

RESPUESTA DE ESTRUCTURAS PROVISTAS DE DISPOSITIVOS EXTERNOS  
DE DISIPACION DE ENERGIA TIPO SOLERA



Ricardo González Alcorta\*

Resumen

Se presentan los resultados preliminares del ensaye en mesa vibradora de una estructura metálica de dos niveles sujeta a cargas armónicas, provista de un sistema de disipación de energía a base de soleras de acero colocadas en diagonales de refuerzo. Se compara la respuesta sísmica de un modelo analítico de diez niveles usando este tipo de disipadores con respecto a la de otras cinco estructuraciones: 1) estructura esquelética, 2) estructura con diagonales sin sistema externo de disipación de energía, 3) estructura con aisladores en la base, 4) estructura con disipadores tipo fricción y, 5) estructura con aisladores en la base y disipadores tipo fricción. Los resultados analíticos del prototipo en mesa vibradora muestran una disminución importante en desplazamientos y elementos mecánicos al incluirse los disipadores de energía, mientras que en el modelo de diez niveles esta disminución es menos significativa.

---

\* Instituto de Ingeniería, UNAM

## Introducción

En un sismo de alta intensidad, el grado de daño en edificios depende de la manera en que estos disipan los altos niveles de energía cinética a los cuales están sujetos. Como la mayoría de los códigos de diseño reconocen, sería demasiado costoso disipar esta energía dentro de la capacidad elástica de los materiales. Es por esto 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 la forman. Gracias a esta ductilidad el edificio puede disipar energía cinética durante sus deformaciones inelásticas.

Investigaciones recientes han demostrado la conveniencia de suministrar a los edificios dispositivos externos de disipación que produzcan reducciones apreciables en su respuesta dinámica, sin tener que depender de la ductilidad que pueda desarrollarse en la estructura, lo que abatiría la posibilidad de daño severo en la misma. Estos dispositivos basan su disipación de energía en el comportamiento histerético de sus partes componentes y se ubican estratégicamente en diferentes puntos de la estructura. Una gran variedad de mecanismos han sido creados bajo este concepto, destacándose aquellos basados en la fricción (1) y en la deformación plástica de los metales (2).

Los mecanismos de fricción basan su funcionamiento en una especie de balata de freno insertada entre placas de acero sometidas a una presión transversal, y ya han sido empleados en diferentes experimentos con resultados muy satisfactorios (3).

Los mecanismos basados en la plastificación de placas pueden comprender cualquiera de los siguientes cuatro tipos de

deformación: flexión (4), compresión (5), tensión (6) y torsión (7). A principios de los años setenta un tipo especial de placa en flexión en forma de U fue analizado (8), en donde la localización de la fluencia se mueve a lo largo del elemento. Recientemente se han realizado estudios en México relacionados con este tipo de mecanismo disipador (9), de los que se concluye que el comportamiento histerético de estas placas es muy estable, sin pérdida apreciable de rigidez y resistencia.

En este trabajo se presentan los resultados preliminares obtenidos del comportamiento de estas placas al utilizarse como sistemas de disipación de energía de un modelo experimental en pruebas en mesa vibradora y en modelos matemáticos de edificios. Asimismo, se presentan las principales características del mecanismo de disipación utilizado así como las características dinámicas de la mesa vibradora usada en el experimento.

En la parte final de este escrito se presenta un estudio analítico de una estructura de 10 niveles provista de este tipo de disipadores de energía, comparándose la respuesta sísmica de esta con la de cinco tipos de estructuraciones diferentes: 1) estructura esquelética, 2) estructura con diagonales sin sistema externo de disipación de energía, 3) estructura con aisladores en la base, 4) estructura con disipadores de fricción y 5) estructura con aisladores en la base y disipadores tipo fricción, situadas en la zona de alta compresibilidad de la ciudad de México y considerando los efectos de la interacción suelo - estructura.

#### CARACTERISTICAS DEL SISTEMA DISIPADOR

A mediados de los años setenta se inició en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) un proyecto enfocado a desarrollar

dispositivos controladores de hundimientos en edificios, con el fin de ofrecer una alternativa ventajosa en comparación con el sistema de pilotes de control tradicionales. Los dispositivos desarrollados tienen como componentes básicos elementos disipadores en forma de U, elaborados con solera de acero estructural. Este tipo de configuración opera bajo el concepto denominado "rolado por flexión" y disipa energía al desplazarse a la manera de las orugas de un tractor.

A raíz de los sismos de 1985 se despertó el interés de usar este tipo de dispositivos de manera más amplia, no sólo como controladores de hundimientos, sino como mecanismos de disipación de energía colocados en la superestructura de edificios. Recientemente se han realizado estudios enfocados al análisis del comportamiento de tales elementos bajo acciones de carga cíclica (19), cuyos resultados se mencionan a continuación.

Los elementos disipadores de energía que fueron sometidos a las pruebas presentan una configuración como la mostrada en la figura N° 1. Su sección es de 1.3 por 3.8 cm.

La figura N° 2 muestra un marco de carga para probar los disipadores de energía en forma de U. Dicho marco consta de un miembro estructural central conectado a una celda de carga que a su vez está unida a la viga transversal de la máquina.

Para probar un conjunto de elementos U, el procedimiento consiste en montarlo en el marco de carga e iniciar la prueba cíclica, donde se aplica un desplazamiento controlado con un movimiento de tipo armónico. La prueba finaliza cuando uno de los elementos sufre rotura parcial o total.

En la figura N° 3 se presenta una gráfica que relaciona la

amplitud de deformación del elemento con el número de ciclos a la falla por fatiga del material. En esta figura se aprecia que el número de ciclos para alcanzar la falla a un desplazamiento de 1 cm crece notablemente hasta alcanzar un valor aproximado de 1000.

En la figura 4 se muestra la evolución del ciclo histerético del sistema compuesto por dos soleras en forma de U al someterse a diferentes amplitudes de desplazamiento, observándose que a partir de los 0.5 cm, que en lo sucesivo se define como deformación de cedencia, se empieza a disipar energía apreciablemente. Este comportamiento fue el que despertó el interés para su posible uso en edificios.

#### MODELO EXPERIMENTAL ESTRUCTURA METALICA DE 2 NIVELES

##### Características de la mesa vibradora

La mesa vibradora con que cuenta el IIUNAM consiste en una losa nervada de concreto de 40 cm de espesor y de 4.5 por 2.4 m de dimensiones en planta. Esta plataforma se apoya sobre dos trabes longitudinales de 1.3 m de peralte. La mesa pesa aproximadamente 15 ton y tiene capacidad para soportar modelos de hasta 15 ton. Todo el conjunto descansa sobre cuatro columnas de acero de sección tubular, que a su vez se apoyan sobre la losa de cimentación, como se muestra en la figura N° 5.

El sistema que se usa para excitar y controlar el movimiento de la mesa consiste en un equipo electromecánico de circuito cerrado capaz de generar movimiento senoidal o aleatorio en dirección horizontal. El desplazamiento máximo del actuador es de  $\pm 2.5$  cm

La frecuencia fundamental de la mesa sin ningún tipo de lastre es de 30 Hz aproximadamente, y cuando soporta un lastre de 15 toneladas esta frecuencia toma un valor cercano a los 20 Hz (11).

#### Diseño de prototipo

Las instalaciones físicas para hacer la prueba experimental y las características de la mesa vibradora impusieron una serie de restricciones sobre las dimensiones, peso y frecuencias naturales que debería poseer el prototipo. Esta última limitación es importante ya que se ha comprobado que la mesa vibradora introduce distorsiones en las señales excitadoras de la base que se envían al sistema controlador (12). Esta distorsión se asocia al hecho de que la frecuencia fundamental del sistema mesa vibradora-actuador presenta valores de alrededor de 20 Hz, lo que ocasiona una amplificación en la respuesta y que se establezca un intervalo de operación confiable del sistema entre 1 y 15 Hz. El límite inferior está definido por el hecho de que la mesa no puede alcanzar aceleraciones mayores de 1 g para frecuencias menores de 1 Hz, además de que para esta frecuencia la distorsión de la señal excitadora empieza a ser muy importante.

