

AMORTIGUAMIENTO ADICIONAL PARA REDUCIR EFECTOS SISMICOS **



ENRIQUE DEL VALLE CALDERON *

INTRODUCCION

En la mayoría de los reglamentos de diseño sísmico del mundo se permite reducir las fuerzas de diseño tomando en cuenta la ductilidad que son capaces de desarrollar las estructuras en función de los materiales y sistema estructural empleado. Esto involucra la posibilidad de daños estructurales de mayor o menor importancia en el caso de sismos excepcionales, como el que sufrió la ciudad de México el 19 de septiembre de 1985 en la zona de terreno blando, ya que en esos casos el aprovechamiento de la ductilidad implica deformaciones inelásticas importantes que pueden producir agrietamientos indeseables o aun colapsos en el caso de que no haya reservas de ductilidad local suficientes o se tengan fallas frágiles prematuras.

Tomando en cuenta esto, el nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, publicado en el Diario Oficial el 3 de julio de 1987 y las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo publicadas en la Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal el 5 de noviembre pasado, reducen a cuatro la máxima reducción por ductilidad global y comportamiento sísmico que puede considerarse al diseñar un edificio (el reglamento anterior permitía hasta seis) e incrementan los requisitos para usar este valor, para evitar la ocurrencia de daños graves o colapsos en el futuro.

Por otra parte, al estudiar el comportamiento de distintas estructuras sometidas a una misma excitación empleando la técnica de espectros de respuesta considerando diferentes amortiguamientos, se puede observar muy claramente que a mayor amortiguamiento la respuesta máxima de la estructura se reduce notablemente, sobre todo en aquellos casos en que la amplificación del movimiento de la base tiende a ser mayor por tener la estructura periodos de oscilación muy parecidos a los periodos dominantes en el movimiento del suelo, lo que produce un efecto cercano a la resonancia, situación frecuente en ciertas estructuras desplantadas en terrenos blandos, como los de la Ciudad de México. Por ejemplo en la Fig. 1, Ref. 1, se muestra el espectro de

* Profesor Titular, Tiempo Completo. DEPMI-UNAM. Ingeniero Consultor.

** Trabajo de ingreso a la Academia Mexicana de Ingeniería, en la especialidad de Ingeniería Civil, presentado en la sección celebrada el 18 de febrero de 1988.

respuesta elástica obtenido con la componente Este Oeste del acelerograma registrado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en terrenos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. El periodo dominante en la vibración del suelo en ese lugar fue de dos segundos y la aceleración máxima del terreno llegó a 0.17 g.; sin embargo, para estructuras con periodo de dos segundos, la respuesta elástica máxima con amortiguamiento nulo es de 3.52 g, con dos por ciento de amortiguamiento baja a 1.61 g., con cinco por ciento a 0.98 g., con diez por ciento a 0.60 g. y con veinte por ciento a 0.39 g, mientras que para periodos de un segundo o tres segundos las diferencias son mucho menores.

El amortiguamiento es una propiedad intrínseca de los sistemas estructurales y de los materiales empleados. Normalmente el de estructuras metálicas es menor que el de las estructuras de concreto reforzado y el de éstas a su vez es menor que el de las estructuras de mampostería. Suele medirse en términos del amortiguamiento crítico, que es el que evitaría totalmente las oscilaciones de una estructura al separarla de su posición de equilibrio; así, para estructuras metálicas el amortiguamiento es usualmente del orden de uno a tres por ciento del crítico, para las de concreto reforzado de un tres a cinco por ciento y para estructuras de mampostería puede llegar hasta un diez por ciento de ese valor. Estos valores pueden determinarse haciendo pruebas de vibración forzada de los edificios, Ref. 2, 3, 4; en ellas se ha visto que el amortiguamiento depende también del nivel de esfuerzos y deformaciones a que se vea sometida la estructura, aumentando si dichos valores son grandes, sobre todo, si se incursiona en el intervalo de comportamiento inelástico.

Al considerar en los reglamentos la respuesta máxima de las estructuras para fines de diseño empleando espectros de diseño elásticos, se suponen valores de amortiguamiento de un cinco por ciento del crítico, y para calcular las fuerzas se toma en cuenta, como se dijo antes, la ductilidad esperada y el comportamiento inelástico, reduciendo las ordenadas espectrales elásticas entre un factor de comportamiento sísmico; sin embargo, si los amortiguamientos fueran mayores que cinco por ciento, la estructura podría diseñarse para fuerzas iguales o más pequeñas, pero sin tener que recurrir a la ductilidad, que como se dijo antes, puede implicar ciertos daños estructurales importantes.

Debido a estos razonamientos se ha buscado desde hace tiempo la forma de aumentar por medios externos el amortiguamiento en las construcciones, para reducir los efectos sísmicos de manera similar a como se reducen las vibraciones producidas en los vehículos por irregularidades del camino en que circulan. En este trabajo se presentan algunos de los resultados obtenidos hasta la fecha (enero, 1988).

COMENTARIOS SOBRE LA RESPUESTA SISMICA DE LAS ESTRUCTURAS

La evaluación de la respuesta de las estructuras a un sismo constituye un problema dinámico de difícil solución, ya que intervienen en ellas numerosas variables que no son fáciles de acotar. Las características que más influyen en la respuesta son: el tipo de suelo en que está desplantada la estructura, que define la forma de la excitación que se tendrá y las propiedades dinámicas de la estructura; formas modales, periodos de oscilación y grado de amortiguamiento en cada modo.

Los sistemas estructurales más empleados para resistir las fuerzas laterales debidas a un sismo son: estructuras esqueléticas, a base de marcos formados por traveses y columnas o por losas planas aligeradas y columnas, contraventeados o no; estructuras a base de muros de carga y rigidez, o combinaciones de marcos y muros.

El tipo de estructuras más estudiado es el conocido como vigas de cortante, que representa a las estructuras formadas por traveses y columnas unidas rigidamente entre sí en los nudos, en las que la rigidez relativa de las traveses no es muy pequeña en comparación con la de las columnas. Este tipo de estructuras ha sido muy aceptado por los arquitectos por la flexibilidad que les permite para aprovechar los espacios en edificios de varios niveles, sobre todo en el caso de usos múltiples, como por ejemplo estacionamientos, comercios, oficinas y habitación en el mismo edificio, pues los únicos obstáculos que tienen son las columnas, las que en la actualidad y con ayuda de materiales de alta resistencia, suelen tener separaciones mayores de ocho o diez metros entre sí. En zonas sísmicas la máxima altura que puede lograrse con este sistema estructural queda, sin embargo, restringida, debido a la necesidad de limitar en forma económica los desplazamientos laterales que pueden presentarse, pues aunque los marcos constituidos por las traveses y columnas reciben el nombre de "marcos rígidos", su rigidez puede llegar a no ser suficiente para que los desplazamientos relativos entre un piso y otro no sean grandes, lo que puede producir daños graves a elementos no estructurales y pánico de los ocupantes.

Existen varios programas de computadora como TABS, ETABS, SUPER ETABS, DRAIN D2, SAP IV, ULARC, COMBAT, etc. (ver por ejemplo Refs. 5, 6, 7), que permiten evaluar la respuesta sísmica de este tipo de estructuras y de otras, considerando comportamiento elástico o inelástico, deformaciones por flexión, fuerza cortante y fuerza normal, efectos de interacción suelo-estructura, comportamiento en el plano o en el espacio, etc. Sin embargo, aun con el programa más completo subsisten incertidumbres importantes en las propiedades elástico geométricas de los miembros de la estructura, como por ejemplo la influencia que puede tener la contribución de las losas a la rigidez de las traveses, la reducción de los momentos de inercia de traveses y columnas por efecto de agrietamiento; el efecto de nudo, que toma en cuenta las

dimensiones efectivas de las trabes y columnas en su intersección en el nudo; el módulo de elasticidad dinámico efectivo, el efecto en la resistencia última del endurecimiento por deformación en el acero de refuerzo, y otros más. Algunas de estas propiedades cambian después de un sismo intenso, por lo que al diseñar un edificio habría preguntarse para qué etapa de su vida útil se van a considerar los valores que se den al programa. Existen también incertidumbres importantes en los valores del amortiguamiento efectivo de cada modo, en cómo tomar en cuenta la interacción suelo-estructura, en la interacción entre estructuras y elementos teóricamente no estructurales, etc.

Para valorar la respuesta se emplean métodos dinámicos de análisis paso a paso o análisis modal espectral usando espectros de respuesta o de diseño, suponiendo comportamiento elástico o inelástico; normalmente se considera que el amortiguamiento no es mayor que un diez por ciento del crítico y se asigna a cada modo un cierto valor; pero si el valor del amortiguamiento que puede considerarse es mucho mayor, para tomar en cuenta la posibilidad de incrementarlo por medios externos, deben hacerse las modificaciones necesarias en los programas, ya que con mayor amortiguamiento algunas de las hipótesis válidas para amortiguamiento pequeño ya no se cumplen, Refs. 8, 9.

Por su simplicidad el análisis modal espectral ha sido más empleado que el de análisis paso a paso para diseño o revisión de edificios; sobre todo para fines de diseño, con espectros obtenidos a partir de diferentes espectros de respuesta de varios sismos en un cierto tipo de terreno.

El espectro de respuesta se define como la gráfica que relaciona las respuestas máximas de una serie de estructuras de un grado de libertad (sistemas masa - resorte - amortiguador) con características dinámicas diferentes sometidas a una misma excitación, con sus periodos o frecuencias de oscilación, Fig. 1. Como respuesta se suele considerar la aceleración, la velocidad o el desplazamiento de la masa al ser excitadas las estructuras de un grado de libertad; para fines de diseño se emplean usualmente espectros de aceleración. La excitación puede ser de cualquier tipo, armónica o aleatoria. Interesa sobre todo el caso de excitación producida por un sismo registrado en acelerógrafos.

Los más modernos de éstos aparatos simplifican mucho el problema ya que la información se obtiene en cinta magnética o en memoria de estado sólido y eso permite pasarla directamente a la computadora para obtener los espectros de respuesta rápidamente; esto permitió conocer los espectros de la Fig. 1, el mismo día del temblor.

