

EFECTO DE AMORTIGUAMIENTO EXTERNO EN LA RESPUESTA DE
UNA ESTRUCTURA METALICA DE DOS NIVELES

JORGE HUMBERTO CHAVEZ GOMEZ

TRABAJO

Presentado a la División de Estudios de Posgrado de la

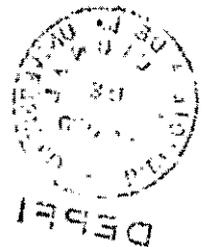
FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
1989

como requisito para obtener
el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA
(E S T R U C T U R A S)

CIUDAD UNIVERSITARIA , D.F. , JUNIO 1989





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

RESUMEN

En este trabajo se diseñó una estructura metálica de dos niveles con disipadores de energía colocados en diagonales, se estudia el efecto de estos en la respuesta de la estructura al ser sometida a excitaciones armónicas en la base y se compara con la de una estructura con la misma rigidez inicial, pero sin los disipadores de energía.

Se pretende que los resultados de este trabajo sirvan para desarrollar un experimento en una estructura metálica que se coloque en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM, y sirvan como base teórica a corroborar durante pruebas. A este modelo físico se le sometería a las mismas excitaciones que al modelo analizado en este trabajo, para así verificar la validez de los resultados aquí obtenidos.

APROBADO POR EL JURADO

Presidente	<u>Ing. Neftali Rodríguez Cuevas</u>
Vocal	<u>M en C Enrique Del Valle Calderón</u>
Secretario	<u>Dra. Sonia E. Ruiz Gómez</u>
Suplente	<u>Ing. Julio Dany Ríos</u>
Suplente	<u>Dr. Roberto Stark Feldman</u>

INDICE

	pag.
1 INTRODUCCION Y OBJETIVOS	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos y alcance.	2
2 TIPOS DE AMORTIGUADORES EXTERNOS	
2.1 Generalidades	3
2.2 Amortiguadores pasivos	4
2.3 Amortiguadores activos	4
3 CARACTERISTICAS DE LOS DOS AMORTIGUADORES EXTERNOS A PROBAR	
3.1 Descripción.	5
3.2 Comportamiento Histerético.	5
3.3 Modelo Matemático de los amortiguadores	6
4 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA Y DEL EXPERIMENTO	
4.1 Consideraciones de diseño.	8
4.2 Sistema estructural.	9
4.3 Selección de las excitaciones en la base.	10
4.4 Modelo matemático elástico lineal de la estructura con amortiguadores en las diagonales.	
4.4.1 Método de análisis	10
4.4.2 Propiedades dinámicas del modelo elástico lineal..	14
5 SIMULACION DE LA RESPUESTA NO LINEAL CON EXCITACION SENOIDAL DE LA BASE.	
5.1 Método de análisis	17
5.2 Modelo matemático de dispositivo amortiguador con comportamiento bilineal.	18
5.3 Modelo matemático de dispositivo amortiguador con comportamiento viscoso.	19
5.4 Espectros de respuesta ante excitaciones senoidales	
5.4.1 Estructura con amortiguadores bilineales.	20
5.4.2 Estructura con amortiguadores viscosos.	22

5.5 Revisión de esfuerzos y estabilidad de la estructura. ...	23
5.6 Comentarios	25
6 CONCLUSIONES	27
7 REFERENCIAS	29

FIGURAS

1 INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1 ANTECEDENTES.

En un sismo de alta intensidad, el grado de daño a edificios depende de la manera en que estos absorben los altos niveles de energía cinética a los cuales están sujetos. Como los códigos de diseño reconocen, sería demasiado costoso absorber esta energía dentro de la capacidad elástica de los materiales. Es por eso que en la práctica de la ingeniería sísmica actual, los edificios dependen para su supervivencia, durante un sismo severo, de la ductilidad de los elementos estructurales que los forman. Gracias a esta ductilidad el edificio puede disipar energía cinética durante sus deformaciones inelásticas.

La razón detrás de esto reside en que al aparecer comportamiento dúctil del edificio, la respuesta se reduce; es decir, hace las veces de un amortiguador estructural. El inconveniente de amortiguar al aprovechar la ductilidad de la estructura es que los elementos estructurales se deterioran irreversiblemente durante la acción de sismos severos, lo que obliga a reconstruir secciones completas del edificio ó que se tenga que demoler después de soportar un sismo muy severo, con todas las pérdidas económicas que esto implica. Además, hay una gran cantidad de incertidumbres en los modelos matemáticos de las estructuras que no se comportan elásticamente, factor más crítico en estructuras de concreto reforzado que en las de acero. Esto no significa que no haya incertidumbres en el comportamiento cuasi-elástico de los edificios reales, sino solo que estas resultan controlables. Prueba de esto último es que en estudios de vibración ambiental se han logrado correlaciones muy buenas entre mediciones de propiedades dinámicas de edificios existentes y las propiedades deducidas de modelos elásticos de esos mismos edificios.

Como se sabe, el amortiguamiento en estructuras es fundamental para la reducción de la respuesta. El amortiguamiento natural de los diferentes sistemas estructurales en uso varía con el material de construcción, la configuración estructural, los elementos secundarios presentes, y también con el detalle de las conexiones entre los diferentes elementos que los componen. Adopta valores relativamente bajos en materiales como el acero y el concreto reforzado, pero más elevados en otros como la mampostería.

Desafortunadamente no es posible establecer valores de amortiguamiento con la misma precisión que las masas y la rigidez. Los valores de amortiguamiento solo se pueden establecer adecuadamente cuando provienen de ensayos directos realizados en las estructuras existentes. Estos valores son demasiado pequeños como para depender de ellos al buscar disipar grandes cantidades de energía cinética.

Por todo lo anterior, se propone el empleo de amortiguamiento adicional que produzca reducciones apreciables de la respuesta dinámica, sin tener que depender de la ductilidad que pueda desarrollarse en la estructura, lo que permitirá reducir la posibilidad de daños antes citada.

Como ya se ha hecho en otros campos de la ingeniería (tal como la ingeniería automotriz), recientemente se han invertido muchos esfuerzos en la investigación teórica y experimental para el uso de dispositivos disipadores de energía [1,2,3,4]; esto se debe al reconocimiento de la importancia que tiene el amortiguamiento en la respuesta de una estructura sometida a vibraciones provocadas por sismos. De estos estudios se ha observado que el amortiguamiento que se obtiene con estos dispositivos es grande comparado con el natural de los sistemas estructurales en uso actualmente.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE.

En este trabajo se pretende hacer un estudio analítico del efecto de dos tipos de dispositivos de amortiguamiento adicional en la respuesta de una estructura metálica de dos niveles. Las acciones a las que estará sometida la estructura son excitaciones senoidales de diversas frecuencias.

Además, se pretende que la estructura que se diseñe en este trabajo sirva como prototipo para la construcción de un modelo físico que pueda llegar a ensayarse en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería. Este modelo físico se sometería a las mismas acciones que el modelo matemático, para así verificar la validez de los resultados obtenidos en el estudio analítico, evaluando de esta forma el comportamiento de este sistema estructural al agregarle dispositivos disipadores de energía, y establecer bases para juzgar la importancia del empleo de amortiguadores en estructuras flexibles.

2 TIPOS DE AMORTIGUADORES EXTERNOS

2.1 GENERALIDADES.

Los primeros intentos prácticos para darle mayor amortiguamiento a las estructuras se dirigieron hacia el uso del comportamiento dúctil de los elementos estructurales, recurriendo al concepto de vigas débiles y columnas fuertes, es decir, forzar la formación de articulaciones plásticas en vigas y no en columnas; también se manejó el concepto del piso débil que tiene el gran inconveniente de que exige demasiada ductilidad de las columnas del piso débil, lo que es muy difícil de alcanzar en la práctica. Otro camino explorado es el usar diagonales excéntricas con gran capacidad de disipación de energía. Todas estas aproximaciones tienen el inconveniente de que deterioran irreversiblemente la rigidez y resistencia de los elementos de los edificios.

Es así que surgen como una alternativa viable los dispositivos para dar amortiguamiento adicional a las estructuras. El concepto básico es que la energía se disipe a través del trabajo mecánico de estos dispositivos y no por el comportamiento dúctil de los elementos de la estructura. Este es el punto importante en la discusión sobre la utilidad de usar estos dispositivos amortiguadores.

Los diferentes dispositivos amortiguadores que se han propuesto se pueden clasificar, por su manera de responder a los movimientos de la estructura, en :

- a) Amortiguadores pasivos
- b) Amortiguadores activos

Esta es la clasificación mas radical, ya que los amortiguadores pasivos responden al movimiento de la estructura de una forma prefijada por el diseñador al momento de construirlo, a diferencia de los amortiguadores activos que responden de acuerdo a un mecanismo de control que se ajusta a la excitación que esta ocurriendo durante un sismo actual y que se retroalimenta con la respuesta que está ocurriendo. Este mecanismo de control recurre a equipo analógico o digital de control.

2.2 AMORTIGUADORES PASIVOS.

Los dispositivos que se han estudiado a la fecha se pueden clasificar en dispositivos colocados en la base de la estructura y dispositivos colocados en la superestructura.

Los dispositivos colocados en la base tienen un efecto de aislamiento de la superestructura con respecto al movimiento de su base, razón por la cual se les conoce como dispositivos aisladores de la base [4]. Los resultados experimentales muestran que los dispositivos reducen efectivamente los esfuerzos en columnas y la aceleración transmitida a la superestructura.

Los dispositivos amortiguadores se basan en principios tales como : fricción entre dos placas [2], comportamiento viscoso, o en comportamiento bilineal como los que se estudian en este trabajo [1].

2.3 AMORTIGUADORES ACTIVOS.

Estos dispositivos no han alcanzado el grado de desarrollo de los amortiguadores pasivos, los cuales ya se han usado en edificios reales como mecanismo de disipación de energía. En un estudio realizado en la Universidad de Nueva York, en Búfalo (USA) [3] se probó un sistema a base de tendones de presfuerzo los cuales generan fuerzas correctoras en el nivel inferior de un modelo de 3 niveles. Con estas fuerzas se busca controlar los desplazamientos de la estructura. La magnitud de las fuerzas correctoras es controlada por un computador digital que ejecuta un algoritmo de control en tiempo real, el cual se retroalimenta con la respuesta del modelo en cada instante.

3 CARACTERISTICAS DE LOS DOS AMORTIGUADORES EXTERNOS A PROBAR

3.1 DESCRIPCION

En este trabajo se prueban dos tipos de dispositivos disipadores de energía : el primero está basado en el comportamiento bilineal de soleras dobladas en forma de U, mientras que el segundo se basa en el comportamiento viscoso de un amortiguador comercial para camión.

El primer dispositivo se ha estado estudiando en el Instituto de Ingeniería [1] y a la fecha se tiene un prototipo práctico que se desea probar experimentalmente en un modelo físico, como el que se diseñó en este trabajo. En la figura 1-a se muestra la configuración del dispositivo ensayado en la máquina MTS del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Está configurado con dos soleras disipadoras. La razón de que se haya elegido esta configuración es porque se supuso que la fuerza de cedencia resultante sería adecuada para este trabajo.

El segundo dispositivo ha sido diseñado para usarse en camiones de carga. Cada dispositivo tiene una capacidad máxima de aproximadamente 5 toneladas. En la figura 2-a se muestran las características geométricas de uno de estos amortiguadores, en su posición extendida.

3.2 COMPORTAMIENTO HISTERETICO

El dispositivo desarrollado en el Instituto de Ingeniería tiene un comportamiento histerético experimental como el mostrado en las figuras 1-b y 1-c, donde se puede observar que presenta ciclos estables sin pérdida de rigidez y de resistencia. Estos disipadores se han probado para 100 ciclos a toda su capacidad (± 2.5 cms) sin presentar deterioro apreciable. Cuando se prueban con desplazamientos menores a 1 cm., el número de ciclos ha rebasado los 1000 ciclos sin deterioro del dispositivo. Esto habla de su resistencia a la fatiga cuando los esfuerzos son bajos.

El otro dispositivo en estudio es un amortiguador comercial del tipo viscoso que se caracteriza por tener una cámara de gas cuya función es

absorber impactos. De acuerdo al fabricante, este amortiguador mantiene sus características originales durante un intervalo de tiempo mucho mayor que los amortiguadores convencionales. Se supone que esta característica es conveniente para la aplicación en edificios. En la figura 2-a se muestran las dimensiones del amortiguador; y en la figura 2-c se muestra su comportamiento cuando se controla el desplazamiento y se varía la frecuencia de la excitación. La historia de desplazamientos es senoidal con una amplitud máxima constante.

3.3 MODELO MATEMATICO DE LOS AMORTIGUADORES

El comportamiento histerético del dispositivo desarrollado en el Instituto de Ingeniería se modela bilinealmente como se muestra en la figura 1-d, el cual se considera adecuado para su uso en el programa de análisis no-lineal con el que se obtendrá la respuesta en el tiempo de la estructura con disipadores.

El comportamiento histerético del dispositivo viscoso se modela matemáticamente como una constante multiplicada por la velocidad relativa de las partes móviles del amortiguador. Las características dinámicas de este dispositivo se obtuvieron experimentalmente en la máquina MTS del Instituto de Ingeniería.

La constante de proporcionalidad se obtuvo mediante el procedimiento de fijar uno de los extremos del amortiguador mientras que en el otro se aplicó una excitación senoidal como desplazamiento de frecuencia (ω) y magnitud (A) fijas, obteniéndose así una gráfica que relaciona la fuerza generada en el amortiguador con el desplazamiento relativo de sus partes móviles, como se indica en la figura 2-b. Así, la fuerza máxima desarrollada es :

$$F_{max} = C \cdot V_{max} \quad (3.1)$$

para un movimiento senoidal de amplitud (A) y frecuencia (ω) constantes, la velocidad máxima es :

$$V_{max} = A \cdot \omega \quad (3.2)$$

asi, el valor de la constante de proporcionalidad se calcula como:

$$C = F_{max} / (A \cdot \omega) \quad (3.3)$$

De los ensayos realizados en laboratorio se obtuvo la figura 2-d. Se observa que no se sigue la ley enunciada por la ecuación 3.1 . Los puntos de la rama superior son los valores de las fuerzas de compresión sobre el amortiguador, los de la rama inferior corresponden a las fuerzas de tensión desarrolladas.

Se desconoce, al momento de escribir este trabajo, si estas diferencias con respecto al comportamiento esperado se deben a un mal funcionamiento del amortiguador ensayado; esto se verificará posteriormente con los amortiguadores que se utilizen en el modelo físico.

Para los fines de este trabajo se hará una aproximación para así poder hacer un estudio preliminar y tener idea de lo que cabría esperar de una estructura con estos amortiguadores. De acuerdo a este criterio se eligió un valor de C que parece adecuado y es :

$$C = 12.22 \text{ kgs-seg/cm} \quad (3.4)$$

4 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA Y DEL EXPERIMENTO

4.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Al diseñar esta estructura se tuvo en mente obtener dimensiones de una que fuera lo suficientemente flexible, de tal manera que se garantizara que los dispositivos disipadores de energía tuvieran oportunidad de trabajar dentro de un intervalo útil de desplazamientos. Esto es especialmente válido para el disipador de comportamiento bilineal. Otro criterio importante usado, consideró que dentro de los desplazamientos de entrepiso esperados, no se alcanzara la condición de cedencia de las columnas y de las vigas.

Un marco de acero estructural soldado surgió como la elección lógica para el modelo, debido a que las condiciones de frontera de todos los elementos estructurales se pueden definir claramente, lo que elimina una fuente de grandes incertidumbres, como es el caso de estructuras de concreto reforzado, con losa monolítica. También se decidió hacer un modelo lo más cercano a uno de escala natural, pues se supone que las conclusiones obtenidas para este modelo se podrán aplicar directamente a las estructuras civiles a escala natural. Al hacer el modelo casi a escala natural, se espera facilitar su construcción, ya que se pueden usar perfiles comerciales y las técnicas usuales de construcción de estructuras de acero. Para darle el peso deseado por piso a la estructura se proponen bloques de concreto reforzado que serán atornillados al sistema de piso.

La instalación física para hacer la prueba experimental de la estructura que se diseñó y analizó en este trabajo, impuso una serie de restricciones sobre las dimensiones, peso y frecuencias naturales que debería poseer el modelo físico final.

En la figura 3 se indican las limitaciones de tamaño para el modelo. La posición de los agujeros, de los cuales se habrá de fijar el modelo a la superficie de la mesa vibradora, determinan las dimensiones en planta del modelo. Es así, que las dimensiones elegidas son las indicadas en la figura 4.

La limitación en peso de la estructura no es tan grave, ya que la capacidad de carga vertical de la mesa es de 15 toneladas, lo que da un margen de trabajo amplio para este caso.