Un criterio básico para el diseño de la estructura fue que esta tuviera una flexibilidad lo suficientemente alta para garantizar la disipación de energía del dispositivo, sin presentar cedencia en columnas o vigas.

Se diseñó una estructura formada por columnas, vigas y diagonales, las cuales forman un marco rígido en la dirección transversal al movimiento previsto del modelo y con una mayor flexibilidad en la dirección longitudinal del mismo, que es la dirección en la que se probó el sistema disipador. Para este estudio se

eligió un peso total por nivel de 2 ton. En la figura N° 6 se muestran una elevación del marco longitudinal y un detalle del sistema de disipación. En la tabla 1 se presentan las frecuencias naturales de vibración para el prototipo, asociadas a los modos de translación y torsión.

#### Respuesta analítica

Para llevar a cabo el análisis inelástico de la estructura se recurrió al programa DRAIN-2D (13). Una descripción amplia del modelaje matemático se encuentra en la referencia 14.

La excitación en la base del modelo fue de tipo senoidal, con una transición de amplitud cero hasta la amplitud máxima de 400  $\text{cm/s}^2$ , en un intervalo de 2 s, con 8 s de duración total de la señal. Se realizó un barrido de frecuencias de la señal excitadora de la base del modelo, con lo que se hace el análisis en el intervalo de frecuencias de interés.

Se compararon los resultados del análisis inelástico respecto a aquellos obtenidos al considerar comportamiento elástico de toda la estructura. En la figura N° 7 se presenta el barrido de frecuencias para los modelos elástico e inelástico de la estructura, donde se observa la reducción significativa en la respuesta de la estructura equipada con disipadores respecto a la que carece de ellos. El valor del amortiguamiento viscoso equivalente para la condición de resonancia es del orden del 13 por ciento del amortiguamiento crítico, que comparado con el del 1 por ciento del amortiguamiento estructural considerado representa un aumento significativo del mismo. Por otro lado, en la figura N° 8 se aprecia una reducción considerable en la magnitud de las fuerzas axiales en la columna inferior izquierda, ya que

la generada es del orden del 10 por ciento de la registrada en la estructura sin disipadores, con la consecuente reducción en el momento de volteo de la base.

#### Respuesta experimental

La estructura se encuentra instrumentada con cuatro sensores de aceleración, tres transductores de desplazamiento y tres transductores de deformación. Con base en esta instrumentación, se desarrolla el siguiente programa de actividades:

- 1) Determinación de características dinámicas (frecuencias naturales, formas modales y niveles de amortiguamiento) por medio de pruebas de vibración ambiental y forzada.
- 2) Realizar pruebas a baja amplitud de aceleración en la base ( $40 \text{ cm/s}^2$ ) con una variación de tipo armónico y en un intervalo de frecuencias de 2 a 8 Hz, entre las cuales se localiza la frecuencia fundamental del sistema, que es de 6.4 Hz. El objetivo es determinar los factores de amplificación con respecto a la aceleración de la azotea. El comportamiento estructural con este nivel de excitación debe ser elástico.
- 3) Realizar pruebas con una amplitud de aceleración en la base de  $400 \text{ cm/s}^2$  con carga de tipo armónico en un intervalo de 2 a 8 Hz. Con esta amplitud de aceleración se piensa que los dispositivos presentan una disipación de energía considerable.

Se efectuaron pruebas de vibración ambiental en el prototipo para determinar las características dinámicas, las cuales se

la generada es del orden del 10 por ciento de la registrada en la estructura sin disipadores, con la consecuente reducción en el momento de volteo de la base.

#### Respuesta experimental

La estructura se encuentra instrumentada con cuatro sensores de aceleración, tres transductores de desplazamiento y tres transductores de deformación. Con base en esta instrumentación, se desarrolla el siguiente programa de actividades:

- 1) Determinación de características dinámicas (frecuencias naturales, formas modales y niveles de amortiguamiento) por medio de pruebas de vibración ambiental y forzada.
- 2) Realizar pruebas a baja amplitud de aceleración en la base ( $40 \text{ cm/s}^2$ ) con una variación de tipo armónico y en un intervalo de frecuencias de 2 a 8 Hz, entre las cuales se localiza la frecuencia fundamental del sistema, que es de 6.4 Hz. El objetivo es determinar los factores de amplificación con respecto a la aceleración de la azotea. El comportamiento estructural con este nivel de excitación debe ser elástico.
- 3) Realizar pruebas con una amplitud de aceleración en la base de  $400 \text{ cm/s}^2$  con carga de tipo armónico en un intervalo de 2 a 8 Hz. Con esta amplitud de aceleración se piensa que los dispositivos presentan una disipación de energía considerable.

Se efectuaron pruebas de vibración ambiental en el prototipo para determinar las características dinámicas, las cuales se

presentan en la tabla 2, donde se observa una muy buena correlación de las frecuencias fundamentales experimentales en su dirección longitudinal respecto a las del modelo matemático. El amortiguamiento estructural obtenido por el método de decremento logarítmico fluctúa alrededor del 1 por ciento del valor crítico, que concuerda razonablemente con el propuesto en el modelo matemático.

Al llevarse a efecto las pruebas con baja amplitud de aceleración se detectó la existencia de una modificación de la frecuencia fundamental, al pasar de 6.4 Hz obtenida con pruebas de vibración ambiental a 6.0 Hz que se obtiene con el nivel de aceleración mencionado. Este cambio se atribuye a que las conexiones de la estructura principal y de las diagonales no trabajan como articulaciones perfectas cuando la excitación es de tipo ambiental. Para la frecuencia fundamental de 6 Hz se obtuvieron aceleraciones en la azotea con un factor de amplificación igual a 50, lo que se asocia a un valor de amortiguamiento estructural de aproximadamente 1 por ciento. Es importante destacar que la dirección transversal tiene una frecuencia fundamental de 6.2 Hz, mientras que la asociada a la torsión vale 11.4 Hz.

Se detectaron movimientos importantes de torsión con una frecuencia de excitación igual a la del movimiento longitudinal, ya que existe una excentricidad entre el centro de masas y el centro de rigidez del prototipo, con aceleraciones transversales de aproximadamente el 50% de la aceleración longitudinal. Este hecho no estaba contemplado en el diseño original del experimento, lo que motivó que se tuviera que rigidizar transversalmente al prototipo, colocándole un refuerzo en diagonal con un perfil circular hueco de 7.62 cm de diámetro en los dos niveles de la estructura. Este refuerzo cambió notablemente las características dinámicas del modelo en la dirección transversal, modificando su

frecuencia fundamental de un valor inicial de 6.0 Hz a uno final de 8.8 Hz, lo que evita el acoplamiento modal con la dirección longitudinal. En la figura 9 se muestra la comparación de los resultados obtenidos en pruebas de vibración ambiental antes y después de la rigidización transversal; se aprecian las modificaciones mencionadas.

Actualmente se realizan las pruebas finales en el modelo, aplicando una aceleración en la base de  $400 \text{ cm/s}^2$  para el intervalo de frecuencias de 2 a 8 Hz.

#### MODELO ANALITICO ESTRUCTURA METALICA DE 10 NIVELES

##### Descripción

Se llevó a cabo un estudio comparativo de la respuesta analítica de una estructura metálica de 10 niveles con dispositivos de disipación de solera respecto a las obtenidas con diferentes sistemas de disipación de energía. Una elevación de los modelos considerados se presenta en la figura 10; y comprenden:

- 1) Estructura esquelética (EE)
- 2) Estructura con diagonales de acero (EDA)
- 3) Estructura con aisladores en la base (EAB)
- 4) Estructura con disipadores de fricción (EDF)
- 5) Estructura con aisladores en la base y disipadores de fricción (EABDF)
- 6) Estructura con disipadores de solera (EDS)

Los primeros dos modelos (EE y EDA) fueron diseñados por Hanson y Fan (15), teniendo como fin estudiar la reducción de los

requerimientos de ductilidad y capacidad de absorción de energía al colocar diagonales de refuerzo en el marco esquelético.

Los modelos EDA, EAB, EDF y EABDF fueron analizados por Filia-trault, Cherry y Byrne (16), con el objeto de comparar dichos sistemas con y sin el efecto de interacción suelo-estructura (ISE) para dos sitios de la ciudad de México, (SCT y Tacubaya).