Para calcular las ordenadas espectrales se puede emplear la integral de Duhamel, u otras técnicas, Ref. 10, que permite tomar en cuenta la forma de la excitación y el amortiguamiento estructural. Se

puede suponer comportamiento elástico independientemente de la amplitud de la respuesta que se tenga o bien considerar que al llegar a un cierto valor de desplazamiento la rigidez de la estructura cambia, lo que influye en dicha respuesta. Se tiene así espectros de respuesta elásticos o inelásticos, usualmente para valores de amortiguamiento de 0, 2, 5, 10 y 20% del crítico como los mostrados en la Fig. 1. Cuando se emplea amortiguamiento adicional externo puede llegarse a valores mayores de 20% del crítico, por lo que, como se indicó anteriormente se ha estudiado las modificaciones que deben hacerse en estos casos para obtener resultados confiables, Ref. 9.

Para aplicar los espectros al análisis de estructuras de más de un grado de libertad, se supone que para cada modo de vibrar existe una estructura equivalente de un grado de libertad, para la cual se obtiene la respuesta espectral, y ese valor sirve entonces para escalar la participación de cada modo, las que deben combinarse para obtener la respuesta global de la estructura. Se ha comprobado que cuando se supone comportamiento elástico los resultados que se obtienen son bastante parecidos a los valores máximos de un análisis paso a paso de la estructura de varios grados de libertad; en el caso de comportamiento inelástico suele haber discrepancias mayores, pues depende de si se considera o no deterioro de la estructura, o si el comportamiento es elasto - plástico o bilineal con pendiente positiva o negativa en el segundo tramo Ref. 11.

Como se indicó antes, el tipo de terreno en que está desplantada la estructura es una variable muy importante; eso quedó claramente demostrado durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, cuando los efectos del sismo fueron muy diferentes en las distintas zonas del D.F., tanto desde el punto de vista de las aceleraciones máximas registradas como desde el de las máximas ordenadas espectrales elásticas, tablas 1 y 2, Ref. 12.

La forma de los espectros cambia considerablemente en función del tipo de terreno. En sismos registrados en terrenos firmes las máximas ordenadas espectrales de aceleración se obtienen para periodos relativamente cortos, menores de 0.5 seg., mientras que para los registrados en terrenos muy blandos las máximas ordenadas espectrales corresponden a periodos mayores, presentándose incluso una respuesta muy grande para periodos cercanos o iguales a los dominantes en la vibración del suelo, los que dependen del espesor de los estratos de material blando y de las propiedades dinámicas de dichos estratos. Esto hace que, según el tipo de terreno, sean las estructuras más vulnerables, porque su respuesta puede ser muy grande, sean las de periodos cortos, en el caso de terrenos firmes o los de periodos intermedios o largos en el caso de los suelos compresibles. Como se vio antes, la respuesta máxima cuando el periodo de la estructura es cercano al del movimiento del suelo puede reducirse muy considerablemente si se logra aumentar el amortiguamiento a valores mayores del 20% por medios externos.

Por otro lado, la vulnerabilidad de las estructuras de mediana altura desplantadas en terreno blando puede ser muy alta, pues sus periodos pueden coincidir con los del suelo, Ref. 13. El aprovechamiento de la ductilidad en estos casos para reducir las fuerzas de diseño puede no ser lo más adecuado, ya que se puede dar el caso de que una estructura tenga respuesta más grande al empezarse a deteriorar, alargándose sus periodos, a diferencia de lo que ocurre con los espectros de terrenos firmes, en los que la respuesta disminuye al alargarse los periodos, Fig. 2, Ref. 14.

Según algunos autores, al tomar en cuenta el comportamiento inelástico de las estructuras los valores máximos correspondientes a comportamiento elástico se reducen muy considerablemente, Ref. 11; sin embargo, considero que si bien eso es cierto para estructuras de un grado de libertad, en las que puede cambiar radicalmente la rigidez al llegarse a un cierto valor de desplazamiento, en las estructuras de varios niveles el cambio es más gradual, lo que permite que la estructura alcance a tener respuestas muy elevadas, aun cuando su amortiguamiento también puede aumentar algo. Es importante en este caso el cuidar que no haya fallas de tipo frágil que reduzcan la posibilidad de alcanzar ductilidades altas, lo que en ocasiones es difícil de lograr, pues los elementos no estructurales pueden modificar radicalmente el comportamiento calculado para una estructura si no se logra desligarlos adecuadamente, Ref. 15.

Considero que para estructuras de tipo esquelético de altura intermedia (8 a 15 pisos) desplantadas en terreno blando en la Ciudad de México o aun mayor altura según los periodos dominantes del suelo, más que aprovechar la ductilidad para reducir los efectos sísmicos debe buscarse aumentar el amortiguamiento por medios externos, o diseñarlas con factores de comportamiento sísmico bajos ($Q = 2$ o menor) para que tengan mayor resistencia. Lo mismo puede decirse de estructuras de periodos cortos desplantadas en zonas de terreno firme donde las aceleraciones máximas pueden ser grandes, por ejemplo estructuras de dos o tres niveles en Acapulco, Ixtapa, Oaxaca, etc. En estructuras a base de muros o de marcos y muros también pueden emplearse amortiguadores, pero por el momento sólo se considerara el caso de estructuras esqueléticas.

DETERMINACION DEL AMORTIGUAMIENTO EN ESTRUCTURAS EXISTENTES

Uno de los problemas para tomar en cuenta de manera más adecuada el amortiguamiento estructural en los modelos matemáticos es la falta de información confiable sobre el amortiguamiento efectivo en estructuras existentes, pues sólo se conocen, como se indicó antes, valores aproximados para distintos materiales y sistemas constructivos, derivados de algunas investigaciones realizadas para conocer con mayor precisión el amortiguamiento efectivo de algunas estructuras en sus distintos modos de vibrar.

Como se mencionó, para ello es necesario hacer pruebas de vibración forzada con vibradores de masas excéntricas colocados normalmente en la azotea de los edificios, Figs. 3, 4 capaces de girar a velocidad angular controlada con distintas frecuencias, con objeto de excitar varios modos de vibrar, haciendo un barrido de frecuencias y definiendo las curvas de resonancia correspondientes, de donde se puede obtener el amortiguamiento efectivo, Fig. 5. Como resultados complementarios de las pruebas de vibración forzada está la obtención de las configuraciones modales y de las frecuencias o periodos correspondientes, que se aprovechan para calibrar los modelos matemáticos de los edificios, reconciliando los valores calculados con los medidos, Ref. 2, 3, 16.

Se ha encontrado que el amortiguamiento asociado a modos superiores es mayor que el correspondiente al modo fundamental de vibrar o primer modo; por ejemplo, en la Ref. 3 se obtuvieron valores de 3 y 5% de amortiguamiento con respecto al crítico para las direcciones transversal y longitudinal de un edificio, en el primer modo, mientras que para el segundo modo los valores son de 5 y 9% respectivamente. La resistencia de este edificio en particular es suministrada en la dirección transversal por elementos metálicos, mientras que en la dirección longitudinal se debe a muros de tabique reforzados con una capa de concreto, lo que explica las diferencias.

En la práctica es difícil excitar más allá del segundo o tercer modo de vibrar por limitaciones en las características de los vibradores y por problemas de vibraciones locales excesivas en los puntos en que se apoyan los vibradores.

Desde el punto de vista teórico se proponen diferentes modelos para idealizar a las estructuras tomando en cuenta el amortiguamiento combinando sistemas de resortes y amortiguadores en serie, Ref. 17.

DISPOSITIVOS PROPUESTOS PARA AUMENTAR EL AMORTIGUAMIENTO

Se han propuesto distintas maneras de lograr amortiguamiento adicional. Algunas se han quedado a nivel de propuesta, quizá con algunos ensayos de laboratorio y otras han avanzado más y se han instalado o están a punto de serlo en edificios reales.

Mencionaré en primer lugar "las bandas amortiguadoras para muros de partición" que propuso el Ing. Jehová Guerrero en el Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica celebrado en Guadalajara, Jal., en 1965, Ref. 18, Figs. 6, 7. Como se puede ver en las figuras, la idea es colocar las bandas en la parte superior de los muros divisorios con objeto de que al tratar de moverse la estructura en relación

al muro deforme por compresión y corte las bandas y éstas absorban energía al deformarse más allá del límite elástico; las bandas son a base de lámina o malla flexible. El Ing. Guerrero hizo algunas pruebas de laboratorio para tener una idea del consumo de energía que se lograría con las bandas que propuso; sin embargo, aparentemente no llegaron a comercializarse y tal vez no se aplicaron en estructuras reales. La idea es interesante y podría tal vez desarrollarse nuevamente con algunas modificaciones, ya que como se mencionó antes uno de los problemas importantes es la posible contribución de los muros divisorios a la resistencia y rigidez de un edificio y con estos dispositivos puede controlarse esa participación.

Otra propuesta interesante fue hecha por los ingenieros italianos Focardi y Manzini, de la Universidad de Florencia, Italia, en la Conferencia Internacional sobre Ingeniería para Protección de Desastres Naturales celebrada en el Instituto Asiático de Tecnología, en Bangkok, Tailandia en 1980, Ref. 19. Su propuesta se basa en el principio de extrusión de metales y consiste en un cilindro de pared gruesa dentro del cual existen dos espacios cilíndricos unidos por una sección de menor diámetro, con dos pistones que deslizan dentro de los espacios cilíndricos y que están conectados con una barra rígida que se prolonga al exterior y a la cual se aplican fuerzas, Fig. 8.

El volumen entre los dos pistones se rellena con un metal dúctil como plomo, o aleación de aluminio para extrusión, de tal manera que al aplicar una fuerza suficientemente grande a la barra, tiende a extruir el metal hacia uno u otro de los cilindros interconectados haciéndolos pasar a través de la sección de menor diámetro, absorbiendo energía y transformándola en calor. Hicieron pruebas en laboratorio con un modelo obteniendo ciclos histeréticos como los mostrados en la Fig. 9, a distintas velocidades de aplicación de la carga, concluyendo que pueden ser efectivos para disipar energía sísmica. Se ignora si han seguido haciendo pruebas o los han instalado en alguna estructura real.

Otro intento para aumentar el amortiguamiento de los edificios consiste en colocarlos sobre apoyos a base de capas de hule y metal, que se deforman por cortante al ser sometidos a fuerzas laterales, Fig. 10, de manera similar a los apoyos deslizantes para puente a base de neopreno y placas metálicas, Ref. 20. En este caso, además de aumentar el amortiguamiento se trata de aislar al edificio de los movimientos del terreno. Se han hecho diversos estudios de laboratorio y se han instalado ya en un edificio de California, E.U.A. Considero que la eficiencia de estos dispositivos dependerá de las frecuencias dominantes del suelo, siendo más adecuados tal vez para terrenos firmes con espectros de aceleración con ordenadas máximas en los periodos cortos, ya que el periodo combinado de dispositivos y estructura será mayor, como en el caso de interacción suelo - estructura en suelos blandos y la respuesta bajara, lo que podría no ocurrir en el caso de terrenos blandos. Una limitante del sistema es que la esbeltez de la

estructura debe ser baja para que no haya problemas de volteo del conjunto que podría hacer trabajar algunos dispositivos a tensión, complicando la solución práctica.

