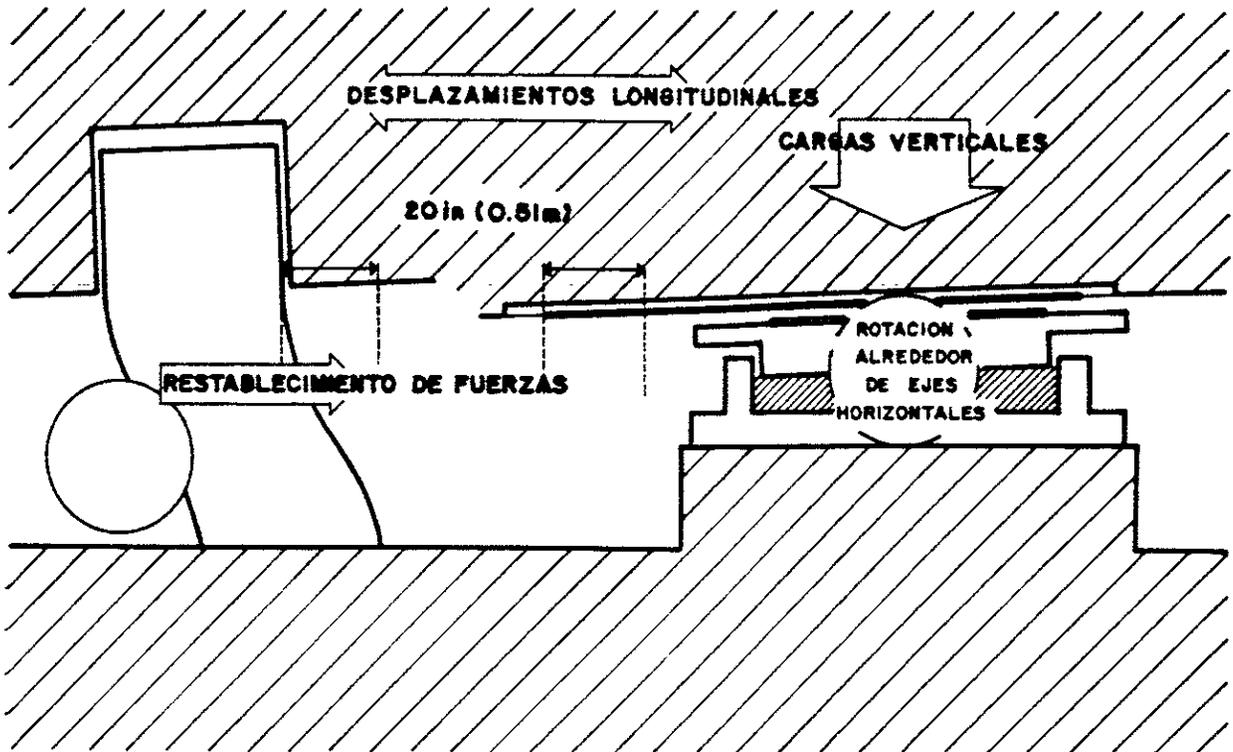


Figura 3.33 SISTEMA DE AISLAMIENTO USANDO PLACAS DE TEFLON

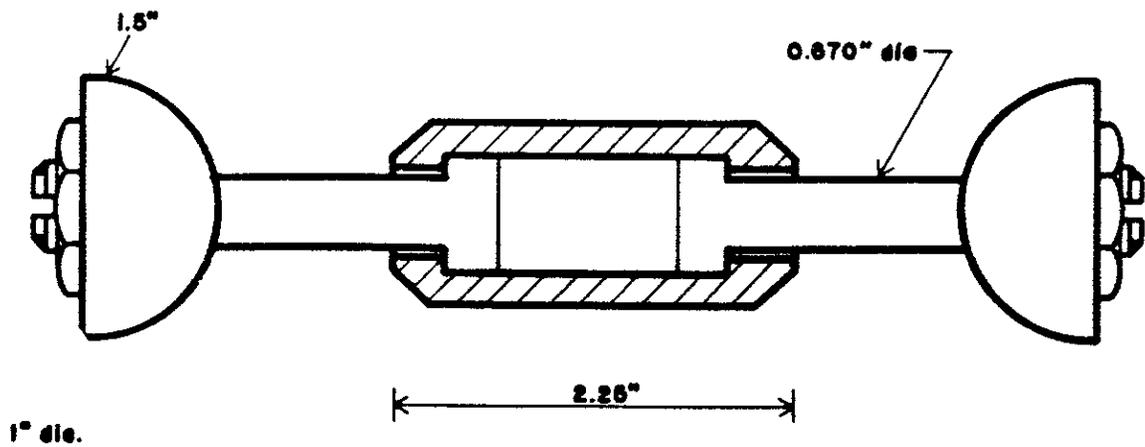


Figura 3.34 AISLADOR DE BASE CON DISPOSITIVO PARA TOMAR TENSIONES

de deslizamiento cromo (fig 3.35). Por la geometría 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 concentraciones de masa en la estructura disminuyan en el nivel de aislamiento. Su comportamiento histerético se muestra en la fig 3.36. Su principal desventaja es que las superficies de cromo, como ocurre con el teflón, se adhieren con el tiempo.

En México a mediados de los 60, González Flores (1964) desarrolló un sistema de aislamiento de base con placas de acero y balines (fig 3.37). El aislador fue incorporado en dos edificios de cinco niveles que hasta la fecha han mostrado buen comportamiento. Su principal limitación se encuentra en la carencia de un dispositivo 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.

Un sistema similar pero con control de desplazamiento (fig 3.38) fue propuesto por Anderson (1990). El dispositivo redujo 30% la aceleración en un marco de acero de diez niveles y los efectos  $P - \delta$  con respecto al marco original. Su comportamiento histerético se muestra en la fig 3.39.

Kaneko y col (1990) estudiaron la efectividad de cuatro tipos de aisladores de base colocados en estructuras reales de Japón. Se analizaron dos aisladores de hule laminados combinados con dispositivos amortiguadores con aceite y con disipadores formados por placas de acero; aisladores de hule de alto amortiguamiento y 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. Se estudió su comportamiento bajo los temblores ocurridos en Japón entre 1986 y 1989 con un intervalo de magnitudes entre 3.4 y 6.8. El comportamiento observado para estos eventos