Teniendo como antecedente los 5 primeros modelos mencionados, se compararon sus respuestas con respecto a la de la misma estructura pero colocando disipadores de energía tipo solera en las diagonales, con y sin el efecto de la ISE y para el sismo de SCT.

Las propiedades de los elementos estructurales, propiedades del suelo y constantes de rigidez de la cimentación consideradas en el análisis se describen en la referencia 16.

#### Periodos fundamentales

Los periodos de vibración calculados con y sin el efecto de ISE para los 6 modelos mencionados se presentan en la tabla 3. Los periodos para el modelo EDA se obtuvieron considerando que las diagonales no tienen resistencia a la compresión. Para los modelos EAB, EDF, EABDF y EDS se presentan dos periodos límites que se definen por la nula y completa cedencia de sus sistemas de disipación.

#### Análisis del daño

Para llevar a cabo el análisis inelástico de los modelos se utilizó el programa DRAIN-2D, con el acelerograma registrado

en SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, dirección este-oeste. En la figura 11 se presentan el acelerograma registrado y los espectros de Fourier y de respuesta para 5% de amortiguamiento, asociados al mismo movimiento.

En la figura 12 se muestran las articulaciones plásticas formadas en los elementos de los 6 modelos analizados, con y sin el efecto de ISE. Para el modelo EDS se muestra el daño considerando dos alternativas; la primera con una deformación de cedencia  $e_y = 0.5$  cm y la segunda con un  $e_y = 0.25$  cm.

Al analizar los resultados obtenidos se observa lo siguiente:

- 1) Al colocarse las diagonales en el modelo EDA se reduce considerablemente el daño del marco esquelético (EE), lo que se explica por la modificación de su periodo fundamental, ya que el periodo predominante del movimiento registrado es de aproximadamente 2 s, como lo muestra la figura 7.
- 2) Tal como Filiatrault, Cherry y Byrne lo mencionan en su trabajo, el modelo EDA permanece elástico si no se considera el efecto de ISE, de lo contrario se presentan daños en algunos elementos estructurales. Al no considerarse el efecto de ISE el modelo EAB es el que sufre mayor daño de todos los modelos analizados, ya que coinciden prácticamente las características del movimiento con las de la estructura; sin embargo, este daño casi desaparece al tomarse en cuenta el efecto de ISE.
- 3) En el modelo EDS los dispositivos alcanzan a disipar energía en los primeros 5 niveles sólo con el desplazamiento de fluencia  $e_y = 0.25$  cm, ya que de lo contrario este modelo

permanece elástico al igual que el modelo EDF, se considere o no el efecto de ISE. Esto muestra que es fundamental poder controlar el desplazamiento asociado a la fluencia de este dispositivo disipador.

#### Comparación del cortante de entrepiso

Las envolventes de los cortantes de entrepiso sin y con el efecto ISE se presentan en las figuras 13 y 14, respectivamente. Para el modelo EE en la línea punteada indica el cortante que se presentaría si todos sus miembros se comportaran elásticamente, por lo que la formación de articulaciones plásticas de este modelo hace abatir considerablemente los cortantes de entrepiso. Los cortantes mayores se asocian al modelo EAB, mientras que el menor cortante se presenta en el modelo EAS, prácticamente para todos los niveles.

Para los modelos estudiados, el efecto de la interacción suelo-estructura hace modificar radicalmente su respuesta, sobre todo para el modelo EAS, ya que a pesar de que no se presentan daños, el cortante crece considerablemente.

#### Comentarios

Para la estructura estudiada en este ejemplo de aplicación, se observa que la influencia de la interacción suelo-estructura llega a ser determinante en el comportamiento estructural, ya que provoca un incremento en su periodo fundamental, sobretodo en aquellos modelos cuyas características dinámicas se encuentran cercanas a la condición de resonancia con las características del movimiento del suelo, causando una magnificación en su respuesta, así como un mayor daño en sus elementos estructurales.

En el modelo con disipadores de solera, a pesar de que existe una disipación de energía en un gran número de ellos, el incremento en el periodo fundamental debido a la cedencia de sus dispositivos y al efecto de interacción suelo-estructura provoca que se presenten grandes cortantes de entrepiso.

### CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo experimental y el resultado de sus pruebas preliminares ha mostrado que el concepto de usar disipadores de energía tipo solera es confiable estructuralmente y que se puede construir.

A pesar de que el estudio de modelos experimentales y analíticos tan simples no justifican una generalización, los resultados obtenidos hasta el momento muestran que el incluir estos sistemas de disipación puede abatir la respuesta ante sismos, siempre que la mayor parte de la rigidez lateral la contemplen los elementos con los dispositivos disipadores de energía.

Es evidente la necesidad de llevar a cabo estudios más profundos sobre el uso de este tipo de disipadores de energía.

### RECONOCIMIENTO

Se agradece al Prof. Neftalí Rodríguez Cuevas su apoyo para la realización de esta investigación. Al Ing. Manuel Aguirre y al Ing. Roberto Sánchez sus comentarios y material de exposición sobre las características del dispositivo disipador de solera. Asimismo, al Dr. David Muría Vila por la revisión del escrito y a Mauricio Córdova su colaboración para el desarrollo del mismo.

## REFERENCIAS

- (1) Pall A.S. "Response of friction damped buildings", VIII Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica, Vol. V, julio 1984, San Fco. Cal., USA, págs. 1007 a 1014.
- (2) Kelly J.M. y Skinner M.S. "The Design of steel energy absorbing restrainers and their incorporation into nuclear power plants for enhanced safety" Vol. 4. Review of current uses of energy absorbing devices". Reporte UCB/EERC-79/10, febrero 1979.
- (3) Wiesner K.B. "The role of damping systems", Third International Conference on Tall Buildings: The second century of the skyscraper. Chicago III. USA, enero 1986.
- (4) Whitaker A., Bertero V., Alonso J. y Thompson C. "Earthquake simulation testing of steel plate added damping and stiffness elements". Reporte UCB/EERC-89/02, enero 1989.
- (5) Hernalsteen P. y Leblouis L.C. "The use of energy absorber against impact loads" Nuclear Engineering and design, Vol. 37, págs. 373 a 406, 1976.
- (6) Esswein G.A. "Development of a plastic strain energy absorbing pipe whip restraint". Proceedings, ASCE Special Conference on Structural Design of nuclear power plant facilities, Vol. 2, págs. 171 a 200, 1973.
- (7) Skinner R.I., Kelly J.M. y Heine A.J., "Hysteretic Dampers for Earthquake-Resistant Structures", International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, págs. 287 a 289, 1975.
- (8) Kelly J.M., Skinner R.I. y Heine A.J. "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures". Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 5, N. 3, págs. 63-88, 1972.
- (9) Aguirre M. y Sánchez R. "Pruebas de elementos disipadores de energía sísmica". Revista Construcción y Tecnología, marzo 1989.
- (10) Aguirre M. y Sánchez R. "Pruebas complementarias de elementos disipadores de energía". Proyecto 8152, Instituto de Ingeniería UNAM, noviembre 1989.
- (11) Rodríguez E. y Ovando E. "Determinación experimental de las características dinámicas de una mesa vibradora". Proyecto 8150, Instituto de Ingeniería UNAM, Febrero 1979.
- (12) Rodríguez M. y Chávez J.H. "Comportamiento sísmico de sistemas losa plana-columna". Proyecto 8714, Instituto de Ingeniería UNAM, febrero 1989.
- (13) Kannan A. y Powell G. "DRAIN-2D: General Purpose Computer Program for Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures". Informe UCB/EERC/- 73/6, Universidad de California en Berkeley, USA, abril 1973.
- (14) Chaves Gómez, J.H. "Efecto de amortiguamiento externo en la respuesta de una estructura metálica de dos niveles". Trabajo final presentado a la DEPEI UNAM, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería. septiembre 1989.
- (15) Hanson R.D. y Fan R.S. "The effect of minimum cross bracing on the inelastic response of multistorey buildings". Memorias de la 4a. Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica. Santiago de Chile, 1969.
- (16) Filiatrault A., Cherry S. y Byrne P.M. "The influence of Mexico City soils on the seismic performance of friction damped and base isolated structures". Earthquake Spectra, Vol. 6, N. 2, mayo 1990.