La tercera limitación mencionada, la frecuencia del modelo, es importante ya que se ha comprobado en un trabajo experimental anterior [7] que la mesa introduce distorsiones en las señales excitadoras de la base que se envían al sistema controlador de la mesa vibradora. Esta distorsión se asocia al hecho de que la frecuencia fundamental del sistema mesa vibradora-actuador presenta valores del orden de 25 Hz [6], lo que ocasiona una amplificación de la respuesta, así se establece una ventana de operación confiable del sistema en el intervalo de 1 a 15 Hertz. El límite inferior está determinado por el hecho de que la mesa no puede alcanzar aceleraciones mayores de 1 g para frecuencias menores de 1 Hertz [6], además de que en esa frecuencia la distorsión de la señal excitadora empieza a ser muy importante.

De un trabajo anterior se tiene la experiencia de que es necesario proporcionar una rigidez transversal adecuada al modelo, de manera que al ensayarlo no se excite fácilmente el modo de torsión [7]. En ese trabajo se logró tal condición, al buscar que el período de torsión fuera del orden del doble que el período del primer modo natural en la dirección longitudinal (dirección del movimiento inducido por la mesa vibradora). Es esta razón la que obligó que las diagonales en los marcos transversales proporcionaran una rigidez tal, que el período de torsión cumpliera ese criterio. La explicación se encuentra en el hecho de que existe acoplamiento entre los dos modos; este acoplamiento ocurre porque en la práctica no se pueden lograr estructuras con su centro de rigidez y de masas coincidiendo en el mismo punto, además, no se puede aplicar tan fácilmente la carga sísmica en la base sin producir efectos de torsión en el modelo.

4.2 SISTEMA ESTRUCTURAL

Se diseñó una estructura formada por columnas, vigas y diagonales que forman un marco especialmente rígido en la dirección transversal al movimiento previsto del modelo y más flexible en la dirección longitudinal del modelo, que es en la que se probarán los dispositivos disipadores. El sistema de piso se diseñó de manera que la masa que se coloque, no le proporcione rigidez a flexión al piso, con la consiguiente facilidad al modelar la rigidez a flexión del piso. La masa concentrada en el piso se le

proporciona al modelo a través de un bloque de concreto diseñado expresamente para esta aplicación. Para este estudio se eligió una masa en cada nivel correspondiente a 2000 Kgf (kilogramos fuerza).

La forma y dimensiones de la estructura se pueden apreciar en la figura 4.

4.3 SELECCION DE LAS EXCITACIONES EN LA BASE

Como se decidió desde el inicio del proyecto, se generarán movimientos armónicos en la base, variando la frecuencia de las excitaciones. Esto obligó a analizar la respuesta bajo diversas frecuencias, para conocer el desplazamiento máximo correspondiente a cada frecuencia, dentro del intervalo de frecuencias escogidas al considerar las limitaciones impuestas por la operación eficiente de la mesa vibradora. Para esta etapa del análisis, se consideró una aceleración máxima de la base igual a 100 cm/s^2 .

4.4 MODELO MATEMATICO ELASTICO LINEAL DE LA ESTRUCTURA CON AMORTIGUADORES EN LAS DIAGONALES.

4.4.1 METODO DE ANALISIS

En esta etapa del análisis se supuso comportamiento elástico lineal de todos los elementos de la estructura, en búsqueda de una estructura flexible con esfuerzos menores a los de cedencia en columnas y vigas. Con la solución obtenida, se procedió posteriormente a realizar análisis no lineal de la estructura, cuyos resultados permitieron la revisión definitiva de estabilidad y esfuerzos de las columnas y vigas del modelo, bajo las solicitaciones modificadas con que se realizó el análisis no lineal.

El procedimiento usado en esta etapa fue :

a) Proposición de perfiles de columnas y vigas, considerando aquellos disponibles en el mercado. Como una aproximación inicial, se considera que la rigidez de la diagonal con dispositivo amortiguador bilineal es igual a la del dispositivo solo; esta rigidez es de 5627 kg/cm (ver figura 1-d).

b) Usando el programa DRAIN [5,8] se obtiene la matriz de rigidez condensada a los dos grados de libertad de traslación del modelo. Se inicia el análisis, al considerar que el modelo esta empotrado en su base y las diagonales estan articuladas en su unión con el marco. Como el programa DRAIN solo permite hacer análisis en un plano, se modeló solo un marco longitudinal, razón por la que se coloca solo la mitad de la masa por piso, como masa del marco en cada nivel.

Para obtener la matriz de rigidez condensada a los 2 grados de libertad indicados en la figura 8, se usó la capacidad del DRAIN para hacer análisis estático. El procedimiento consiste en aplicar al modelo matemático en el DRAIN una carga de 1000 kgs (arbitraria) en el nivel superior y obtener los desplazamientos en los dos niveles, enseguida, se descarga el nivel superior y se aplica una carga de 1000 kgs en el nivel inferior con lo que se tiene otro par de desplazamientos en los dos niveles del sistema en estudio.

Así, se pueden formar las siguientes dos matrices :

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

como $F = K \cdot D$ se tiene que :

$$\boxed{K = F \cdot D^{-1}} \quad (4.2)$$

donde K es la matriz de rigidez condensada buscada.

c) Se define la matriz de masas, tal que en cada nivel existan 1000 kgs fuerza concentrados (tomando en cuenta solo un marco del modelo); esta matriz no se alteró en los diferentes intentos que se hicieron para encontrar los perfiles más adecuados. La matriz de masa resultó ser :

$$M = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix} \cdot 1/g \quad (4.3)$$

donde, aproximadamente, $g = 978 \text{ cm/s}^2$ para el Valle de México.

d) Definidas las matrices de rigidez y masas se obtuvo la matriz de amortiguamiento de acuerdo a la expresión :

$$C = \alpha . M + \beta . K \quad (4.4)$$

donde los escalares α y β se determinan de acuerdo a las ecuaciones :

$$\lambda_1 = \frac{\alpha T_1}{4 \pi} + \frac{\beta \pi}{T_1} \quad (4.5)$$

$$\lambda_2 = \frac{\alpha T_2}{4 \pi} + \frac{\beta \pi}{T_2}$$

T_1 y T_2 son los periodos de flexión en el sentido longitudinal y se obtienen de la condición :

$$\det (K - \omega_1^2 . M) = 0 \quad (4.6)$$

donde $\omega_1 = \frac{2 \pi}{T}$. En este trabajo se consideró que el amortiguamiento estructural es del 1 por ciento con respecto al crítico, para los dos modos de vibrar. De ahí que λ_1 y λ_2 sean ambas iguales a 0.01 en las ecuaciones (4.5).

e) Finalmente, se efectúan análisis correspondientes al intervalo de frecuencias seleccionadas, para obtener las respuestas máximas de desplazamiento, velocidad, aceleración y cortante basal en cada masa. Para esta parte del análisis se utilizó un programa desarrollado para un estudio anterior, de una estructura ensayada en la mesa vibradora [7]. De este programa se pueden obtener las respuestas máximas indicadas arriba. En la figura 9 se muestra una gráfica típica, que relaciona la respuesta máxima para cada frecuencia de excitación.

f) Con los desplazamientos máximos ,para la frecuencia de resonancia, se calculan las fuerzas horizontales equivalentes en cada nivel con la expresión :

$$F = K . D \quad (4.7)$$

donde D es el vector de desplazamientos máximos correspondiente a la

frecuencia de resonancia. Este vector F se introduce en el modelo matemático creado con el programa DRAIN, en el paso (b), con lo que se obtienen los elementos mecánicos correspondientes a los desplazamientos máximos para la frecuencia de resonancia de la estructura.

Este es un proceso iterativo, que se detiene cuando el desplazamiento máximo en resonancia de los niveles alcanza un valor razonable (alrededor de 2.0 cms por entrepiso) y simultáneamente, los elementos mecánicos no exceden a los de fluencia para las barras que forman la estructura. En la tabla 1 se muestran los resultados de algunos ciclos a través del proceso indicado arriba.

ESTRUCTURA	D _{max} (cms)	A _{max} (cm/s ²)	M _{max} (kg-cm)	M _y (kg-cm)	M _{max} /M _y (%)
MIPR-4	4.06	5758	63,832	45,540	140
CE-1	3.73	5744	96,217	121,440	79
IPR-4	3.03	5713	77,451	45,540	170
IPR-5	2.72	5683	105,527	70,840	149
PTR-2	2.26	5628	154,402	136,822	113
IPR-3	1.59	5460	222,998	230,230	97

TABLA 1 RESPUESTA MAXIMA EN RESONANCIA

NOTAS :

D_{max} = desplazamiento máximo, relativo a la base, del nivel superior.

A_{max} = aceleración máxima absoluta del nivel superior.

Las estructuras identificadas con IPR o MIPR, tienen perfiles IPR flexionándose alrededor de su eje débil, excepto el IPR-3 que está colocado con máxima rigidez a flexión en la dirección del movimiento de la mesa vibradora. El diseño MIPR-4 es similar al IPR-4, la diferencia esta en la altura de entrepiso, para MIPR-4 es de 200 cms y para IPR-4 es de 165 cms. En los demás diseños esta altura es como en IPR-4. M_{max} es el momento flexionante máximo en las columnas del piso inferior, y M_y es el momento de cedencia correspondiente, es decir, el producto del esfuerzo de cedencia por el módulo de sección del perfil.

De los diseños analizados, la estructura CE-1 es la más adecuada, aunque los momentos flexionantes en las columnas son casi los de cedencia, cuando

no se considera la interacción con la carga axial.

Para reducir el problema de los momentos flexionantes grandes en las columnas, se tomó la decisión de articular el modelo en su base. Con esto se logró abatir los momentos flexionantes y aumentar la flexibilidad global de la estructura. Este efecto se debe a que las diagonales toman una porción mayor de la energía de deformación, ya que aumenta su contribución relativa a la rigidez transversal del sistema estructural. Así, en lo que sigue, se manejaron las secciones transversales indicadas en la figura 7, con la columnas del primer entrepiso articuladas en su parte inferior.

4.4.2 PROPIEDADES DINAMICAS DEL MODELO ELASTICO LINEAL

Las frecuencias naturales obtenidas para la estructura final, y alternativamente los periodos, se presentan en la siguiente tabla :

MODO NATURAL	FRECUENCIAS DE MODOS (Hz)		PERIODOS (seg)	
	PRIMERO	SEGUNDO	PRIMERO	SEGUNDO
LONGITUDINAL	6.35	18.5	0.157	0.054
TRANSVERSAL	9.3	27.0	0.107	0.037
ROTACIONAL	20.0	57.0	0.050	0.017

TABLA 2 FRECUENCIAS DE LOS DIFERENTES MODOS DE VIBRAR

Como la frecuencia del primer modo de torsión excede a la del primer modo natural longitudinal por un margen amplio, se espera que en ensaye experimental del modelo no se excite el modo de torsión, al aplicar excitaciones longitudinales en resonancia con el primer modo natural longitudinal.

Las formas modales correspondientes se muestran en la tabla siguiente :

NIVEL	CONFIGURACIONES DE LOS MODOS NATURALES					
	LONGITUDINALES		TRANSVERSALES		ROTACIONALES	
	1°	2°	1°	2°	1°	2°
2	1	1	1	1	1	1
1	0.689	-1.454	0.590	-1.696	0.595	-1.681

TABLA 3 CONFIGURACIONES MODALES

Las matrices de rigidez (K) y de masa (M), para un marco longitudinal de la estructura definitiva, son :

$$K = \begin{bmatrix} 5554.6 & -5598.0 \\ -5610.0 & 9832.9 \end{bmatrix} \quad M = \begin{bmatrix} 1.0225 & 0 \\ 0 & 1.0225 \end{bmatrix}$$

La matriz de amortiguamiento natural (C) de la estructura se calcula como la suma: $C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K$ donde los factores α y β son :

$$\alpha = 0.593976$$

$$\beta = 0.000128$$

Estas características dinámicas se obtuvieron suponiendo que el modelo se desplanta sobre un soporte infinitamente rígido. Como se ha mencionado, el sistema mesa-actuador presenta una rigidez finita, por esta razón se revisa la posible modificación de las características dinámicas del modelo al considerar su interacción con el sistema mencionado.

Rodríguez y Ovando [6] encuentran que la frecuencia fundamental del sistema mesa-actuador, con un lastre de aproximadamente 6 toneladas, es de 25 Hertz ($T=0.04$ seg) con un amortiguamiento de 17 %; esta frecuencia está asociada fundamentalmente al modo de balanceo de la mesa vibradora.

Como una aproximación a los efectos de interacción mesa-estructura, se puede estimar el periodo fundamental del sistema mediante la siguiente expresión :

$$T_{EMA} = \sqrt{T_E^2 + T_{MA}^2}$$

donde T_{EMA} = periodo del sistema estructura-mesa vibradora.

T_E = periodo de la estructura considerando base infinitamente rígida.

T_{MA} = periodo del sistema mesa-actuador.

Sustituyendo los valores ya conocidos, se encuentra que :

$$T_{EMA} = \sqrt{(1/6.35)^2 + (1/25)^2} = 0.162 \text{ seg.}$$

lo que significa que habría una modificación del periodo fundamental de un 3 % respecto al que considera base infinitamente rígida. Se considera que este aumento en el periodo fundamental no modificará significativamente los resultados obtenidos para la estructura sobre base infinitamente rígida.

5 SIMULACION DE LA RESPUESTA NO LINEAL CON EXCITACION SENOIDAL DE LA BASE.

5.1 METODO DE ANALISIS.

Del análisis realizado en el capítulo anterior se obtuvieron las dimensiones generales y perfiles para definir el modelo. En este capítulo se efectuará el análisis bajo comportamiento no lineal de dicho modelo, al suponer que en las diagonales de los marcos longitudinales están colocados los dispositivos disipadores en estudio.

Para poder tomar en cuenta el comportamiento no lineal de la estructura con disipadores de comportamiento bilineal en las diagonales, se recurrió al programa DRAIN que es el único programa disponible que permite modelar procesos no lineales.

En el análisis matemático de la estructura, con disipadores viscosos, se usó el programa de análisis elástico-lineal mencionado en el punto 4.4.1.e ; este programa permite introducir las matrices de rigidez, amortiguamiento y masas directamente. Es decir, ya condensadas a los dos grados de libertad traslacional. Al usar este programa se parte de la suposición de que no se alcanzará la condición de cedencia en columnas y vigas cuando la excitación en la base provoque la resonancia de la estructura.

La excitación en la base del modelo presenta las características indicadas en la figura 10, donde se indica la transición de amplitud cero hasta la amplitud máxima de 400 cm/s^2 , en un intervalo de 2 segs y la señal dura 8 segs. Bajo las mismas condiciones anteriores, se varió solo la frecuencia de la señal excitadora de la base del modelo, con lo que se hace el análisis en el dominio de las frecuencias de interes. En un principio, se usó una amplitud máxima de 100 cm/s^2 , pero se observó que la respuesta era muy pequeña, por lo que se decidió usar una amplitud máxima de 400 cm/s^2 .

Para evaluar el beneficio de colocar dispositivos amortiguadores con comportamiento bilineal en la estructura, se comparan los resultados del análisis no-lineal con los resultados del mismo modelo pero suponiendo comportamiento elástico lineal de sus elementos. Como indicadores se usaron los valores máximos de desplazamiento de los dos niveles, las fuerzas axiales en las diagonales, momentos flexionantes en 2 secciones críticas, cargas axiales en columnas y el momento de volteo en la base.

Para el caso de la estructura con amortiguadores viscosos, se comparan las respuestas de la estructura sin diagonales longitudinales contra la estructura con amortiguadores colocados en las diagonales longitudinales de los dos pisos del modelo. Las respuestas que es posible comparar, con los programas de computadora disponibles, son los valores máximos de : desplazamiento relativo a la base de los dos niveles, aceleraciones absolutas de los dos niveles y el cortante basal.

5.2 MODELO MATEMATICO DE DISPOSITIVO AMORTIGUADOR CON COMPORTAMIENTO BILINEAL.

Para modelar este dispositivo disipador se utilizó el elemento armadura del programa DRAIN con las características que aparecen en la figura 5. Este elemento se usó con la opción que no permite pandeo en compresión de la diagonal, lo que concuerda con las propiedades de la diagonal con dispositivo disipador, ya que se seleccionó una sección transversal en cajón bastante sobrada para el resto de la diagonal, esto con el fin de evitar la posibilidad de pandeo de la diagonal. Esta sección en cajón se forma soldando 2 angulos de $4 \times \frac{1}{4}$ ". La diagonal se articuló en ambos extremos con el fin de reducir al mínimo los momentos flexionantes en la misma. El dispositivo se colocó en un extremo de la diagonal.

Puesto que se tiene la rigidez del dispositivo y la del resto de la diagonal como resortes en serie, se obtuvo una rigidez equivalente de 5471 kg/cm^1 , lo que equivale al 97.2 % de la rigidez del dispositivo por lo que se puede dar a toda la diagonal la rigidez original del dispositivo sin cometer errores de consideración.

Para fines del programa DRAIN se consideró para la diagonal un módulo de elasticidad de $2,100,000 \text{ kg/cm}^2$, por lo que el área equivalente de la diagonal resulta de 0.845 cm^2 . Con estas características se obtiene la rigidez equivalente calculada.

