

ANALISIS INELASTICO PASO A PASO DE UNA ESTRUCTURA
CON AMORTIGUAMIENTO SUPLEMENTARIO

WASHINGTON BOLIVAR ALVARADO ORELLANA

TRABAJO

Presentado a la División de Estudios de Posgrado de la

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

como requisito para obtener

el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

(Estructuras)

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D.F.

Febrero-1988



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.

A mis padres

RESUMEN

El amortiguamiento en una estructura reduce considerablemente la respuesta sísmica y si se usan sistemas que disipen energía en forma mecánica, los elementos estructurales trabajarán inelásticamente después de que ya se ha consumido energía.

En un modelo de acero de nueve niveles se incorporan dispositivos amortiguadores, al cual se le somete a la excitación sísmica SCT-EW 19-SEP-85 para comparar su respuesta cuando no existen dichos dispositivos. La vibración se la hace en tres periodos distintos para ver la efectividad.

Se probaron distribuciones de dispositivos en el modelo y se obtuvo en el mejor de los casos, un amortiguamiento viscoso equivalente de 9.2% del crítico, que corresponde únicamente al trabajo de disipación de energía en forma mecánica. La carga vertical que llega a los apoyos es reducida.

INDICE

Pág.

1.- INTRODUCCION	1
2.- MODELO ANALIZADO	3
2.1 Carga, propiedades geométricas y mecánicas	3
2.2 Características dinámicas	3
2.3 Dispositivo de amortiguamiento	5
3.- CARGA OPTIMA DE DESLIZAMIENTO	11
4.- ACELEROGRAMA	15
4.1 Señal considerada	15
4.2 Espectros de respuesta	15
5.- RESPUESTA SISMICA	20
5.1 Para un periodo dominante de 2.0 seg	20
5.2 Para un periodo dominante de 0.414 seg	21
5.3 Para un periodo dominante de 0.268 seg	22
6.- OTRAS DISTRIBUCIONES DE AMORTIGUADORES	30
7.- AMORTIGUAMIENTO VISCOSO EQUIVALENTE	45
8.- DESLIZAMIENTO DE LOS AMORTIGUADORES	47
9.- CONCLUSIONES	49
REFERENCIAS	50

1.- INTRODUCCION :

En los últimos años, se ha invertido muchos recursos para la investigación tanto teórica como experimental del amortiguamiento en estructuras y en especial aquel proporcionado por mecanismos o aparatos disipadores de energía; y es que el concepto de amortiguamiento inherente y/o suplementario que pueda existir en una estructura, juega un papel muy importante cuando se habla de respuesta sísmica, pues ésta puede ser notablemente disminuida aún en el caso de una posible resonancia, aumentando con ello la resistencia sísmica, que se traduce en un mejor comportamiento de la estructura ante la excitación, logrando minimizar la posibilidad de daños permanentes y más todavía del colapso.

Un mecanismo incorporado en la estructura en lugares estratégicos, con el único propósito de absorber energía cinética generada por el movimiento sísmico, produce el efecto de amortiguamiento, con el que se logra reducir la amplitud de las vibraciones. La cantidad de energía consumida, ya sea en los amortiguadores o en la estructura misma, determina el nivel de daños, pues, mientras menor es la diferencia entre la energía ingresada y la disipada, menor es la respuesta. Posiblemente en el futuro, las estructuras tendrán amortiguamientos considerablemente mayores a los tradicionalmente usados y obtenidos hasta ahora.

El mecanismo amortiguador (ó dispositivo) considerado en este análisis, es el que está propuesto y patentado por el Dr. Avtar Pall (11), en el que se usa el principio de la FRICCION para lograr la disipación de energía, que es un método muy utilizado para extraer la energía cinética de un cuerpo en movimiento. Se coloca en la intersección de las diagonales de contraventeo y no actúa cuando el movimiento sísmico es leve, sino cuando llega a un cierto rango de severidad. La energía por él disipada, minimiza o anula las incursiones al rango inelástico de los elementos estructurales cuando la excitación es moderada o posterga su fluencia cuando la excitación es muy severa.

La señal que se usa en el análisis es la componente horizontal EW, registrada en la Secretaría de Comunicación y

Transportes (SCT), durante el temblor del 19 de septiembre de 1985 en la ciudad de México, que se ha reducido de 180 a 37 seg aproximadamente, seleccionando el tramo a tomarse con el criterio de Intensidad de Arias [4].

Se utiliza el programa DRAIN-2D (de marcos planos) [5] [13], implementado en la computadora Burroughs de la UNAM, que realiza el análisis dinámico mediante un procedimiento paso a paso.

En este trabajo, se obtiene la respuesta elástica e inelástica de un marco plano de acero de nueve niveles contraventeado con diagonales y se compara con la que resulta cuando se incorpora en él los mecanismos amortiguadores. Además, se encuentra el valor de amortiguamiento viscoso equivalente del marco que tiene los dispositivos y finalmente se verá la holgura de la guía (ranura) que se requiere en las placas del amortiguador, para que se deslicen con la suficiente libertad.

2.- MODELO ANALIZADO

2.1 Carga, propiedades geométricas y mecánicas

En la fig.1 se muestra el marco plano en estudio. Se trata de un marco de acero de tres vanos y nueve niveles, que forma parte de un modelo en tres dimensiones (a escala 1/3) probado en la mesa vibradora de la Universidad de California, Berkeley. A continuación se dan algunos de los datos usados en el análisis del marco, expresados en unidades de Ton y cm[1][3][8]:

Sobre cada una de las crujeas extremas, existe una carga total de 2.268 Ton, que se considera uniformemente distribuida en una longitud de 100. cm en los cuatro últimos niveles y de 154. cm en los cinco primeros niveles. Esta carga vertical estática gravita sobre el marco cuando actúa el sismo. Las trabes son del mismo perfil en todos los niveles, característica que también se cumple en las columnas. Las diagonales de contraventeo, colocadas simétricamente en el marco, tienen una sección de $0.64 * 5.08$ cm², que soportan un esfuerzo máximo de compresión por pandeo elástico de 0.086 Ton/cm².

Los momentos plásticos de columnas y vigas son 226. y 211. Ton-cm, respectivamente. El módulo de elasticidad es de 2039. Ton/cm² y el endurecimiento por deformación se considera prácticamente nulo (modelo elasto-plástico). Se supone que las bases del marco están empotradas y que los desplazamientos horizontales de los nudos de un mismo nivel son iguales.

La numeración de nudos y barras se encuentra en la fig.1a, donde se puede identificar los números de las columnas inferiores y de las líneas de columnas, que son datos que se van a manejar más adelante.

2.2 Características dinámicas

Utilizando el programa SUPER-ETABS [6], se calcularon los periodos fundamentales de vibración para el marco sin diagonales y para el marco con diagonales, los mismos que se indican a continuación, junto con los resultados de masa modal efectiva (expresada en porcentaje respecto de la masa total) para conocer el aporte de cada uno de los modos de vibrar:

Marco sin diagonales.

Número del Modo	Periodo Natural (seg)	Frecuencia (Hz)	Frecuencia Circular (rad/seg)	Masa Modal (%)
1	.4136	2.42	15.2	86.5
2	.1351	7.40	46.5	9.1
3	.0774	12.92	81.2	2.6
4	.0529	18.90	118.7	1.0
5	.0393	25.45	159.9	0.5
6	.0309	32.38	203.5	0.2
7	.0255	39.29	246.9	0.1
8	.0220	45.42	285.4	0.0
9	.0201	49.78	312.8	0.0

Marco con diagonales.

Número del Modo	Periodo Natural (seg)	Frecuencia (Hz)	Frecuencia Circular (rad/seg)	Masa Modal (%)
1	.2682	3.73	23.4	81.5
2	.0842	11.88	74.7	13.5
3	.0457	21.88	137.5	3.1
4	.0318	31.45	197.6	1.1
5	.0245	40.87	256.8	0.5
6	.0201	49.76	312.7	0.2
7	.0173	57.89	363.8	0.1
8	.0155	64.64	406.1	0.0
9	.0144	69.24	435.0	0.0

Las configuraciones modales de los seis primeros modos fundamentales se muestran en la fig.2 y fig.3, para cada marco.