MODO	FRECUENCIAS (Hz)	
	PRIMERO	SEGUNDO
LONGITUDINAL	6.40	18.50
TRANSVERSAL	6.00	17.46
TORSION	10.11	23.50

**TABLA 1 Frecuencias naturales de vibración del modelo matemático del prototipo experimental**

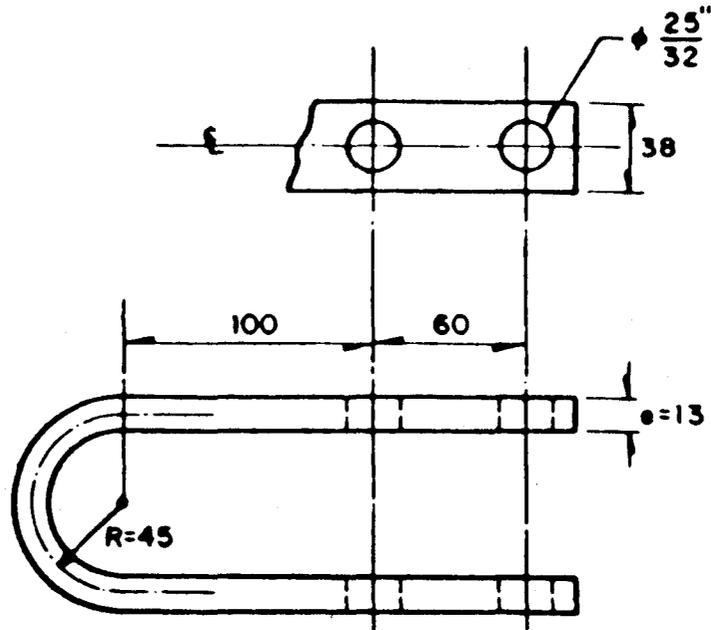
MODO	FRECUENCIAS (Hz)	
	PRIMERO	SEGUNDO
LONGITUDINAL	6.60	17.20
TRANSVERSAL	6.20	21.20
TORSION	11.20	33.60

**TABLA 1 Frecuencias naturales de vibración del prototipo obtenidas con el método de vibración ambiental**

MODELO	PERIODOS ( s )									
	EE	EDA	EAB		EDF		EABDF		EDS	
			To	Tf	To	Tf	To	Tf	To	Tf
SIN EFECTO ISE	1.85	1.02	1.33	2.02	1.02	1.85	1.33	2.56	1.02	1.85
CON EFECTO ISE	2.35	1.67	2.57	3.16	1.67	2.80	2.57	4.16	1.67	2.80

To= Período antes de la cedencia de los sistemas de disipación      Tf= Período después de la cedencia de los sistemas de disipación