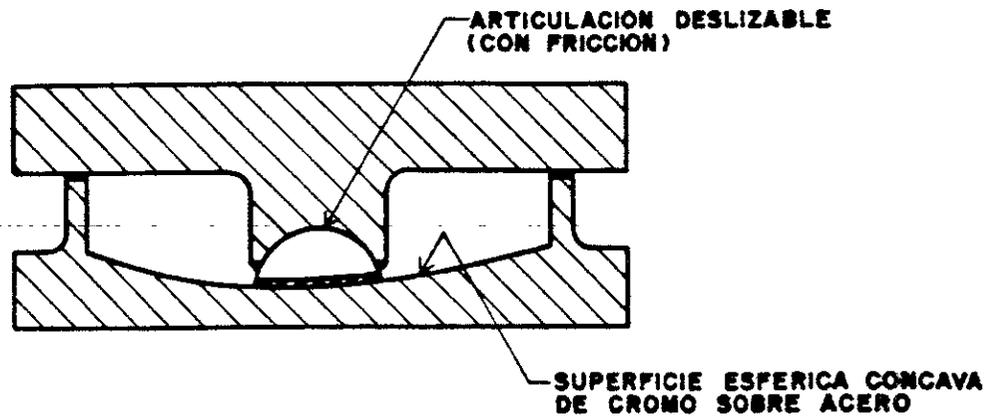


Figura 3.35 PENDULO DE FRICCIÓN

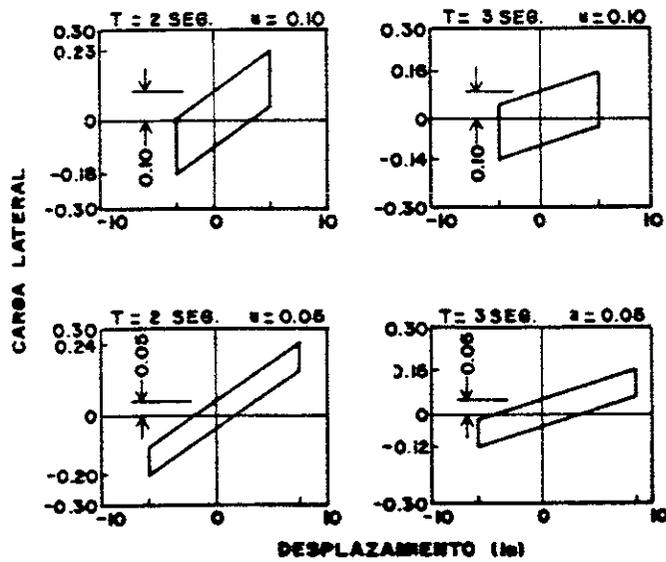


Figura 3.36 COMPORTAMIENTO HISTERETICO

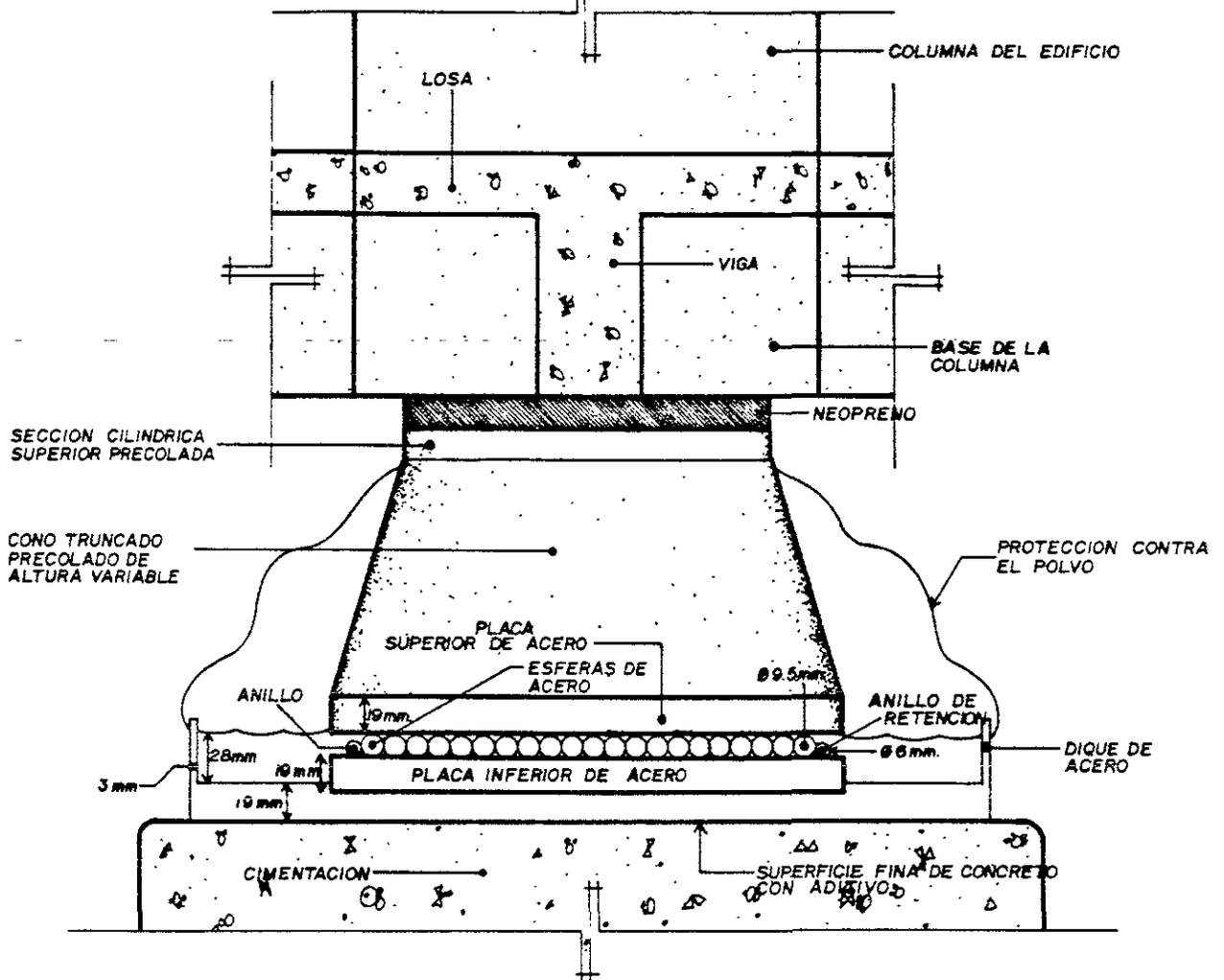


Figura 3.37 AISLADOR DE BASE DEL ING. MANUEL GONZALEZ FLORES

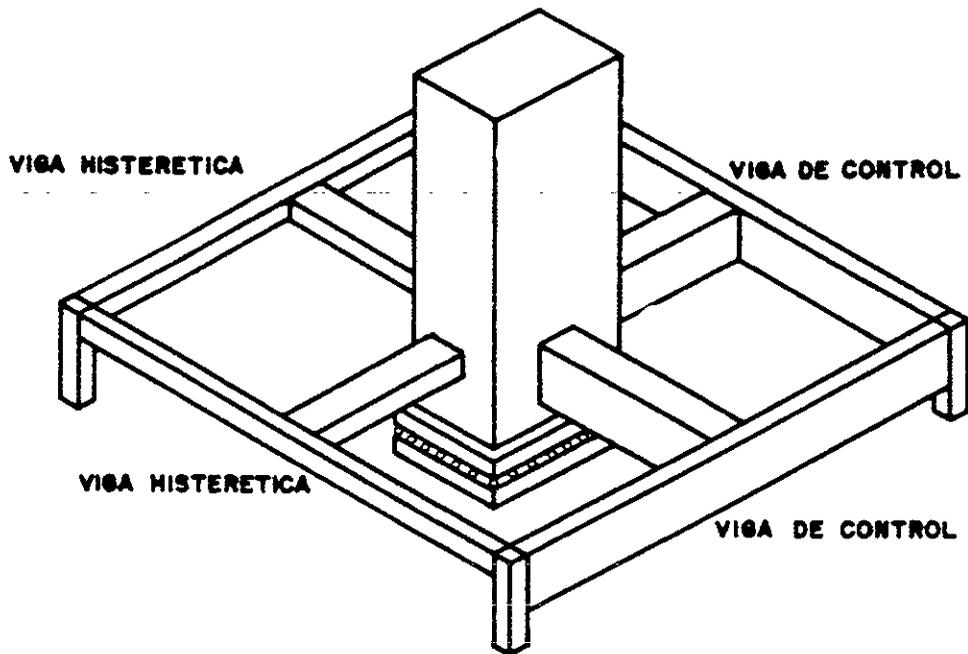


Figura 3.38 AISLADOR CON CONTROL DE DESPLAZAMIENTOS

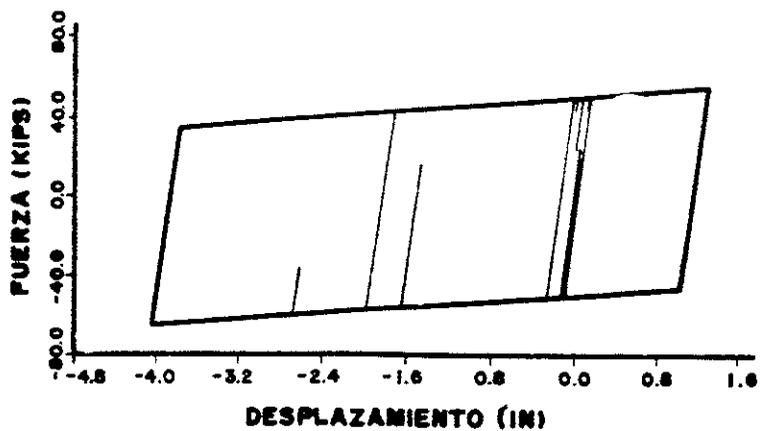


Figura 3.39 COMPORTAMIENTO HISTERETICO

muestra reducciones de entre 40 y 67% en la máxima aceleración de la azotea, normalizada con respecto a la aceleración registrada en la cimentación.

Buckle y Mayes (1990-a) 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 desplazamientos y fuerzas cortantes de 40% y 50% respectivamente.

Un sistema interesante para aislar edificios fue desarrollado en México y probado experimentalmente en la Universidad de Illinois (Foutch, Garza y Tobias, 1994). El sistema de aislamiento funciona como un péndulo, por lo que el periodo del edificio aislado puede ajustarse para lograr las máximas reducciones de la respuesta como función de la ubicación de la estructura.

Buscando nuevos materiales que mejoren el comportamiento de los que tradicionalmente se utilizan, se han hecho aleaciones cuyo comportamiento esfuerzo deformación es como el mostrado en la fig 3.40. La gráfica del inciso a) corresponde a temperaturas menores a cierto umbral; si la temperatura al formar la aleación se incrementa, se puede tener un comportamiento como el de la figura b) (que disipa energía sin deformación permanente) o el de la figura c). Graesser y Cozzarelli (1989) han propuesto su uso para aisladores de base. Materiales con estas características podrían ser los que en un futuro se usen en la construcción.

Poco se ha avanzado en estudios que muestren la factibilidad económica de los sistemas aisladores de base. Kelly, Mayes y Weissberg (1989) hacen una estimación para una estructura aislada y otra sin aislar según la metodología desarrollada por Ferrito (1984). Los costos así obtenidos no pueden considerarse generales, lo que confirma la necesidad de dirigir futuros estudios con este objetivo.

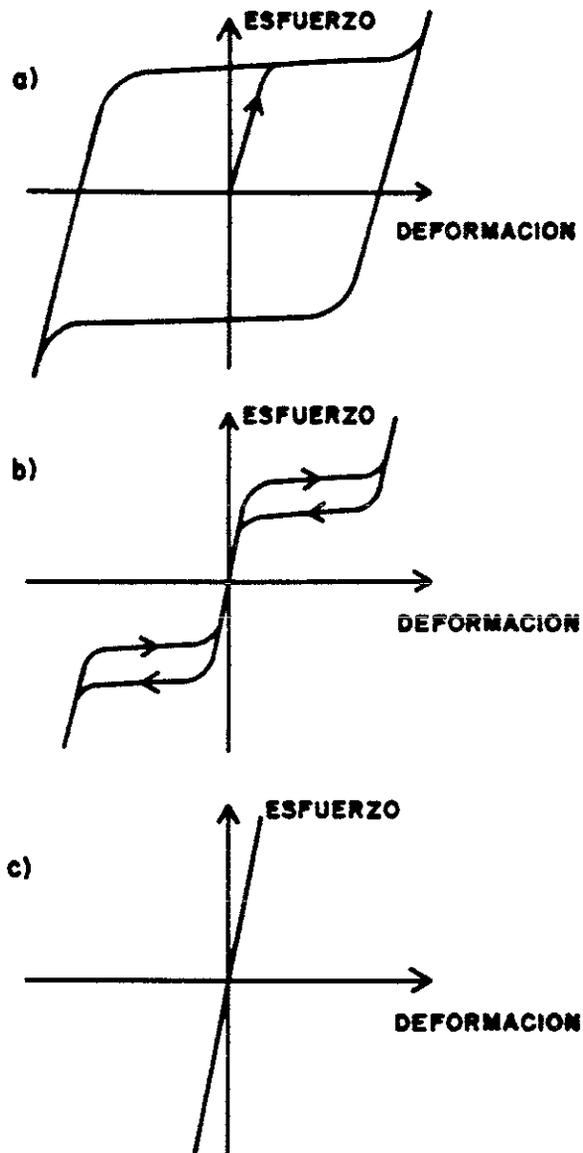


Figura 3.40 CURVAS ESFUERZO DEFORMACION DE DISPOSITIVOS DE ALEACION CON MEMORIA ADAPTABLE.