DEPFI.

T. UNAM

1 9 8 8

ALV

La necesidad de saber los periodos fundamentales de los dos marcos (especialmente del primer modo, pues es el que más influye, según se ve en los resultados presentados), es para escalar la señal sísmica de tal manera que se pueda lograr la resonancia de los marcos, para los análisis comparativos de respuesta que se van a obtener más adelante. El escalar el sismo significa reducir o amplificar la aceleración del suelo o modificar el periodo dominante del terreno.

2.3 Dispositivo de amortiguamiento

El mecanismo, localizado en la intersección de las diagonales que se usa como amortiguador del marco, se indica en la fig.4, en la que se aprecia dos pares de soleras que se sobreponen en una cierta longitud, entre la cual existe un material de asbesto, que sirve de freno como las balatas de los coches. A través de la intersección de las cuatro soleras, se coloca un perno micrométrico que se ajusta para lograr apretar la unión y conseguir que exista un deslizamiento relativo de la una placa respecto a la otra, cuando la tensión alcanza el valor de la llamada carga de deslizamiento, que no es otra cosa que la carga para la cual se vence la fricción.

Pruebas dinámicas de carga y descarga se han realizado con el dispositivo [2]: cuando este se encuentra en forma aislada y cuando está formando parte de un marco. Los lazos de histéresis obtenidos en ambos casos, se muestran en la fig.5. En el primero, resulta un rectángulo muy bien definido con unas ciertas imperfecciones en las esquinas, que se deben a tolerancias en la construcción del mecanismo y en el segundo, un comportamiento análogo en tensión, mientras que en compresión la diagonal se pandea elásticamente bajo una carga muy pequeña. Estas pruebas indican un comportamiento muy estable aún después de 50 ciclos [2].

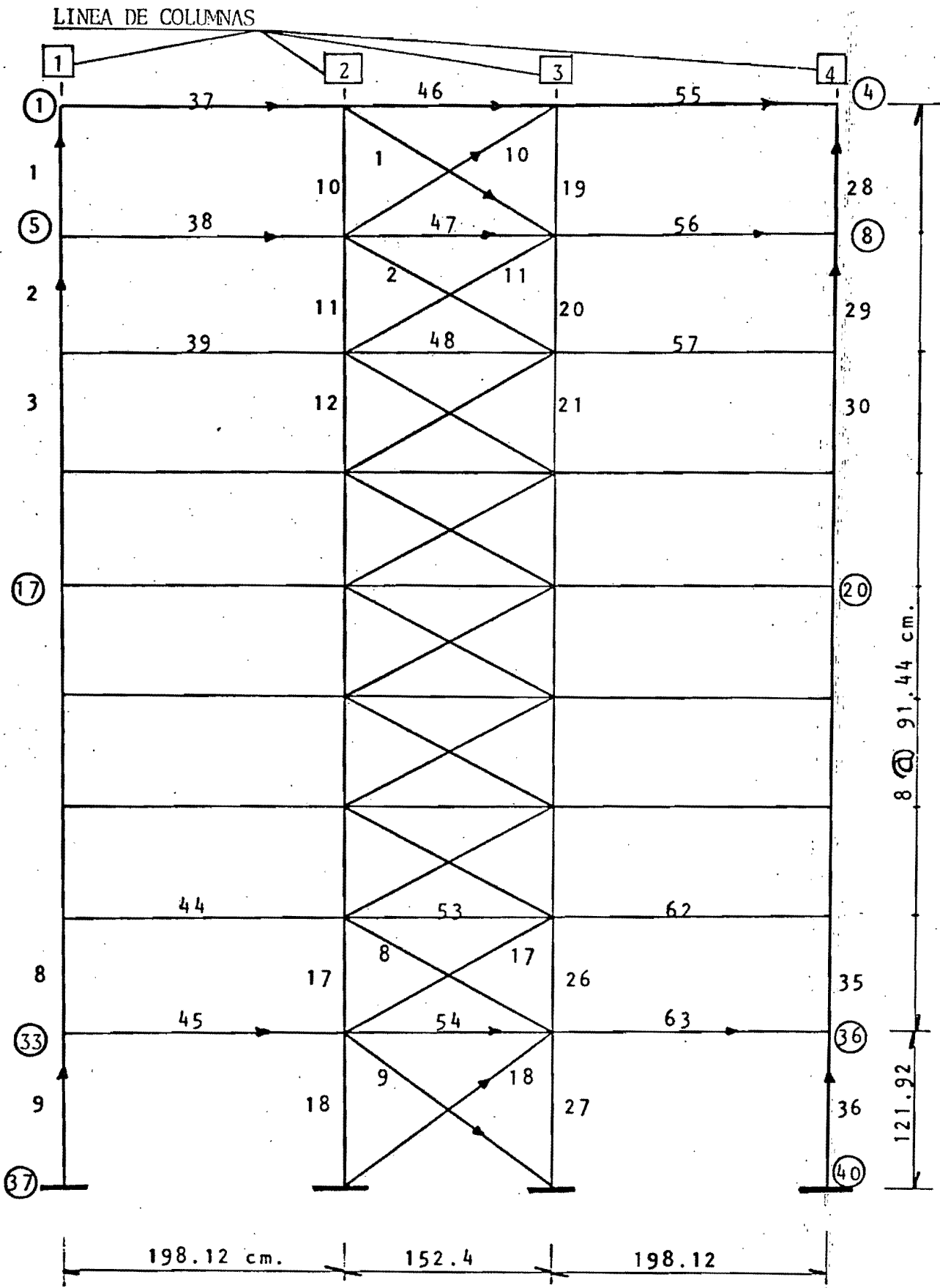
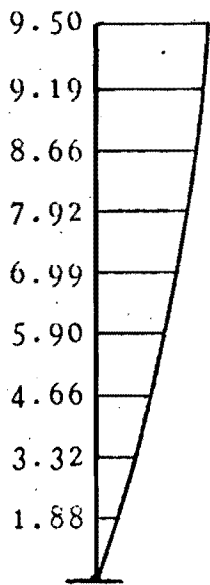
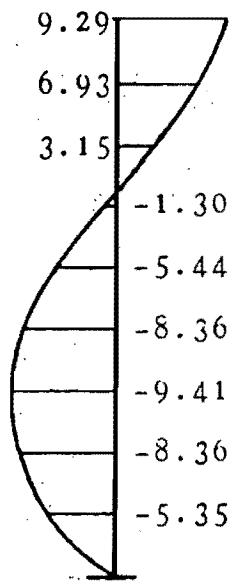