**TABLA 3 Periodos fundamentales de vibración de los modelos analizados**



Acotaciones, en mm

FIGURA 1 Dimensiones de la solera utilizada como elemento disipador de energía

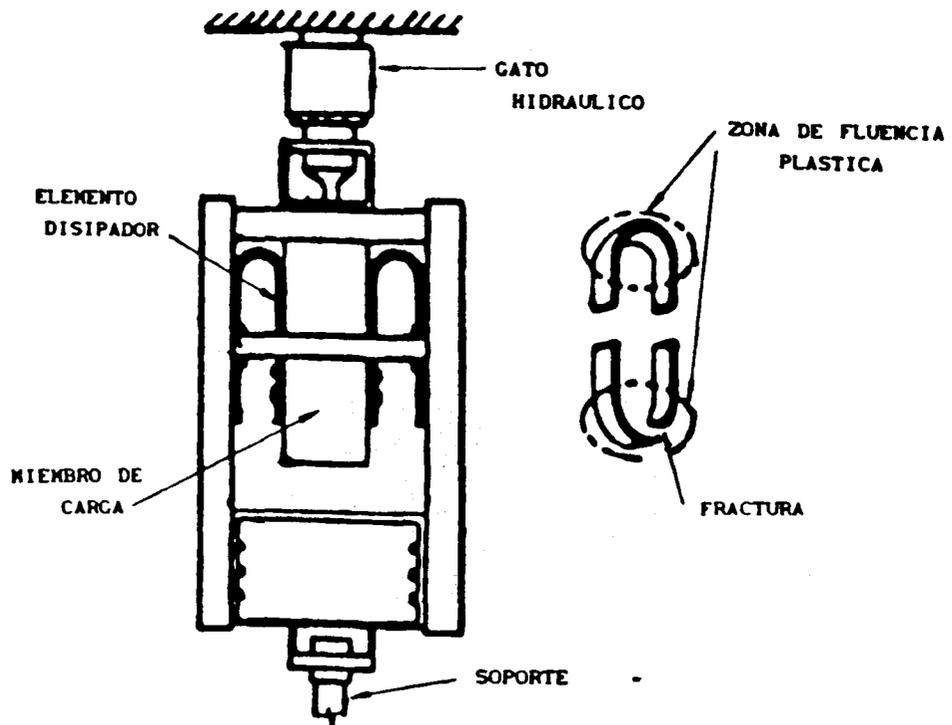


FIGURA 2 Marco de carga para probar los dispositivos disipadores

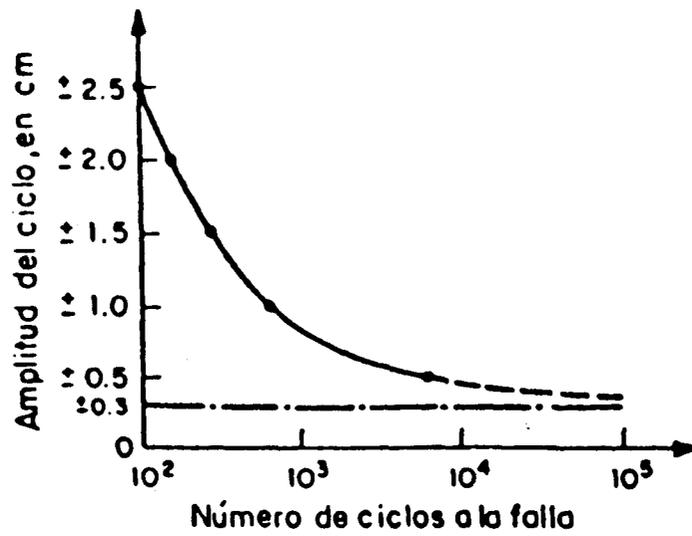


FIGURA 3 Curva de fatiga de los disipadores de energía

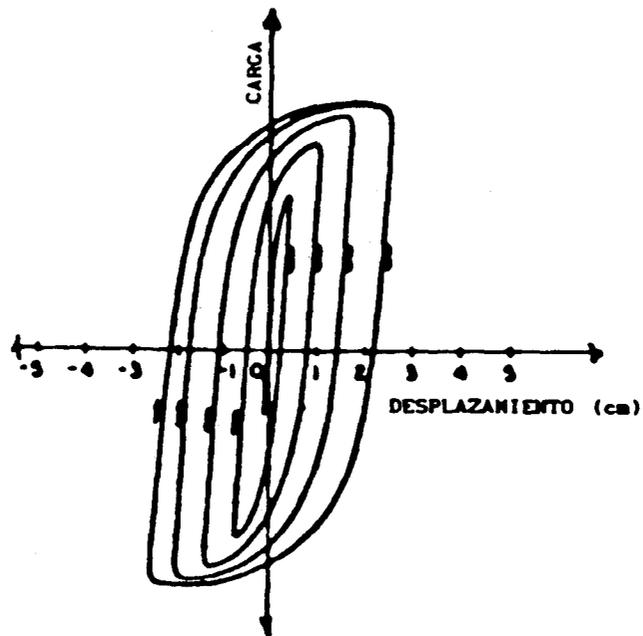


FIGURA 4 Evolución del ciclo histerético del dispositivo

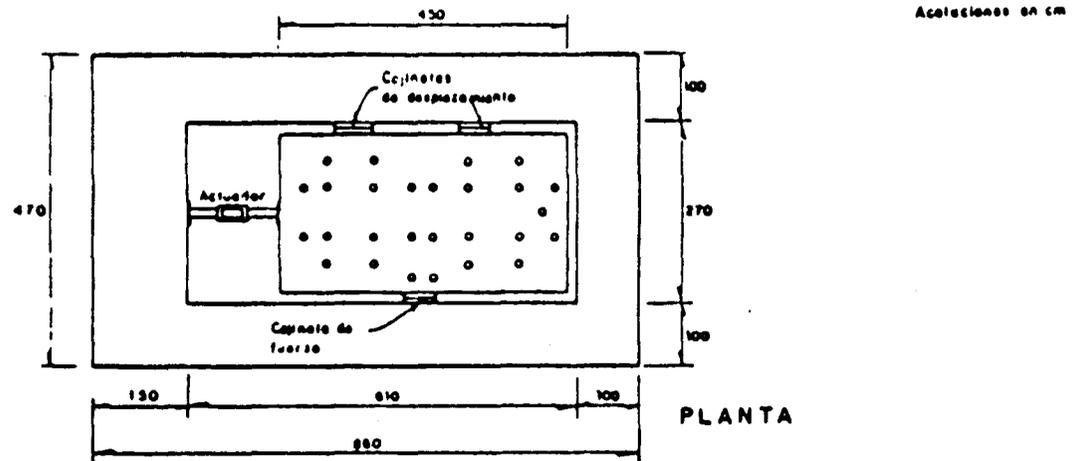
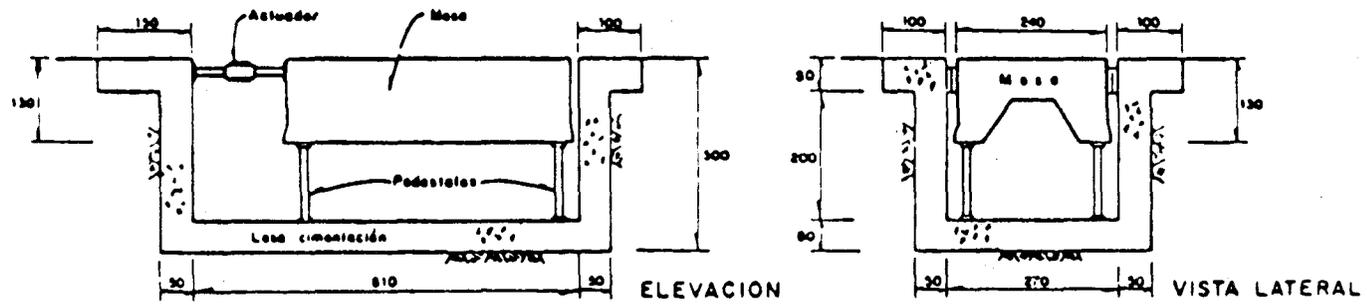
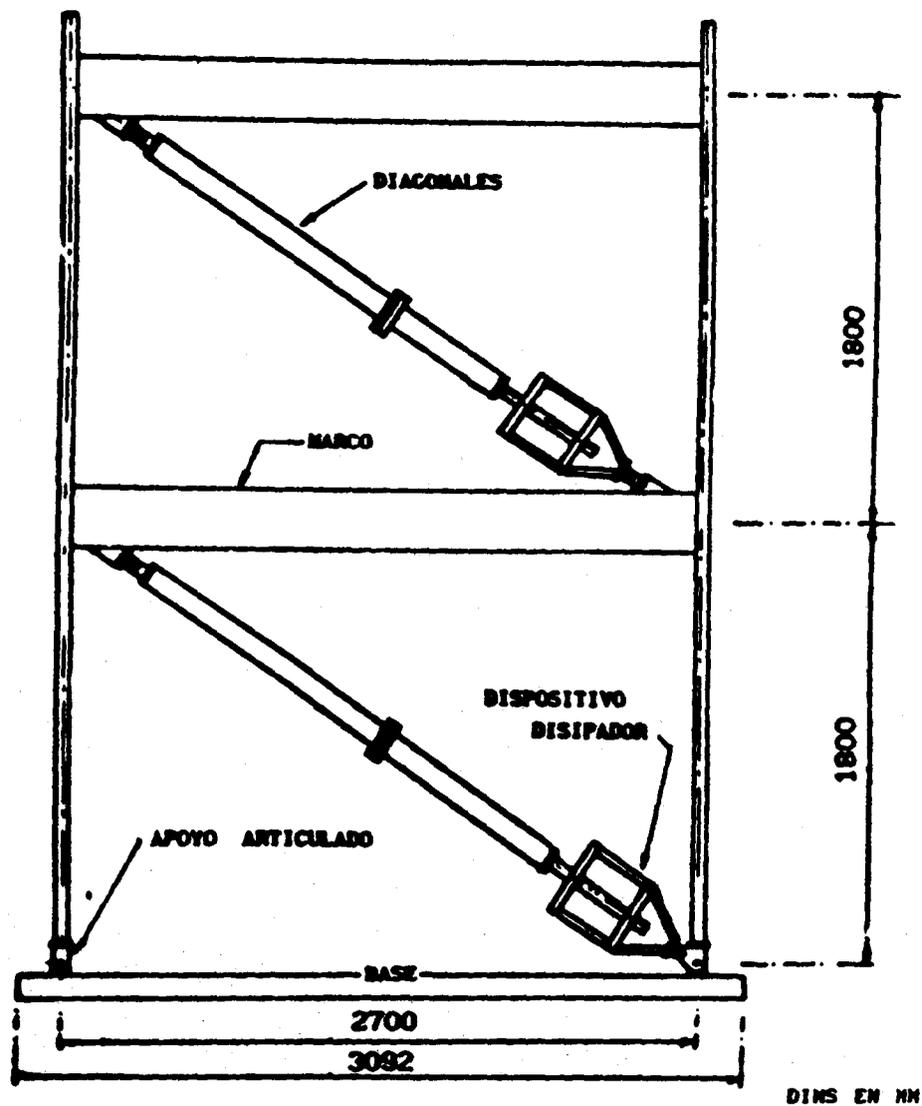
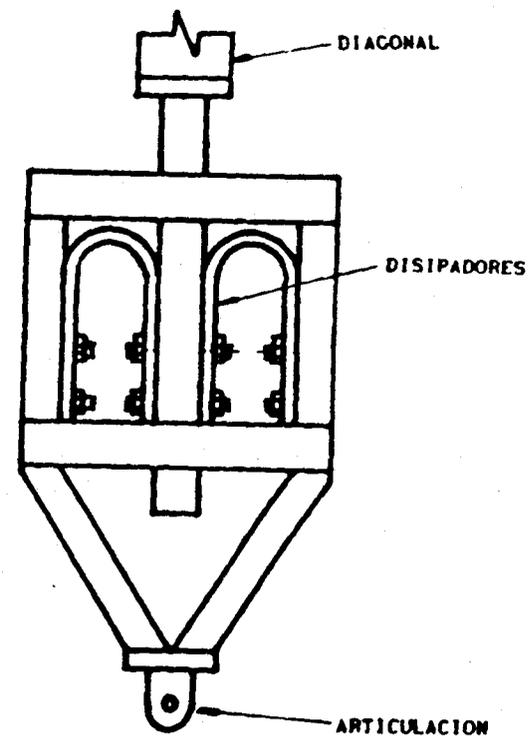