Mediante un estudio costo-beneficio Mayes, Buckle y Jones (1988) muestran la factibilidad del uso de aisladores en la industria de la prefabricación. Este estudio, sin embargo, no incorpora aspectos importantes para obtener conclusiones generales, como son la consideración de daños por eventos que ocurran en el futuro, durante la vida útil de la edificación.

Debido al creciente interés por los aisladores de base se han propuesto criterios de toma de decisiones para determinar la factibilidad de su uso (Olson y Lambright, 1990 y Sharpe, 1990).

Se han construido varias estructuras con aisladores de base como las descritas en Charleson, Wright y Skineer (1980), Skinner (1982), Andriano y Carr (1987), Takayama, Tada y Wada (1987), Skinner y col (1980), Kelly (1988), McVerry y Robinson (1989), Way y Howard (1990), Tajirian, Kelly y Aiken (1990), Gates, Hart y Crouse (1990), Anderson (1990), Sveinsson y col (1990), Asher y col (1990), Hart y col (1990), Bachman, Gomez y Chang (1990), Jones, Mayes y Sveinsson (1989), Mayes, Jones y Buckle (1989), Jones (1990), Higashino (1990), Saruta, Yokota y Watanabe (1990), Eisenberg y col (1992), Vestroni y col (1992), Tanabe y col (1992), Sarrazin y Moroni (1992), Amin, Mockha y Fatehi (1993), Cho y Retamal (1993), Kelly y Boardman (1993), y Okoshi, Nakawa y Kawamura (1993).

Villaverde (1993) hace una revisión crítica de los sistemas de control activo y pasivo, y describe las principales estructuras en las que se han implementado. 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

La inclusión de una o varias masas, sobre un edificio puede reducir considerablemente su respuesta ante eventos sísmicos, si son seleccionadas como pisos adicionales con ciertas propiedades dinámicas.

Den Hartog (1956) fue uno de los primeros investigadores que abordó el tema de sistemas con osciladores resonantes, demostró que con ciertos parámetros dinámicos del sistema conjunto pueden obtenerse reducciones importantes de la respuesta. En un sistema de dos grados de libertad, si el periodo de la excitación 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. Al existir 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 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 piso (Korenev y Reznikov 1988 y Khachian y col, 1990).

Paniagua, Gómez e Iglesias (1989) estudiaron analíticamente 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 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 y Soni (1977), Villaverde y Newmark (1980), Villaverde (1986 y 1988), Yang, Sarkani y Long (1988), Chen y Soong (1989), Ibrahim, Grigoriu y Soong (1989) e Igusa (1990).

En la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana, 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. Si se permite que la estructura tenga demandas de ductilidad moderadas, los desplazamientos del oscilador disminuyen considerablemente. Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos, la disminución de la respuesta es considerablemente dependiente de las características dinámicas de la estructura con relación a las correspondientes a la excitación, lo que hace poco atractivo su uso.

### 3.1.4 CABLES DE PRESFUERZO

Los enormes daños provocados por los temblores de septiembre de 1985 obligaron a buscar sistemas alternativos de reparación y rigidización de estructuras. Uno de los sistemas propuestos utilizado para reforzar escuelas fue la inclusión de cables de presfuerzo como contravientos de la estructura para incrementar su resistencia y rigidez (Rioboo y Tapia, 1989). Se han llevado a cabo estudios analíticos (Paniagua, Gómez e Iglesias, 1989) y experimentales (Miranda y Bertero, 1989) 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 lo hace atractivo como una posible solución para la reducción de daños sísmicos. Los estudios anteriores se han limitado a estructuras pequeñas con estructuraciones similares a las que se utilizan en la construcción de escuelas bajo 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 al incorporar 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 atractiva para edificios pequeños y de mediana altura, como se comprueba en los estudios analíticos de Jara y col (1992) y Gómez y col (1993), donde se muestra que para edificios diseñados originalmente con demandas de ductilidad de dos y cuatro, esta pueden reducirse de manera apreciable al incluir los cables de presfuerzo.

## **3.2 DISPOSITIVOS DE CONTROL ACTIVO**

El control activo se basa en el principio de eliminar las vibraciones de una estructura mediante la aplicación de fuerzas externas o modificando la rigidez lateral de la estructura durante la acción del sismo. El movimiento se detecta mediante la inclusión de sensores, en varias partes de la estructura, que miden la respuesta de esta y las excitaciones externas.

Los sensores se conectan a una computadora que envía señales a sistemas (actuadores) que aplican fuerzas a la estructura con la finalidad de contrarrestar el movimiento.

Los principales sistemas desarrollados en la actualidad se describen a continuación:

### **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 es controlado 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 (fig 3.41). 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 (Toyama y col, 1992). Mediciones de la respuesta ante la acción del viento han mostrado que el movimiento lateral del edificio es de alrededor del 30% del que tendría, si no existiera la 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

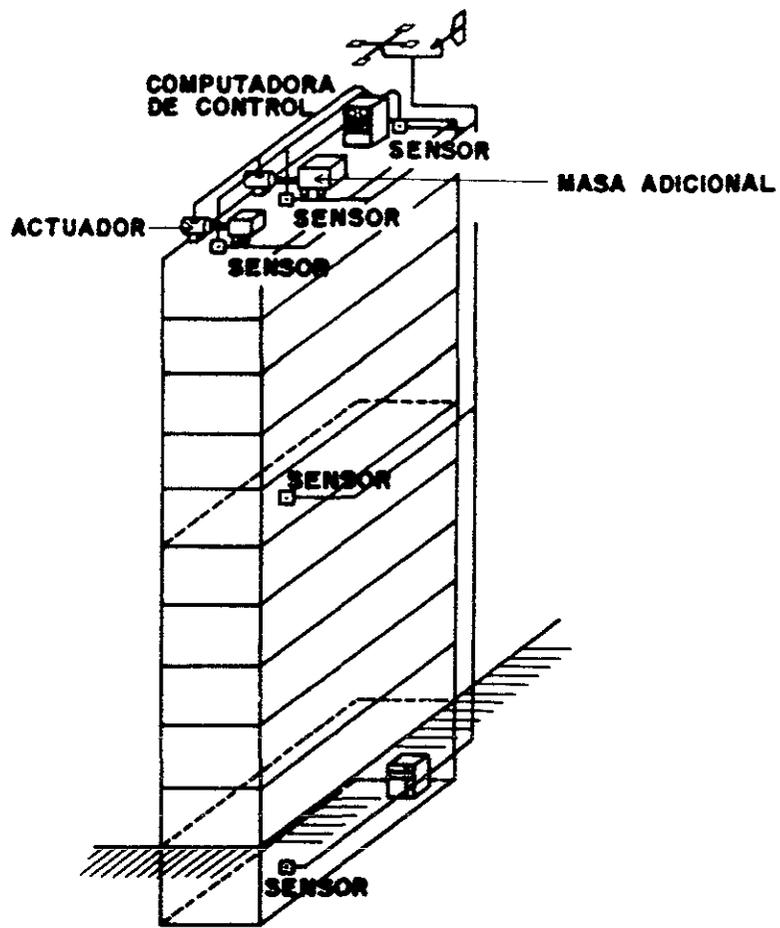


Figura 3.41 SISTEMA DE MASA ACTIVA

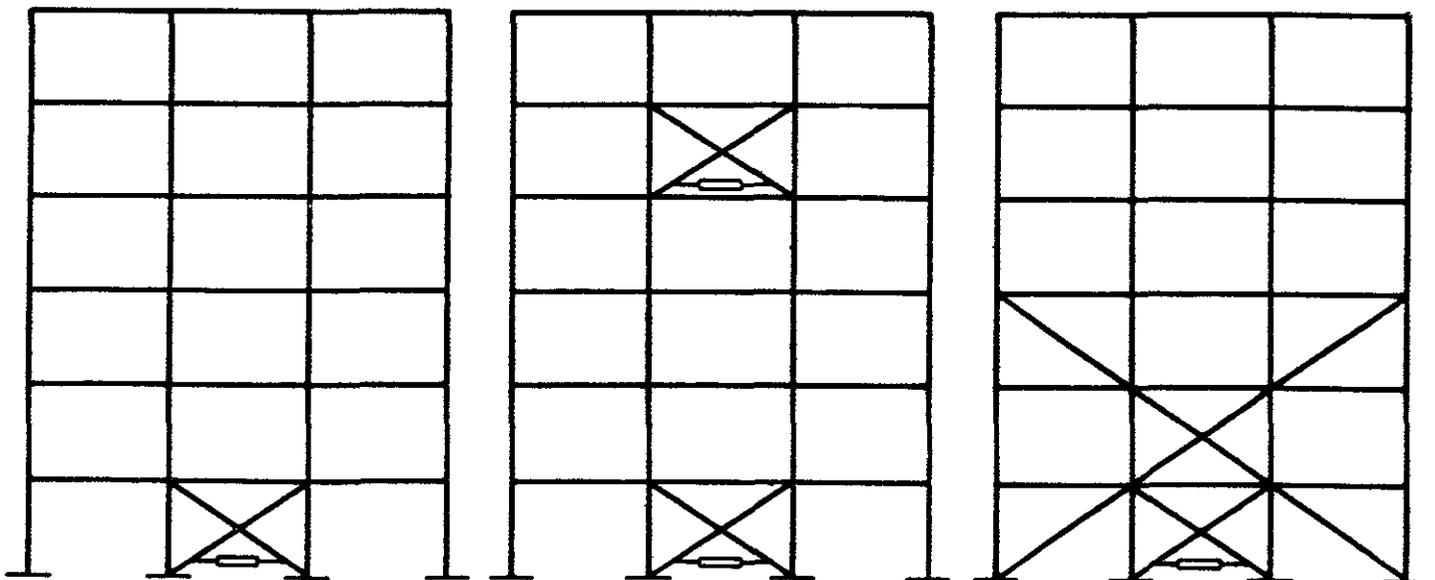


Figura 3.42 SISTEMA DE TENDONES ACTIVOS EN UN MODELO ESTRUCTURAL DE SEIS NIVELES

dispositivos, se han propuesto diversos sistemas como el descrito por Maebayashi y col, 1992. Se 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 un edificio del Japón de siete niveles.

Similar al anterior, Fujita y col (1992) describen 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 la de Kitamura y col (1992), que 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%.