5.3 MODELO MATEMATICO DE DISPOSITIVO AMORTIGUADOR CON COMPORTAMIENTO VISCOSO.

El efecto de los amortiguadores se puede incluir en la matriz de amortiguamiento C que se introduce en la ecuación de equilibrio dinámico :

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K \cdot u = M \cdot \ddot{u}_g \quad (5.1)$$

donde: \ddot{u} es la aceleración relativa a la base del modelo

\dot{u} es la velocidad relativa a la base

u es el desplazamiento relativo a la base

\ddot{u}_g es la aceleración de la base del modelo.

M y K son las matrices de masa y rigidez respectivamente.

en esta ecuación, la matriz C incluye el amortiguamiento natural de la estructura, que es del orden del 1 por ciento del crítico, además del amortiguamiento adicional debido a la presencia de los disipadores viscosos en las diagonales de la estructura. Entonces la matriz C se calcula como :

$$C = (\alpha \cdot M + \beta \cdot K) + C^* \quad (5.2)$$

donde C^* se calcula como :

$$C^* = \begin{bmatrix} C_1 \cdot \cos^2 \theta_1 & : & -C_1 \cdot \cos^2 \theta_1 \\ -C_1 \cdot \cos^2 \theta_1 & : & (C_2 \cdot \cos^2 \theta_2 + C_1 \cdot \cos^2 \theta_1) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

En este caso C_1 es igual a C_2 , que son las constantes de proporcionalidad de los amortiguadores viscosos. La figura 11 muestra los ángulos θ_1 y θ_2 .

5.4 ESPECTROS DE RESPUESTA ANTE EXCITACIONES SENOIDALES.

5.4.1 ESTRUCTURA CON AMORTIGUADORES BILINEALES.

Al analizar las figuras 12, 13, 14, 15 y 16 se observa la disminución radical de la respuesta de la estructura equipada con disipadores con respecto a la que no los tiene.

En desplazamientos se observa que el máximo del nivel 2 es el 7.6 % del registrado cuando no hay disipadores en las diagonales y el del nivel 1 es el 8.8 % . Además se observa en la tabla 4 que la relación Δ/H sería adecuada para controlar daños a los elementos secundarios (si los hubiera).

NIVEL	u (cms)	* u (cms)	Δ (cms)	Δ / H_i	$c = H_i/\Delta$
2	1.031	13.50	0.248	0.00138	725
1	0.824	9.33	0.783	0.00435	229

TABLA 4 DESPLAZAMIENTOS MAXIMOS EN RESONANCIA

NOTAS :

- u = desplazamiento máximo relativo a la base, para la estructura con amortiguadores.
- *
u = desplazamiento máximo relativo a la base, para la estructura sin amortiguadores.
- Δ = desplazamiento relativo máximo de entrepliso para la estructura con amortiguadores en las diagonales.
- H_i = altura de entrepliso = 180 cms.

En análisis lineal el factor de amplificación dinámica de desplazamientos en resonancia, FD, se calcula en forma aproximada como :

$$FD = \frac{1}{2 \xi} \quad (5.4)$$

donde ξ es el amortiguamiento viscoso, que en este caso se está tomando como 1 % del amortiguamiento crítico. Para este caso el valor de $FD \approx 50$. Con los valores obtenidos en el análisis se obtuvo un $FD = 49.8$ que es razonablemente parecido a 50 por lo que la expresión (5.4) es adecuada. El

factor de amplificación dinámica máximo, en la respuesta de la estructura con disipadores es $FD = 3.8$. Con este valor se puede calcular un valor de amortiguamiento viscoso equivalente (en resonancia) con la expresión :

$$\xi = \frac{1}{2 FD} \quad (5.5)$$

de esta expresión resulta un amortiguamiento viscoso $\xi = 13.2 \%$ del valor crítico.

Por otro lado, en las figuras 14 y 15 se aprecian reducciones considerables en elementos mecánicos debido a la presencia de los disipadores. En la figura 14-a se aprecia que los momentos flexionantes en columnas son inferiores a los de cedencia ($M_y = 122,000 \text{ kg-cm}$) lo que significa que no se alcanzan a formar articulaciones plásticas en columnas cuando hay disipadores; la figura 14-b muestra que cuando no hay disipadores se formarían zonas plastificadas en columnas. Es así que los disipadores de energía evitan esa condición indeseable. En la figura 15 se aprecia la reducción de fuerzas axiales en la columna inferior izquierda, la nueva fuerza axial es del orden del 9.6 % de la registrada en la estructura sin disipadores; consecuentemente, se redujo el momento de volteo en la base (figura 16) al 9.3 %. Todo esto viene a reflejarse en mejores condiciones para la cimentación de la estructura.

En la figura 13 se aprecia que las fuerzas axiales en las diagonales son controladas efectivamente por el disipador, lo que lleva a un diseño más eficiente y seguro de las diagonales. Las fuerzas axiales máximas alcanzadas en la diagonal inferior son del orden del 5.5 % de las que se presentarían si no hubiera disipadores. En la figura 13-a se observa que en el intervalo de 4 a 8 Hz solo alcanza a ceder la diagonal inferior, es decir, los requerimientos de desplazamientos se concentran en el nivel inferior.

De estas observaciones se desprende que la presencia de los disipadores mejora radicalmente el comportamiento de la estructura en la zona próxima a resonancia, con respecto a la estructura sin disipadores. Fuera de esta zona los disipadores no trabajan como tales, ya que la fuerza axial que toman es menor que la fuerza de cedencia, razón por la cual se comportan como lo haría una diagonal elástica lineal sin capacidad de disipar energía.

5.4.2 ESTRUCTURA CON AMORTIGUADORES VISCOSOS.

En las figuras 17, 18 y 19 se presentan las respuestas máximas durante el barrido de frecuencias. En realidad se presentan dos estructuras diferentes, la primera se denominará modelo A y la segunda modelo B. El modelo A tiene solo a los amortiguadores en sus diagonales longitudinales, el modelo B tiene un amortiguador y un resorte en paralelo en cada diagonal longitudinal; la rigidez de los resortes es igual a la rigidez inicial de los amortiguadores bilineales, de tal manera que las rigideces iniciales del modelo B y el modelo con amortiguadores bilineales sea igual.

Inicialmente se estudió el modelo A al cual se logró darle un amortiguamiento viscoso equivalente de 14 %, aunque a costa de grandes desplazamientos horizontales de sus pisos (ver figura 17). El desplazamiento es 7.8 veces mayor que el alcanzado en el segundo nivel de la estructura con amortiguadores bilineales. Por este motivo se propuso el modelo B en el cual se redujo apreciablemente el desplazamiento con respecto al modelo A, en este caso el amortiguamiento viscoso equivalente es del orden del 5 %. Como muestran las figuras 18 y 19, esta reducción en desplazamientos fue acompañada de un aumento en el nivel de aceleraciones alcanzadas en la azotea y de aumento en la fuerza cortante en la base.

Es claro que la respuesta en desplazamientos del modelo B se redujo por la adición de los resortes en sus diagonales. A pesar de que el modelo B tuvo respuesta en desplazamientos menor, la eficiencia de los amortiguadores viscosos se redujo; esto se puede apreciar mejor si se considera que en el modelo A el factor de amplificación dinámica fué de 3.41 y en el modelo B fué 10.2.

Algo que resulta interesante resaltar es que en ambos modelos casi desapareció el pico correspondiente al segundo modo de los modelos. Esto se aprecia con más claridad en la figura 18 por ser la aceleración el parámetro que refleja más marcadamente los picos en resonancia.

En la tabla 5 se muestran los valores de Δ/H máximos que se presentan cuando la estructura entra en resonancia con el movimiento del suelo.

NIVEL	u (cms)	u* (cms)	Δ (cms)	Δ / H_i	$c = H_i / \Delta$
2	2.725	9.83	0.849	0.00472	212
1	1.876	6.76	1.876	0.01042	96

TABLA 5 DESPLAZAMIENTOS MAXIMOS EN RESONANCIA (modelo B)

NOTAS :

- U = desplazamiento maximo relativo a la base, para la estructura con amortiguadores.
- *
u = desplazamiento maximo relativo a la base, para la estructura sin amortiguadores. (modelo B)
- Δ = desplazamiento relativo maximo de entrepiso para la estructura con amortiguadores en las diagonales.
- H_i = altura de entrepiso = 180 cms.

5.5 REVISION DE ESFUERZOS Y ESTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA.

Para la estructura con disipadores de comportamiento bilineal, se tiene el siguiente estado de esfuerzos máximos :

ELEMENTO	$\frac{f_a}{F_a}$	$\frac{f_b}{F_b}$	$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b}$
Col. inf. der.	0.064	0.374	0.44
Col. inf. izq.	0.081	0.353	0.43
Col. sup. der.	0.019	0.524	0.54
Col. sup. izq.	0.049	0.498	0.55
viga superior	0.010	0.054	0.06
viga inferior	0.017	0.074	0.09

TABLA 6 RELACION DE ESFUERZOS ACTUANTES A PERMISIBLES

notas :

- f_a = esfuerzo axial actuante.
 F_a = esfuerzo axial admisible.
 f_b = esfuerzo actuante en flexion.
 F_b = esfuerzo admisible en flexion.

En la tabla 6 se muestra que el nivel de esfuerzos es bajo en todas las columnas y vigas del marco longitudinal. Esto se debe a que las secciones fueron escogidas con criterios elástico-lineales sin considerar la reducción en la respuesta debido al comportamiento no lineal de los disipadores.

Aunque este nivel de esfuerzos no es óptimo, se considera adecuado para un ensaye posterior del modelo físico, en el que se probaría la eficiencia de estos disipadores, manteniéndose elástica el resto de la estructura.

En la tabla 7 se muestra el estado de esfuerzos máximos para la estructura con amortiguadores viscosos y resortes en sus diagonales longitudinales (modelo B). Evidentemente, el estado de esfuerzos en columnas es mucho menos favorable que para la estructura con amortiguadores bilineales. Otro inconveniente es que se alcanzan fuerzas axiales en las diagonales casi 4 veces mayores, lo que hace algo más pesadas a las diagonales con amortiguadores viscosos y resortes en paralelo.

ELEMENTO	$\frac{f_a}{F_a}$	$\frac{f_b}{F_b}$	$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b}$
Col. inf. der.	0.111	0.847	0.96
Col. inf. izq.	0.183	0.813	0.996
Col. sup. der.	0.024	0.860	0.88
Col. sup. izq.	0.053	0.780	0.83
viga superior	0.010	0.089	0.10
viga inferior	0.017	0.176	0.19
fuerza máxima en resortes : diagonal superior = 3782 kgs. diagonal inferior = 8573 kgs.			

TABLA 7 RELACION DE ESFUERZOS ACTUANTES A PERMISIBLES
(MODELO B)

5.6 COMENTARIOS.

Con los resultados obtenidos para los modelos con diferentes tipos de amortiguadores se pueden hacer las siguientes observaciones :

La estructura con amortiguadores bilineales se comportó más favorablemente que el modelo B con amortiguadores viscosos. Esta afirmación está basada en que la respuesta en desplazamientos del modelo B es del orden de 2.5 veces mayor, además de que las aceleraciones alcanzadas en los pisos son también mayores, esto último influye directamente en que se alcancen mayores fuerzas cortantes y momentos de volteo en la estructura. Se compara esta estructura con el modelo B debido a que tiene la misma rigidez inicial.

Una diferencia entre los dos tipos de amortiguadores es que el amortiguador bilineal solo trabajó (es decir, tomó fuerzas mayores a las de su cedencia) en la zona de resonancia del primer modo longitudinal, y el amortiguador viscoso trabajó en todas las frecuencias de excitación. Es debido a este fenómeno que los amortiguadores viscosos eliminaron el pico de respuesta en la frecuencia de excitación en resonancia con el segundo modo de la estructura, mientras el otro amortiguador no tuvo este efecto.

Por otro lado, con el amortiguador bilineal se puede controlar, mediante un diseño adecuado, la fuerza cortante que se alcanzará por entrepiso; a diferencia de los amortiguadores viscosos con resortes en paralelo para los cuales no se puede controlar tan fácilmente la fuerza cortante máxima que se genera.

Para el nivel de aceleración en la base, utilizado como excitación de la estructura con amortiguadores bilineales, se observa que los dispositivos colocados en el entrepiso superior no alcanzaron a ceder; aunque, como es de esperarse, de aumentar las aceleraciones en la base eventualmente cederían. En todo caso, para una estructura real, sometida a excitaciones más o menos definidas, es necesario encontrar la ubicación más adecuada de estos dispositivos en el sentido vertical de la estructura o variar la carga de cedencia, de tal manera que cedan casi simultáneamente.

Del análisis de los modelo A y B, ambos con amortiguadores viscosos, se observó que la eficiencia para disipar energía de los amortiguadores disminuyó al aumentar la rigidez de la estructura, medida esta eficiencia como la cantidad de amortiguamiento viscoso equivalente dada a la

estructura.

Resulta interesante observar que para esta estructura, debido al gran amortiguamiento adicional, no es muy crítico el equivocarse en la magnitud del amortiguamiento natural; ya que un error fuerte en su estimación no afectaría apreciablemente la respuesta (recordar que el amortiguamiento natural es del orden del 1 por ciento).

6 CONCLUSIONES

Para la estructura analizada en este trabajo se obtuvo que los dos tipos de amortiguadores manejados le agregan un amortiguamiento considerable a la estructura. En esta comparación el amortiguador bilineal resultó mucho más eficiente, ya que además de darle a la estructura un amortiguamiento viscoso equivalente del 13 por ciento, controla los desplazamientos laterales de mejor manera (elementos mecánicos menores) y disminuye las aceleraciones absolutas máximas que se alcanzan en la estructura, razón por la cual se reducirían los daños a los objetos no estructurales que estuvieran dentro de la estructura.

Al parecer, una de las condiciones para el trabajo eficiente de ambos tipos de amortiguadores es que la estructura sea relativamente flexible, y para el caso del amortiguador bilineal, que más de la mitad de la rigidez lateral de la estructura la proporcionen las diagonales con los amortiguadores. En consecuencia, estos disipadores de energía no trabajarían eficientemente en estructuras que incluyan muros de concreto para resistir las fuerzas laterales y disipadores de energía en sus diagonales.

Se piensa que la reducción general de elementos mecánicos, desplazamientos y aceleraciones, debidos a la presencia de los disipadores de energía de comportamiento histerético bilineal, se podría obtener en otras estructuras. La condición básica para obtener los beneficios ya planteados sería que la mayor parte de la rigidez lateral de la estructura estuviera dada por las diagonales con los dispositivos disipadores de energía. Así se podría esperar :

- a) Reducción de la amplitud de los desplazamientos de entresuelo y de las aceleraciones, con la reducción considerable de daños a elementos secundarios
- b) Se evita el fenómeno de resonancia, o por lo menos se reduce considerablemente
- c) Como cabría esperar, las dimensiones de los elementos estructurales se pueden reducir, obteniéndose así economías en el tamaño de los miembros

d) Al disiparse la energía a través de los dispositivos, no se tiene que depender de la habilidad de los elementos estructurales para comportarse dúctilmente durante sismos de gran intensidad. Y en el último de los casos, se dejaría este comportamiento dúctil como la última línea de defensa de la estructura

e) Para una estructura diseñada de acuerdo a estos conceptos, se tendría que reparar los elementos estructurales principales solo después de un sismo extraordinariamente intenso, ya que para los sismos de mayor intensidad esperados, no se requeriría de su ductilidad y consiguiente deterioro

Por supuesto, estas afirmaciones se basan en los resultados obtenidos en este estudio analítico y, para tener confianza de su validez, se deben comprobar experimentalmente. Principalmente, se debe construir y probar el amortiguador montado en la diagonal de la estructura, buscando un dispositivo práctico de fabricar y confiable en su funcionamiento.