FIGURA 5 Dimensiones generales de la mesa vibradora



a) Elevación longitudinal



b) Detalle de dispositivo

FIGURA 6 Prototipo experimental y detalle de dispositivo

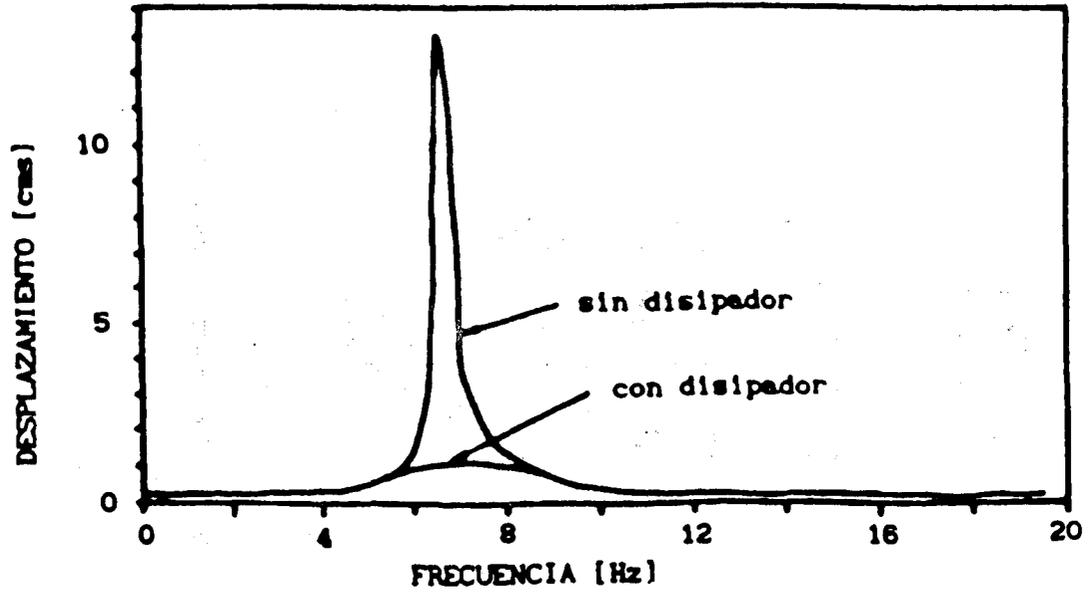


FIGURA 7 Desplazamientos máximos de azotea obtenidos del modelo matemático del prototipo

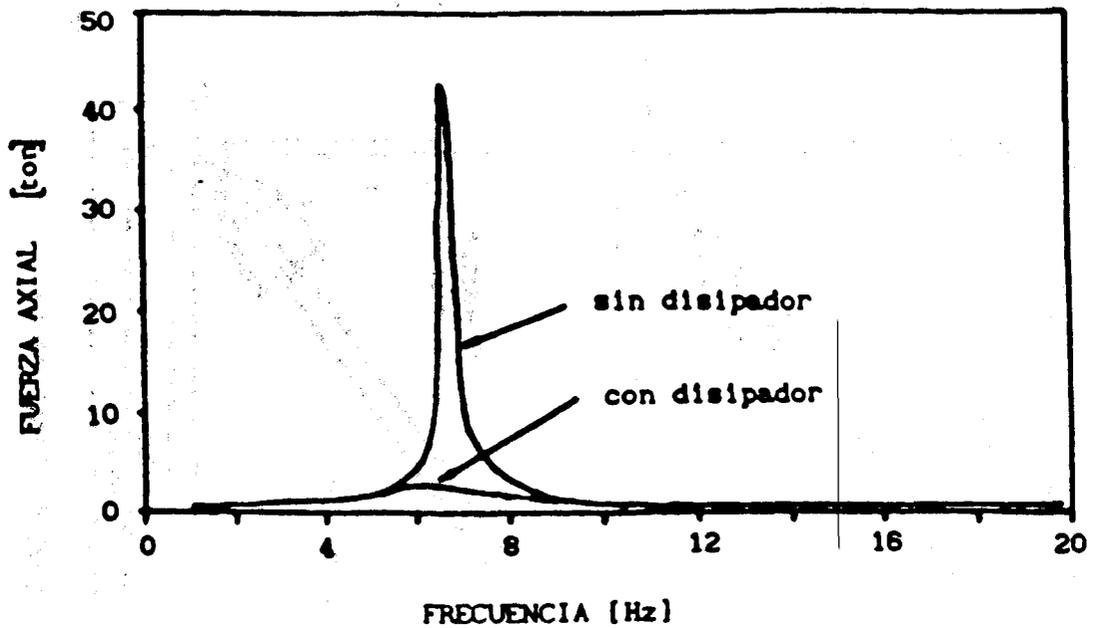
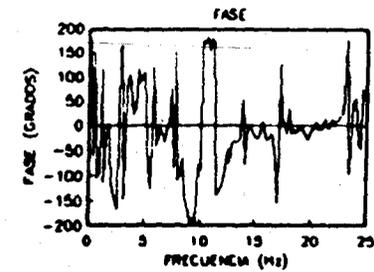
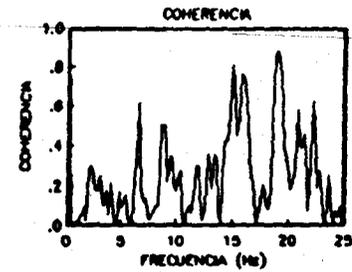
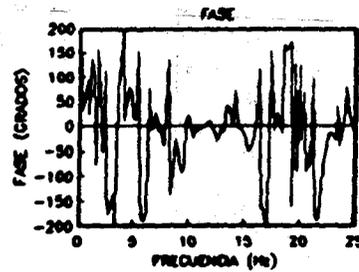
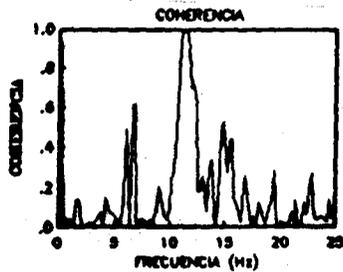
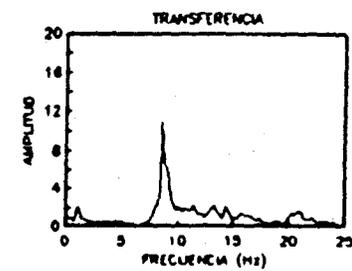
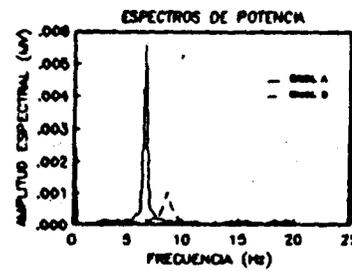
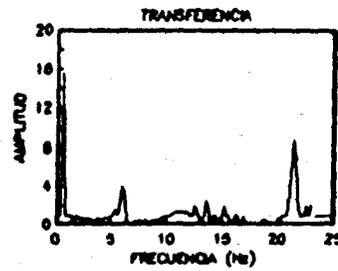
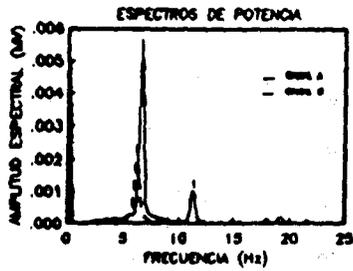


FIGURA 8 Fuerza axial máxima en columna inferior izquierda del prototipo obtenida del modelo matemático

ANTES DE RIGIDIZACION

DESPUES DE RIGIDIZACION



F(L)= 6.6 HZ  
 F(T)= 6.2 HZ  
 F(TORSION)= 11.4 HZ

CANAL A: AZOTEA LONGITUDINAL  
 CANAL B: AZOTEA TRANSVERSAL

F(L)= 6.6 HZ  
 F(T)= 8.8 HZ  
 F(TORSION)= 20.8 HZ

FIGURA 9 Pruebas de vibración ambiental antes y después de la rigidización transversal