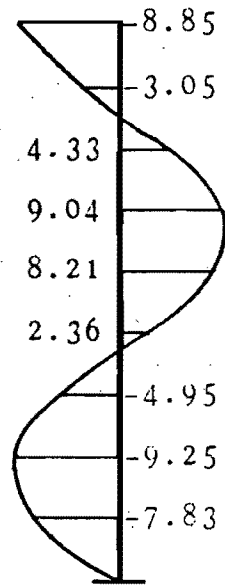
Fig. 1a. Numeración de barras y nudos



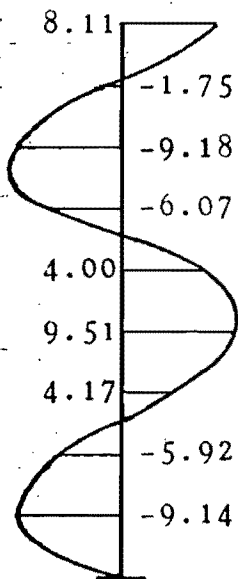
$T_1=0.414 \text{ seg}$



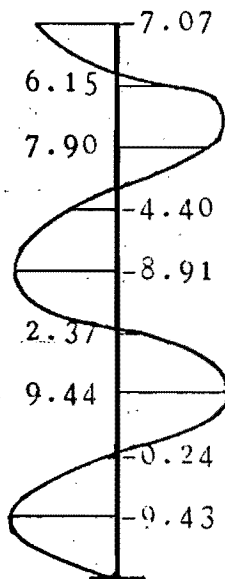
$T_2=0.135$



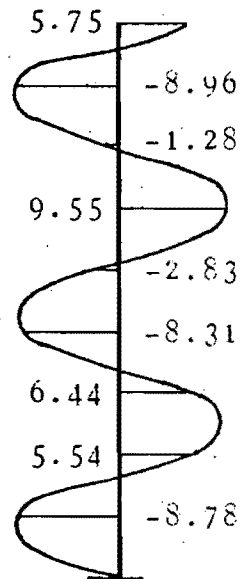
$T_3=0.077$



$T_4=0.053$

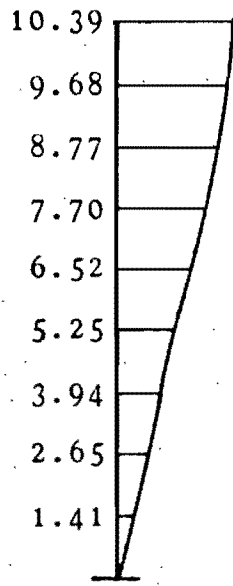


$T_5=0.039$

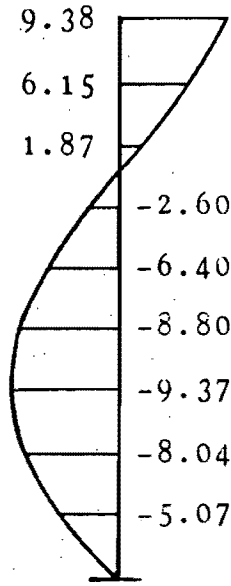


$T_6=0.031$

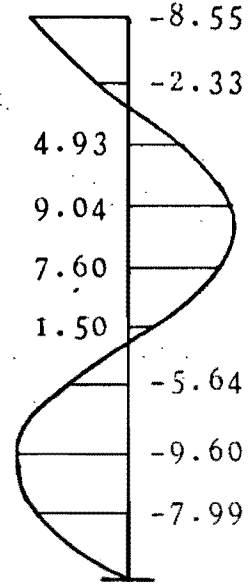
Fig. 2. Configuraciones modales del marco sin diagonales.



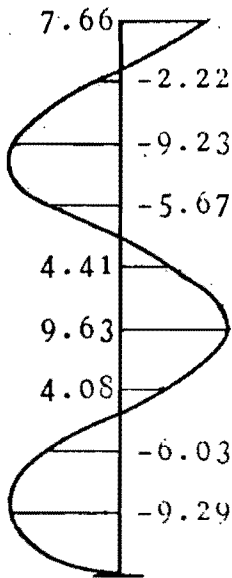
$T_1=0.268$ seg



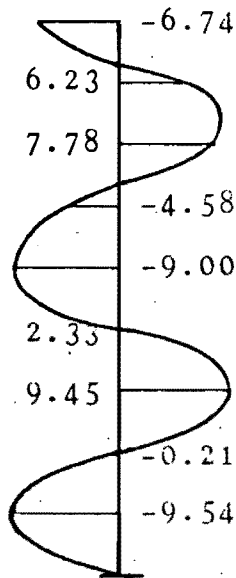
$T_2=0.084$



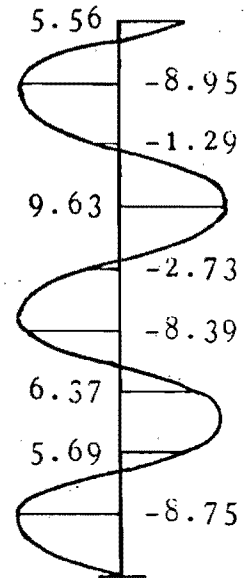
$T_3=0.046$



$T_4=0.032$



$T_5=0.025$



$T_6=0.020$

Fig. 3. Configuraciones modales del marco con diagonales.

Conexión con las diagonales.

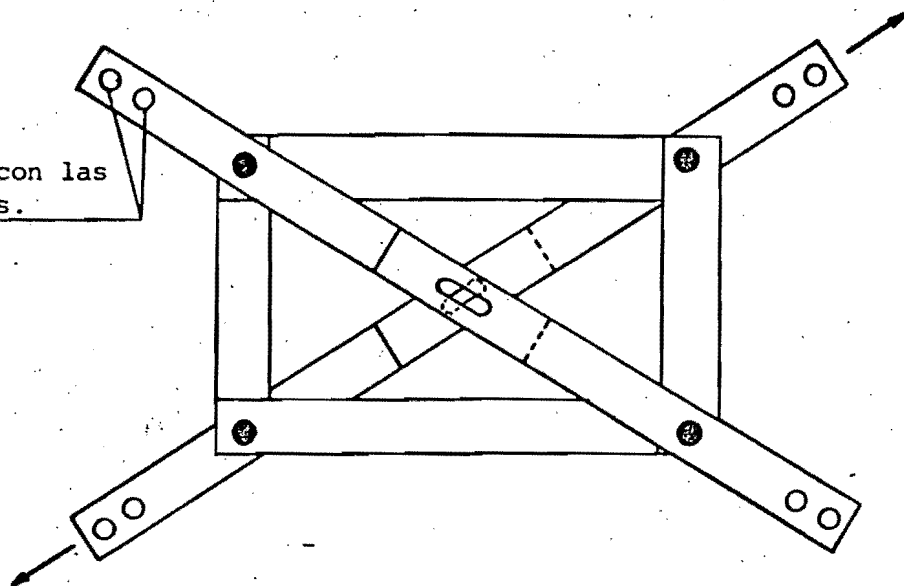
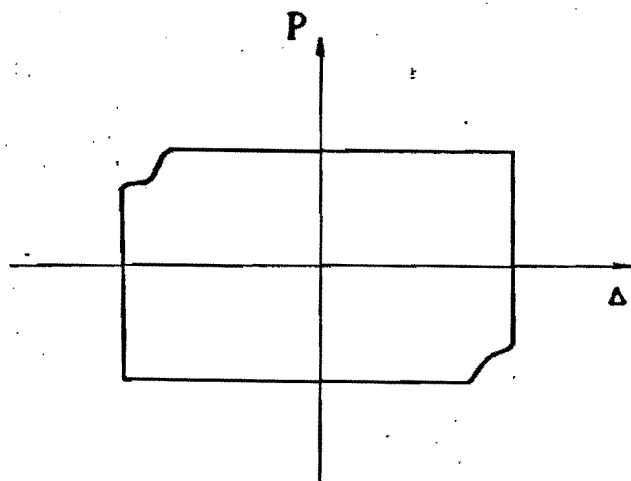
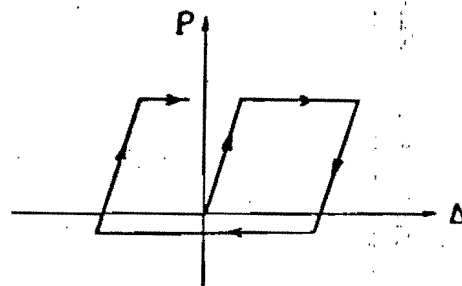
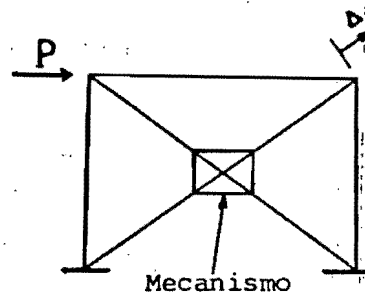


Fig. 4. Mecanismo de disipación de energía por fricción.



Dispositivo solo



Formando parte de un marco

Fig. 5. Lazos de histéresis cuando el mecanismo se prueba solo y cuando forma parte de un marco.

3.- CARGA ÓPTIMA DE DESLIZAMIENTO

La energía disipada en el amortiguador, es proporcional al producto de la carga por el deslizamiento relativo de las placas. Si esta carga es tal que, la diferencia entre la energía ingresada y la energía disipada es mínima, se dice que se trata de la carga óptima de deslizamiento.