Actualmente existen a nivel comercial otros dispositivos para amortiguar la respuesta de los edificios al someterlos a efectos de viento o de sismo.

Desde hace varios años (1972), fueron instalados en las conexiones de las cuerdas inferiores de las travesas a las columnas de cada una de las Torres Gemelas del Centro Comercial Mundial en la Ciudad de Nueva York, de más de 100 pisos de altura, 10000 amortiguadores a base de un material viscoelástico desarrollado por la compañía 3M que se coloca entre placas de acero, Figs. 11 y 12, Ref. 21, para reducir las oscilaciones que el viento induce en dichas torres y aumentar la sensación de confort de los ocupantes. Dichos amortiguadores funcionaron satisfactoriamente en ocasión del huracán Gloria que afectó a esa ciudad el 27 de septiembre de 1985, Ref. 22, aunque el amortiguamiento efectivo que mencionan es relativamente bajo, del orden de tres por ciento del crítico. En 1985 se instalaron también en el edificio Columbia Center en Seattle 260 amortiguadores a base de material viscoelástico, en diagonales entre un piso y otro, de mayor capacidad que los de las Torres Gemelas.

Se han hecho diversos estudios para ver si este tipo de amortiguador podría ser adecuado para reducir los efectos sísmicos, encontrando que hay problemas de calentamiento del material viscoelástico que reducen su eficiencia, lo que se origina por el nivel de deformaciones que debe alcanzarse y los intervalos de frecuencia a que se debe operar, por lo que se ha considerado que para este objeto no serían muy adecuados, Ref. 23, 24.

Como solución alternativa se han propuesto amortiguadores de dos tipos; uno que disipa energía a base de hacer fluir placas de acero, que está todavía a nivel experimental, Ref. 25, 26, Fig. 13 y otro que disipa energía por fricción de una especie de balata de freno insertada entre placas de acero sometidas a una presión transversal, Fig. 14, Ref. 27, el cual ya ha sido empleado en diversos experimentos con resultados muy satisfactorios, Ref. 28. Estos dos tipos de amortiguador se pueden emplear con diagonales de contraventeo de manera similar al de Focardi, aumentando considerablemente la rigidez de la estructura a fuerzas laterales, lo que puede a su vez provocar la disminución o el incremento de la respuesta sísmica inicial, dependiendo de los periodos dominantes de la vibración del suelo en que esté desplazada la estructura y de los periodos de éstas; en el primer caso el amortiguador trabajaría tanto para deformaciones relativamente pequeñas como para grandes deformaciones; en el segundo caso, una vez que los desplazamientos llegan a un cierto valor, el amortiguador empieza a trabajar y a reducir la respuesta, pudiendo ajustarse la fuerza de deslizamiento para que los amortiguadores

empiecen a disipar energía antes de que la estructura llegue a trabajar inelásticamente, reduciendo la probabilidad de que sufra daños.

Se han usado también masas reactivas sintonizadas a una cierta frecuencia colocadas en los niveles superiores de los edificios para amortiguar efectos de viento, como en la Torre CN de Toronto, Canadá y en varios edificios de Nueva York, Ref. 28. Esta forma de lograr amortiguamiento adicional no sería recomendable para el caso de los sismos pues sus efectos se contrarrestarían con el aumento en masa.

ESTUDIO EN EDIFICIOS CON AMORTIGUAMIENTO ADICIONAL

Entre las pruebas a que ha sido sometido el amortiguador de fricción se encuentran las realizadas en la Universidad de California, Berkeley, en abril de 1987, cuando se instaló una serie de estos dispositivos en las crujeas centrales de dos marcos de un modelo de edificio de acero, escala 1/3 de nueve niveles, que se ensayó en mesa vibradora, Fig. 15.

El modelo se sometió al sismo de El Centro, California, de 1940 y al del 19 de septiembre de 1985 registrado en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Con objeto de incrementar más los efectos de éste último sismo, con periodos dominantes de 2.0 seg., y tomando en cuenta que el periodo del modelo de edificio con las diagonales de contraventeo era de 0.4 seg., se escaló el tiempo en la mesa vibradora a la quinta parte, para tratar de provocar efectos de resonancia, escalando las amplitudes de aceleración varias veces, sin lograr provocar daños al modelo. Con fines de comparación se aflojaron los dispositivos y diagonales de contraventeo, para que la estructura trabajara como marco rígido alargándose su periodo a 0.5 seg., al excitar la mesa en esas condiciones, escalando el tiempo en este caso a la cuarta parte, los desplazamientos del modelo resultaron excesivos aun para una fracción de las aceleraciones máximas del registro. En la Fig. 16 se comparan los desplazamientos correspondientes a ambas pruebas, Ref. 29.

En la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería se han desarrollado diversos trabajos de investigación sobre este tema bajo mi dirección; en la Ref. 31 se estudió la respuesta inelástica del modelo ensayado en Berkeley empleando el programa DRAIN-2D, suponiendo que al alcanzarse la carga de deslizamiento de los amortiguadores las diagonales empezaban a fluir (en realidad la carga de -- deslizamiento correspondía al 60% de la carga de fluencia de las diagonales, para lograr que la estructura permaneciera elástica al ser excitada). Se obtuvieron resultados bastante similares a los experimentales, para la estructura contraventeada y con dispositivos y para la que trabajaba como marco rígido, encontrando que en este último

caso se formaban varias articulaciones plásticas mientras que en la que tenía amortiguadores los momentos obtenidos tanto para trabes como para columnas eran mucho menores que los de fluencia por lo que la estructura permanecía elástica aun escalando las aceleraciones del sismo de SCT más de tres veces, comprobando la gran eficiencia de estos amortiguadores, Figs. 17 y 18.

En otras investigaciones en la DEFFI se está estudiando el efecto en la variación de las cargas de deslizamiento, también se estudiará el comportamiento de una estructura con estos dispositivos sometida a efectos torsionantes.

Se ensayarán también amortiguadores a base de soleras que fluyen, Ref. 26, que prometen ser mucho más económicos que los de fricción y sin varias de las incertidumbres señaladas por distintos estructuristas, como el efecto de variación en la carga de apriete de las placas y efectos de intemperismo al paso de los años.

En la Universidad de California, Berkeley, se está estudiando también la aplicación de esta nueva técnica, pues para temblores de suelo duro como los que ocurren ahí el uso diagonales de contraventeo hace que aumente la respuesta sísmica por tener periodos dominantes cortos, misma que puede reducirse por el aumento de amortiguamiento, Ref. 32. También en la Universidad de Michigan se han desarrollado diferentes trabajos teóricos y experimentales sobre este tema, Refs. 8, 9, 23.

APLICACIONES

Se ha propuesto emplear amortiguadores de fricción en la reparación de algunas estructuras dañadas por los sismos de 1985 en las que el proyecto de reparación contempla el uso de diagonales de contraventeo. Al utilizar los amortiguadores se logra reducir el peso de las diagonales, pues en la solución convencional se hacen trabajar tanto a tensión como a compresión, por lo que resultan relativamente robustas, y con los dispositivos de fricción sólo trabajarían a tensión. La reducción en peso permite absorber el costo de los amortiguadores y tal vez lograr economías; sin embargo, hasta la fecha no ha sido posible concretar su aplicación en ningún edificio.

En Montreal se está construyendo un edificio para una biblioteca en que se emplearán los amortiguadores de fricción Refs. 32, 34. En opinión de algunos autores este tipo de amortiguador es el que más desarrollado se encuentra a la fecha, Ref. 35.

Una de las razones por las que hay cierta oposición a la instalación de estos dispositivos en la reparación de edificios o en construcciones nuevas es que las estructuristas a cargo de los proyectos desean hacer ellos mismos el diseño de los amortiguadores; sin embargo, no hay suficiente información sobre cómo diseñarlos ni catá-

logos de donde se pueda seleccionar el amortiguador adecuado para cada caso. Lo que se ha hecho hasta ahora es analizar el modelo del edificio con acelerogramas artificiales como el propuesto por Blume, Newmark, Kapur o con acelerogramas reales, registrados en temblores fuertes, como el del 19 de septiembre de 1985 de SCT o el de El Centro, California en 1940 u otros, empleando programas de análisis paso a paso, que para edificios de varios niveles consumen tiempos de computadora apreciables. Estos programas se emplean normalmente para fines de investigación, no para diseño, como se indicó antes.

Considero que será necesario dar a los proyectistas la posibilidad de diseñar y seleccionar los amortiguadores adecuados por procedimientos más sencillos, lo que aun requiere cierto tiempo; creo que por el momento es importante hacer el esfuerzo de instalarlos en algunos edificios en la Ciudad de México o en zonas de la costa del Pacífico, en el tipo de estructuras vulnerables antes descrito, para poder evaluar los problemas prácticos que se presenten, diseñándolos por medio de análisis paso a paso para temblores específicos.

Este tipo de dispositivos permitiría cumplir con el Artículo Transitorio décimo segundo del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal publicado en el Diario Oficial el tres de julio de 1987, que indica que todas las construcciones del Grupo A existentes deberán revisarse y demostrar que reúnen las condiciones de seguridad estructural que fija este Reglamento, debiendo reforzarse o modificarse en caso de que no sea así, lo que ocurrirá en la mayoría de los casos.

CONCLUSIONES

- 1.- El empleo de amortiguamiento adicional en ciertos edificios que sean más vulnerables a los sismos, debido a la coincidencia de sus características dinámicas con las del movimiento a que pueden verse sometidos en función del tipo de suelo en que están desplantados, es preferible al criterio tradicional de diseñar esos edificios con base en la ductilidad que puede desarrollarse.
- 2.- Entre los distintos sistemas que se han propuesto para lograr el amortiguamiento adicional destacan los que disipan energía a base de fricción, ya que están prácticamente listos para su utilización, pues han sido sujetos a diversas pruebas para verificar su eficiencia.
- 3.- Los amortiguadores que disipan energía a base de fluencia de placas de acero parecen ser una alternativa más económica y con eficiencia similar al de fricción; sin embargo, aun se requieren estudios para eliminar cualquier posibilidad de falla.
- 4.- Será necesario proporcionar a los proyectistas estructurales métodos de análisis y diseño de los amortiguadores, que sean simples y

les permitan seleccionar el amortiguador más adecuado en cada caso.