## **TENDONES ACTIVOS**

Los tendones son contravientos colocados diagonalmente en forma de X que abarcan uno o varios niveles de la estructura (fig 3.42). 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 y con esto 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. Descripciones más detalladas de estos elementos y resultados de estudios de laboratorio se encuentran en Higashino (1990) y Soong (1990 y 1991).

Se han propuesto métodos de análisis para estos sistemas como los descritos en Cheng (1990), Suhardjo, Spencer y Sain (1990) y Yamada y col (1990).

## **DISPOSITIVO DE FRICCIÓN ACTIVO**

Akbay y Aktan (1990) propusieron un sistema de control activo, que disipa energía por fricción, similar al pasivo de Pall (1982). El sistema puede controlar la fuerza umbral de deslizamiento de los dispositivos en condiciones de servicio y en condiciones últimas.

Una descripción reciente de los sistemas de control activo y pasivo desarrollados a la fecha se puede consultar en Housner (1997).

### **3.3 COMENTARIOS FINALES**

La aplicación de los sistemas anteriores depende de, entre otros parámetros, las características de los eventos sísmicos, la localización de la edificación y de las propiedades dinámicas de la estructura.

Los disipadores de energía tiene como principales ventajas el soportar un número alto de ciclos de carga y descarga sin mostrar degradación, disipando energía mediante comportamiento histerético y que prácticamente no requieren mantenimiento. Entre sus desventajas se encuentra que para temblores de baja intensidad su comportamiento es elástico, por lo que poco

contribuyen en la disipación de energía y que pueden adquirir una deformación permanente después de la ocurrencia de un evento de gran magnitud. Dadas estas características, y considerando que para su funcionamiento dependen de los desplazamientos relativos de entrepiso, son una opción atractiva para la disminución de daños provocados por temblores en estructuras sometidas a eventos de gran magnitud, alejadas de los epicentros, como lo es la zona blanda de la ciudad de México.

Los dispositivos de fricción funcionan cuando la fuerza axial sobre ellos excede cierto valor umbral de diseño, por lo que no suelen contribuir de manera importante para eventos sísmicos de baja intensidad. Su principal ventaja está en el incremento importante de amortiguamiento que se genera al iniciar su funcionamiento. Sin embargo, especial cuidado debe tenerse al utilizar estos dispositivos debido a la posible modificación, con el tiempo, de las propiedades mecánicas de la superficie de contacto que genera la fuerza de fricción.

Los dispositivos de comportamiento viscoelástico incrementan la rigidez de la estructura y de manera mucho más importante el amortiguamiento. Esto hace que para estructuras con periodo fundamental cercano al periodo dominante de la señal sísmica, la respuesta con estos dispositivos sea reducida considerablemente. Su principal desventaja se encuentra en que la mayor parte de estos sistemas están contruidos con polímeros, cuyo comportamiento es fuertemente dependiente de la temperatura. Adicionalmente, se tienen incertidumbres con relación a la modificación de sus propiedades a largo plazo.

Los sistemas de comportamiento viscoso han sido utilizados de manera generalizada en la industria militar de varios países, su posible uso en la reducción de la respuesta sísmica de estructuras está iniciando. A diferencia de los dispositivos viscoelásticos, los sistemas de comportamiento viscoso basan su aplicación en el incremento del amortiguamiento fundamentalmente, mediante el paso de un fluido entre compartimientos. El amortiguamiento

adicional que generan puede originar grandes fuerzas de reacción en estructuras sometidas a eventos sísmicos de gran magnitud, razón por la que algunos investigadores están estudiando la aplicabilidad de estos sistema trabajando conjuntamente con dispositivos de otro comportamiento, que permitan reducir estas fuerzas. Una desventaja importante es que requieren cierto mantenimiento, para garantizar que se encuentre siempre en condiciones adecuadas de funcionamiento.

El principal objetivo de los aisladores de base consiste en flexibilizar a la estructura e incrementar el amortiguamiento mediante el comportamiento histerético de materiales como el plomo. Su intervalo de aplicabilidad es considerablemente distinto a los sistemas anteriormente comentados, puesto que suelen utilizarse en estructuras localizadas en lugares en los que, los epicentros de temblores son cercanos. Dado que la esbeltez es uno de los parámetros que restringe su utilización debido a los momentos de volteo y a los desplazamientos laterales, su uso queda limitado a estructuras de mediana altura. Las mayores reducciones de la respuesta se obtienen en estructuras con periodos pequeños bajo excitaciones con grandes contenidos de frecuencias altas. Para edificaciones en las que existe la posibilidad de asentamientos diferenciales, no parece atractivo su uso, puesto que podría originar que los aisladores se deformaran lateralmente, en condiciones de servicio.

El oscilador resonante es un sistema que bajo ciertas condiciones ideales de una estructura (comportamiento elástico) y excitación armónica, reduce la respuesta de forma muy importante, lo que ha hecho atractivo su estudio. Desafortunadamente, en estructuras como las que actualmente se construyen, sometidas a eventos sísmicos de gran magnitud, es prácticamente imposible lograr reducciones importantes de la respuesta, por la imposibilidad de mantener a la estructura con comportamiento elástico, y por la enorme sensibilidad de la respuesta a las propiedades dinámicas de la edificación (que se modifican al incursionar en el intervalo inelástico) y a las características del temblor. La única posibilidad de utilización de este sistema

para reducir la respuesta, es para temblores de magnitud moderada, que den origen a espectros de banda ancha, y que no produzcan comportamiento inelástico de la estructura.

Los cables de presfuerzo son una solución atractiva para rigidizar estructuras pequeñas y de mediana altura. Su principal ventaja se encuentra en que amplía las posibilidades de refuerzo de estructuras existentes, debido a que el esfuerzo axial máximo que soportan los cables es de más de siete veces el esfuerzo de fluencia del acero estructural. Esto permite, cuando así se desea, que la estructura contribuya en la resistencia lateral de la edificación, lo que resulta de particular importancia cuando se compara el comportamiento con sistemas alternativos de rigidización, como el contraventeo de marcos con perfiles de acero estructural o la adición de muros de cortante, que normalmente hacen que los ejes en los que se colocan estos sistemas, sean tan rígidos que la fuerza sísmica es tomada en su totalidad por ellos, dejando a los marcos restantes para soportar únicamente cargas verticales.

Los sistemas de control activo, aunque prometen reducir de manera más eficaz la respuesta sísmica de estructuras de forma eficiente, sin las limitaciones de los sistemas de control pasivo, se encuentran en seria desventaja en nuestro país, por su elevado costo y la necesidad de mantenimiento periódico. 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.

### 3.4 REFERENCIAS

- Aguñiga, F y Jara, J M (1993), "Reducción de daños sísmicos mediante el uso de osciladores resonantes", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Pto. Vallarta, Jalisco, pp 826-832.
- Aguirre, M y Sánchez, R (1989), "Pruebas de elementos disipadores de energía sísmica", IMCYC.
- Aguirre, M y Sánchez, R (1990), "Disipadores de energía sísmica", Construcción y Tecnología, Vol. III, No. 27, pp 15-19.
- Aiken, I D, Kelly, J M, y Mahmoodi, P (1990), "The application of viscoelastic dampers to seismically resistant structures", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 459-468.
- Aiken, I D y Kelly, J M (1996), "Cyclic dynamic testing of fluid viscous dampers", Proceedings of the Fourth Caltrans Research Workshop, California Department of Transportation, Sacramento.
- Akbay, Z y Aktan, H M (1990), "Intelligent energy dissipation devices", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 427-435.
- Alonso, J L (1989), "Mechanical characteristics of X-plate energy dissipators", CE 299 Report, University of California at Berkeley.
- Amin, N, Mokha, A y Fatehi, H (1993), "Seismic isolation retrofit of the U.S. Court of Appeals Building", Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, ATC 17-1, San Francisco California, V1, pp 185-196.
- Anderson, J C y Saunders, W D (1987), "Seismic rehabilitation using strengthening and isolation", Pacific Conference on Earthquake Engineering, Nueva Zelanda, 297-308.
- Anderson, J C (1990), "A slip surface isolation system for multistory buildings", Earthquake Spectra, Vol 6, No.2, pp 353-369.
- Anderson, T L (1990), "Seismic isolation design and construction practice", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 519-528.
- Andriano, T and Carr, A J (1987), "Seismic performance of base-isolated multistorey structures",

Pacific Conference on Earthquake Engineering, Nueva Zelanda, 309-320.

Asher, J W, Van Volkinburg, D R, Mayes, R L, Kelly, T, Sveinsson, B I y Hussain, S (1990), "Seismic isolation design of the USC University Hospital", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 529-538.

Bachman, R E, Gómez, M J y Chang, K C (1990), "Verification analysis of the base isolated Los Angeles County Fire Command and Control Facility", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 539-548.

Beck, J L y Skinner, R I (1974), "The seismic response of a reinforced concrete bridge pier designed to step", International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 2, pp 343-358.

Bergman, D M y Hanson, R D (1990), "Viscoelastic versus steel plate mechanical damping devices and experimental comparison", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 469-477.

Bozzo, L, Mahins, S y Zayas, V (1990), "Design of friction base isolation systems", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 549-557.

Buckle, I G y Mayes, R L (1990-a), "Seismic retrofit of bridges using mechanical energy dissipators", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 305-314.

Constantinou, M C y Tadjbakhsh, I G (1984), "Hysteretic dampers in base isolation random approach", J Struct Eng, ASCE, Vol 111, No 4, pp 705-721.

Constantinou, M C, Caccese, J y Harris, C H (1987), "Frictional characteristics of teflon-steel interfaces under dynamic conditions", International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 15, pp 751-759.

Constantinou M C, Symans, M D, Tsopelas, P y Taylor, D P (1993), "Fluid Viscous dampers in applications of seismic energy dissipation and seismic isolation", Proc of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control, ATC 17-1, San Francisco California, pp 581-592.

Chalhoub, M S y Kelly, J M (1990), "Comparison of SEANOC Base Isolation Tentative Code to shake table test", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 116, No 4, pp 925-938.