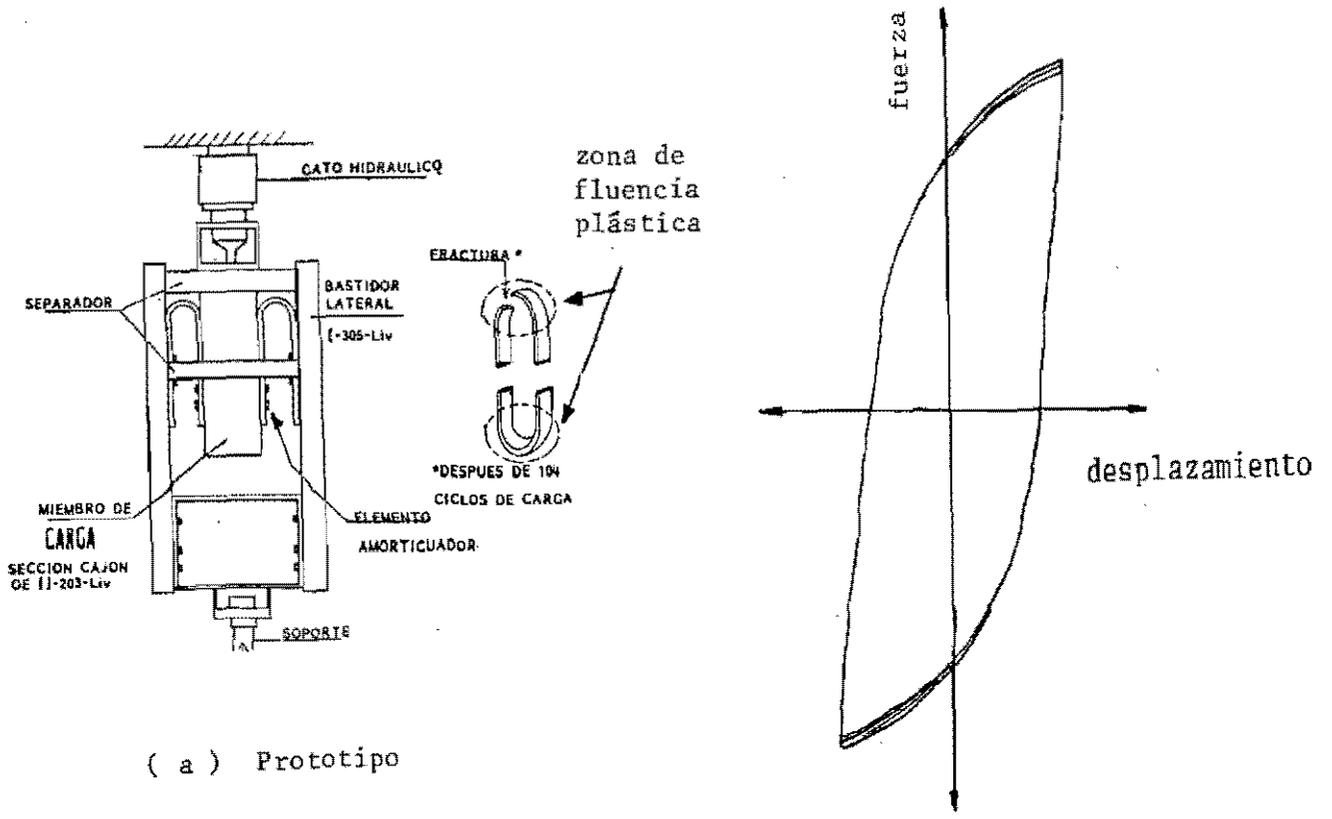
Bajo el supuesto de que estos resultados se comprueben satisfactoriamente en el laboratorio, con un modelo físico, se piensa que ha llegado el momento de decidir si se ha de continuar diseñando de acuerdo a los principios actuales del diseño sísmico o se debe cambiar a otra manera de atacar el problema de la ingeniería sísmica donde se busque proporcionar a las estructuras la capacidad de resistir los máximos sismos previstos en los reglamentos, con la ayuda de disipadores de energía, sin depender de la ductilidad que podrían desarrollar los elementos estructurales, dejando esa capacidad como último recurso para sobrevivir a sismos no previstos en dichos reglamentos.

7 REFERENCIAS

- 1 Aguirre, M. y Sánchez, R. "Pruebas de elementos disipadores de energía sísmica", Revista Construcción y Tecnología", IMCYC, Marzo 1989.
- 2 Alvarado, W. "Análisis inelástico paso a paso de una estructura con amortiguamiento suplementario", Trabajo presentado a la DEPMI de la UNAM como requisito para obtener el grado de maestro en Ing., Febrero 1988.
- 3 Chung, L.L.; Lin, R.C.; Song, T.T. y Reinhorn, A.M. "Experimental Study of Active Control of MDOF Structures Under Seismic Excitations", Informe No. NCEER-88-0025, State University of New York at Buffalo, USA, Julio 1988.
- 4 Fan, F-G. y Ahmadi, G. "Base Isolation of a Multi-Story Building Under a Harmonic Ground Motion - A Comparison of Performances of Various Systems", Informe No. NCEER-88-0010, State University of New York at Buffalo, USA, Mayo 1988.
- 5 Kanaan, A. y Powell, G. "General Purpose Computer Program for Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures", Informe No. UCB/EERC-73/6, EERC, Universidad de California en Berkeley, USA, Abril 1973.
- 6 Rodríguez, E. y Ovando, E. "Determinación experimental de las características dinámicas de una mesa vibradora", Proyecto 8150, Instituto de Ingeniería, UNAM, Febrero 1979.
- 7 Rodríguez, M. y Chávez, J.H. "Comportamiento sísmico de sistemas losa plana-columna", Proyecto 8714, Instituto de Ingeniería, UNAM, Febrero 1989.
- 8 Powell, G. "DRAIN-2D User's Guide", Informe No. UCB/EERC/-73/22 EERC, Universidad de California en Berkeley, USA, Octubre 1973.

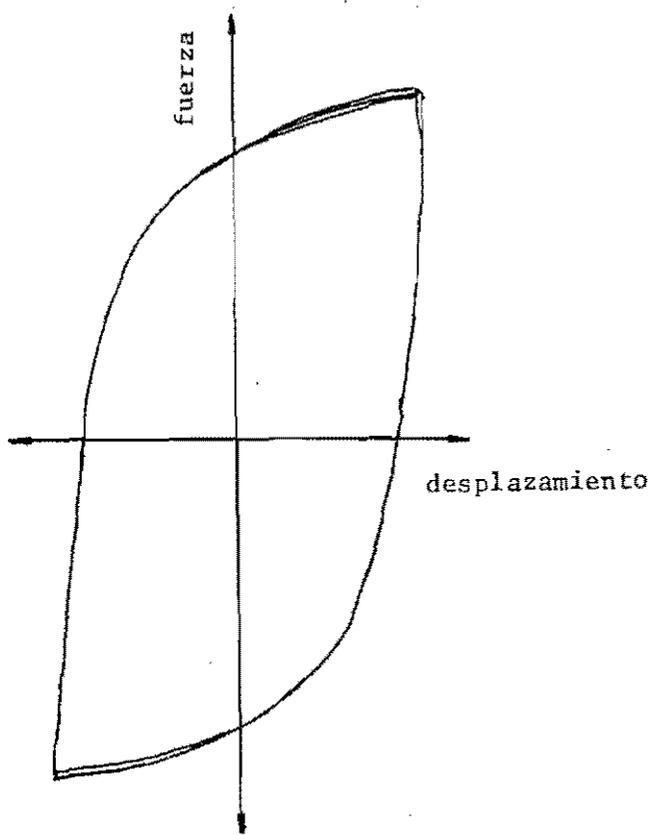


DEPMI

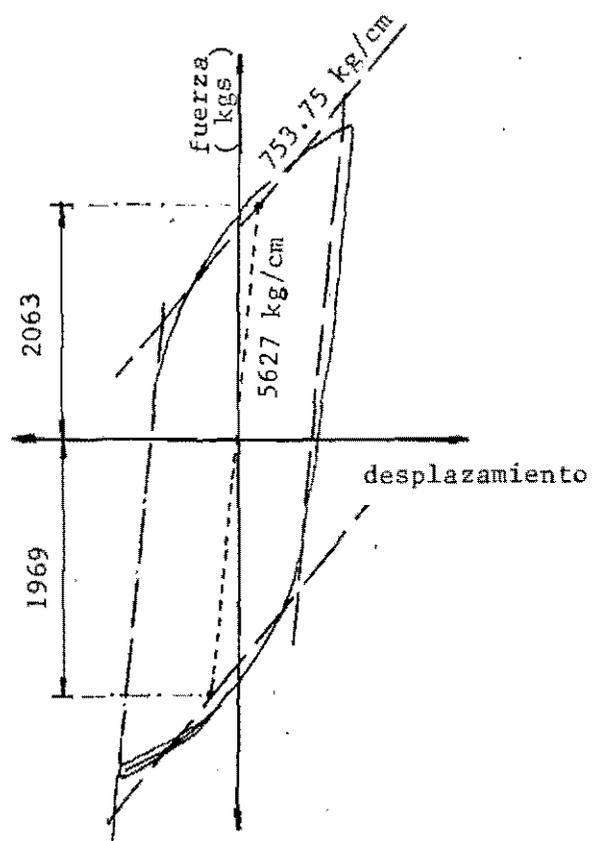


(a) Prototipo

(c) Ciclo histerético experimental a 15 mm de amplitud

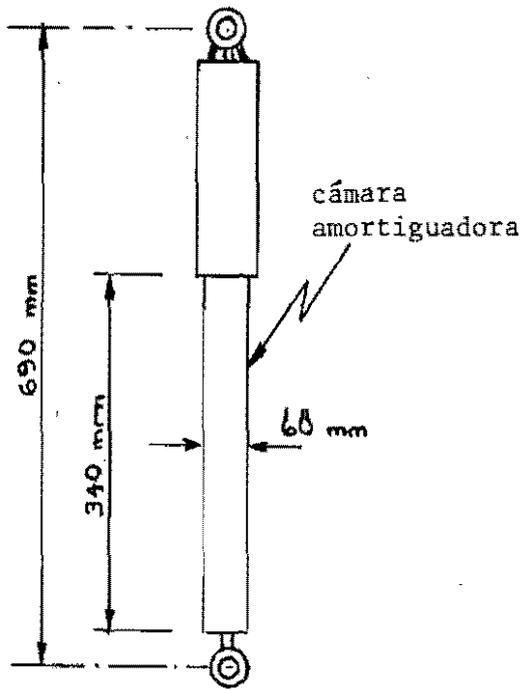


(b) Ciclo histerético experimental a 25 mm de amplitud

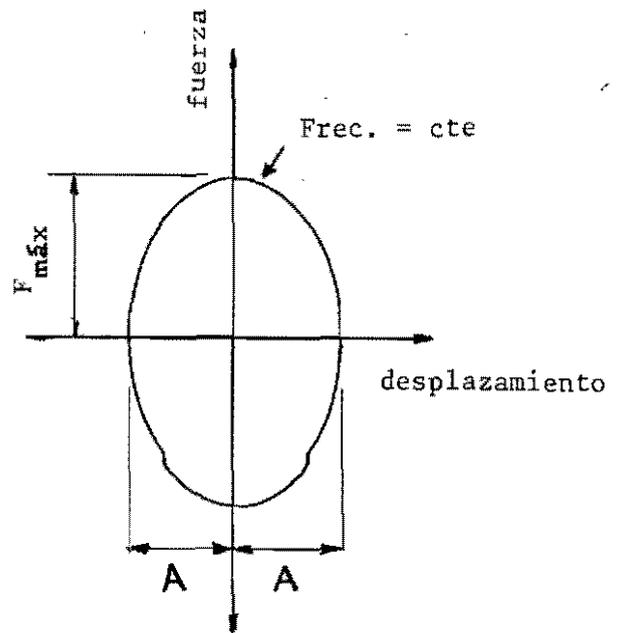


(d) Modelo Bilineal

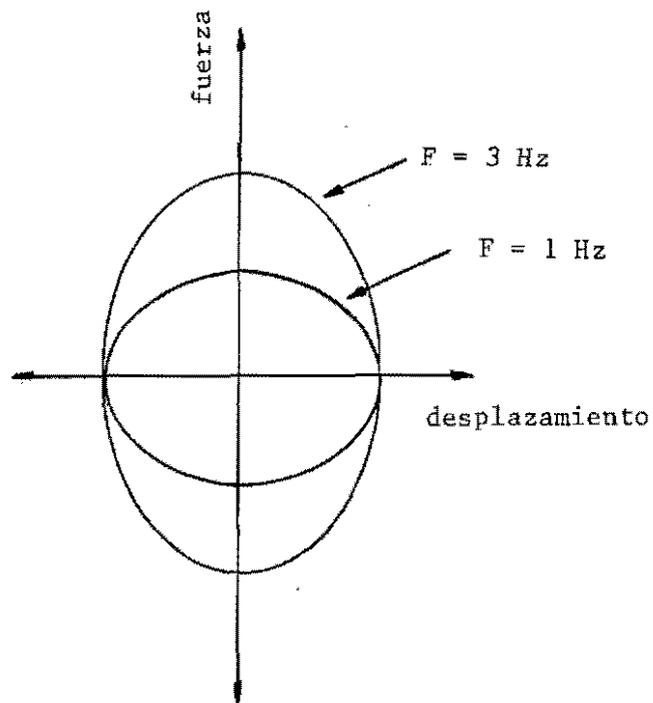
FIGURA 1 PROTOTIPO DE DISIPADOR ELASTO-PLASTICO ENSAYADO EN EL INSTITUTO DE INGENIERIA DE LA UNAM.



(a) Dimensiones

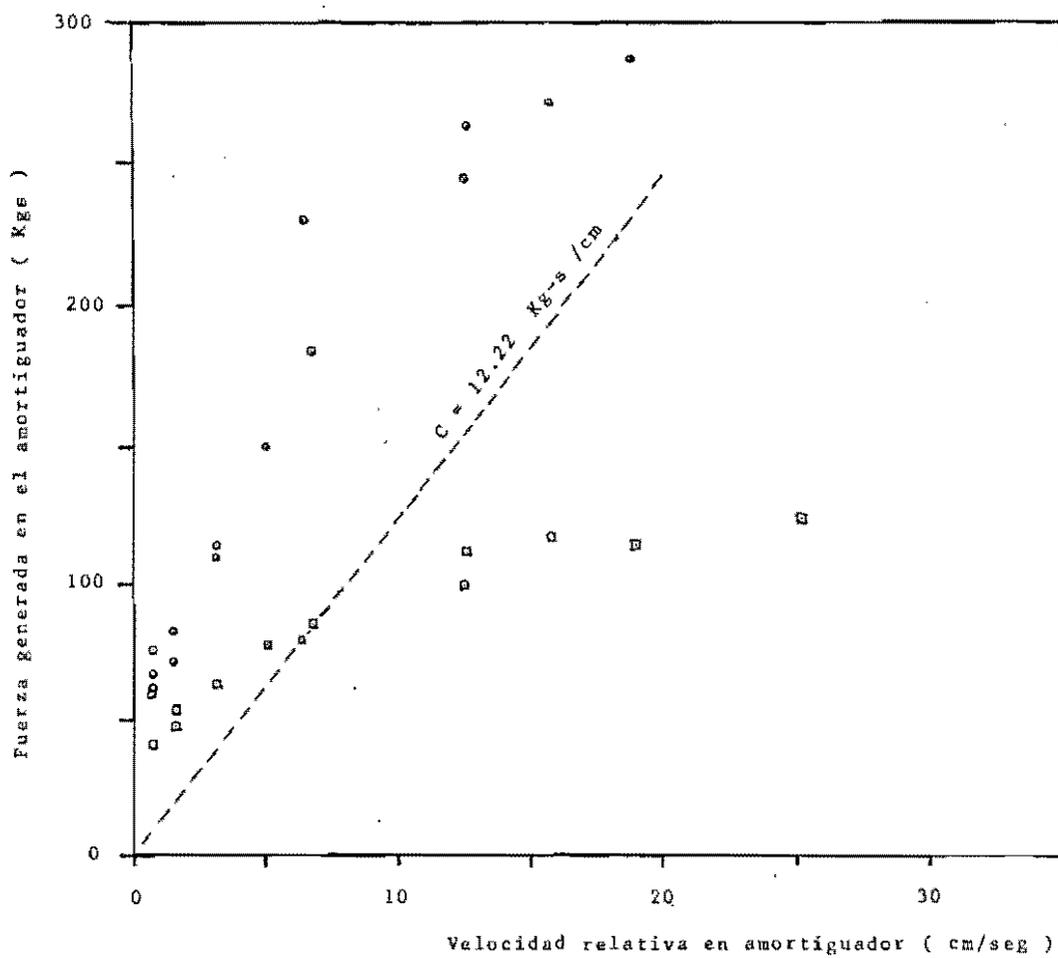


(b)



(c) Ciclo histerético experimental a diferentes frecuencias.

FIGURA 2 AMORTIGUADOR VISCOZO Y CARACTERISTICAS DINAMICAS.