Si la carga es baja, debido a que existe poca presión del perno que une las placas, la energía de disipación por fricción es casi nula; por otro lado, si la carga es muy alta, debido a una gran presión del perno, la energía de disipación es nula por no existir deslizamiento de las placas. Entre estos dos extremos, existe un valor intermedio de la carga de deslizamiento, a la que se le llama óptima, para la cual, la energía disipada por fricción es máxima; es posible que este valor de carga sea independiente del movimiento sísmico y quizás se pueda considerar más bien como una propiedad estructural, según resultados adicionales que se han logrado con otros modelos, lo que se traduciría en una simplificación del procedimiento de diseño del mecanismo de fricción [2]. Estudios dinámicos paramétricos han mostrado que dicha carga óptima de deslizamiento, no afecta significativamente la respuesta sísmica, si se encuentra en un rango de $\pm 20\%$ [10].

Con el fin de determinar la carga óptima de deslizamiento del marco en estudio, se realizaron varios análisis dinámicos. Para ello, se utiliza el modelo simple que originalmente fue propuesto y usado por Pall [11], el mismo que considera un esfuerzo de fluencia ficticio de las diagonales de contraventeo, que corresponde al esfuerzo de tensión para el cual el mecanismo se desliza consumiendo energía. La carga de deslizamiento debe ser más baja que la carga de fluencia real de la diagonal, para que el mecanismo se active antes de que ningún elemento estructural empiece a incursionar en el rango inelástico. Se considera que todos los dispositivos en el marco están ajustados para que se deslicen bajo la misma carga, es decir, una distribución uniforme del amortiguamiento.

Se analiza los dos casos siguientes: cuando la señal es reducida a 75% y escalado el tiempo para lograr un período

dominante del terreno de 0.414 seg y cuando la señal se escala para lograr un periodo dominante del terreno de 0.268 seg.

En la fig.6 se puede ver los resultados obtenidos para el primer caso. Se muestra la envolvente de momentos en columnas y vigas de varios niveles, para valores de carga de deslizamiento del dispositivo que van de 0. a 8. Ton, que representa la región elástica de las diagonales. Los valores de momentos que se obtienen para la carga de deslizamiento nula, corresponden a la respuesta del marco sin diagonales. Se aprecia claramente la efectividad de los dispositivos de fricción, al lograr disminuir notablemente la respuesta del marco, conforme se va aumentando la carga de deslizamiento del dispositivo; se obtiene una estabilización de los momentos con una muy pequeña variación, cuando la carga es mayor a 4. Ton; se nota en este tramo, un trabajo en conjunto del marco, pues la envolvente del primer nivel está muy cerca de la envolvente del último.

Para el caso en el que el sismo se escala de tal manera que se logra un periodo dominante del terreno de 0.268 seg, la envolvente de momentos de varios niveles en vigas y columnas, se muestra en la fig.7. Nuevamente se obtiene poca variación de la respuesta, cuando la carga es mayor a 4. Ton, aunque los momentos del primer nivel no son tan cercanos a los del último nivel, como sucedió en el caso anterior. Estas gráficas sugieren que posiblemente el comportamiento del marco puede ser más uniforme, si en lugar de tener un amortiguador en cada nivel con el mismo valor de carga de deslizamiento, se tiene con diferentes valores de cargas, de tal manera que exista un mayor amortiguamiento en los pisos inferiores, que en este marco son los más solicitados. Esto conduciría a la idea de optimización de la colocación de amortiguadores, para lograr disminuir la respuesta sísmica y sacar mejor provecho de la disipación de energía que se puede conseguir.

En base a este estudio realizado, para los análisis siguientes se tomará el valor de 5.45 Ton como carga de deslizamiento del dispositivo en cada uno de los niveles, similar al usado en la Ref.1.

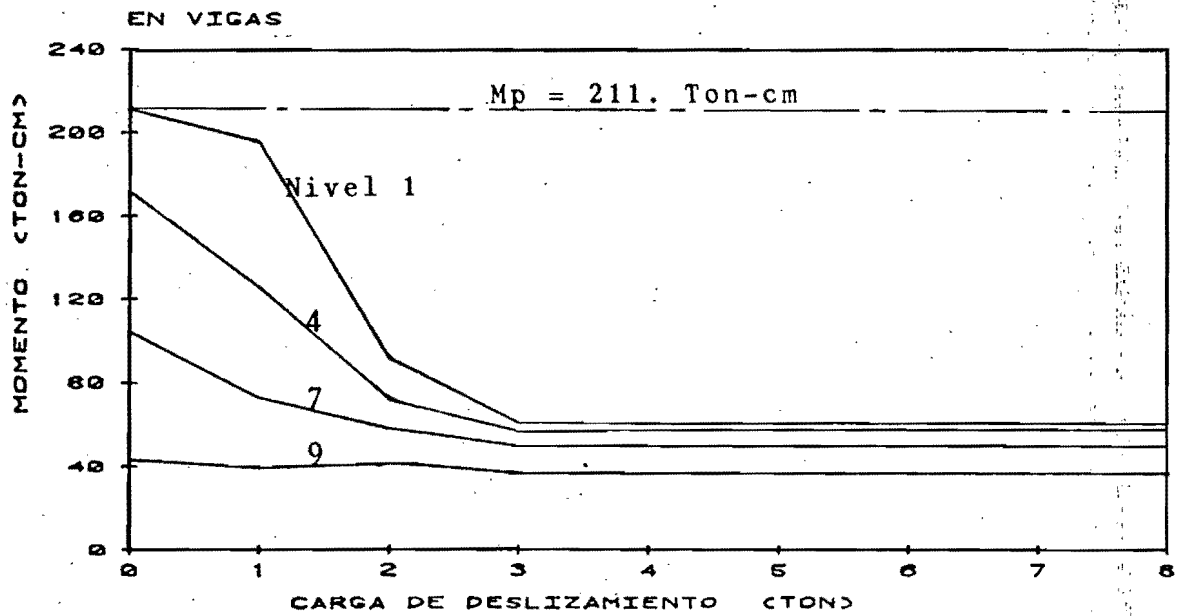
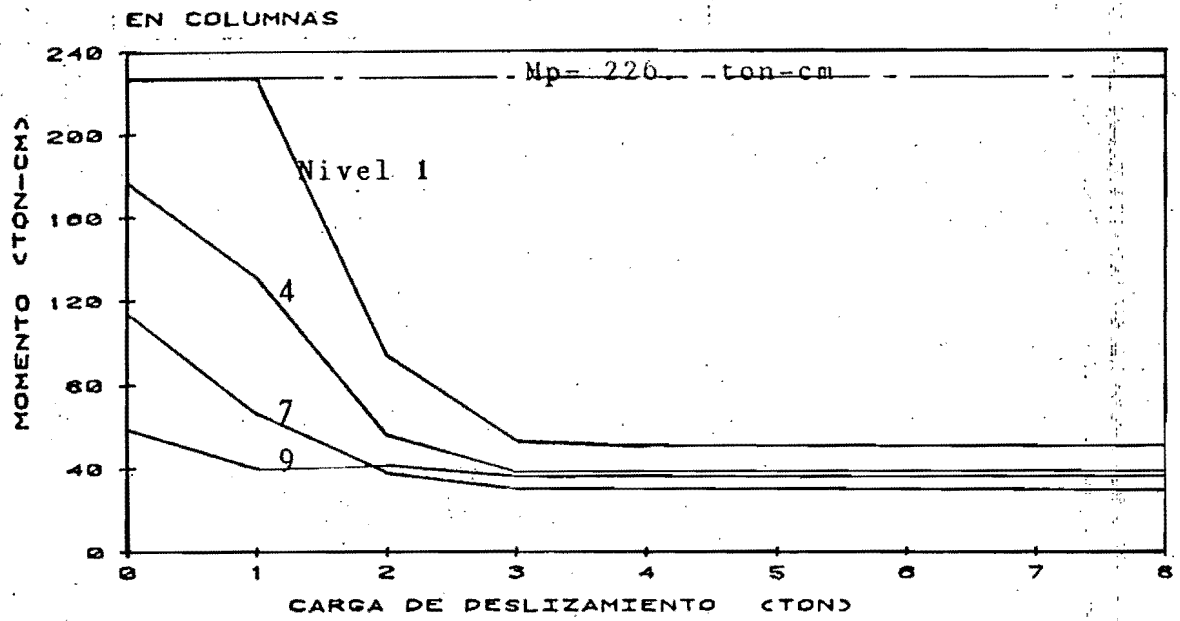


Fig. 6. Envolventes de momento en columnas y vigas, para un periodo dominante del suelo de 0.414 seg.