Chang, K C, Soong, T T, Lai, M L y Nielsen, E I (1993), "Development of a design procedure

for structures with added viscoelastic dampers", Proceedings of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, ATC 17-1, San Francisco California, V2, pp 473-484.

Charleston, A W, Wright, P D y Skinner, R I (1987), "Wellington Central Police Station base isolation of an essential facility", Pacific Conference on Earthquake Engineering, Nueva Zelanda, pp 377-387.

Chávez, J H y González, R (1989), "Efecto de dos tipos de amortiguadores externos en la respuesta de una estructura metálica de dos niveles", VIII Cong Nal Ing Sis y VII Cong Nal Ing Estruct, Acapulco, Gro., Vol III, pp F341-F350.

Chen, Y Q and Soong, T T (1989), "Seismic behavior and response sensitivity of secondary structural systems", Report No. NCEER-89-0030, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.

Chen, F Y (1990), "Optimum design of seismic structures: methodologies and results", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 917-926.

Cho, D M y Retamal, E (1993), "Bearings to withstand an earthquake bigger than the "Big One", Proceedings of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, ATC 17-1, San Francisco California, V1, pp 209-220.

Delis, E A, y col (1996), "Energy dissipation in bridges using hydraulic dampers", Proceeding of Structures Congress XIV, Chicago, Illinois, ASCE, Vol. 2, pp 1188-1196.

Den Hartog (1956), "Mechanical Vibrations", 4th ed, MacGraw Hill, NY.

Eisenberg, J M, Melentyev, A M, Smirnov, V I, Nemykin, A N (1992), "Applications of seismic isolation in the USSR", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2039-2046.

Elhassan, R M y Ekwueme, C G (1996), "Analytical investigation of the response of a building with added viscous dampers", Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, México.

Ferrito, J M (1984), "Economics of seismic design for new buildings", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 12.

Filiatrault, A y Cherry, S (1987), "Performance evaluation of friction damped braced steel frames under simulated earthquake loads", Earthquake Spectra, Vol 3, No 1, pp 57-78.

- Filiatrault, A y Cherry, S (1990), "A simplified seismic design procedure for friction damped structures", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 479-488.
- Filiatrault, A, Cherry, M and Byrne, P M (1990), "The influence of México City soils on the seismic performance of friction damped and base isolated structures", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 335-352.
- Foutch, D A, Garza, F y Tobias, D (1994), "Seismic base isolation system based on pendular action", Proceedings of the First World Conference on Structural Control, Los Angeles, California, pp 4.22-4.31
- Fu, Y (1996), "Frame retrofit by using viscous and viscoelastic dampers", Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, México.
- Fujita, T (1985), "Earthquake isolation technology for industrial facilities research, development and applications in Japan", Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng, Vol 18, No 3, pp 224-249.
- Fujita, T, Takanashi, J, Matsumoto, K, Kinoshita, M y Miyano, H (1992), "Mass damper with convertible active and passive modes for response control of buildings", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2079-2083.
- Gates, W E, Hart, G C y Crouse, C B (1990), "Vibration studies of an existing building for base isolation retrofit", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 559-568.
- Gómez, C, Rosenblueth, E y Jara J M (1993), "Estudio paramétrico de estructuras con disipadores de energía", Boletín del Centro de Investigación Sísmica, Fundación Javier Barros Sierra, Vol 3 No.1.
- Gómez, C., Cruz, J I, Jara J M y Vargas, E (1993), "Estudio paramétrico de estructuras con cables de presfuerzo", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jalisco, pp 463-469.
- González M. (1964), "Sistema para eliminar los esfuerzos peligrosos que los temblores causan en las estructuras", V Congreso Mexicano de la Industria de la Construcción, Tijuana, B.C., México.
- Graesser, E J y Cozzarelli, F A (1989), "Multidimensional models of hysteretic material behavior for vibration analysis of shape memory energy absorbing devices", National Center for Earthquake Engineering Research, Report No. NCEER-89-0018, State University of New

York at Buffalo.

Griffith, M C, Kelly, J M, Coveney, V A y Koh, C G (1988), "Experimental evaluation of seismic isolation of medium-rise structures subject to uplift", Earthquake Engineering Research Institute, Report No. UCB/EERC-88/02, University of California at Berkeley.

Griffith, M C, Aiken, I D y Kelly, J M (1990-a), "Displacement control and uplift restraint for base-isolated structures", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 116, No 4, pp 1135-1148.

Griffith, M C, Aiken, I D y Kelly, J M (1990-b), "Comparison of earthquake simulator test results with the SEANOC Tentative Seismic Isolation Design Requirements", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 403-417.

Grigorian, C E y Popov, E P (1993), "Slotted bolted connections for energy dissipation", Proceedings of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control, ATC 17-1, San Francisco California, pp 545-556.

Hart, G C, Gates, W T, Drag, D J, Wallance, W A, Mehrain, M y Elmlinger, J (1990), "Seismic strengthening of a tall building incorporating base isolation", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 333-342.

Higashino, M (1990), "The application of base isolation and structural control system in Takenaka", Seminario sobre Instrumentación Sísmica y Uso de Elementos Disipadores de Energía en el Comportamiento Estructural, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, D.F., pp 249-271.

Housner, G W (1997), "Structural control: past, present and future", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, No. 123, Special Issue, pp 897-971.

Ibrahim, Y, Grigoriu, M y Soong, T T (1989), "Random vibration and reliability analysis of primary-secondary structural systems", National Center for Earthquake Engineering Research, Report No. NCEER-89-0031, State University of New York at Buffalo.

Igusa, T (1990), "Response characteristics of inelastic 2-DOF primary-secondary system", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 116, No.5, pp 1160-1174.

Ikonomov, A S (1982), "Seismic isolation of bridges with the alexisismon", Proceedings Conference Short and Medium Span Bridges, Toronto, pp 141-153.

Inghman, T J, Rodriguez, S y Seim, C (1997), "Use of dampers in the seismic retrofit of the Golden Gate Bridge", Proceedings of the Structures Congress XV, Portland, Oregon, ASCE,

Vol. 2, pp 1219-1223.

- Jara, J M, Vargas, E, Galindo, C, González, R y Gómez, C (1992), "Seismic performance of buildings with energy dissipating systems", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2455-2460.
- Jones, L R, Mayes, R L y Sveinsson, B I (1989), "Preservando una obra maestra, mejoramiento sísmico del City and County Building de Salt Lake City, UTAH, EEUU", Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero, pp F.159-F.168.
- Jones, L R (1990), "Analytical methods in seismic isolation design", Seminario sobre Instrumentación Sísmica y Uso de Elementos Disipadores de Energía en el Comportamiento Estructural, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, D.F., pp 157-176.
- Kaneko, M, Tamura, K, Maebayashi, K y Saruta, M (1990), "Earthquake response characteristics of base-isolated buildings", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 569-578.
- Katsuta, C y Mashizu, N (1965), "Earthquake isolation method of structure by a high speed electrohydraulic servomechanism", Proceedings of the 3rd. World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, pp 276-297.
- Kelly, J M, Eidinger, J M y Derham, C J (1977), "Practical soft story earthquake isolation system", Earthquake Engineering Research Center, Report No UCB/EERC-77/27, Berkeley, California.
- Kelly, J M, Beuckle, K E, y Skinner, M S (1980), "Experimental testing of a friction damped aseismic base isolation system with fail safe characteristics", Earthquake Engineering Research Center, Report No UCB/EERC-80/18, University of California at Berkeley.
- Kelly, J M (1981), "Control of seismic response of piping systems and other structures by base isolation", Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-81/01, University of California at Berkeley.
- Kelly, J M, Buckle, I G y Tsai, H C (1986), "Earthquake simulator testing of a base-isolated bridge deck", Earthquake Engineering Research Center, Report No UCB/EERC-85/09, Berkeley, California.
- Kelly, T E, Mayes, R L y Jones, L R (1986), "Preliminary design procedures for seismically isolated structures", Proc Workshop on Base Isolation and Passive Energy Dissipation, ATC, Appendix E.

- Kelly, J M (1988), "Base isolation in Japan, 1988", Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-88/20, University of California at Berkeley.
- Kelly, J M (1990), "Base isolation: linear theory and design", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 223-244.
- Kelly, T E, Mayes, R L y Weissberg, S (1989), "Estimación del daño causado por sismos en estructuras convencionales y aisladas", Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero, pp F.149-F.158.
- Kelly, T E y Boardman, OP R (1993), "Seismic isolation of the museum of New Zealand, Te Papa Tongarewa", Proceedings of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, V1, pp 389-400.
- Khachian, E E, Khigatian, Z M y Melkumian, M G (1990), "Earthquake engineering of high-rise buildings with flexible upper floor (Vibration Damper)", comunicación personal.
- Kirekawa, A, Ito, Y y Asano, K (1992), "A study of structural control using viscoelastic material", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2047-2054.
- Kitamura, H, Teramoto, T, Yamane, T y Fujita, T (1992), "Design and analysis of a tall building with an active mass damper", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2061-2067.
- Kobori, T, Miura, Y, Fukuzawa, E, Yamada, T, Arita, T, Takenaka, Y, Miyagawa, N, Tanaka, N y Fukumoto, T (1992), "Development and application of hysteretic steel dampers", Tenth World Conference on Earthquake Engineering, España, V4, pp 2341-2346.
- Korenev, B G y Reznikov, L M (1988), "Vibration dynamic dampers theory and technical additions", Physical and Mathematical Literature, Moscú, Rusia.
- Kuntz, R J (1990), "Earthquake hazard mitigation. The need for human resources development and research", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 265-276.
- Lee, D M, y Medland, I C (1977), "Base isolation for earthquake protection of multi-storey shear structures", Proc 6th Aust Conf Mech and Struct Mats, Vol 1, pp 181-188.
- Lee, D M y Medland, I C (1978-a), "Base isolation -An historical development and the influence of higher mode responses", Bulletin of the New Zealand National Society of Earthquake

Engineering, Vol 11, No 4, pp 219-233.

Lee, D M y Medland, I C (1978-b), "Estimation of base isolated structure response", Bull N Z Nat Soc Earth Eng, Vol 11, No 4, pp 234-244.