(d) Relación experimental Fuerza-velocidad

FIGURA 2 Continuación

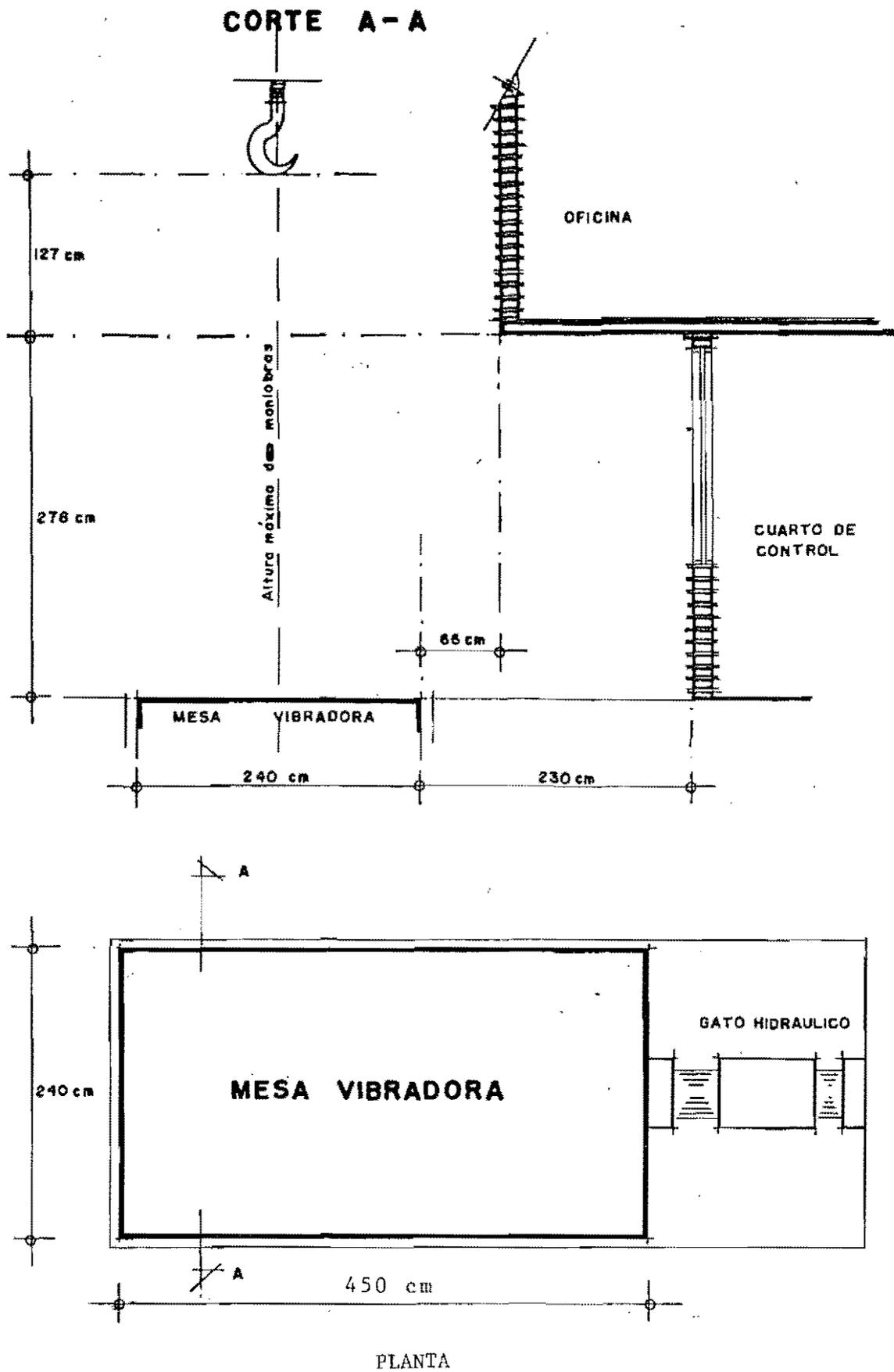


FIGURA 3 DIMENSIONES DEL AREA DE PRUEBA EN LA MESA
VIBRADORA DEL INSTITUTO DE INGENIERIA

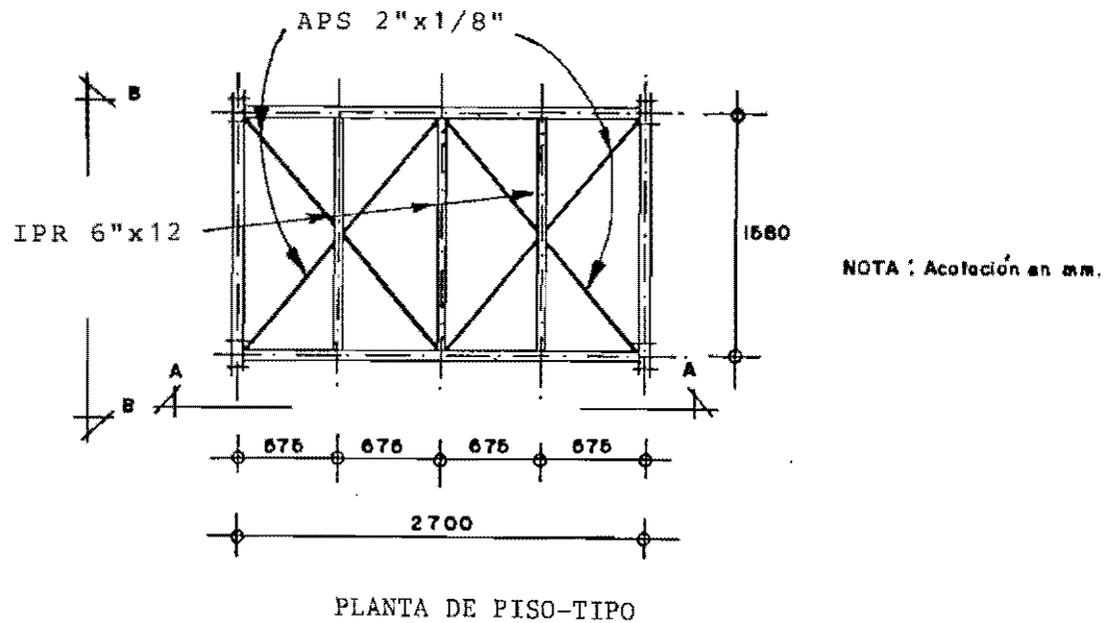
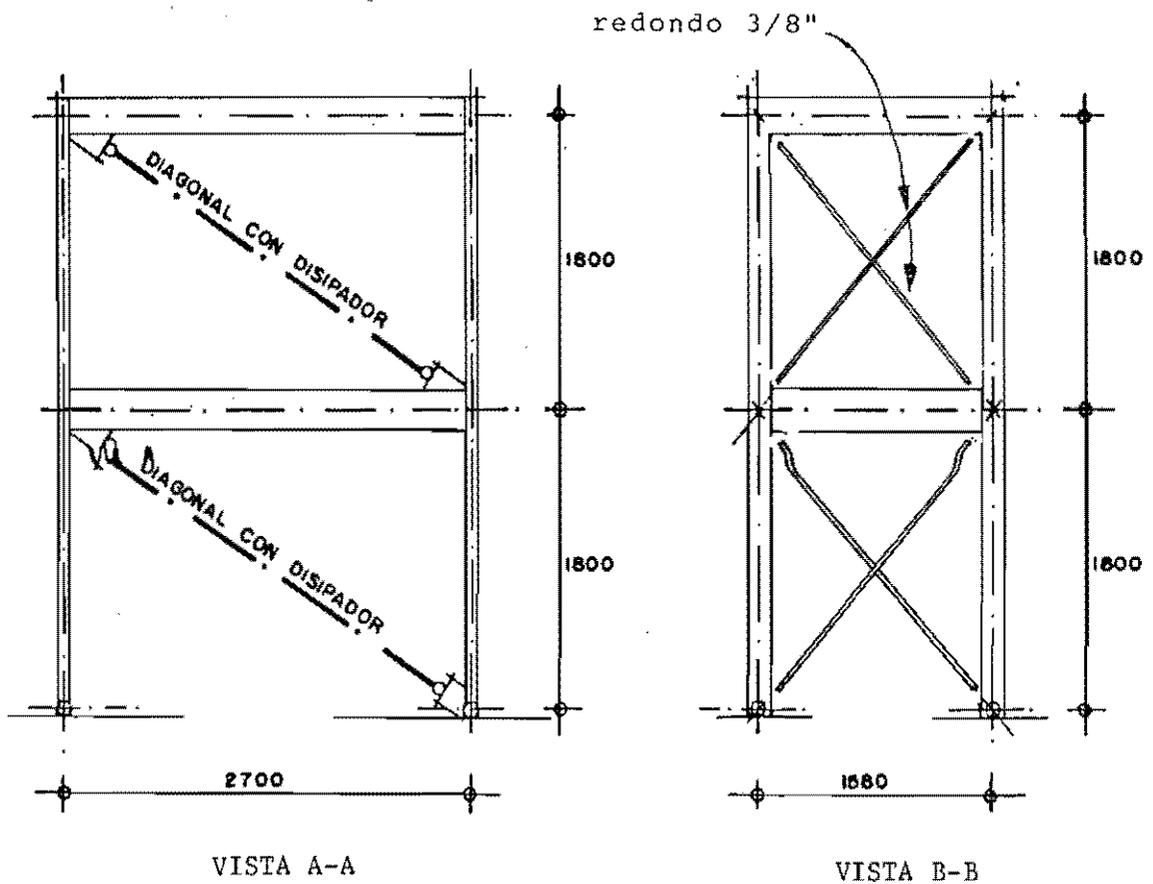
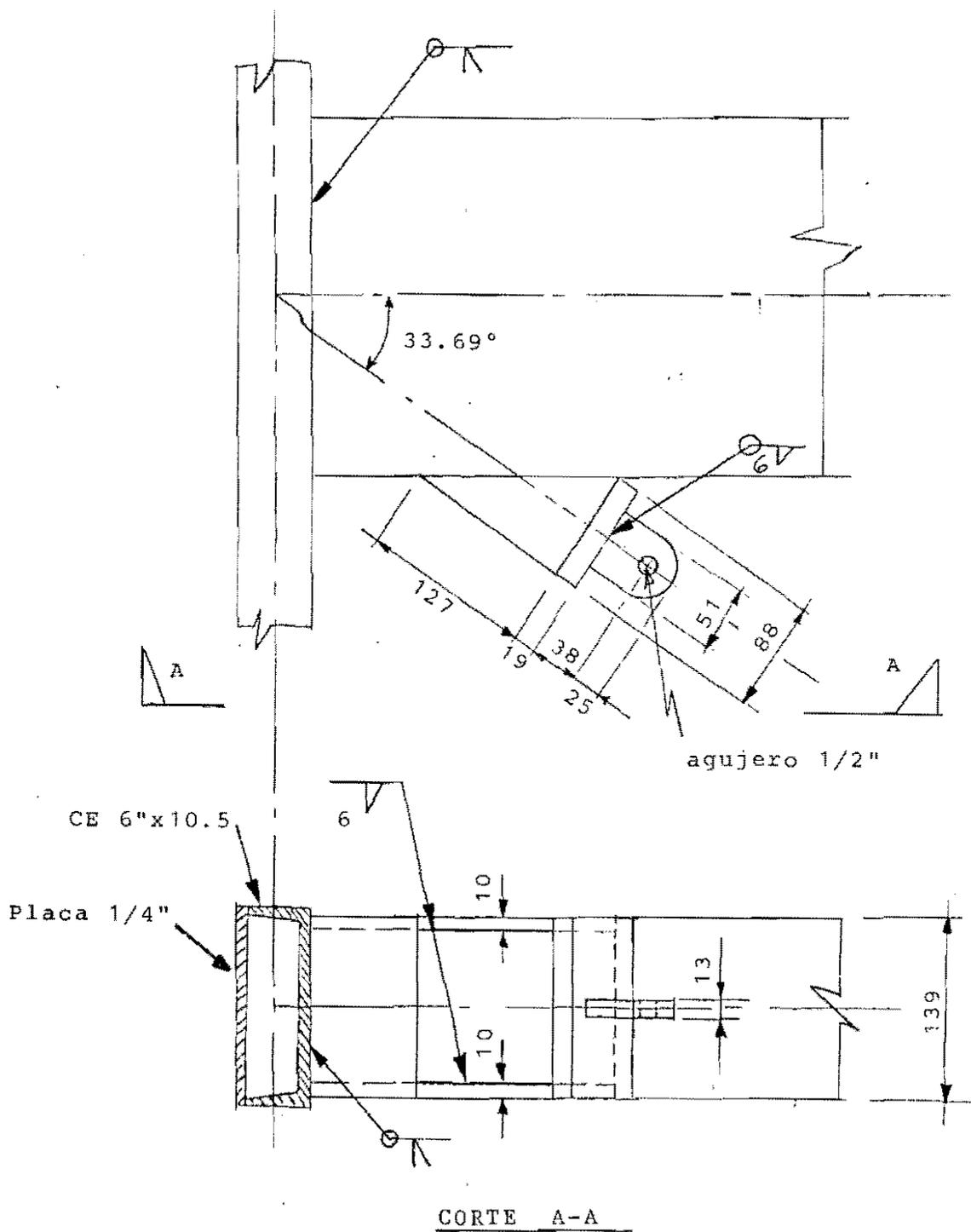


FIGURA 4 DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA FINAL



Detalle de union viga longitudinal-columna-diagonal

FIGURA 4 Continuacion.