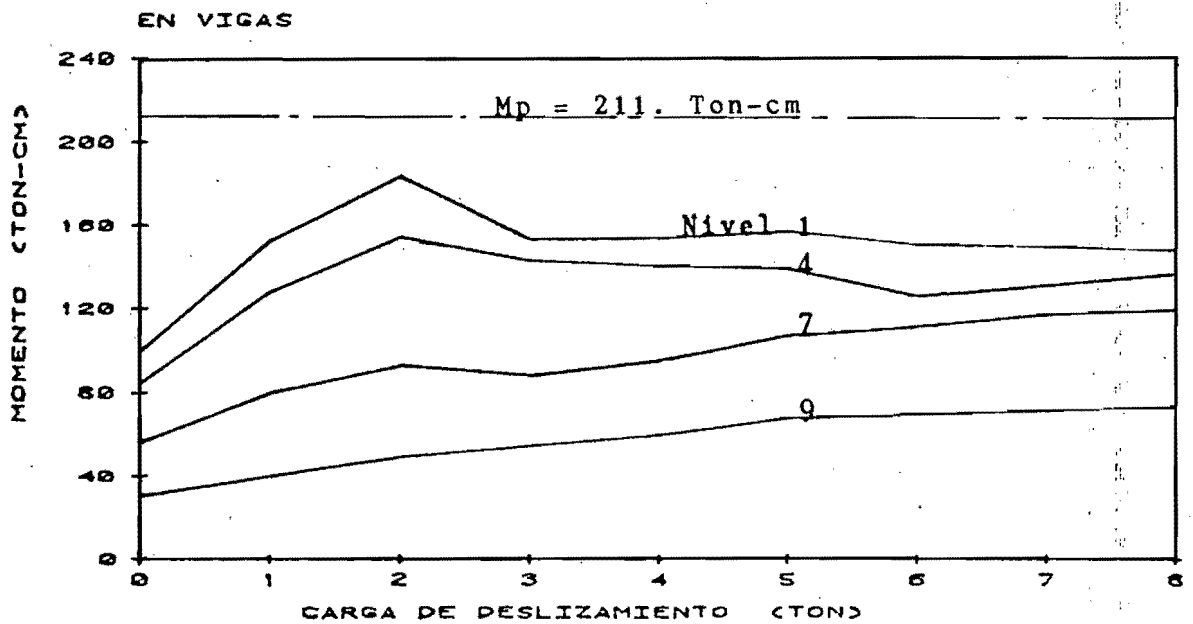
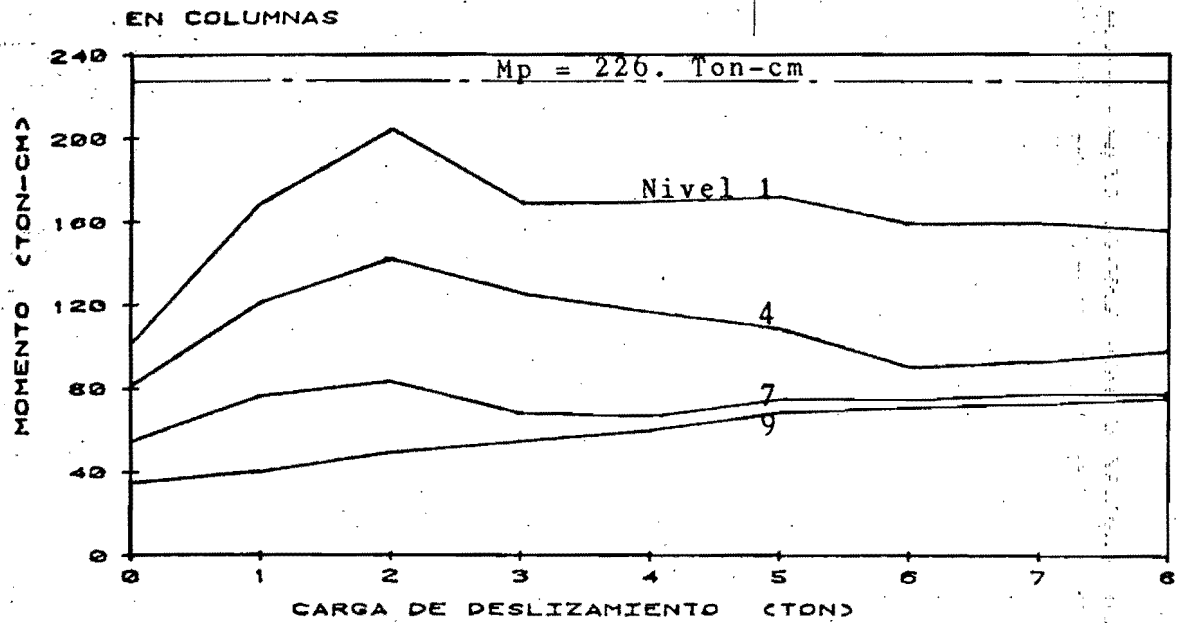


Fig. 7. Envolventes de momento en columnas y vigas, para un período dominante del suelo de 0.268 seg.

4.- ACELEROGRAMA

4.1 Señal considerada

La señal sísmica utilizada en este trabajo es la componente horizontal SCT-EW 19-SEP-85. Tiene una duración total de 180. seg (registrado con un intervalo de tiempo de 0.02 seg) y un valor máximo de aceleración de 167.92 gals; su periodo dominante es de 2.0 seg, que corresponde a un terreno de tipo arcilloso (suelo blando de la ciudad de México) [7].

Debido a la gran duración del temblor, que para un análisis inelástico es demasiado costoso e impráctico, se ha tomado únicamente parte de la señal original para usarlo en este trabajo. Ese tramo escogido inicia a los 36 y termina a los 73 seg, es decir, tiene una duración de 37. seg y representa aproximadamente un 90.% de toda la energía que el sismo induce sobre la estructura. El criterio usado para esa elección, fue el de Intensidad de Arias, que es un indicador del daño potencial que el sismo puede producir en un sitio [4].

En la fig.8 se muestra la señal del sismo en forma completa que fue registrada en la estación SCT [7] y el tramo que se ha tomado como acelerograma para este trabajo.

4.2 Espectros de respuesta

Con el objeto de ver qué tan diferente puede ser la señal reducida respecto a la completa, se compara a continuación los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento. Se va a considerar los valores máximos y los periodos dominantes del terreno.

De la señal completa ya se tienen calculados los espectros en la Ref.7, de donde se toman para aquí reproducirlos junto con los que se van a obtener de la señal reducida. El autor modificó el programa DUHAMEL

que está incluido en la Ref.12, para conseguir, a través de un barrido de los periodos, los valores de aceleración respectivos que corresponden a la gráfica del espectro. Dicho programa, calcula la respuesta en el dominio del tiempo y evalúa la integral que existe en el proceso, utilizando el método incremental, que es una solución analítica exacta, puesto que se considera la excitación como segmentos lineales [12].

Los espectros de la señal reducida se dibujan para los periodos comprendidos entre 0.5 y 5.0 seg (que es el tramo más significativo) con un intervalo de 0.1 seg, para valores de amortiguamiento de 0., 2. y 5.% del crítico; las unidades que se usan son : cm y seg.

En la fig.9 se muestran los espectros de aceleración absoluta. Se puede ver que la forma misma de las dos gráficas, son muy semejantes y que ambas tienen el mismo periodo dominante del terreno, que es de 2.0 seg. En cuanto a las ordenadas máximas de las curvas que corresponden a 0., 2. y 5.% de amortiguamiento, se obtienen los valores de 3540., 1624. y 978. cm/seg² para la señal completa, contra los calculados 3270., 1554. y 1005. de la señal reducida, respectivamente, que representa en el peor de los casos una diferencia de 7.6% y que se considera un error aceptable, pues está dentro de los límites que se pueden permitir en la ingeniería.