Lin, B C y Tadjbakhsh, I (1986), "Effect of vertical motion of friction-driven isolation system", International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 14, pp 609-622

Lin, R C, Liang, Z, Soong, T T y Zhang, R H (1988), "Experimental study of seismic structural response with added viscoelastic dampers", National Center for Earthquake Engineering Research, Report NCEER-88-0018, Buffalo, Nueva York.

Maebayashi, K, Shiba, K, Mita, A e Inada, Y (1992), "Hybrid mass damper system for response control of building", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2359-2364.

Martínez, E (1990), "Mejoramiento de la respuesta sísmica de edificios dañados, mediante la acción de disipadores de energía", Memorias del Seminario sobre Instrumentación Sísmica y Uso de Elementos Disipadores de Energía en el Comportamiento Estructural, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, D.F., pp 211-248.

Matsushita, K y Izumi, M (1965-a), "Some analyses of mechanisms to decrease seismic force applied to buildings", Proceedings of the 3rd. World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, pp 342-359.

Matsushita, K y Izumi, M (1965-b), "Deflection controlled elastic response of buildings and methods to decrease the effect of earthquake forces applied to buildings", Proceedings of the 3rd. World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, pp 360-372.

Mayes, R L, Buckle, I G y Jones, L R (1988), "-Seismic isolation- A solution to the earthquake problems of the precast concrete industry", PCI Journal, may-jun, pp 25-57.

Mayes, R L, Buckle, I G y Jones, L R (1989), "Uso del aislamiento sísmico, Una perspectiva mundial", Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero, pp F.169-F.178.

Mayes, R L, Jones, L R y Buckle, I G (1990), "Impediments to the implementation of seismic isolation", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 283-296.

Mayes, R L, Jones, L R y Kelly, T E (1990), "The economics of seismic isolation in buildings", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 245-263.

- McKay, G R, Chapman, H E y Kirkcaldie, D K (1990), "Seismic isolation New Zealand applications", *Earthquake Spectra*, Vol. 6, No. 2, pp 203-222.
- McVerry, G H y Robinson, W H (1989), "Seismic isolation in New Zealand", *Indian Workshop*.
- Medeot, R. y Albajar, L. (1992), "The evolution of seismic devices for bridges in Italy", *Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, España, V4, pp 2227-2232.
- Megget, L M (1978), "Analysis and design of a base-isolated reinforced concrete frame building", *Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng*, Vol 2, No 4, pp 245-254.
- Mehrain, M y Clayton, M (1987), "Determination of design forces in base isolated buildings", *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Nueva Zelanda, pp 331-338.
- Miyamoto, H K y Scholl, R E (1996-a), "Case study: seismic rehabilitation of a non-ductile soft story concrete structure using viscous dampers", *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, México.
- Miyamoto, H K y Scholl, R E (1996-b), "Performance-based design of steel pyramid using viscous dampers", *Proceedings 65<sup>th</sup> Annual Convention*, SEAOC, Sacramento, pp 135-146.
- Mokha, A, Constantinou, M y Reinhorn, A (1990-a), "Teflon bearings in base isolation. I: testing", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 2, pp 439-454.
- Mokha, A, Constantinou, M y Reinhorn, A (1990-b), "Teflon bearings in base isolation. II: modeling", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 2, pp 455-474.
- Nagarajaiah, S, Reinhorn, A M y Constantinou, M C (1989), "NonLinear dynamic analysis of three-dimensional base isolated structures (3D-Basis)", *National Center for Earthquake Engineering Research*, Report NCEER-89-0019, State University of New York at Buffalo.
- Nagarajaiah, S, Reinhorn, A M y Constantinou, M C (1990), "Analytical modeling of three-dimensional behavior of base isolation devices", *Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California, pp 579-588.
- Nims, D K, Inandi, J A, Richter, P J y Kelly, J M (1993), "Application of the energy dissipating restraint buildings", *Proceedings of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*", Applied Technology Council ATC 17-1, pp 627-638.
- Okoshi, T, Nakagawa, S y Kawamura, M (1993), "Aseismic design of C-1 building: The biggest base isolated building in the world", *Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive*

Energy Dissipation, and Active Control, San Francisco, California, VI, pp 413-424.

Olson, R A y Lambright, W H (1990), "Base isolation. What we need to know to diffuse this technology", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 277-282.

Pall, A S (1984), "Response of friction damped buildings", Proc 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, V, pp 1007-1014.

Pall, A S y Marsh, C (1982), "Response of friction damped braced frames", J Struct Div, ASCE, Vol 108, No ST6, pp 1313-1323.

Pall A S y Pall R (1993), "Friction-dampers used for seismic control of new and existing buildings in Canada", Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, V2, pp 675-686.

Paniagua, J P, Gómez, A, e Iglesias, J (1989), "Sistema amortiguador hidrodinámico", VIII Con Nal Ing Sis y VII Nal Ing Est, Vol III, Acapulco, Guerrero, pp F227-F236.

Popov, E P, Engelhardt, M D y Ricles, J M (1989), "Eccentrically braced frames. US practice", Engineering Journal, AISC.

Priestley, M J N, Crosbie, R L y Carr, A J (1977), "Seismic forces in base isolated masonry structures", Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng, Vol 10, No 2, pp 55-68.

Ricles, J M y Popov, E P, (1987), "Dynamic analysis of seismically resistant eccentrically braced frames", Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-87/07, University of California at Berkeley.

Ricles, J M y Bolin, S M (1990), "Energy dissipation in eccentrically braced frames", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 309-318.

Rioboo, J.M. y Tapia, C. (1989), "Sistema de rigidización estructural mediante cables de alta resistencia, aplicación a edificios escolares", VIII Con Nal Ing Sis y VII Nal Ing Est, Vol III, Acapulco, Guerrero.

Robinson, W H y Greenbank, L R (1975), "Properties of an extrusion energy absorber", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 3, pp 187-191.

Robinson, W H y Greenbank, L R (1976), "An extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an earthquake", International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 4, pp 255-259.

- Robinson, W H y Tucker, A G (1977), "A lead rubber shear damper", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol 10, No. 3, pp 151-153.
- Robinson, W H (1982), "Lead rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes", Earth Eng Struct Dyn, Vol 10, pp 593-604.
- Robinson, W H y Cousins, W J (1987), "Recent development in lead dampers for base isolation", Pacific Conference on Earthquake Engineering, Nueva Zelanda, pp 279-283.
- Rodwell, E, Ehrman, CH S y Maeno, Y (1990), "EPRI contribution to international utility industry seismic isolation development program", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 419-430
- Roeder, W C, Stanton, J F, y Taylor, A W (1990), "Fatigue of steel reinforced elastomeric bearings", J Struct Eng, ASCE, Vol 116, No 2, pp 407-425.
- Ruiz, E, Mejía, R y Ruiz, S E (1996), "Comparative study of a multistory frame with energy dissipation devices and without them", Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, México.
- Sarrazin, M y Moroni, M O (1992), "Design of a base isolated confined masonry building", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2505-2508.
- Saruta, M, Yokota, H y Watanabe, H (1990), "Verification test on base isolated building", Memorias del seminario sobre Instrumentación Sísmica y Uso de Elementos Disipadores de Energía en el Comportamiento Estructural, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, D.F., pp 273-289.
- Scholl, R E (1984), "Brace dampers: An alternative structural system for improving the earthquake performance of buildings", Proc 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, V, pp 1015-1022.
- Scholl, R E (1990), "Improve the earthquake performance of structures with added damping and stiffness elements", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 489-498.
- Scholl, R E (1993), "Design criteria for yielding and friction energy dissipator", Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, San Francisco, California, V2, pp 485-495.

- Sharpe, R L (1990), "Independent engineer peer review for seismic isolation projects", *Earthquake Spectra*, Vol.6, No. 2, pp 309-316.
- Shimoda, I, Irenaga, M y Takenaka, Y (1992), "Development of a lead rubber bearing with stepped plug", *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, España, V4, pp 2327-2332.
- Skinner, R I y McVerry, G H (1975), "Base isolation for increased earthquake resistance of buildings", *Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng*, Vol 8, No 2, pp 93-101.
- Skinner, R I, Beck, J L y Bycroft, G N (1975-a), "A practical system for isolating structures from earthquake attack", *Earth Eng Struct Dyn*, Vol 3, pp 297-309.
- Skinner, R I, Kelly, J M y Heine, A J (1975-b), "Hysteretic dampers for earthquake resistant structures", *Earth Eng Struct Dyn*, Vol 3, pp 287-296.
- Skinner, R I, Tyler, R G y Hodder, S B (1976), "Isolation of nuclear power plants from earthquake attack", *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 9, No.4, pp 199-204.
- Skinner, R I, Tyler, R G, Heine, A J y Robinson, W J (1980), "Hysteretic dampers for the protection of structures from earthquakes", *Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng*, Vol 13, No 1, pp 22-36.
- Skinner, R I (1982), "Base isolation provides a large building with increased earthquake resistance; development design and construction", *Conf on NR for Earthquake Protection of Buildings*.
- Soong, T T y Skinner, G T (1981), "Experimental study of active structural control", *ASCE, J. Eng. Mech., Div.*, Vol 107, pp 1057-1068.
- Soong, T T (1990), "Active control of building structures under seismic loads", *Memorias del Seminario sobre Instrumentación Sísmica y Uso de Elementos Disipadores de Energía en el Comportamiento Estructural*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, D.F., pp 291-304.
- Soong, T T y Mahmoodi, P (1990), "Seismic behavior of structures with added viscoelastic dampers", *Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California, pp 499-506.
- Soong, T T, Masri S F y Housner G W (1991), "An overview of active structural control under seismic loads", *Earthquake Spectra*, Vol 7, No. 3, pp 483-505.