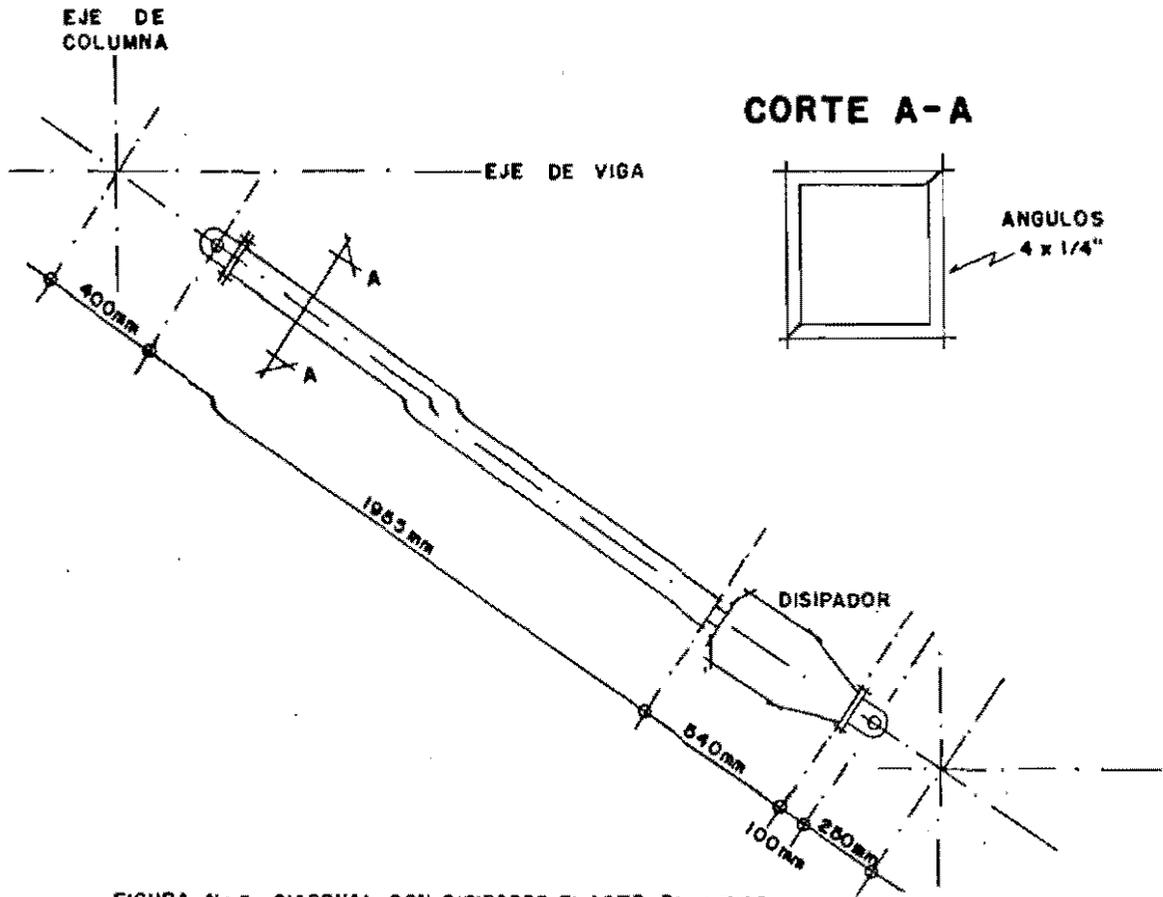


FIGURA No 5 DIAGONAL CON DISIPADOR ELASTO-PLASTICO

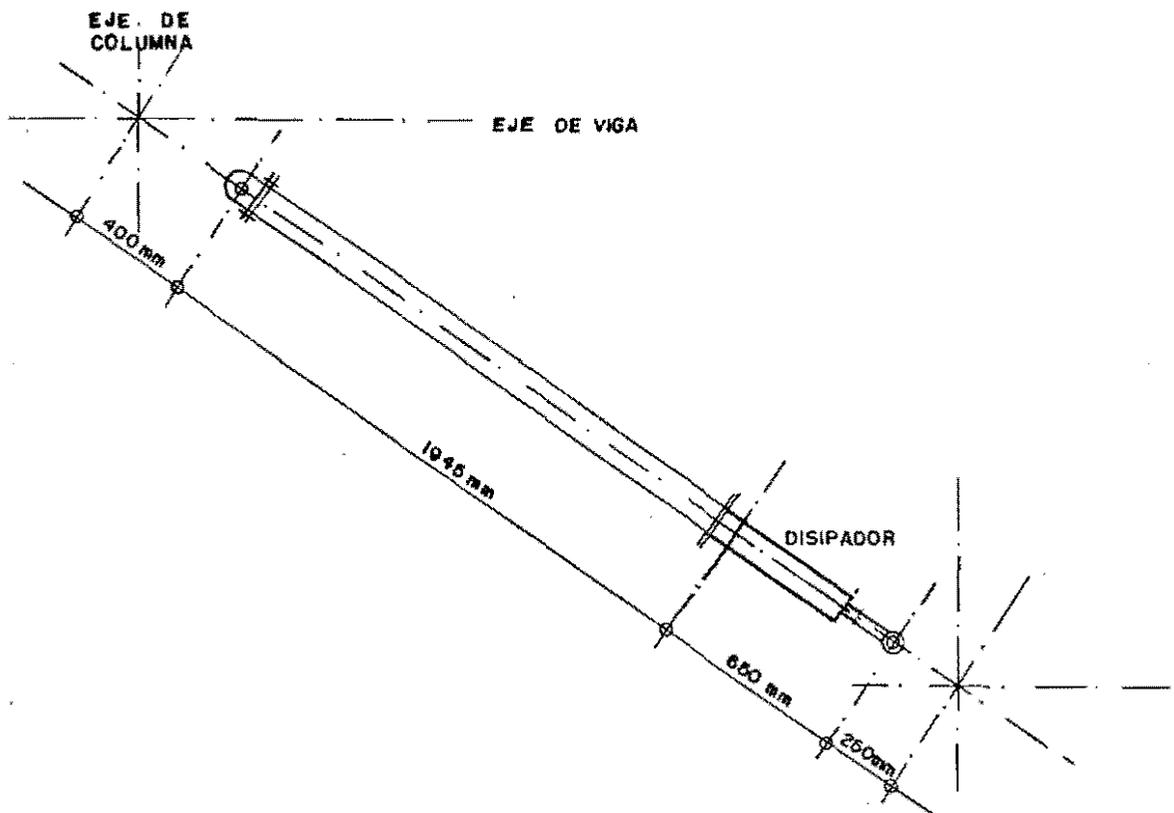
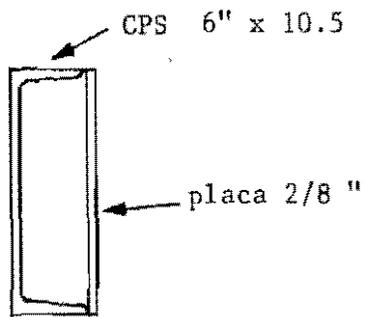
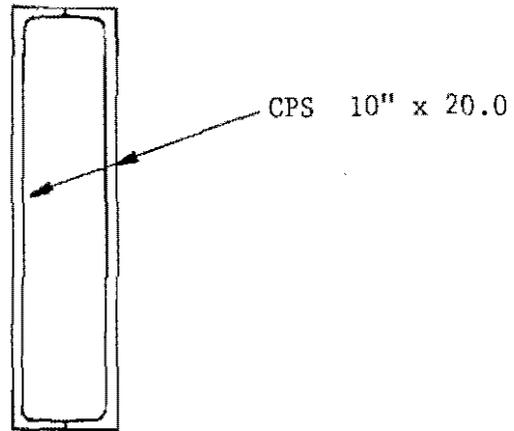


FIGURA No 6 DIAGONAL CON DISIPADOR VISCOSO



sección transversal
de columnas



sección transversal
de vigas de marcos longitudinales

FIGURA 7 SECCIONES TRANSVERSALES DE COLUMNAS Y VIGAS

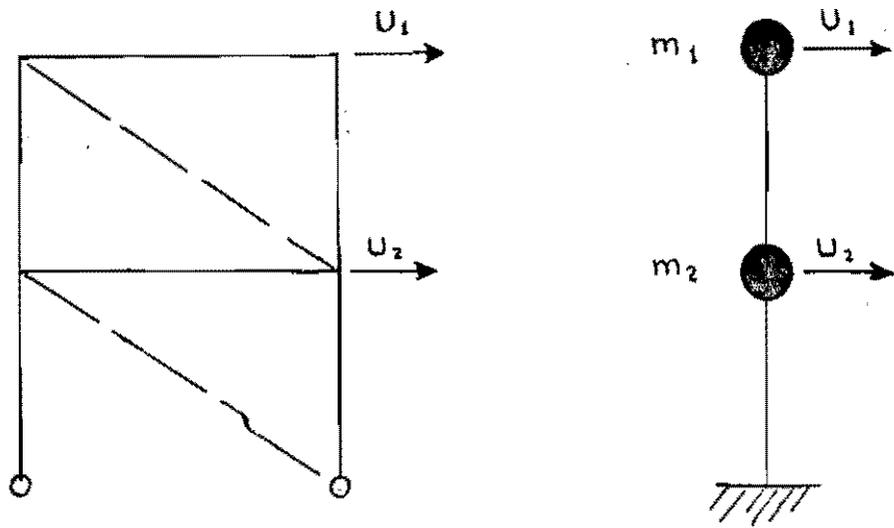


FIGURA 8 IDEALIZACION DE LA ESTRUCTURA PARA ANALISIS ANTE CARGAS LATERALES

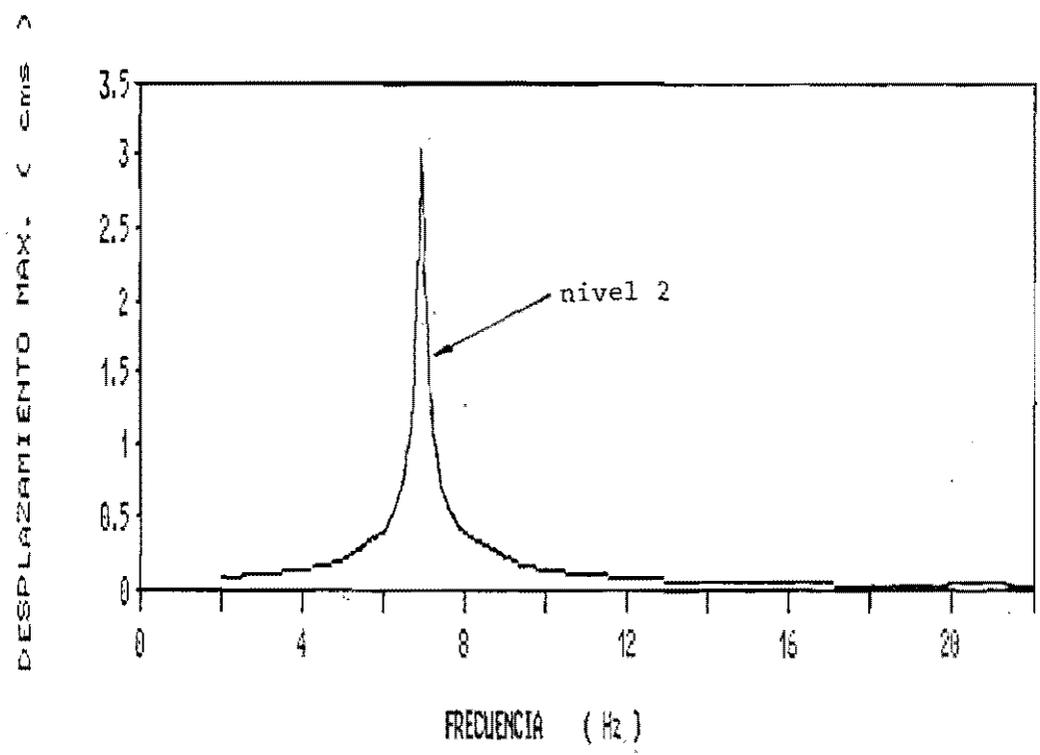


FIGURA 9 RESPUESTAS MAXIMAS PARA LAS FRECUENCIAS DE INTERES

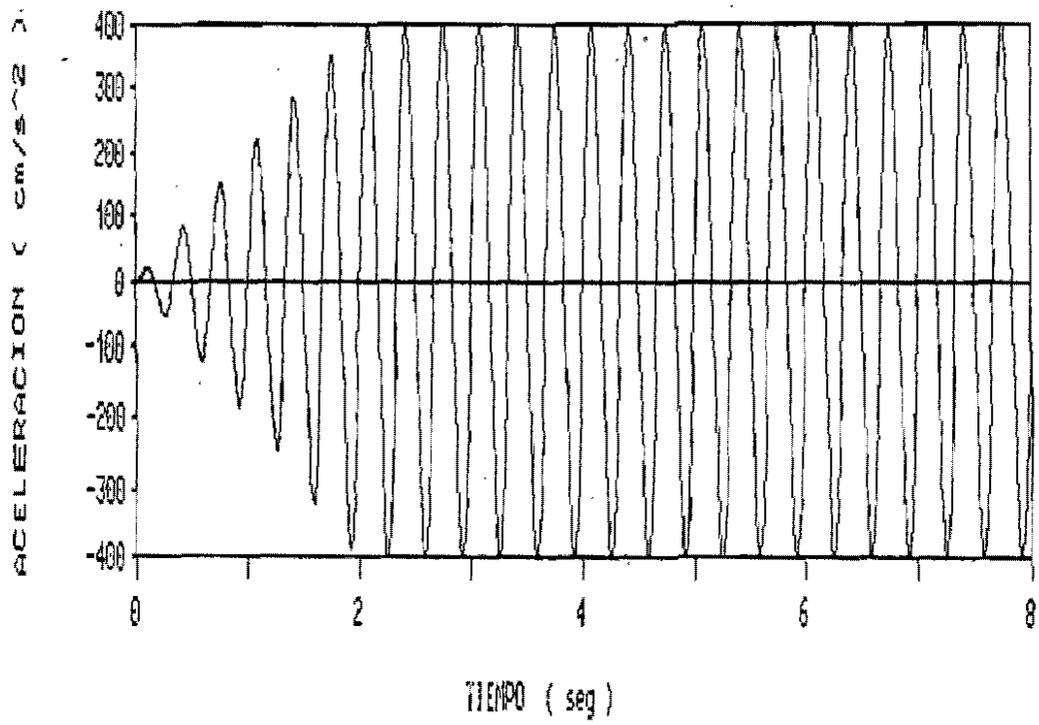


FIGURA 10 HISTORIA DE ACELERACIONES EN LA BASE
(para análisis con disipadores)

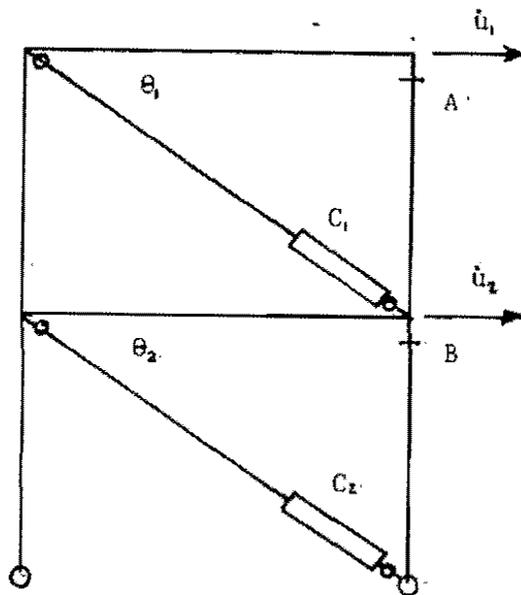
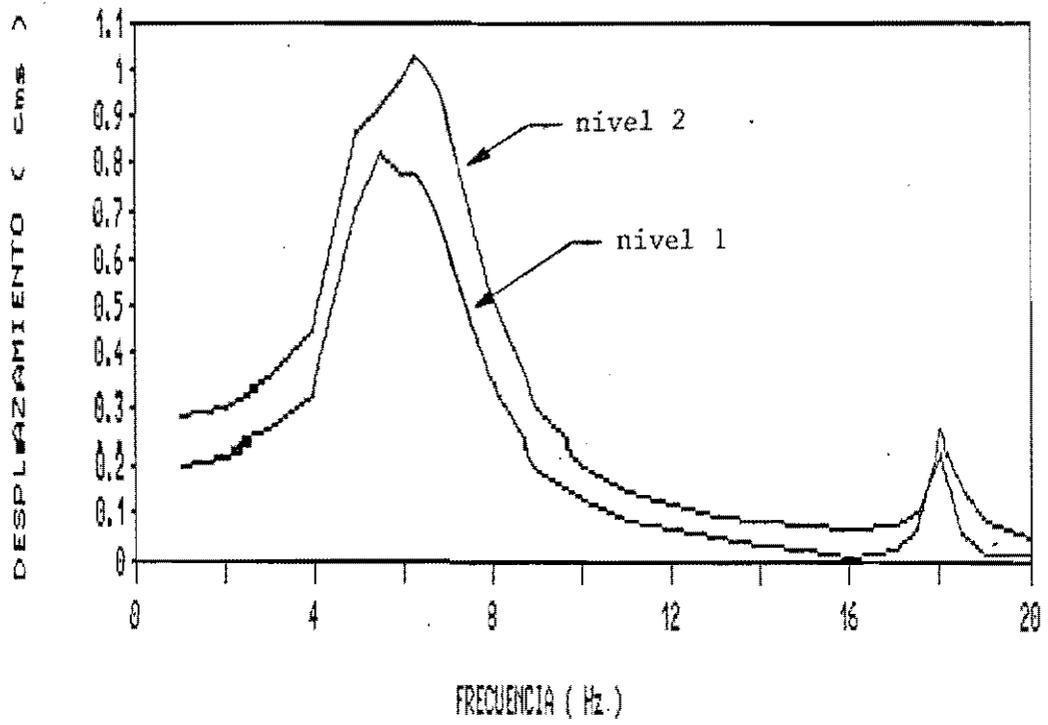
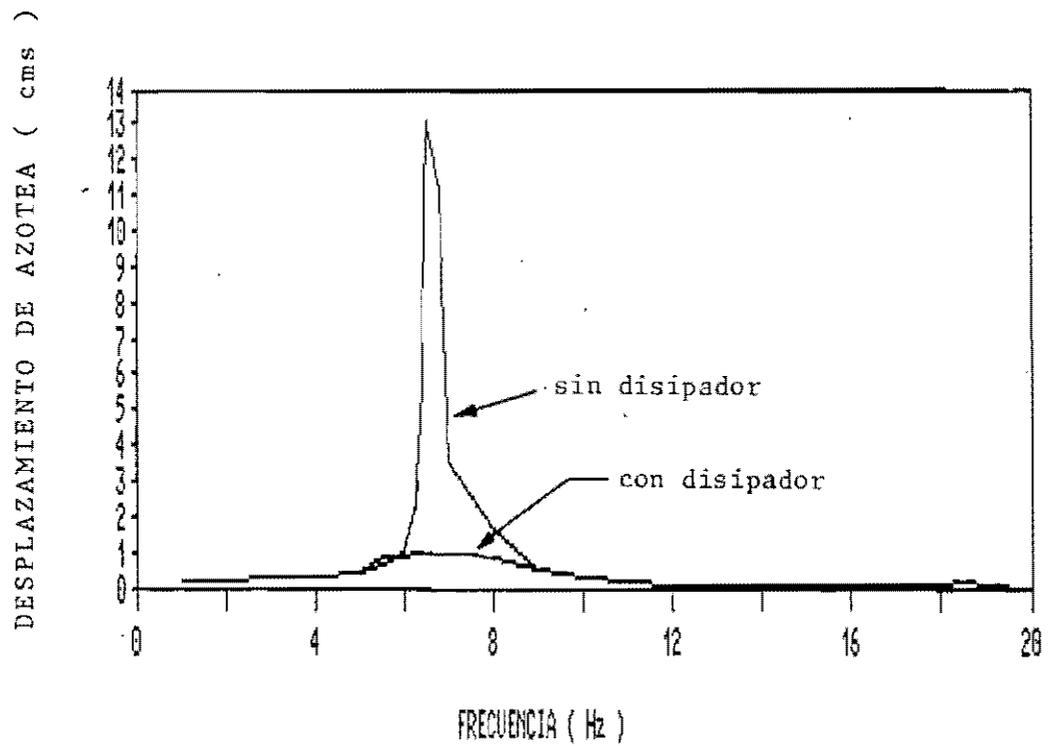