Análogamente se muestran los espectros de velocidad y desplazamiento relativo en la fig.10, donde nuevamente se ven muy similares los resultados obtenidos con la señal reducida respecto a los que se tienen con la señal completa.

Con esto se puede decir que, al haber reducido el sismo de 180. a 37. seg con un determinado criterio, se ha logrado un ahorro considerable en tiempo de máquina, que es un factor importante en la investigación cuando se realiza análisis inelástico paso a paso. Se ha comprobado que el periodo dominante sigue siendo el mismo que el original, con lo que ya se conoce los factores de escalación del tiempo del acelerograma, para lograr otros periodos dominantes del terreno que se van a usar más adelante.

SISMO	GRO-MICH	REGISTRO	SCT1850919B1.T	CORRECCION
DATOS	IDEI	ESTA	SCT1	METODO CALTECH.
FECHA	850919	INST	03-144	FILTRO 0.050 0.055 23.0 25.0
HORA	13:19:23	COMP	(N90W)	ΔT 0.020
EPIC	17.680 102.470	HORA	13:19:22	MAX ACEL <u>158.40</u> <u>-167.92</u>
M	8.1	DIR	179.99	MAX VEL 57.42 -60.50
H	33	DIST	400	MAX DESP 21.94 -19.07

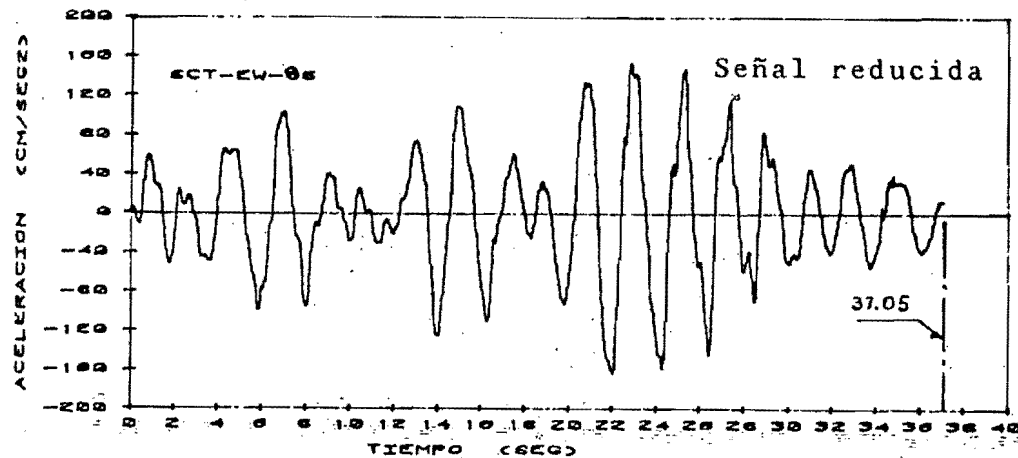
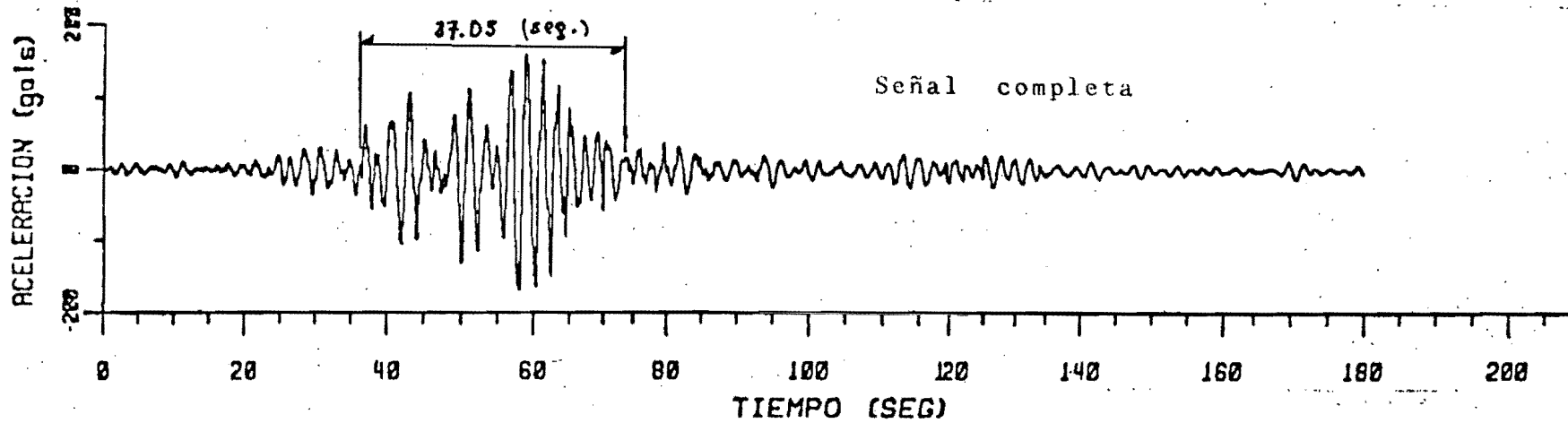


Fig. 8. Tramo del acelerograma SCT EW-85 que se ha tomado para el análisis.