- Sosa, G y Ruiz, S E (1992), "Análisis estructural y costos de edificios con aisladores sísmicos", Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Revista de Ingeniería Sísmica, ene-mar, pp 11-28.
- Su, Y F y Hanson, R D (1990-a), "Seismic response of building structures with mechanical damping devices", Department of Civil Engineering, University of Michigan.
- Su, Y F y Hanson, R D (1990-b), "Comparison of effective supplemental damping equivalent viscous and hysteretic", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 507-516.
- Suhardjo, J, Spencer, B F y Sain, M K (1990), "Feedback-feedforward control of seismic structures", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 437-446.
- Suzuki, H, Kaizu, N, Takeuchi, M y Takahashi, K (1992), "Theoretical study and development of new base-isolation systems for power equipment", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 1999-2003.
- Sveinsson, B I, Ewing, R, Mayes, R L, Hart, G C y Elhassan, R (1990), "Seismic isolation analysis of an existing eight-story building", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 589-597.
- Tadjbakhsh, I y Lin, B C (1987), "Displacement proportional friction (DPF) in base isolation", Earth Eng Struct Dyn, Vol, 15, pp 799-813.
- Tagami, J, Ishii, K, Iisuka, M e Ishida, M (1990), "Application of substructure pseudo dynamic test to base isolated structure", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 599-608.
- Tajirian, F F, Kelly, J M y Aiken, I D (1990), "Seismic isolation for advanced nuclear power stations", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 371-401.
- Takayama, M Tada, H y Wada, A (1987), "A practical research of base isolation system", Pacific Conference on Earthquake Engineering, Nueva Zelanda, pp 285-296.
- Takeshi, S, Yasuhiko, T y Tetsuo, S (1998), "Development of hybrid damping system for seismic vibration control performance test and vibration control effect study on Y-O damper", Report of Obayashi Corporation, Technical Research Institute, No. 56, pp 37-42.
- Tanabe, T, Ebara, Y, Matutani, T, Ono, T, Yokoyama, H, Ymada, Y, Fujii, A, Tada, H y Takayama, M (1992), "Experiments of base isolation with full-scale buildings", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2479-

2484.

- Taylor, D P (1996), "Fluid dampers for applications of seismic energy dissipation and seismic isolation", Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, México.
- Tena, A (1995), "Procedimiento analítico para definir la rigidez y capacidad lateral de los dispositivos disipadores de energía ADAS", Boletín del Centro de Investigación Sísmica, No. 5, pp 42-52.
- Toyama, K, Ishii, K, Igarashi, K, Sakamoto, M, Koshika, N, Sasaki, K y Kobori, T (1992), "Application of the active mass driver (AMD) system to structural active seismic response control", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2347-2352.
- Tsai, K Ch, Li, J W, Hong, Ch P, Chen, H W y Su, Y F (1993), "Welded steel triangular plate device for seismic energy dissipation", Proceeding of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, San Francisco, California, V2, pp 687-698.
- Tyler, R G (1977-a), "Dynamic test of laminated rubber bearings", Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng, Vol 10, No 3, pp 143-150.
- Tyler, R G (1977-b), "Dynamic test on PTFE sliding layers under earthquake conditions", Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng, Vol. 10, No. 3, pp 129-138.
- Tyler, R G (1977-c), "Damping in building structures by means of PTFE sliding joints", Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng, Vol. 10, No. 3, pp 139-142.
- Tyler, R G y Robinson, W H (1984), "High-strain test on lead rubber bearings for earthquake loads", Bull New Zealand Nat Soc Earth Eng, Vol 17, No 2, pp 90-105.
- Urrego, O E, Ruiz, S E y Silva F L (1993), "Influencia de la distribución de disipadores de energía en la respuesta sísmica de un edificio", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, Jalisco, pp 849-855.
- Vestroni, F, Capecchi, D, Meghella, M, Mazza, G y Pizzigalli, E (1992), "Dynamic behaviour of isolated buildings", Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España, V4, pp 2473-2478.
- Villaverde, R y Newmark, N M (1980), "Seismic response on light attachments to buildings", Civil Engineering Studies, Struct Res Series No 469, University of Illinois.

- Villaverde, R (1986), "Simplified seismic analysis of secondary systems", J Struct Eng, Vol 112, No. 3.
- Villaverde, R (1988), "Rosenblueth's modal combination rule for systems with non-classical damping" J Earth Eng Struct Dyn, No 16, pp 315-328.
- Villaverde, R (1993), "Are vibration control techniques a competitive alternative for the seismic design of structures?", X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Pto. Vallarta, Jalisco, pp 870-878.
- Warburton, G B and Soni, S R (1977), "Errors in response calculation of non-classically damped structural dynamics", J Earth Eng Struct Dyn, Vol 5, pp 363-375.
- Way, D y Howard, J (1990), "Seismic rehabilitation of the Mackay School of Mines, phase III, with base isolation", Earthquake Spectra, Vol. 6, No. 2, pp 297-308.
- Whittaker, A, Aiken, I, Bergman, D, Clark, P, Cohen, J, Kelly, J y Scholl, K (1993), "Code requirements for the design and implementation of passive energy dissipation systems", Proceedings of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, ATC 17-1, San Francisco California, V2, pp 497-508.
- Whittaker, A, Bertero, V, Alonso, J y Thompson, Ch (1989), "Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements", Earthquake Engineering Research Center, Report No UCB/EERC-89/02, University of California at Berkeley.
- Xiaoming, L (1989), "Optimization of the stochastic response of a bridge isolation system with hysteretic dampers", International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 18, pp 951-964.
- Yamada, Y, Iemura, H, Igarashi, A e Iwasaki, Y (1990), "Phase delayed active control of structures under random earthquake motion", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, pp 447-456.
- Yang, S N, Sarkani, S y Long, F X (1988), "Modal analysis of non-classical damped structure system using canonical transformations", National Center for Earthquake Engineering Research, Report No NECCR-88-0014, Buffalo, Nueva York.
- Zayas, V A, Low, S S y Mahin, S A (1990) "A simple pendulum technique for achieving seismic isolation", Earthquake Spectra, Vol.6, No. 2, pp 317-333.

## CONCLUSIONES

Se presentó un estado del arte de los sistemas desarrollados en la actualidad para la reducción de la respuesta sísmica de sistemas estructurales y el estudio analítico de un conjunto de estructuras de concreto a las que se adicionaron disipadores de energía, considerando los parámetros más importantes que intervienen en la respuesta sísmica de estos sistemas. Con base en los resultados discutidos con anterioridad, se obtienen las siguientes conclusiones:

1. La aplicación de los diferentes dispositivos depende de, entre otros parámetros, las características de los eventos sísmicos, la localización de la edificación y de las propiedades dinámicas de la estructura. Los disipadores de energía tiene como principales ventajas el soportar un número alto de ciclos de carga y descarga sin mostrar degradación, disipando energía mediante comportamiento histerético y que prácticamente no requieren mantenimiento. Entre sus desventajas se encuentra que para temblores de baja intensidad su comportamiento suele ser elástico, por lo que contribuyen poco en la disipación de energía. Adicionalmente, cuando su comportamiento es elastoplástico, pueden quedar con una deformación permanente al terminar el movimiento sísmico.
2. Similarmente a los disipadores de energía con comportamiento elastoplástico, los dispositivos de fricción contribuyen únicamente en la rigidización de la estructura para eventos sísmicos de baja intensidad. Para grandes temblores, la fricción que se desarrolla en el dispositivo incrementa el amortiguamiento de la estructura, siendo ésta su principal ventaja. Sin embargo, especial cuidado debe tenerse al utilizar estos dispositivos debido a la posible modificación, con el tiempo, de las propiedades mecánicas de la superficie de contacto que genera la fuerza de fricción.

3. La inclusión de dispositivos de comportamiento viscoelástico incrementan la rigidez y el amortiguamiento de la estructura. Para estructuras con periodo fundamental cercano al periodo dominante de la señal sísmica, la respuesta con estos dispositivos puede reducirse considerablemente. Su principal desventaja se encuentra en que la mayor parte de estos sistemas están contruidos con polímeros, cuyo comportamiento es fuertemente dependiente de la temperatura y que existen incertidumbres con relación a la modificación de sus propiedades a largo plazo.
4. A diferencia de los dispositivos viscoelásticos, los sistemas de comportamiento viscoso basan su aplicación en el incremento del amortiguamiento fundamentalmente, mediante el paso de un fluido entre compartimientos. El amortiguamiento adicional que generan puede originar grandes fuerzas de reacción en estructuras sometidas a eventos sísmicos de gran magnitud, razón por la que algunos investigadores están estudiando la aplicabilidad de estos sistema trabajando conjuntamente con dispositivos de otro comportamiento, que permitan reducir estas fuerzas. Nuevamente, el constante mantenimiento es lo que limita su utilización.
5. Los aisladores tienen un intervalo de aplicabilidad considerablemente distinto a los sistemas anteriormente comentados, por lo que suelen utilizarse en estructuras localizadas en lugares en los que, los epicentros de temblores son cercanos. Dado que la esbeltez es uno de los parámetros que restringe su utilización debido a los momentos de volteo y a los desplazamientos laterales, su uso queda limitado a estructuras de mediana altura en las que la posibilidad de asentamientos diferenciales es despreciable, puesto que éstos podrían originar que los aisladores se deformaran lateralmente, en condiciones de servicio.
6. El oscilador resonante es un sistema que reduce la respuesta de forma muy importante, si la estructura tiene comportamiento elástico y la excitación es armónica. La única posibilidad de utilización de este sistema para reducir la respuesta, es para temblores de magnitud moderada, que den origen a espectros de banda ancha, y que no produzcan comportamiento inelástico de

la estructura.