5.- La instalación de dispositivos amortiguadores en edificios existentes de alta vulnerabilidad podría ser adecuada para disminuir su respuesta en temblores futuros. Asimismo, su utilización en la reparación de edificios dañados por sismos puede ser muy adecuada.

REFERENCIAS

1. Mena E., et al, "Acelerograma en el Centro SCOP de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Sismo del 19 de septiembre de 1985". Informe IPS-108, Instituto de Ingeniería, UNAM, Sept. 1985.
2. Robles F. J. "Determinación experimental del amortiguamiento estructural empleando pruebas de vibración forzada". Tema de examen sin créditos académicos para optar por el grado de Maestro en Ingeniería (Estructuras), División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1986.
3. Foutch D. A., Hjelmstad K. D., Del Valle E. "Investigation of two Buildings Shaken During the 19 September 1985 Mexico Earthquake", 2nd, U. S. - México Workshop on 1985 Mexico Earthquake Research, Research Progress Reports, EERI, II, N S F, México, Nov. 1987.,
4. Del Valle E. "Pruebas de Vibración Forzada para Determinar las Características Dinámicas de las Estructura, Primer Coloquio Anual de Profesores de Carrera, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1984.
5. Wilson E. L., Hollings J. P., Dovey H. H. ETABS, "Three Dimensional Analysis of Buildings Systems (Extended version)", Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report EERC 75-13, 1975.
6. Powell G.H., Kanaan a., DRAIN-2D, "A General Purpose Computer Program for Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures", Earthquake Engineering Research Center, University, of California, Berkeley, Report EERC 73-6, 1973.
7. Neuss C. P., Maison B.F., Bouwkamp J. G., "A Study of Computer Modeling Formulation and Special Analytical Procedures for Earthquake response of multistory Buildings", J. G. Bouwkamp Inc. Berkeley, Calif. 1983.
8. Ashour S. A., Hanson R.D., "Elastic seismic Response of Buildings with Supplemental Damping", Departament of Civil Engineering, University of Michigan, January, 1987.
9. Wu J., Hanson R. D., "Inelastic Response of Structures with High Damping Subjected to Earthquakes", Department of Civil Engineering, University of Michigan, November 1987.
10. Clough R. W., Penzien J., "Dynamics of Structures", McGraw Hill Book Company, 1975.

11. Meli R., Avila J. "Respuesta inelástica Ante el Acelerograma del SCT del Sismo del 19 de Septiembre de 1985", V Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz, Ver., Mayo 1986.
12. Del Valle E., "Características de los Sismos de Septiembre de 1985", Segundo Coloquio Anual de Profesores de Carrera de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, Dic. 1985.
13. Borja G., Díaz M., Vázquez A., Del Valle E., "Estadísticas de los Danos Causados por los Sismos de Septiembre de 1985 en la Ciudad de México", V. Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz, Ver., Mayo 1986.
14. Del Valle E., "Criterios de Reparación de Algunos Edificios Afectados por el sismo del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México. Ejemplos de Aplicación", Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, SMIS, Querétaro, Qro. Noviembre 1987.
15. Del Valle E., "Earthquake Damage to Non-Structural Elements" Proceedings, VIII World Conference on Earthquake Engineering, Vol. V, San Francisco Calif., 1984.
16. Rodríguez N., "Análisis Experimental de Vibraciones de Edificios" Informe final elaborado para el Departamento del Distrito Federal, Instituto de Ingeniería, UNAM, Enero 1987.
17. Arboleda J., "Disipación de Energía en Estructuras en Vibración", Tema de examen sin créditos académicos para optar por el grado de Maestro en ingeniería (Estructuras) División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM. Enero 1988.
18. Guerrero J., "Bandas Amortiguadoras para Muros de Partición" Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, SMIS, Guadalajara, Jal. 1965. También en Trabajos selectos de ingeniería Civil 1940 -1975, Jehová Guerrero Torres, I. C. editado por A. Flores M y G. Salazar P.
19. Focardi F., Manzini E., "A Energy-Sink Device for Antiseismic Constructions", Proceedings of the International Conference on Engineering for Protection from Natural Disasters, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, January 1980.
20. Kelly J. M., Skinner, M.S., "Review of Current Use of Energy Absorbing Devices", Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report UCB/EERC-79-10, febrero 1979.
21. Mahmoodi P., "Structural Dampers", Journal of the Structural Division. ASCE, Vol. 95, No. ST 8, August 1969.
22. Mahmoodi P., Robertson L.E., Yontar M., Moy C., Feld L., "Performance of Viscoelastic Dampers in World Trade Center Towers" Volume on Dynamics of Structures, Structures Congress, ASCE, Orlando, Florida, August 1987.

23. Hanson R., "Supplemental Damping for improved Elastic and inelastic Response of Buildings During Earthquakes", Simposio Internacional de Estructuras Metálicas, Morelia, Mich., Nov. 1987.
24. Bertero V., "Comunicación personal".
25. Scholl R., "Earthquake Resistant Design Using Added Damping and Stiffness Elements", Simposio Internacional de Estructuras Metálicas, Morelia, Mich., Nov. 1987.
26. Aguirre M., "Diseño y pruebas de un dispositivo para absorción de energía", Memorias del Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, Oaxtepec, Mor., 1977.
27. Pall A. S., "Energy Disipation Devices for Aseismic Design of Buildings", Proceedings of a Seminar and Workshop on Base Isolation and Passive Energy Disipation, Applied Technology Council (ATC), 1986.
28. Wiesner K. B., "The Role of Damping Systems", Third Internacional conference on Tall Buildings: "The second Century of the Skyscraper", Chicago, U. S. A., January, 1986.
29. Ocampo R., Del Valle E., Escamilla S., "Reporte Sobre el Comportamiento de un Modelo de Nueve Niveles en el que se Ensayó el Dispositivo Desarrollado por el Dr. Avtar Pall", presentado a la Secretaría General de Obras de Departamento del Distrito Federal, Mexico 1987.
30. Fillitault A., Cherry S., "Seismic Tests on Friction Damped Steel Frames" Proceedings, Third Conference on Dynamic Response of Structures, ASCE, Los Angeles, 1986.
31. Alvarado W., "Análisis Paso a Paso de un Modelo Sometido al Acelerograma SCT, 19 Sept. 85, con y sin Dispositivos Amortiguadores", Trabajo de investigación I, DEPII, UNAM, Oct. 1987.
32. Bertero V., Del Valle E., Meli R., "Experimental and Analytical Studies of Promising Techiques for the Repair and Retrofitting of Buildings 2nd. U.S. - Mexico Workshop on 1985 Mexico Earthquake Research, Research, Progress Reports, EERI, NSF, México, Nov. 1987.
33. Pall A.S., Verganelakis V., Marsch C., "Friction Dampers for Seismic Control of Concordia University Library Buildings", Fifth Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Canada, July 1987.
34. Pall A. S., "Friction Damped Concrete Frames for Concordia Public library" 50th Regional Tall Buildings Conference, Tall Buildings in Seismic Regions, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Los Angeles, Feb. 1988.
35. Tarics A., "Earthquake, Are We Ready?", The Military Engineer, Sept, Oct. 1987.

T A B L A 1

ACELERACIONES MAXIMAS MEDIDAS EN DISTINTOS SITIOS
DEL DISTRITO FEDERAL, EN CM/SEG.² *

Componente	Terreno Firme			Tacubaya	Terreno de Transición Viveros	S.C.T.	Terreno Blando	
	Cd. Universitaria						Central/Abastos	
	CUMV	CUIP	CUOI					CDAO
N-S	37	32	28	34	44	98	69	81
E-W	39	35	33	33	42	168	80	95
Vert.	20	22	22	19	18	36	36	27
Según Reglamento	30				45		60	

* Informe IPS-10D Instituto de Ingeniería, UNAM, J. Prince, et al, ref. 21.

T A B L A 2

RESPUESTAS MAXIMAS DE ACELERACION ABSOLUTA, EN
CM/SEG.2. PARA 5 Y 10% DEL AMORTIGUAMIENTO CRITICO*

Componente	Amort.	Terreno Firme			Tacubaya	Terreno de Transición Viveros	S.C.T.	Terreno Blando	
		Cd. Universitaria						Central/Abastos	
		CUMV	CUIP	CUOI					CDAO
N-S	5%	109	107	118	114	167	598	415	326
	10%	81	66	76	84	114	360	232	217
E-W	5%	120	133	126	99	159	983	340	421
	10%	92	93	89	72	123	625	204	284
Según Reglamento		160				200		240	
Vert.	5%	81	79	76	72	65	129	107	90
	10%	53	54	52	48	40	83	82	63

* Informe IPS-10D, Instituto de Ingeniería, UNAM, J. Prince, et al.

SISMO		REGISTRO		CORRECCION		
DATOS	GRO-MICH	IDE1	ESTA	SCT1	METODO	CALTECH.
FECHA		850919	INST	D3-144	FILTRO	0.050 0.055 23.0 25.0
HORA		13:19:23	COMP	N90W	AT	0.020
EPIC	17.680 102.470	HORA	13:19:22	MAX ACEL	158.40.	-167.92
M	8.1	DUR	179.99	MAX VEL	57.42.	-60.50
H	33	DIST	400	MAX DESP	21.94.	-19.07

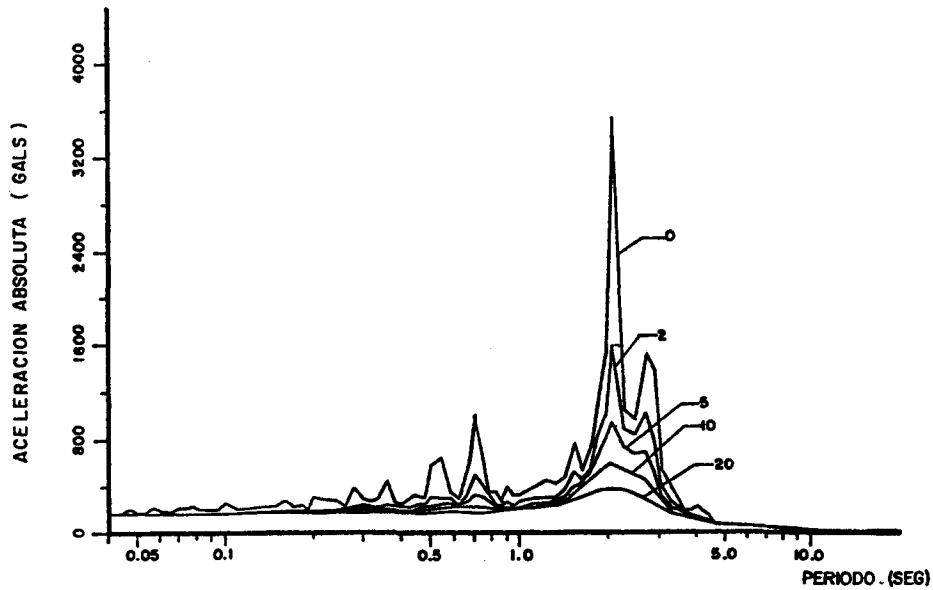


Fig 1 Espectro de respuesta (ref. 1)