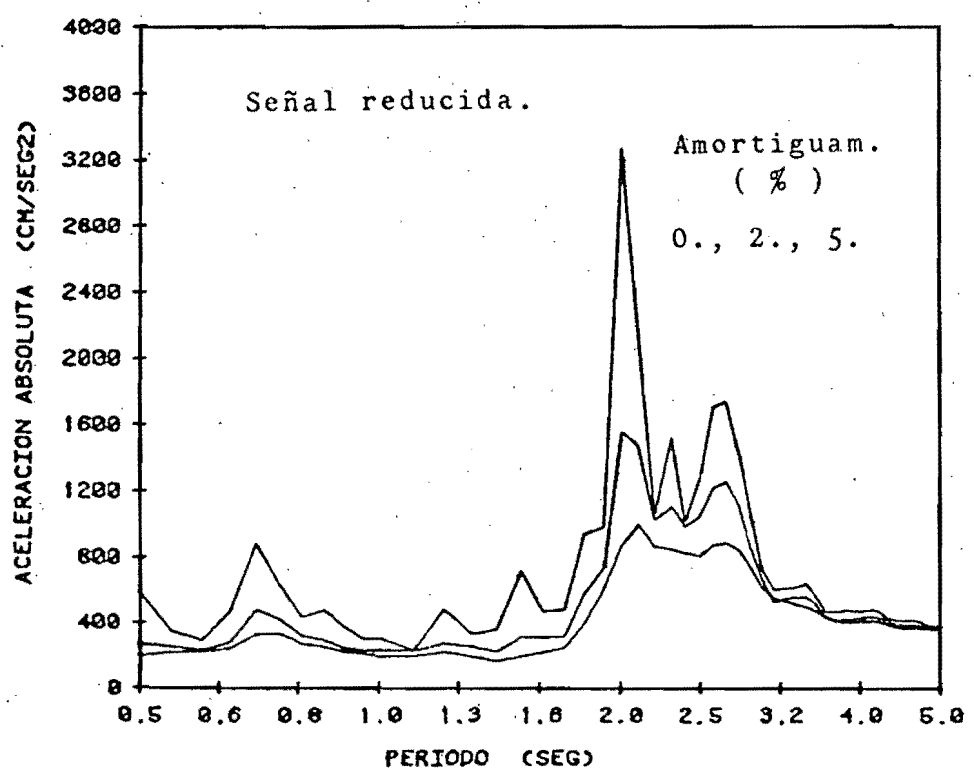
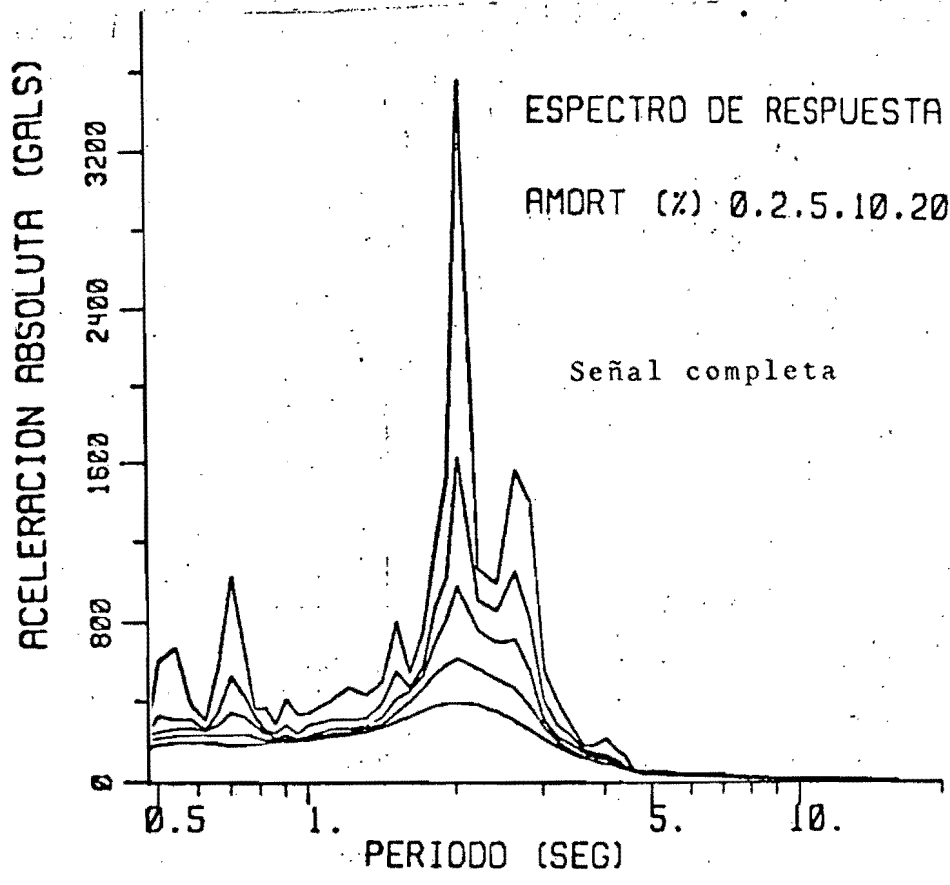
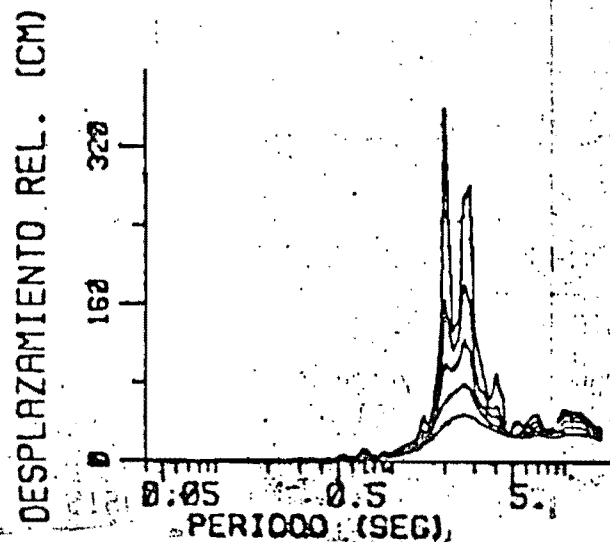
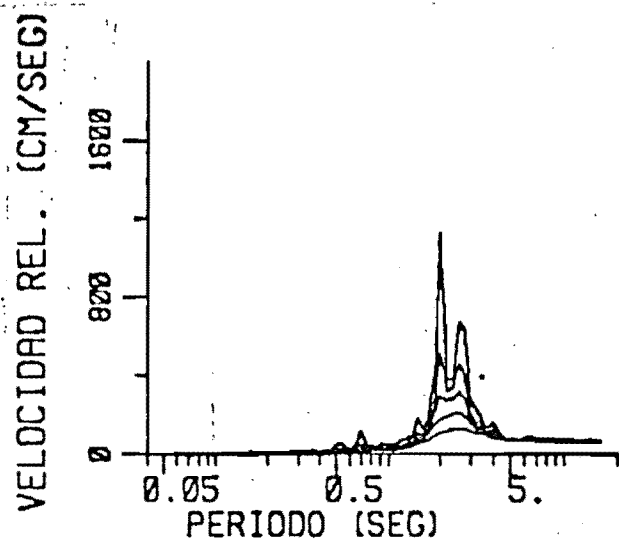
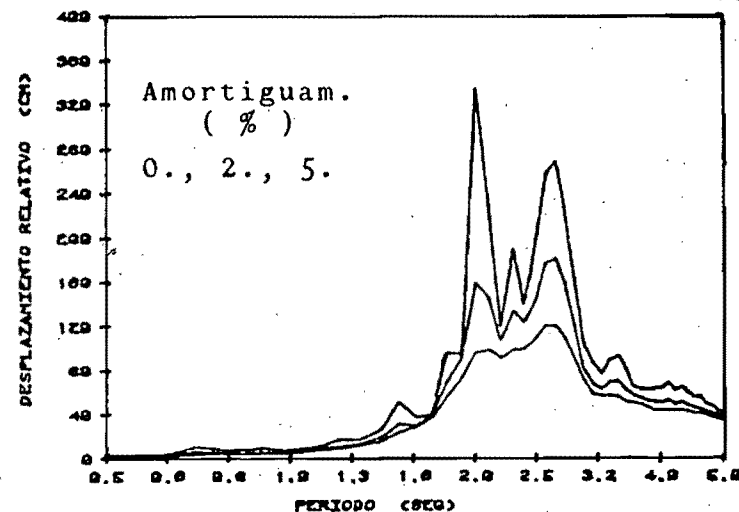
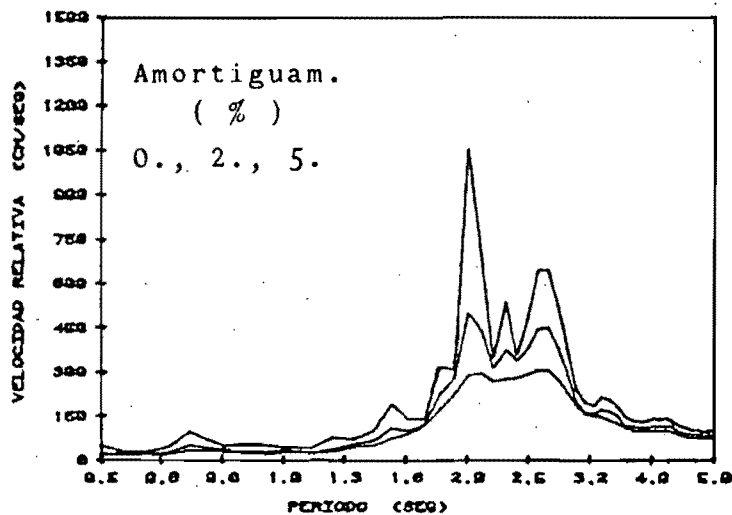


Fig. 9. Espectros de aceleración absoluta, obtenidos con la señal completa y con la señal reducida.

ESPECTRO DE RESPUESTA AMORT (%) 0.2.5.10.20



Señal Completa



Señal Reducida

Fig. 10. Espectros de velocidad y desplazamiento relativo, obtenidos con la señal completa y con la señal reducida.

5.- RESPUESTA SISMICA

La manera en la que responde el marco contraventeado (con o sin dispositivos) ante la excitación sísmica, se compara a través de envolventes de desplazamiento y de acciones en las barras, así como también con historias de desplazamiento horizontal de tres niveles distintos. Se pone énfasis en la carga axial que llega a los apoyos, para saber si el uso de amortiguadores hace que el diseño de la cimentación sea más económico, sin sacrificar su buen comportamiento y su seguridad.

En la Ref.1 se observa la diferencia de respuesta que se obtiene cuando se vibra al modelo sin diagonales, comparado con el que tiene amortiguadores. En el presente trabajo se pone más atención en analizar la respuesta sísmica del marco contraventeado, con y sin amortiguadores.