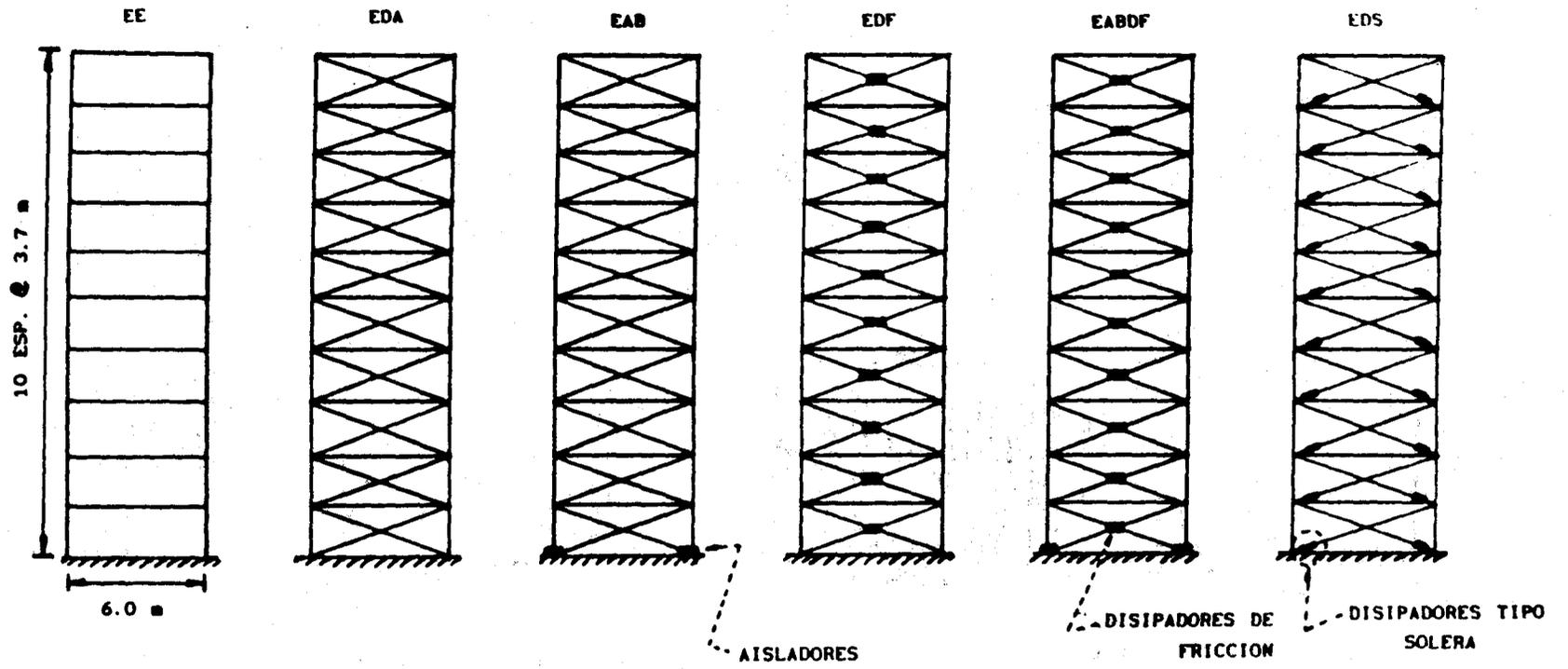


FIGURA 10 Descripción de los modelos estructurales

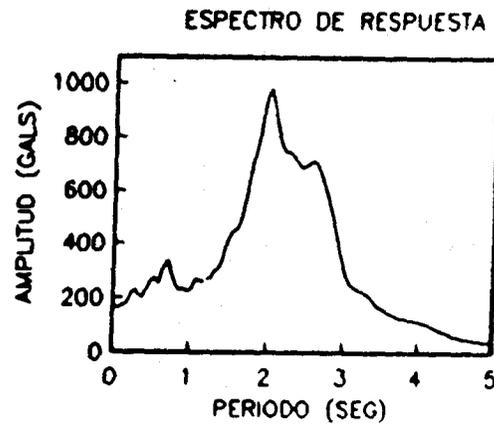
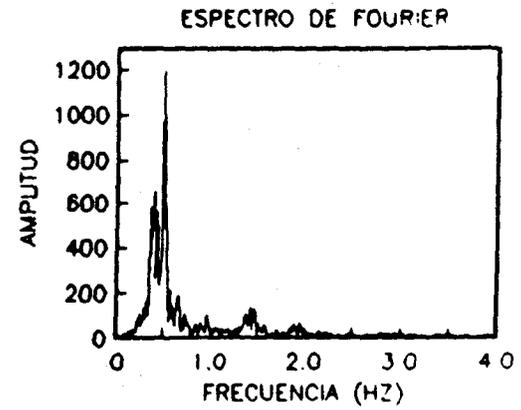
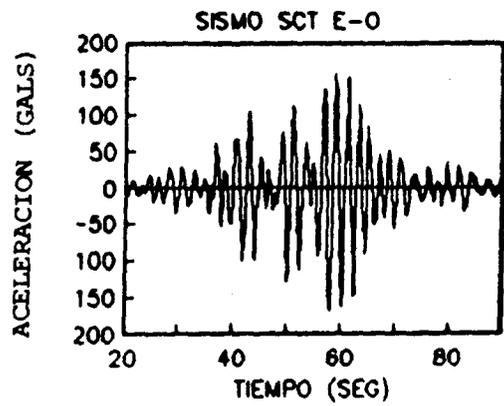


FIGURA 11 Características del acelerograma registrado en SCT durante el sismo de 19/IX/85