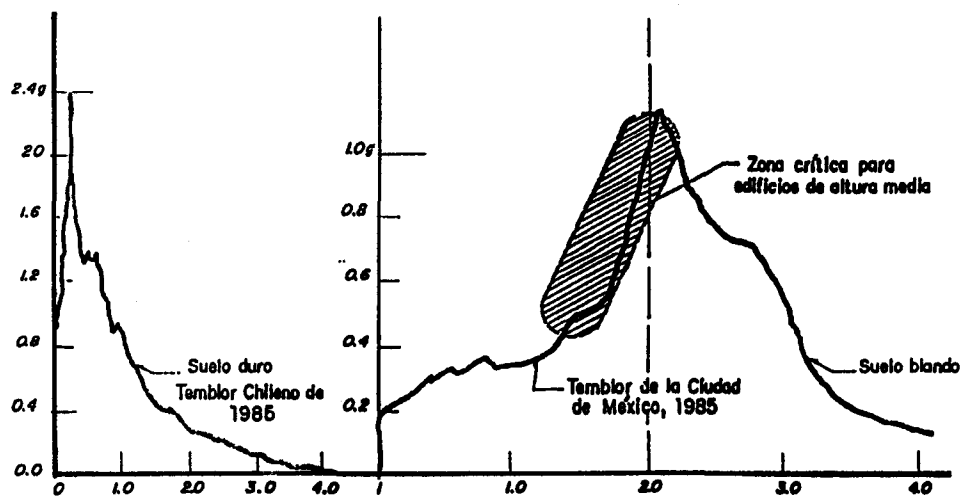


Fig 2 Espectros de respuesta típicos para terrenos duro y blandos, para 5 % de amortiguamiento y comportamiento elástico, ref. 14



Fig 3 Vibrador de masas excéntricas

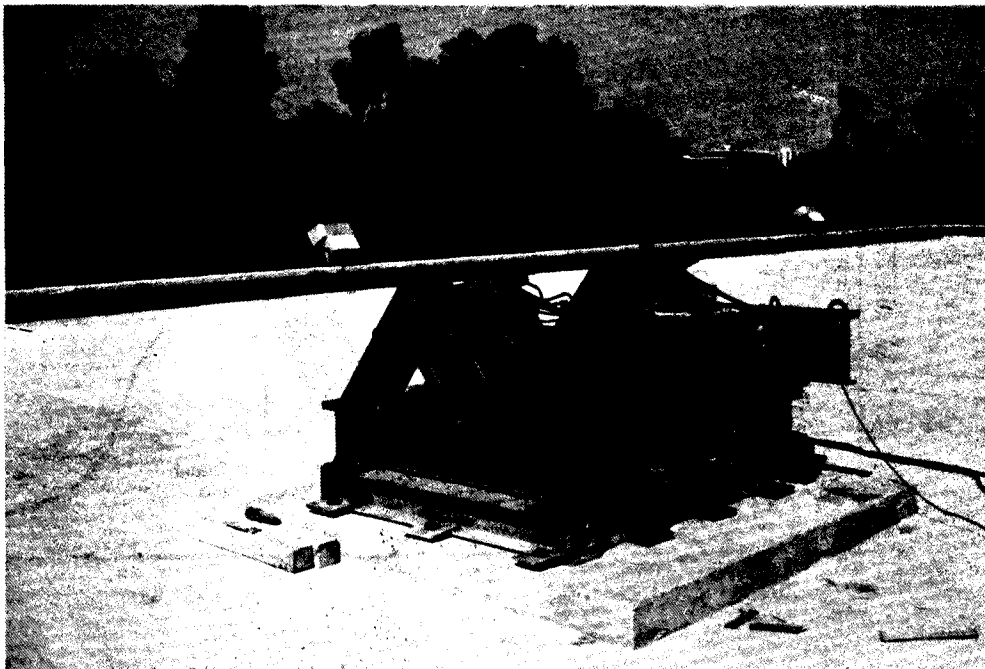


Fig 4 Vibrador colocado en una azotea

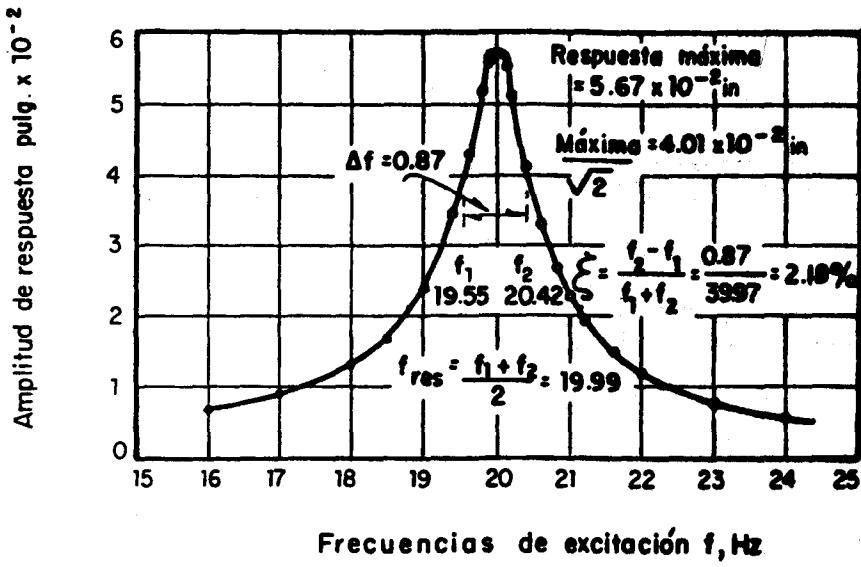
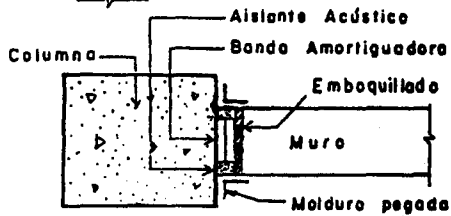
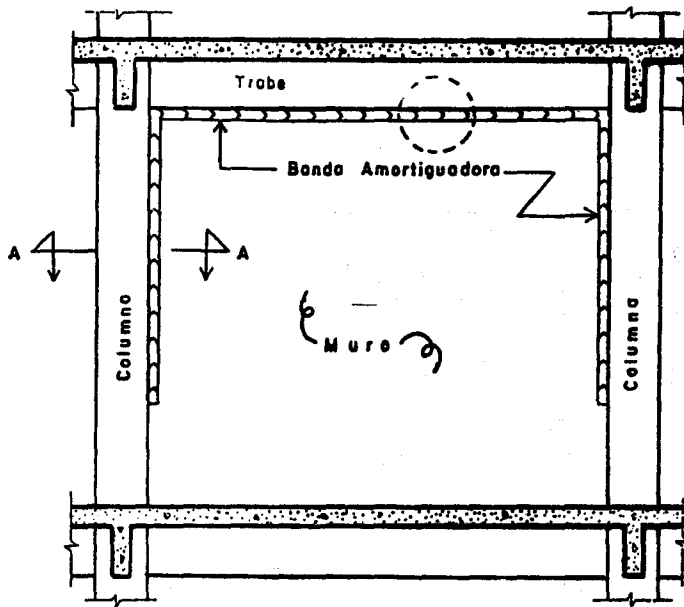