7. Los sistemas de control activo pueden reducir de manera más eficaz la respuesta sísmica de estructuras, sin las limitaciones de los sistemas de control pasivo. Sin embargo, en nuestro país se encuentran en seria desventaja por su elevado costo y la necesidad de mantenimiento periódico. 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.
8. La respuesta sísmica inelástica de estructuras de varios grados de libertad puede predecirse adecuadamente con sistemas equivalentes de un grado de libertad. De acuerdo con las gráficas de demandas de ductilidad de la estructura y de los disipadores, las respuestas máximas de los modelos de seis, quince y treinta niveles se predicen adecuadamente con los sistemas de un grado de libertad.
9. Para el diseño de estructuras con disipadores de energía, localizadas en la zona de terreno blando del valle de México, se proporcionan gráficas de desplazamientos máximos y demandas máximas de ductilidad, para dos resistencias del modelo estructural sin disipadores y un amplio intervalo de periodos, que pueden utilizarse para la obtención de los parámetros que determinan las propiedades mecánicas y geométricas de disipadores de energía, que se incorporen en estructuras nuevas o ya construidas. Las gráficas de comportamiento obtenidas permiten elegir el conjunto de parámetros más conveniente, de acuerdo con los requisitos particulares de rigidez, resistencia y comportamiento deseado, del proyecto estructural.
10. Dadas las características dinámicas de los registros sísmicos en la zona de terreno flexible del valle de México, correspondientes a grandes temblores originados en la costa del Pacífico, los espectros de respuesta tiene ordenadas importantes para periodos grandes. De acuerdo con los

análisis realizados, cuando la estructura se localiza en la curva ascendente del espectro de respuesta el mejor comportamiento al adicionar disipadores de energía se obtiene cuando la rigidez del disipador es similar a la rigidez del contraviento, el sistema conjunto proporciona una rigidez de cuando menos tres veces y media la rigidez del marco y el desplazamiento de fluencia de los disipadores, con relación al desplazamiento de fluencia del entrepiso, no excede de cinco.

11. En estructuras con periodos de hasta 1.0 seg, no existe una diferencia de consideración entre los marcos con disipadores y los modelos contraventeados, a excepción del incremento importante de la fuerza cortante basal en los marcos contraventeados y a que los esfuerzos axiales en los contravientos del modelo contraventado son, en todos los casos, mayores que los correspondientes a los contravientos de los modelos con disipadores de energía.
12. Con demandas máximas de ductilidad moderadas en los disipadores, cercanas a siete, es posible reducir los desplazamientos relativos de entrepiso de las estructuras, localizadas en la curva ascendente de los espectros de respuesta, a valores cercanos a la mitad de los correspondientes a los modelos sin dispositivos y disminuir las demandas máximas de ductilidad de los elementos estructurales hasta llevarlos al comportamiento elástico. Es importante, sin embargo, señalar que para cierto conjunto de parámetros el comportamiento al adicionar dispositivos puede ser similar al del marco sin disipadores, para evitar este comportamiento, se debe considerar lo descrito en el párrafo anterior.
13. Cuando el periodo fundamental elástico de la estructura se encuentra en la zona del umbral de resonancia, existen varias combinaciones de parámetros de los modelos con disipadores, que no sólo mejoran el comportamiento del marco solo, sino también el de los modelos contraventeados. Los mejores resultados se obtienen cuando la relación de  $K_{cd}/K_m$  es mayor o igual que cinco,  $K_c/K_d$  cercano a uno y  $\Delta y_m/\Delta y_d \leq 3$ . De acuerdo con las relaciones de índice de daño y las curvas de equilibrio energético, el modelo con disipadores mejora

considerablemente el comportamiento de los modelos contraventados, al utilizar parámetros dentro de los intervalos mencionados.

14. Los desplazamientos relativos de entrepiso del modelo con disipadores de quince niveles, con respecto al modelo sin dispositivos, tienen reducciones desde un 33% hasta más de tres veces, dependiendo del registro sísmico utilizado. Cabe mencionar que la mayor reducción se obtiene con el registro de SCT-EW (1985), que es el único registro real con el que se contó. En los demás casos, los análisis correspondieron a registros de temblores de menor magnitud escalados, por lo que los valores de respuesta obtenidos deben verse con cierta reserva. Es importante señalar que en un número pequeño de casos, del conjunto de parámetros analizados para el modelo con disipadores, el comportamiento del marco tiende a ser elástico. Cuando la estructura se localiza en esta zona del espectro de respuesta, es necesario considerar que al adicionar disipadores de energía, la respuesta puede disminuir considerablemente, pero difícilmente se elimina en su totalidad las demandas de ductilidad en los marcos.
15. La fuerza cortante basal que se obtiene en los modelos de quince niveles muestra incrementos importantes para los modelos contraventados, llegando a incrementos mayores del 50%, con respecto a los modelos con disipadores. Por su parte, los modelos con dispositivos muestran incrementos mucho más moderados de la fuerza cortante basal, al compararse con el modelo sin dispositivos.
16. Una conclusión importante del estudio del modelo de quince niveles, es que se pueden obtener grandes demandas de ductilidad en los disipadores de energía, sin que esto represente necesariamente una disminución considerable de la respuesta del modelo estructural original. Esto se observó repetidamente en varios de los casos comentados con anterioridad, donde se mostró la fuerte influencia que, en las demandas de ductilidad del marco y los disipadores, tiene la relación de rigideces entre el contraviento y el dispositivo, relación que en pocos estudios analíticos y experimentales ha sido adecuadamente valorada.

17. Para estructuras con un periodo fundamental que se localizan en la recta descendente de los espectros de respuesta (modelo de treinta niveles), la demanda de ductilidad del marco sin ningún sistema de rigidización, es moderada para todos los registros sísmicos considerados. La incorporación de sistemas de disipación de energía no resulta en una disminución importante de la respuesta y aunque presenta relaciones del índice de daño ligeramente menores, difícilmente se justifica la incorporación de dispositivos para este tipo de estructuras.
18. El modelo de marco contraventeado de treinta niveles, reduce los periodos de vibración de la estructura, lo que lo ubica en zonas de mayor respuesta. Por este motivo, los desplazamientos relativos y demandas de ductilidad de entrepiso se incrementan, mostrando el peor comportamiento de los sistemas estructurales analizados.
19. Aunque la incorporación de disipadores de energía también reduce el periodo original de la estructura, la fluencia de estos elementos llevan al marco a zonas de menor respuesta, que conjuntamente con la energía histerética disipada por ellos, reducen ligeramente la respuesta del marco solo. Es por esto que el desplazamiento de fluencia de los disipadores debe ser pequeño, con relación al desplazamiento de fluencia del entrepiso ( $\Delta y_d \approx 0.1 \Delta y_m$ ), aunque esto también limita la cantidad de energía, que por comportamiento histerético, estos dispositivos desarrollan.
20. Adicionalmente a lo señalado anteriormente, con respecto a lo poco atractivo de utilizar el modelo contraventeado para el marco de treinta niveles, como era de esperarse el mayor incremento de la fuerza cortante basal del modelo contraventeado, con relación a los modelos de marco solo y con disipadores, se presenta para el marco de treinta niveles. Se presentan incrementos en la fuerza cortante de más de dos veces, entre el marco contraventeado y el marco con dispositivos.

21. Los espectros de ductilidad obtenidos, muestran la fuerte influencia del periodo original de la edificación, en el comportamiento de estructuras con disipadores de energía. A diferencia de lo obtenido en otros estudios, se comprueba que, con los parámetros adecuados, las reducciones más importantes de la respuesta (casos en los que resulta más atractivo la incorporación de disipadores de energía) se obtiene para periodos de la estructura sin dispositivos entre uno y dos segundos.
22. Con base en los resultados de los sistemas de un grado de libertad, se muestra que la relación de la fuerza de fluencia del marco a la fuerza de fluencia del disipador, es prácticamente independiente de la relación de rigideces del contraviento al disipador, sólo en los casos en que la relación de fluencias del marco al disipador es pequeña (menor que 3.0). Así mismo, la fuerza lateral necesaria para originar la fluencia del marco, como función de la fuerza de fluencia del disipador, disminuye con el incremento de la rigidez lateral del sistema.
23. De acuerdo con los resultados de los sistemas de varios grados de libertad analizados, la fuerza cortante basal de los modelos con dispositivos y de los modelos contraventeados, disminuye con la demanda de ductilidad del marco, cuando estos se localizan a la izquierda o en la zona de mayor amplitud del espectro de respuesta. En las estructuras ubicadas en la curva descendente del espectro, el incremento de la demanda de ductilidad del marco va ligado a aumentos de la fuerza cortante basal. En general, la fuerza cortante basal de los modelos contraventeados es mayor que la asociada a los modelos con disipadores, lo que marca una diferencia apreciable para la elección del sistema más conveniente.
24. El incremento de la fuerza cortante basal al adicionar disipadores, no origina que las fuerzas cortantes en las columnas sean mayores que las del modelo sin disipadores. Por el contrario, en los modelos de seis y quince niveles, las fuerzas cortantes en las columnas se reducen hasta en un 50% al colocar los dispositivos. Las edificaciones con periodos localizados en la recta descendente del espectro de respuesta (marco de treinta niveles), producen fuerzas cortantes

del marco solo, similares a las totales (disipadores más marco) del modelo con dispositivos, por lo que la reducción de las fuerzas cortantes de las columnas es mayor que en los modelos de seis y quince niveles.

## RECOMENDACIONES DE ESTUDIOS A FUTURO

El presente estudio permitió determinar la aplicabilidad de sistemas de un grado de libertad para predecir las demandas máximas de ductilidad de sistemas de varios grados de libertad con disipadores de energía. En el trabajo se mostró la contribución de las variables que más influyen en el comportamiento del sistema y se obtuvieron gráficas que permiten estimar de manera simple los parámetros que determinan las propiedades mecánicas de disipadores de energía, para estructuras sometidas a eventos sísmicos con las características del temblor de Michoacán de 1985, registrado en la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Para continuar con los estudios hasta ahora realizados, que permitan en un futuro cercano incorporar recomendaciones en reglamentos de construcción, es conveniente que se enfoquen esfuerzos en las siguientes actividades:

1. Estudio de sistemas de un grado de libertad con parámetros acotados de acuerdo con los resultados aquí presentados, sometidos a un mayor número de eventos sísmicos registrados y, en caso necesario, bajo la acción de acelerogramas sintéticos.
2. Análisis de sistemas de un grado de libertad localizadas en terreno de transición, con el conjunto de parámetros que se utilizaron en este estudio.
3. Con base en los resultados de respuesta del presente trabajo y los obtenidos con los estudios propuestos, se debe realizar un estudio costo-beneficio de estructuras con disipadores de energía de uso comercial. El estudio debe basarse en un método formal de toma de decisiones en ambiente de incertidumbre, que incorpore el costo inicial de las estructuras con dispositivos y la esperanza del valor presente en caso de falla de las edificaciones, así como la aleatoriedad de las variables que intervienen en la determinación de la respuesta sísmica.