FIGURA 11 IDEALIZACION DE AMORTIGUADORES VISCOSOS

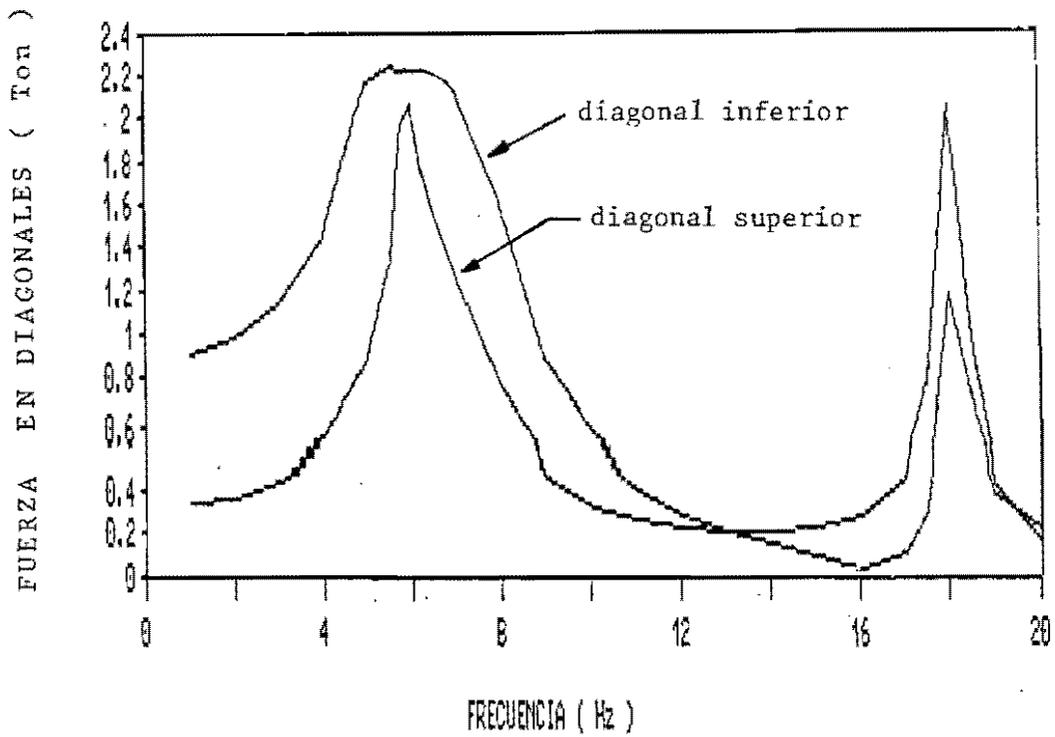


(a) Con disipadores de energía

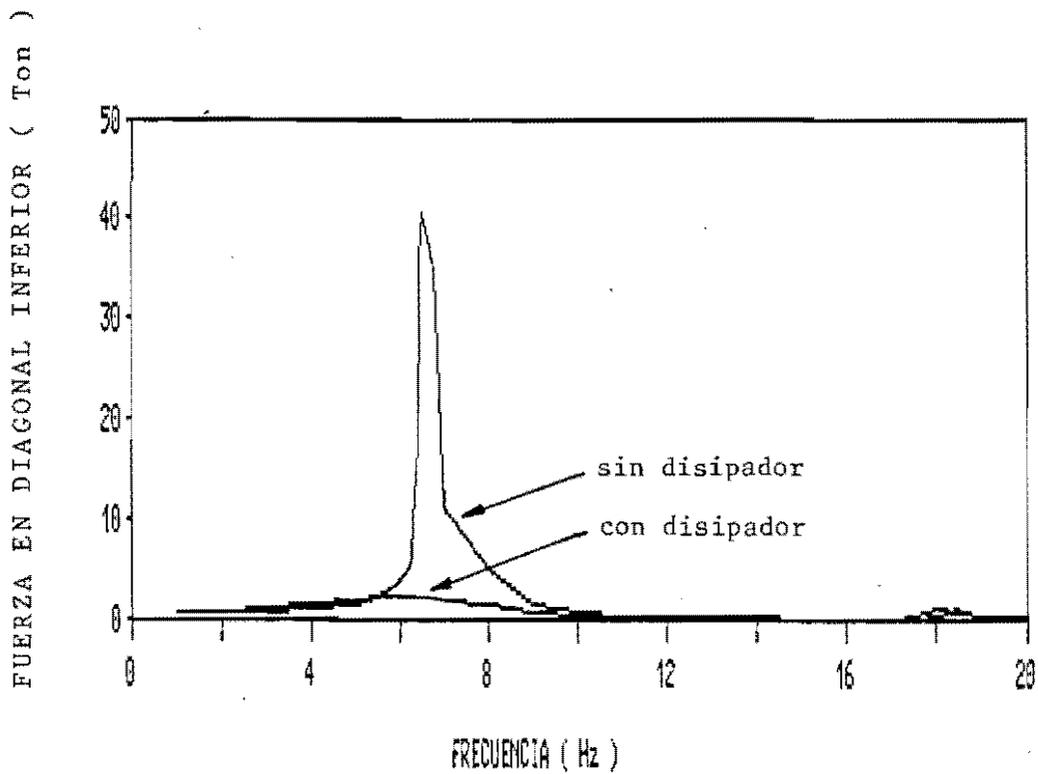


(b) Comparación con y sin disipadores

FIGURA 12 DESPLAZAMIENTO RELATIVO A LA BASE DE PISOS.

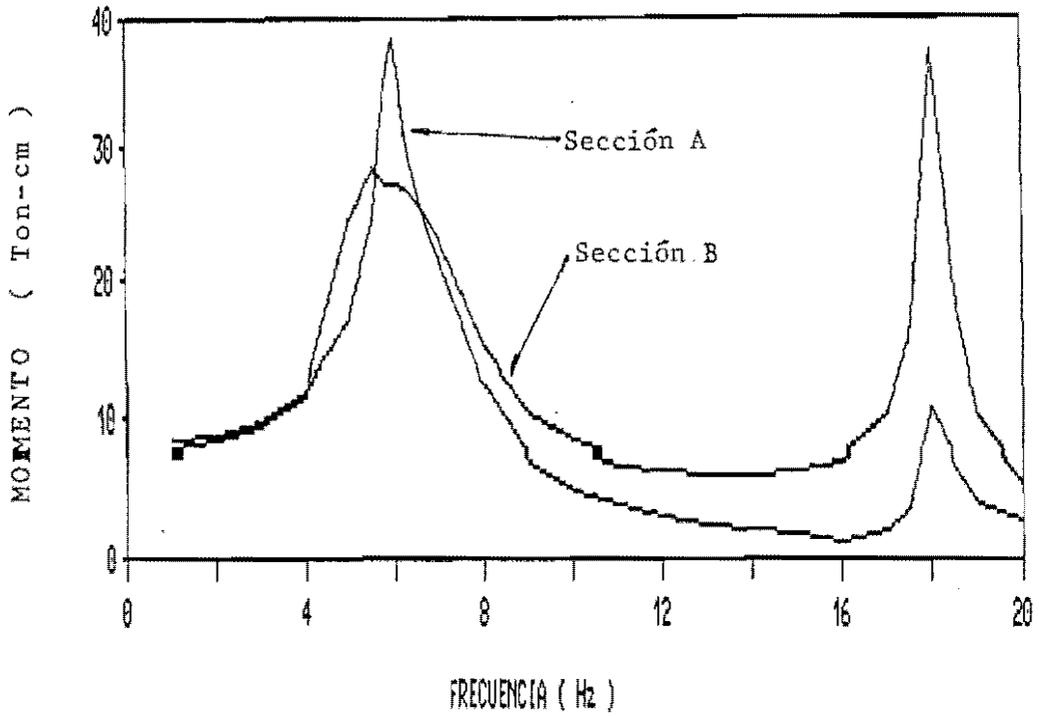


(a) Con disipadores de energía

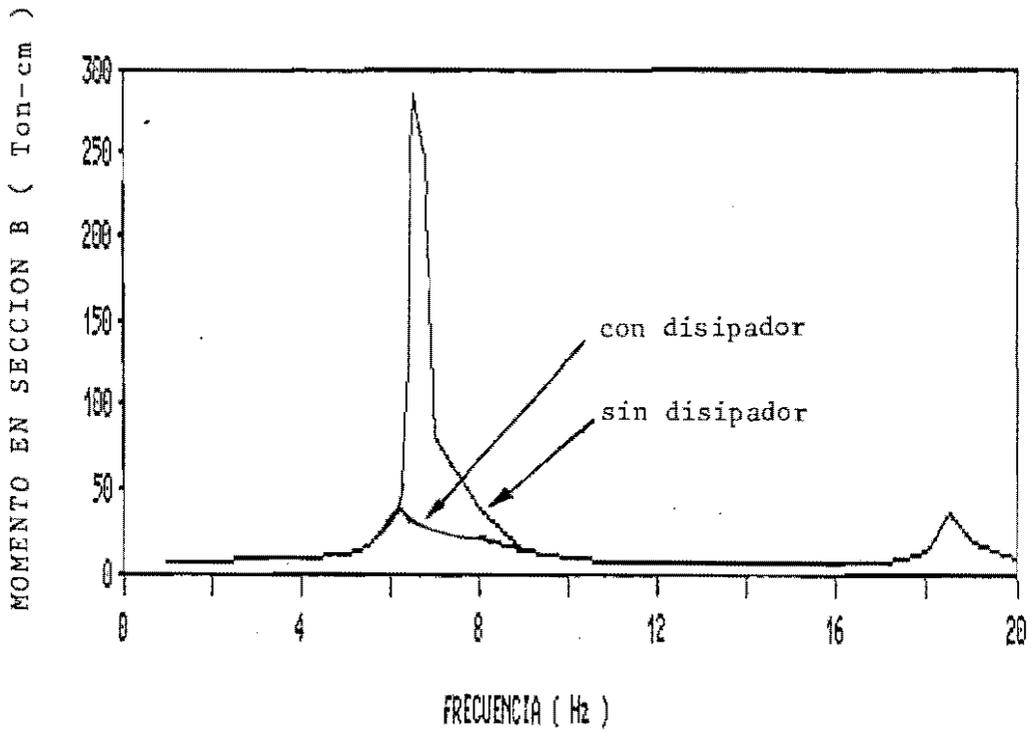


(b) Comparación con y sin disipadores

FIGURA 13 FUERZAS AXIALES EN DIAGONALES

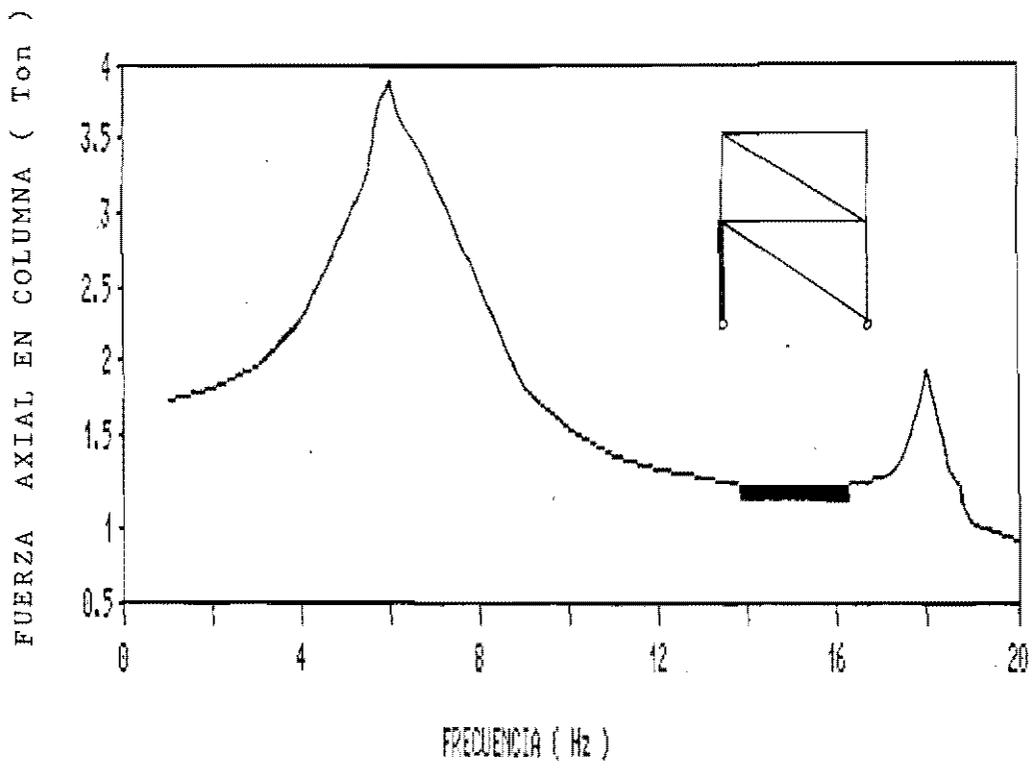


(a) Con disipadores de energía

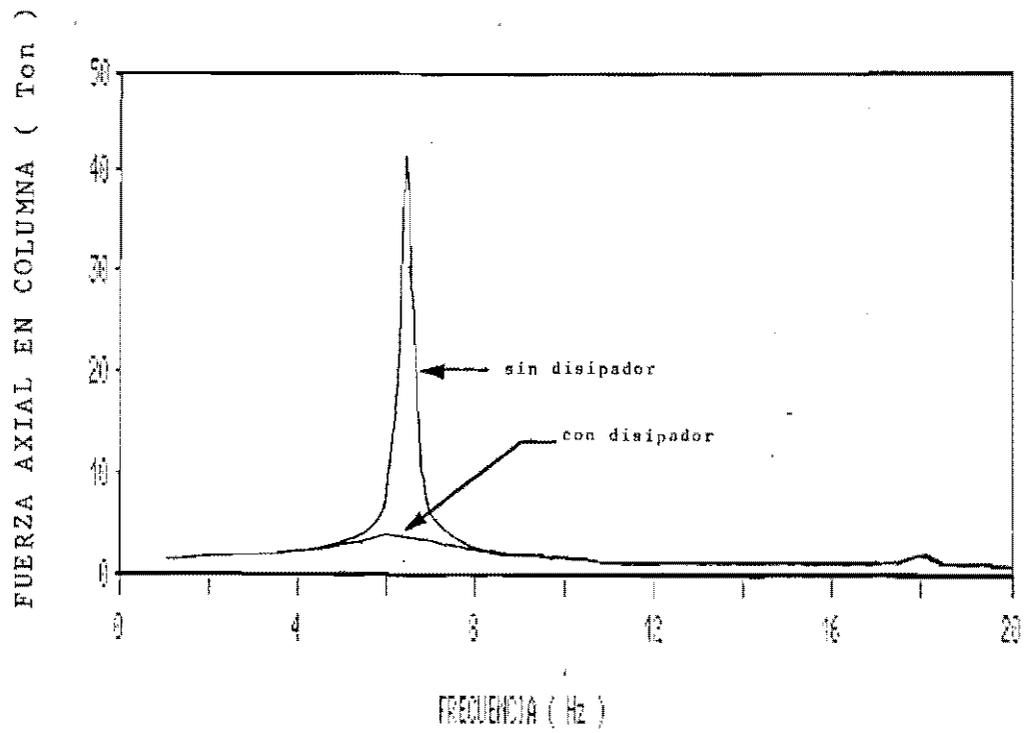


(b) Comparación con y sin disipadores

FIGURA 14 MOMENTOS FLEXIONANTES EN COLUMNAS

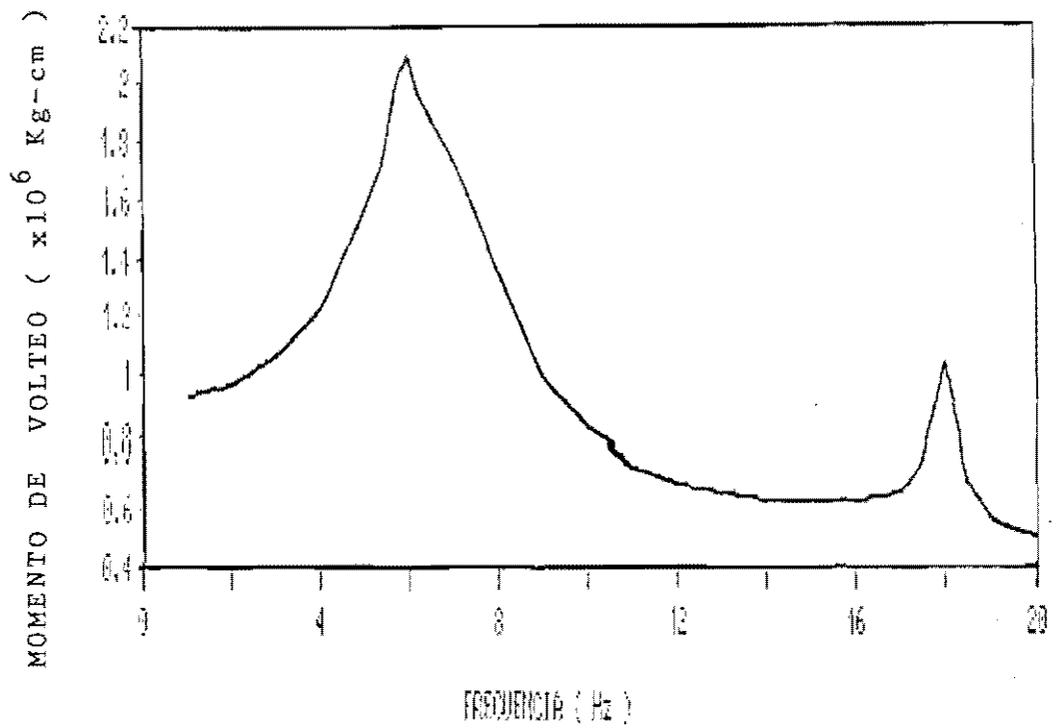


(a) Con disipadores de energía

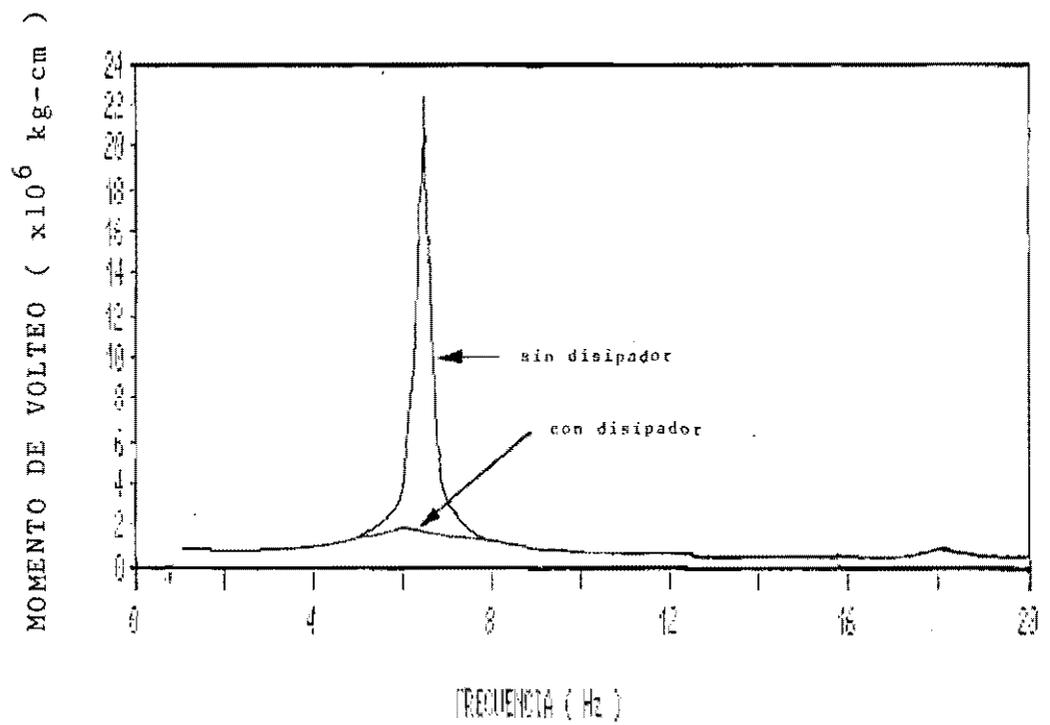


(b) Comparación con y sin disipadores

FIGURA 15 FUERZA AXIAL EN COLUMNA INFERIOR IZQUIERDA.