Fig 5 Prueba de vibración forzada para determinar el amortiguamiento, ref. 10



CORTE A-A

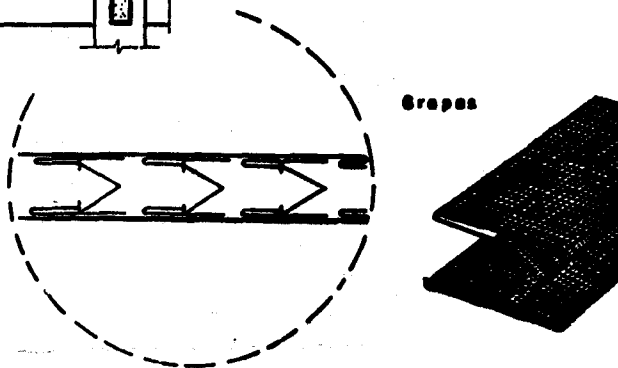


Fig 6

Fig 7

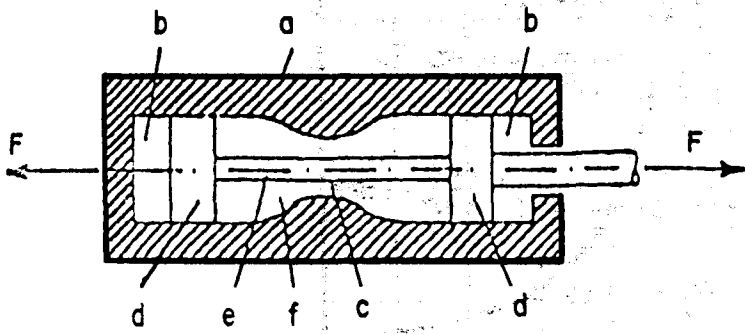


Fig 8a Amortiguador de Focardi

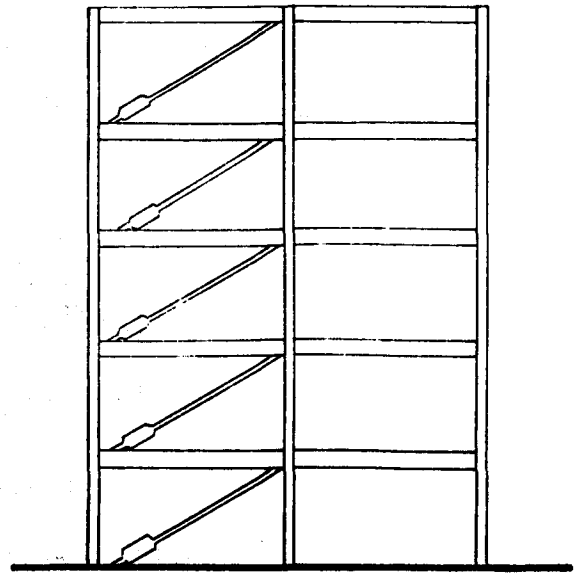


Fig 8b Aplicación

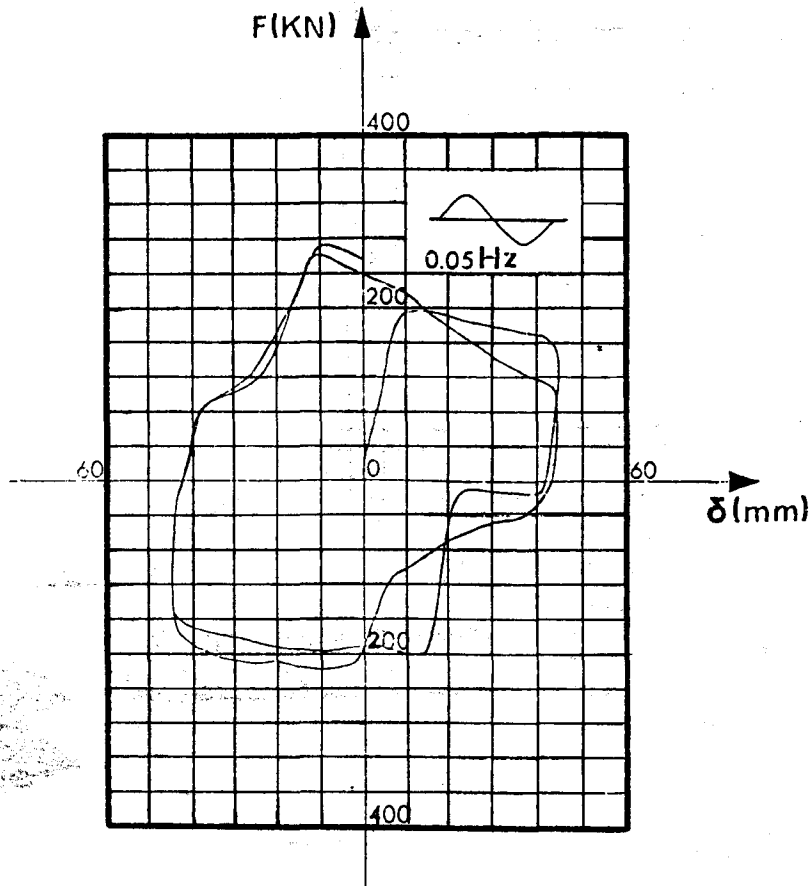


Fig 9 Ciclos de Histéresis

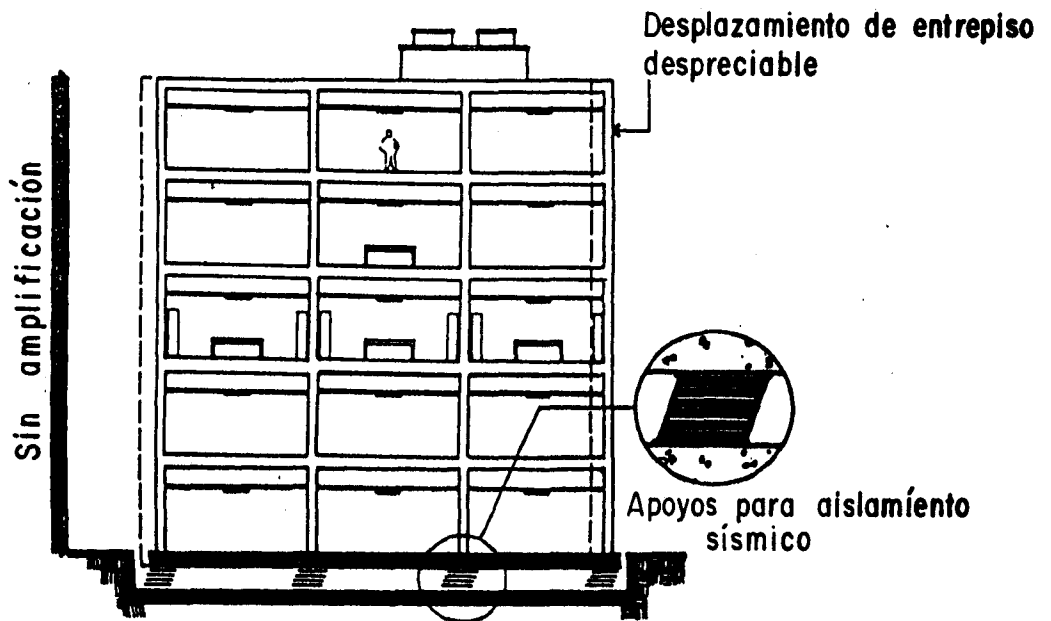


Fig 10 a. Estructura con aisladores en la base



Fig 10 b. Ensaye de aisladores

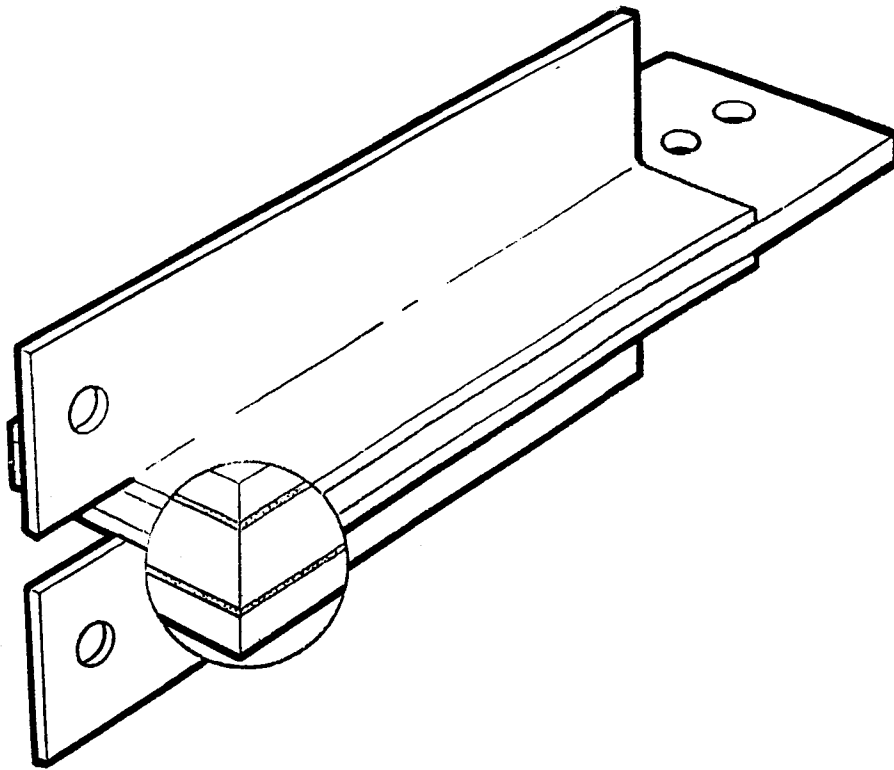


Fig 11 Amortiguador a base de material viscoelástico

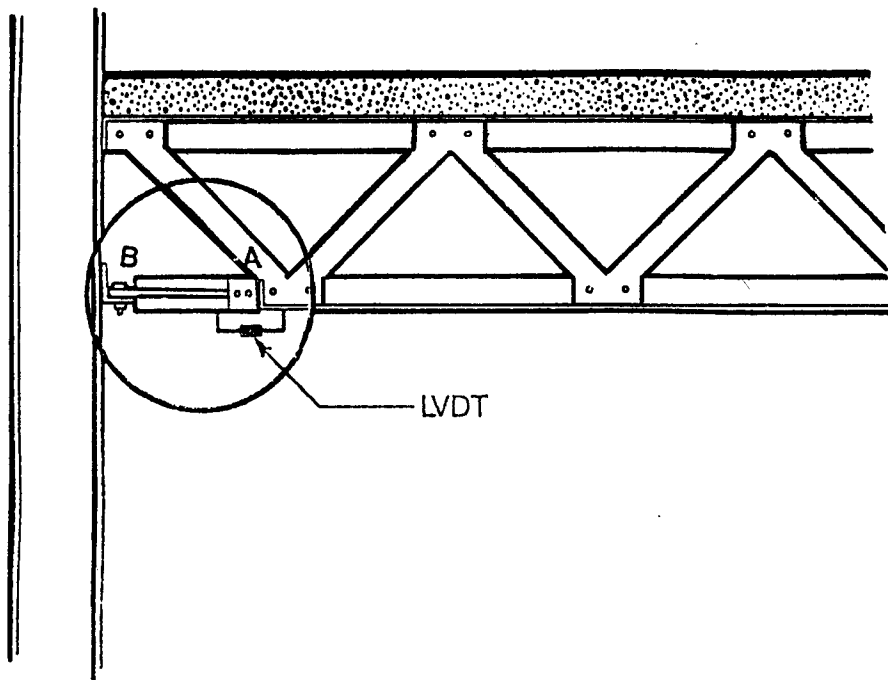


Fig 12 Colocación de amortiguadores con material viscoelástico en las torres del Centro Mundial de Comercio, en Nueva York