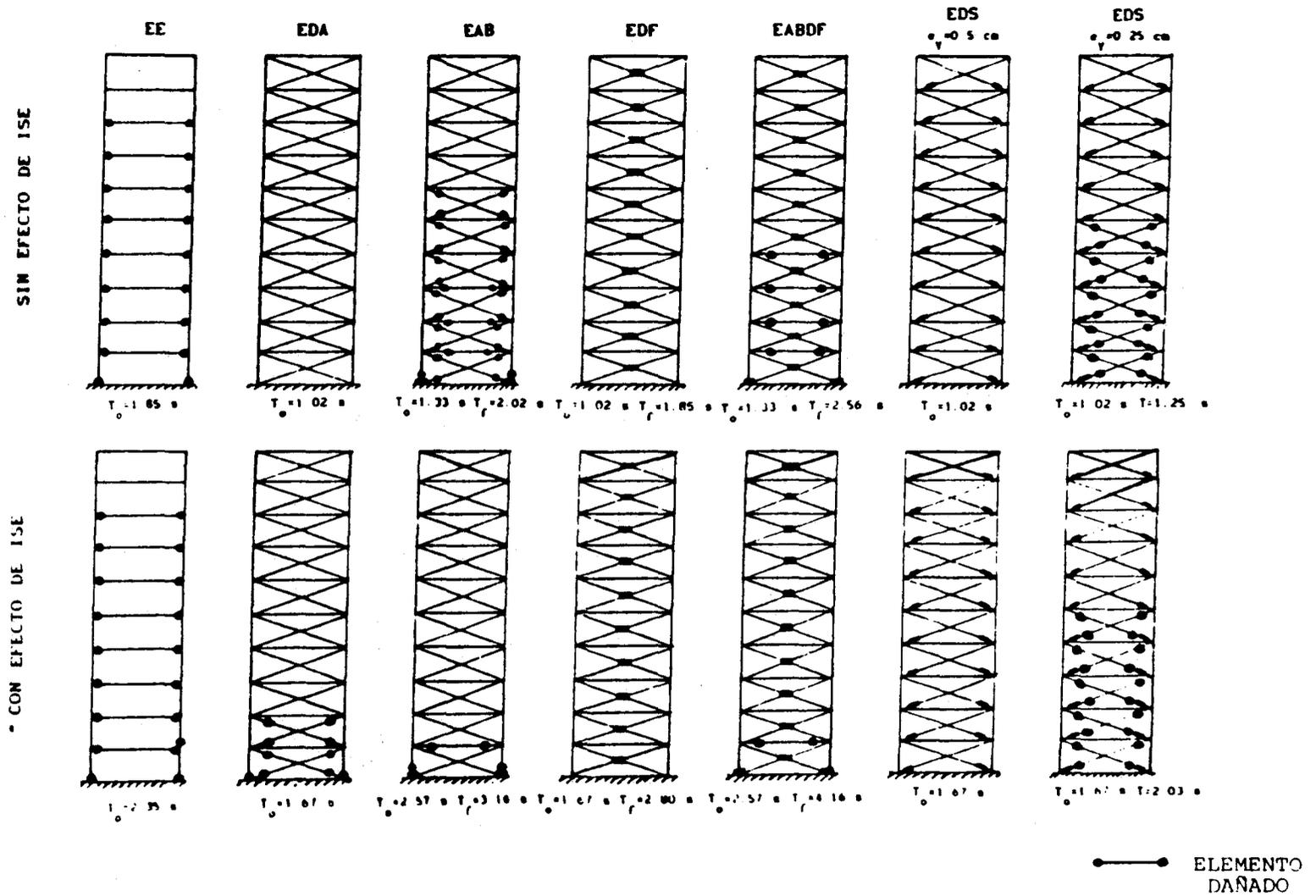


FIGURA 12 Daños presentados en los modelos analizados con el sismo de SCT

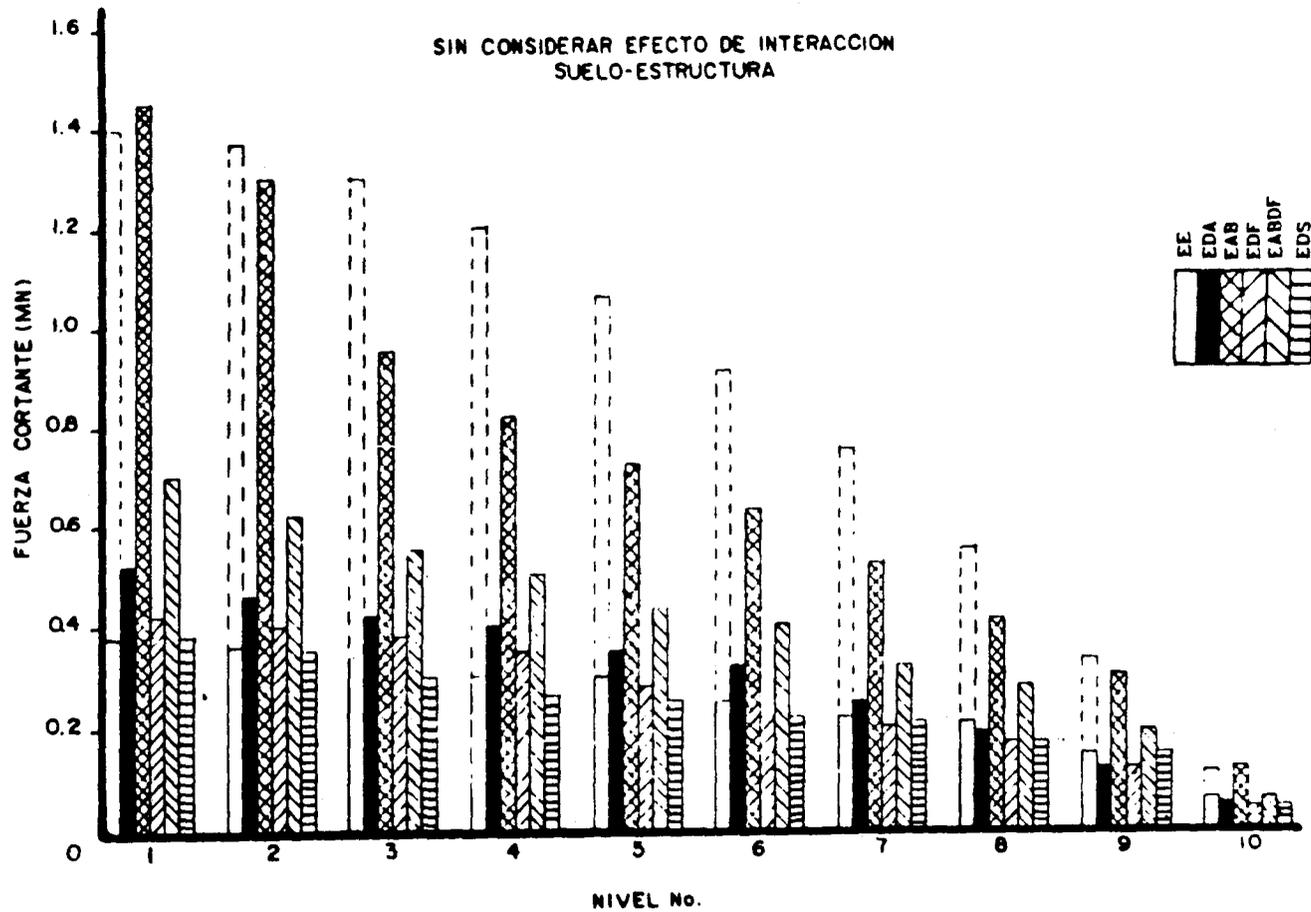


FIGURA 13 Cortantes máximos de entrepiso para los modelos analizados sin considerar efecto de ISE

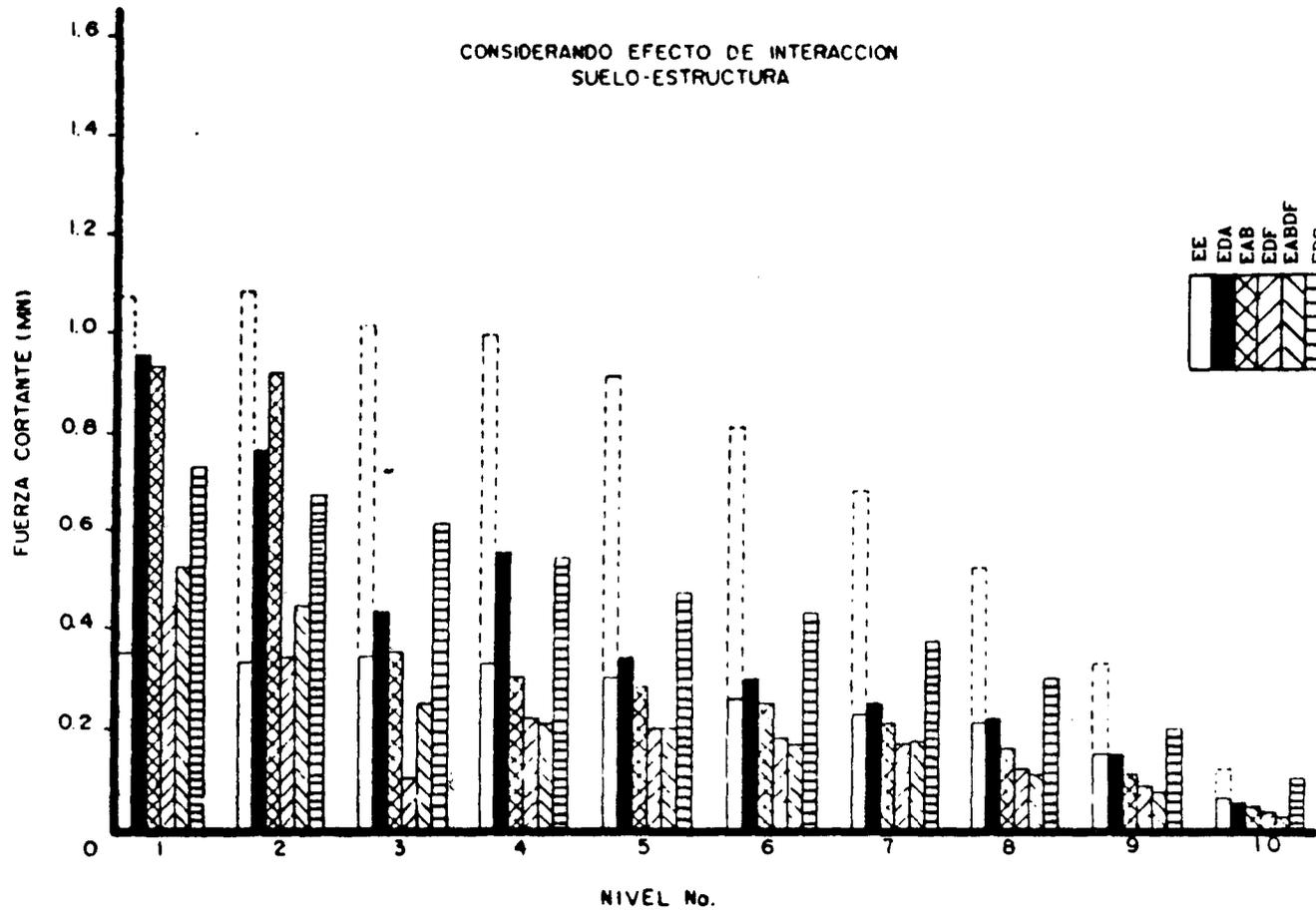


FIGURA 14 Cortantes máximos de entrepiso para los modelos analizados considerando efecto de ISE