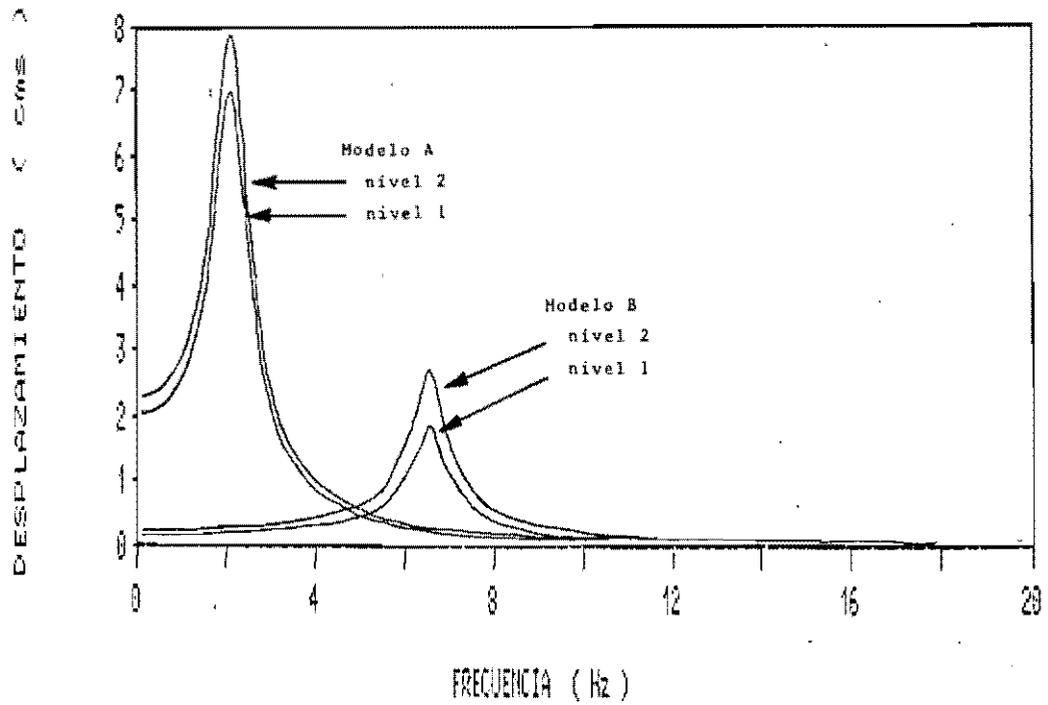


(a) Con disipadores de energía

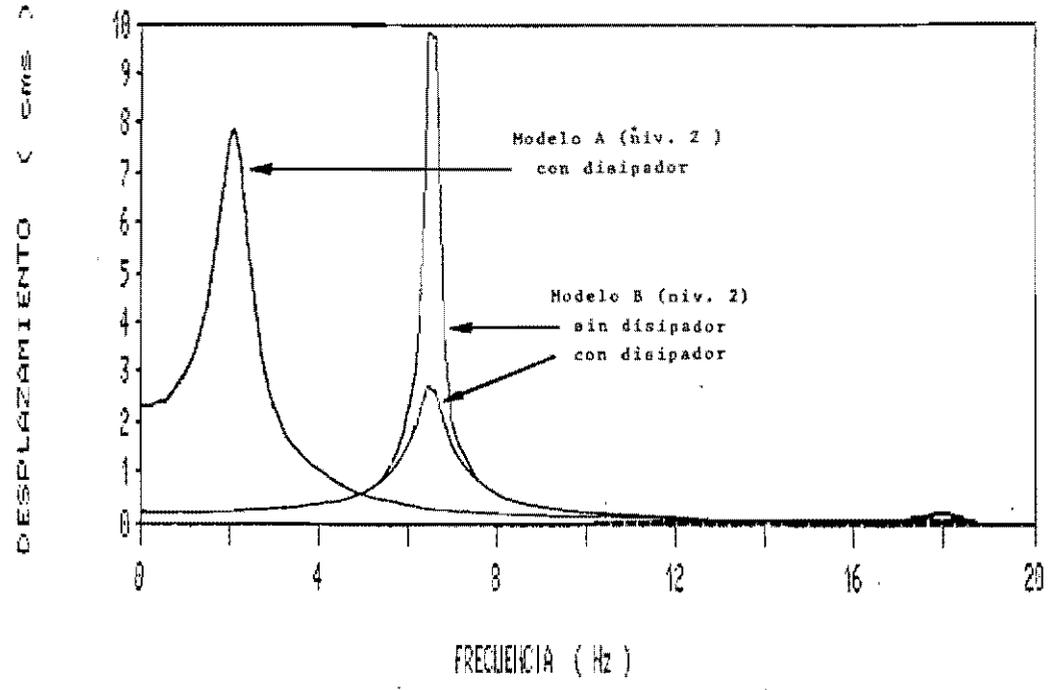


(b) Comparación con y sin disipadores

FIGURA 16 MOMENTO DE VOLTEO EN LA BASE

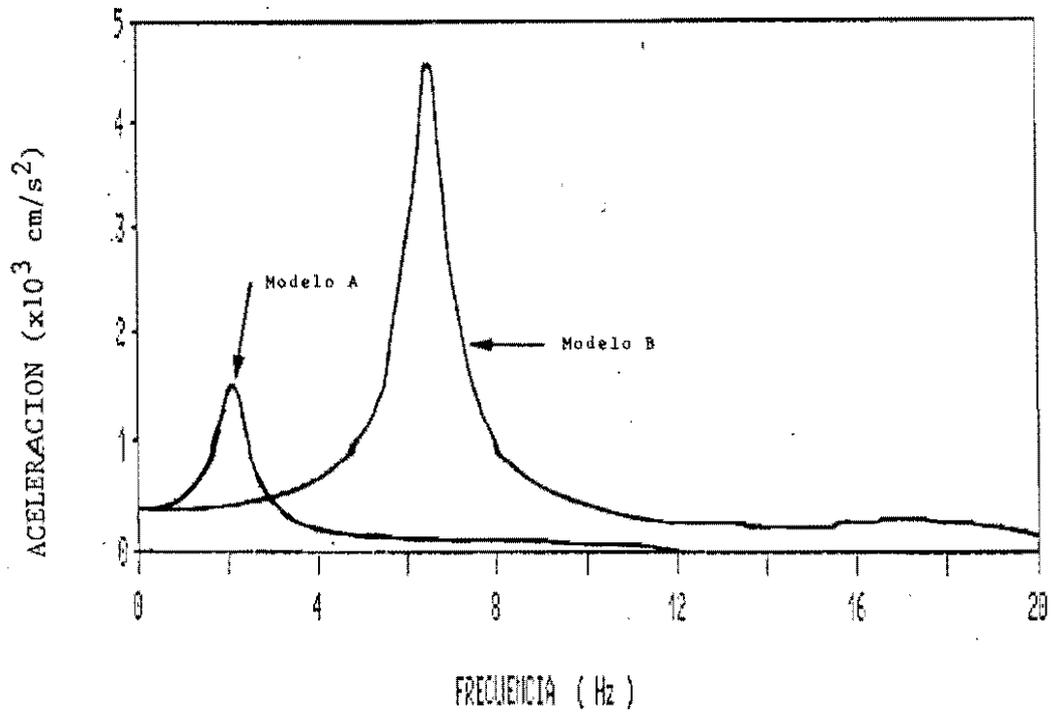


(a) Con disipadores de energía

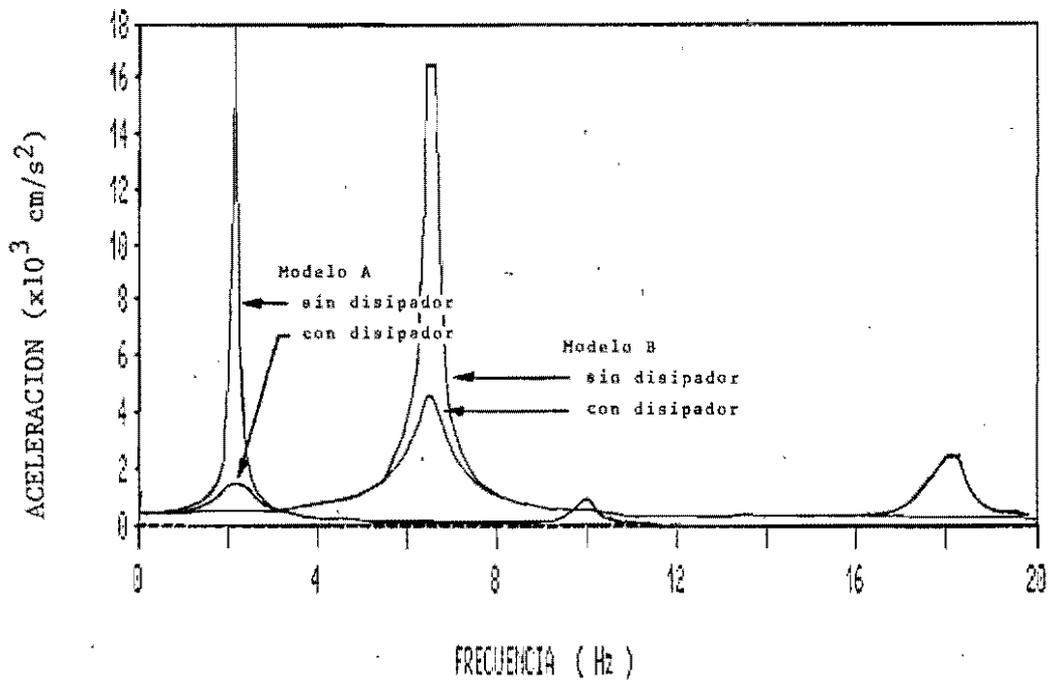


(b) Comparación con y sin disipadores

FIGURA 17 DESPLAZAMIENTO RELATIVO A LA BASE

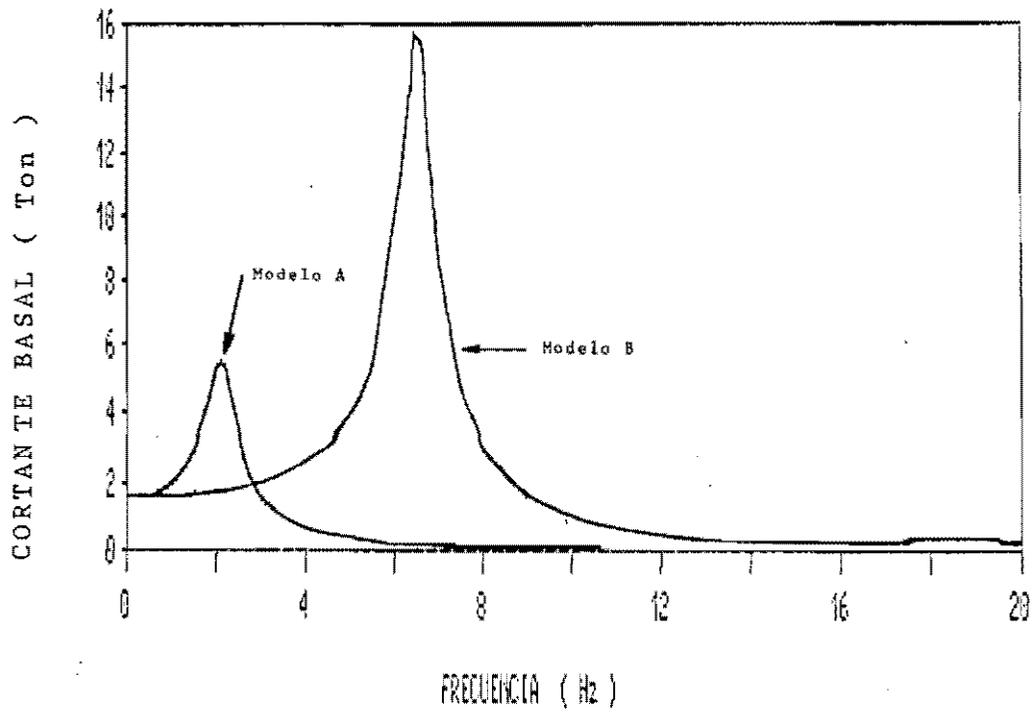


(a) Con disipadores de energía

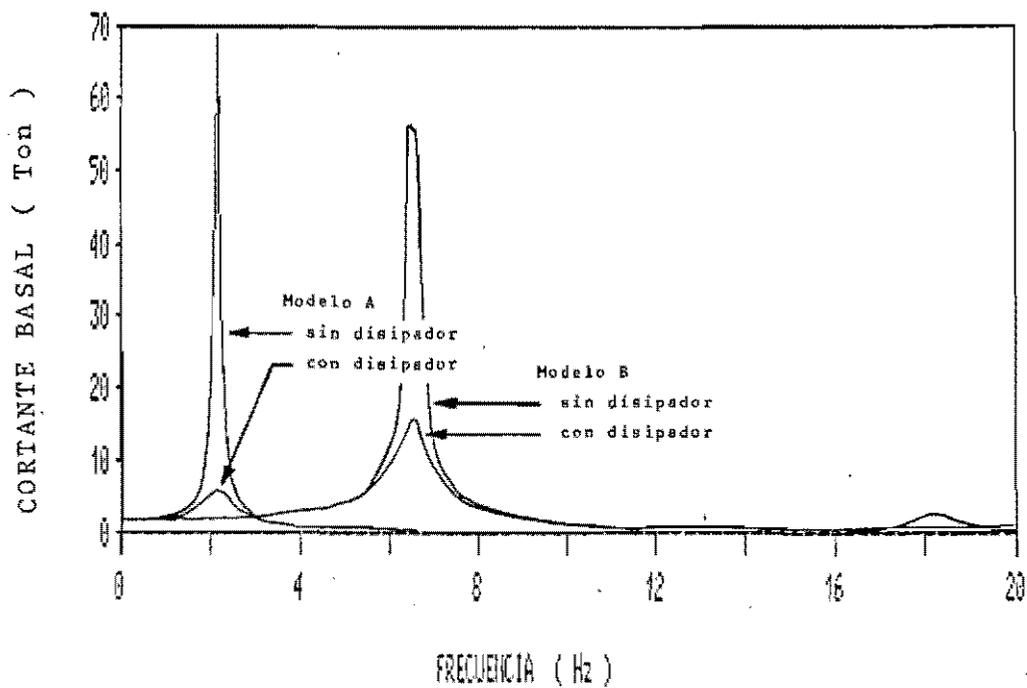


(b) Comparación con y sin disipadores

FIGURA 18 ACELERACION ABSOLUTA DE AZOTEA



(a) Con disipadores de energía



(b) Comparación con y sin disipadores

FIGURA 19 CORTANTE BASAL