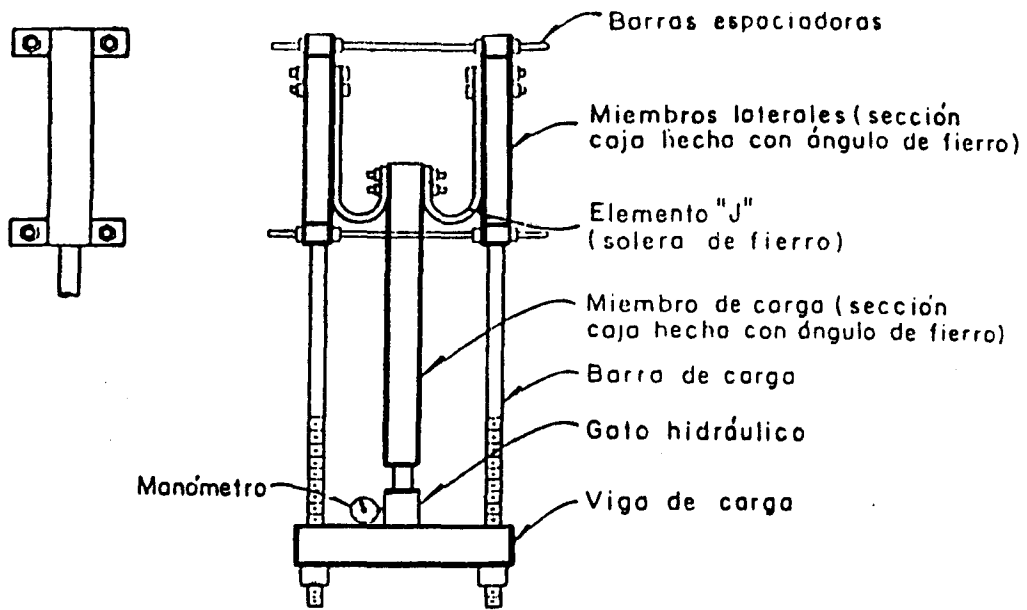


Fig 13 a Marco de carga para pruebas de elementos J

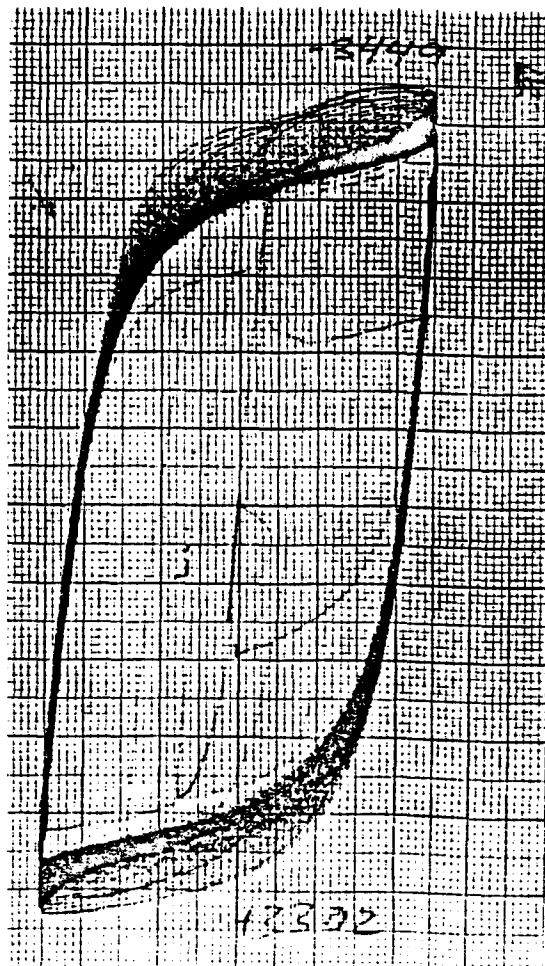


Fig 13 b Ciclos de histéresis (115 ciclos)

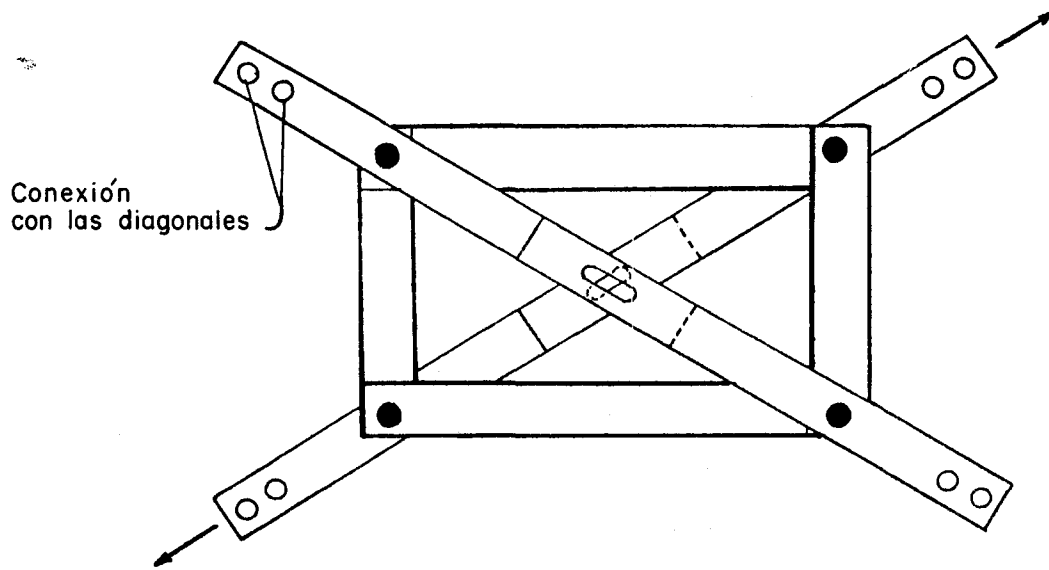


Fig 14a Mecanismo de disipación de energía por fricción. ref. 31

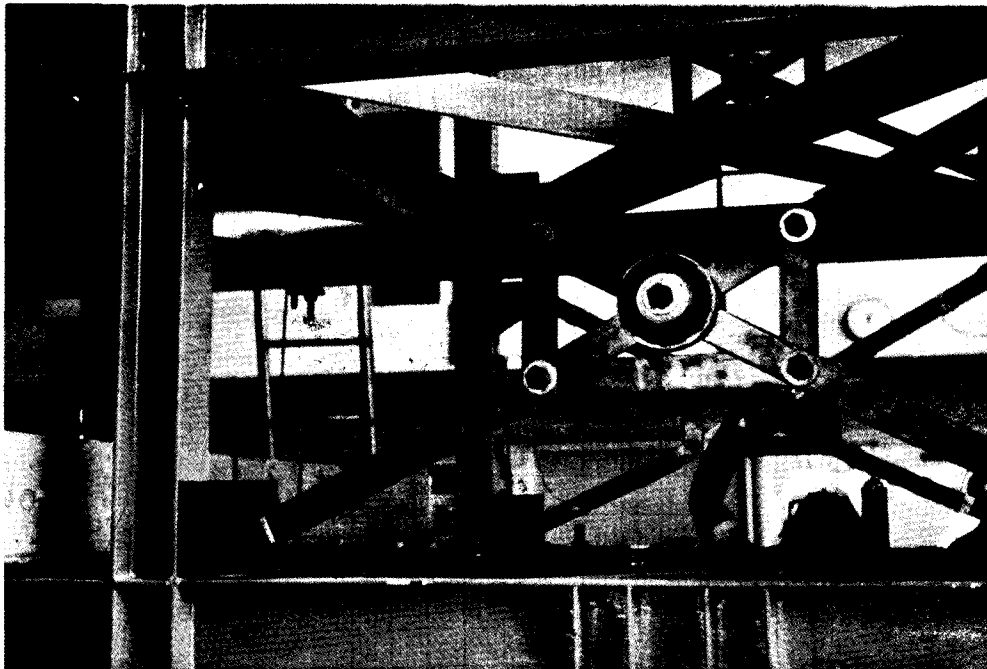
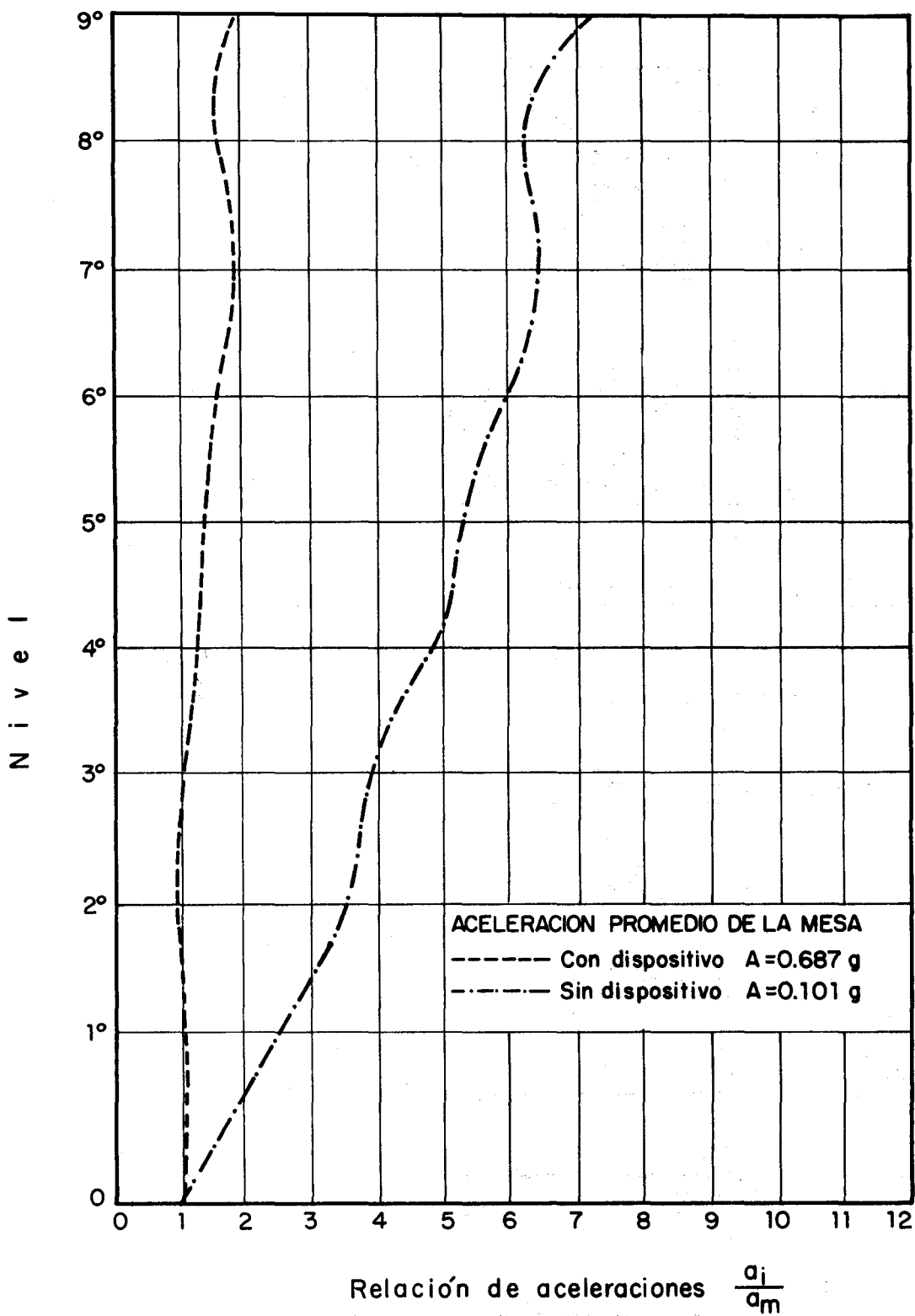


Fig 14 b



a_i = Aceleración máxima en el nivel i
 a_m = Aceleración promedio de la mesa

Fig 16 Ref. 29

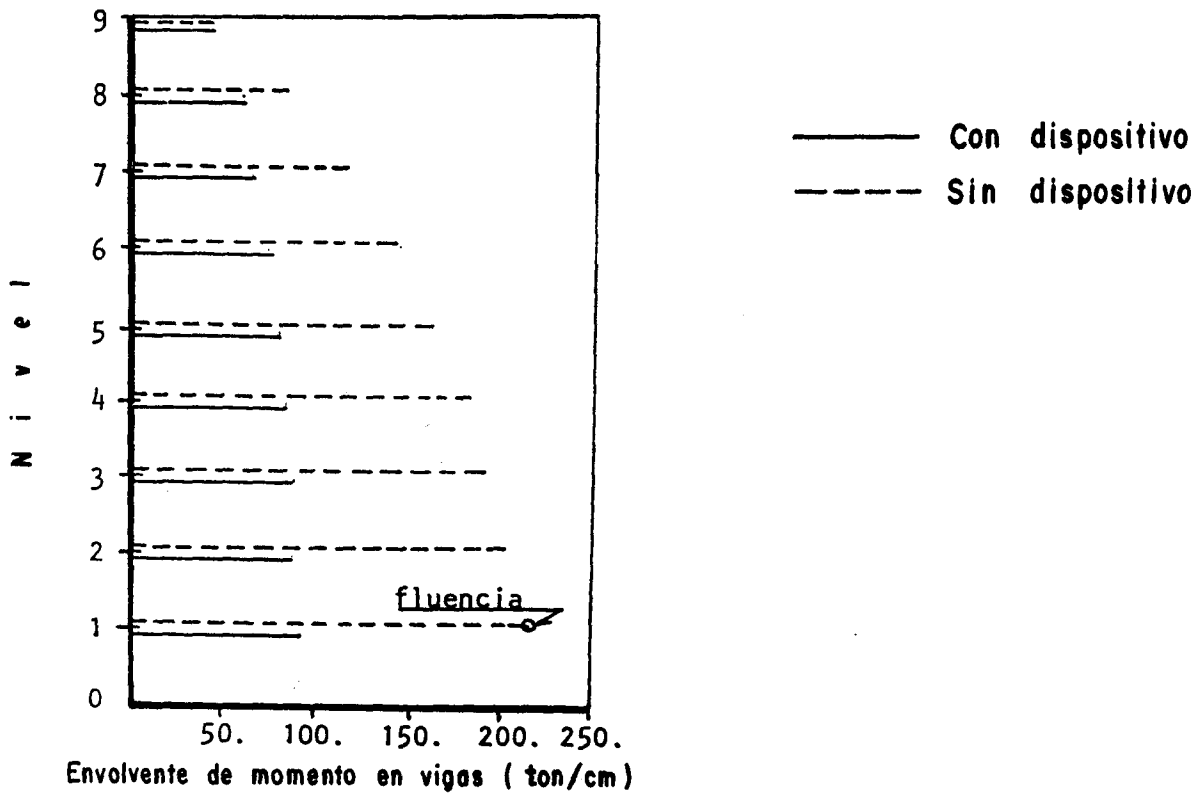
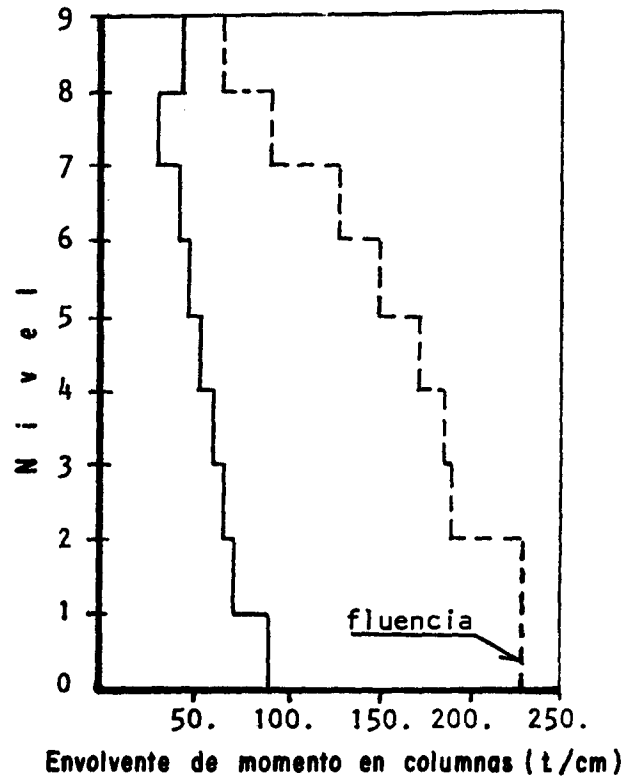
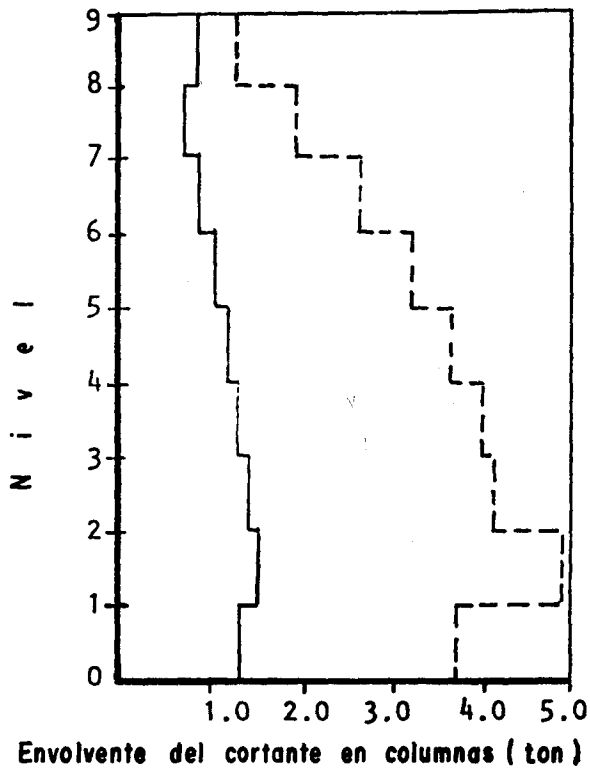


Fig 17 Envolventes de cortante y momento , escalado el tiempo.
 $T = 1/5$; $A = 1/1$, ref. 7

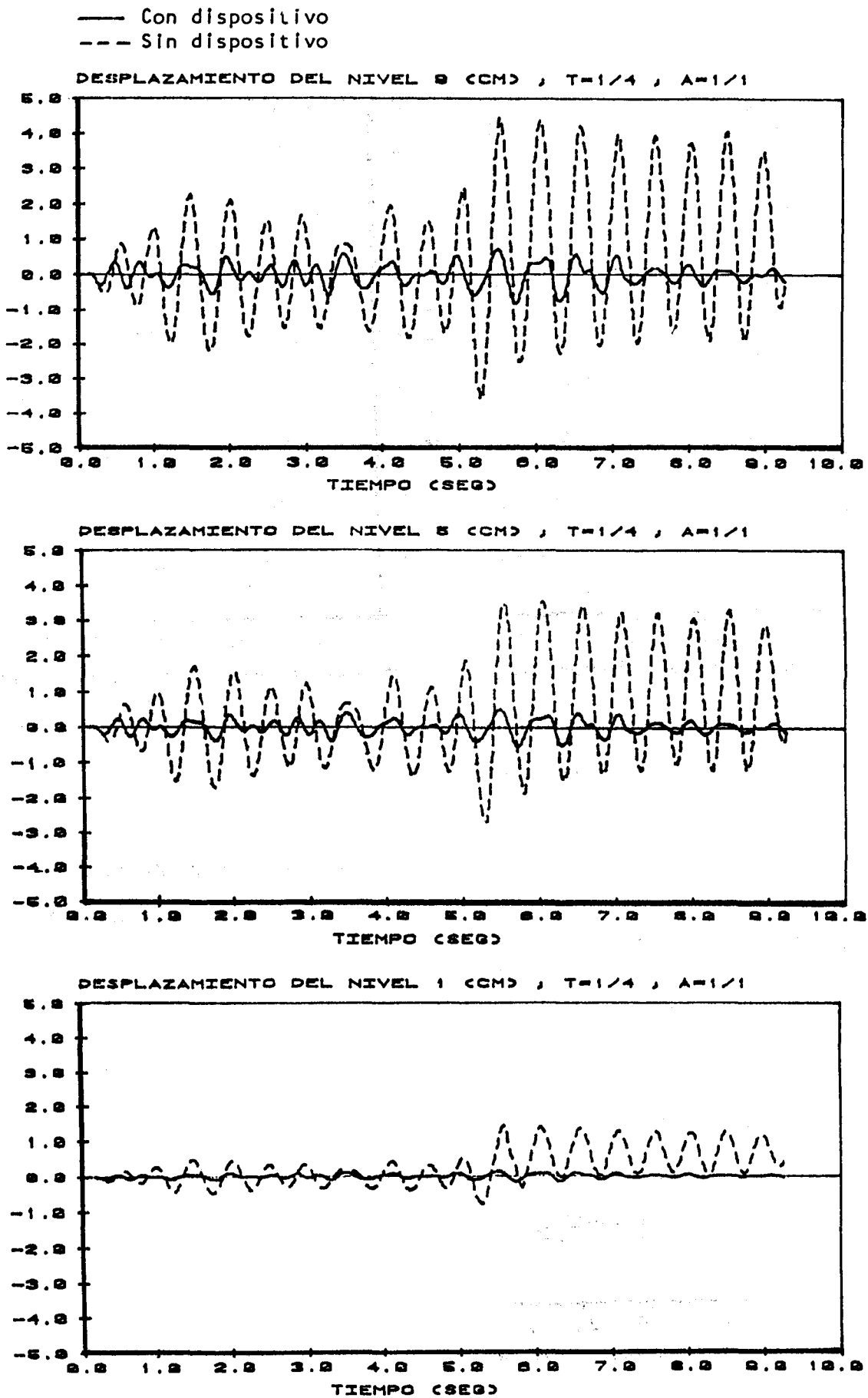


Fig 18 Historia de desplazamiento horizontal de los niveles 9,5 y 1 escalado el tiempo . (Ref. 7)