La señal sísmica se escala en el tiempo, para obtener tres periodos dominantes distintos, que son: 2.0, 0.414 y 0.268 seg, que corresponden a la señal original y a los periodos fundamentales del marco sin y con diagonales, respectivamente. Esto se hace con el fin de tratar de no dar ventaja a ninguno de los marcos, pues si se vibran en un solo periodo y se obtiene resultados, el un marco podría estar en una situación más peligrosa que el otro que tiene un periodo fundamental diferente. Para los tres casos que a continuación se analizan, la amplitud de la aceleración permanece constante, es decir, no se escala la aceleración de la señal sísmica.

5.1 Para un periodo dominante de 2.0 seg

Este caso corresponde a una vibración en la que se usa la señal original del sismo, es decir, el acelerograma que fue registrado en la estación SCT, el cual tiene un espectro con un pico muy considerable para el periodo de 2.0 seg, como ya se vió antes y que se puede apreciar en la fig.9. Esto significa que en el análisis no se escala el tiempo ni la amplitud de la aceleración.

La respuesta sísmica que se obtiene bajo esta condición de movimiento se muestra en la fig.11, en la que se ha dibujado la historia de desplazamiento horizontal de tres niveles: superior, intermedio e inferior, para el modelo que tiene dispositivos y para el que no tiene diagonales.

El desplazamiento máximo del último nivel es menor a 2.0 cm y está dentro del permitido por las normas de construcción, pues un valor límite de 6 por mil representa un desplazamiento horizontal total de 5.1 cm para dicho nivel. Si se toma en cuenta como desplazamiento relativo de entrepiso, en ningún caso se supera el máximo permitido, pues para el mismo valor de porcentaje anterior, representa por ejemplo para el primer nivel, un desplazamiento de 0.7 cm.

El periodo con el que vibran los dos marcos, es el del sismo, ya que las estructuras se dejan llevar por el movimiento del terreno, debido a que existe una gran diferencia con los periodos fundamentales de ambos casos, lo que hace que la respuesta sea muy pequeña, pues está muy lejos de que se pueda producir la resonancia. Ninguna sección de vigas y columnas ingresa en el rango inelástico, notándose que todavía existe una capacidad adicional de resistencia muy considerable hasta que suceda la primera fluencia. En la fig.12 se reproduce de la Ref.1, la envolvente de cortante, momento en columnas y vigas que resulta para esta vibración, en la que la respuesta del marco que no tiene diagonales es mayor.

5.2 Para un periodo dominante de 0.414 seg

Este periodo dominante (que se logra escalando el tiempo del acelerograma) coincide exactamente con el fundamental del marco sin diagonales, lo que significa que existe la condición de resonancia para dicho marco, mientras que para el que tiene dispositivos esta forma de vibrar del terreno, no es crítica. En la fig.13 se muestra la historia de desplazamiento horizontal de tres niveles, en la que se puede apreciar la notable diferencia de respuesta que existe entre las dos estructuras. Mientras que la una no pudo resistir el ataque sísmico ya que sucedió el colapso por giros excesivos en varios nudos (la máquina suspendió automáticamente la ejecución del programa cuando habían transcurrido 5.36 de un total de 7.67 seg que dura la señal), la otra estructura no solo que pudo soportar el sismo completo, sino que logró inclusive mantenerse en el

intervalo elástico, quedándole aún una cierta resistencia adicional antes de que cualquiera de sus elementos ingrese en el intervalo inelástico.

Se puede ver que cada marco responde según sus propias características dinámicas, con periodos diferentes, pues los picos de ambas respuestas no coinciden entre sí. Existe una vibración en un predominante primer modo del marco sin diagonales, con una forma de respuesta que tiende a ser armónica, que finalmente termina en el colapso, mientras que para el otro marco la respuesta es un tanto irregular, con influencia de los modos superiores, lo que significa que existe diferencia entre su primer periodo fundamental y el periodo con el que lo están vibrando.

5.3 Para un periodo dominante de 0.268 seg

Este periodo de vibración coincide con el fundamental del marco con diagonales, por lo que está en la condición de resonancia y en peor situación que el marco sin diagonales, porque éste tiene un periodo que corresponde a un punto que está a la derecha del pico del espectro, fuera del intervalo peligroso.

En la fig.14 se presenta la historia de desplazamiento horizontal de esta vibración. En el correspondiente al nivel 9 se ha graficado la respuesta de los tres marcos: el que no tiene diagonales, el que sí los tiene y en el que se le ha incorporado los amortiguadores. Para el primero, como era de suponerse, la respuesta es menor que para los otros dos que responden más fuerte; mientras el uno permanece en el rango elástico, el otro con diagonales sufrió la fluencia de secciones de varias barras; encambio, el que tiene amortiguamiento adicional no ingresó en el rango inelástico, porque deslizaron los dispositivos de los cinco primeros niveles, consumiendo energía y evitando que fluyeran los elementos estructurales principales. Cabe mencionar que el deslizamiento de los dispositivos no constituye daño estructural. Un resumen de formación de rótulas plásticas, que no corresponden al mismo instante, se presenta en la fig.15.

La diferencia de respuesta entre los marcos contraventeados con y sin dispositivos, se nota aproximadamente a partir de los 3.5 seg que es en donde existe un consumo de energía en el uno por inelasticidad y en el otro por fricción, pues antes de este tiempo, los dos marcos se comportan iguales porque aún están en el

intervalo elástico.

El hecho de que la curva que representa al marco amortiguado se desfase respecto a la otra, significa que existe una ampliación del periodo de vibración por efecto del consumo de energía en el dispositivo, que se traduce en menor respuesta sísmica, porque se está alejando (hacia el lado derecho) del pico del espectro.

Una envolvente de desplazamiento horizontal se presenta en la fig.16, en donde se puede apreciar que aparentemente si se compara los marcos contraventeados, en los pisos superiores los amortiguadores si realizan su trabajo, pero en los inferiores como que mas bien es perjudicial; la respuesta del marco sin diagonales es pequeña porque su periodo fundamental es distinto al de vibración.

Sin embargo, si se observa la historia de fuerza axial de las columnas inferiores, exterior e interior, que viene en la fig.17, se concluye que la presencia de amortiguadores y su disipación de energía, contribuye a aumentar el periodo con el que vibra la estructura, lo que le hace mucho bien, pues la respuesta sísmica va disminuyendo.

En la fig.18 se muestra envolventes de fuerza axial para cada uno de los niveles de la línea de columna exterior e interior del marco, en donde se ve resultados parecidos a los anteriores en cuanto al buen comportamiento de los dispositivos, aunque la diferencia se esperaba que fuera más notable.

Con la idea de ver cuánto puede mejorar la respuesta del marco con amortiguamiento adicional, se escala la amplitud de la aceleración en 25.% y 100.%, puesto que los dispositivos trabajan y consumen más energía cuando el sismo es severo.

Para esta nueva condición de sismo con 25.% de incremento de aceleración, la historia de desplazamiento horizontal de la fig.19, indica que existe diferencia entre las dos respuestas a partir de 1.2 seg, es decir, mucho más antes que en el caso anterior en el que no hubo amplificación. En términos generales, la respuesta del marco amortiguado, tiene un periodo que va aumentando respecto al otro, que significa una amplitud menor en casi todo el intervalo del rango inelástico. La envolvente de desplazamiento horizontal de la fig.20

muestra que es perjudicial el hecho de haber colocado amortiguadores en el marco, porque se obtiene valores más grandes que del que no los tiene; esto es una consecuencia de que la carga de deslizamiento es menor que la carga real de fluencia, por lo que existe un efecto de cedencia de las diagonales, que hace que el desplazamiento horizontal aumente respecto al marco que no tiene los dispositivos. Este incremento de respuesta de desplazamiento es contrarrestado por toda la energía que se consume en los amortiguadores, que se nota cuando se compara la fuerza axial en las columnas, fig.21 y fig.22. Una envolvente de formación de rótulas plásticas se presenta en la fig.23, donde se ve que la mayor ventaja se encuentra en que el deslizamiento del dispositivo no constituye daño estructural.

Para la condición de un incremento de 100.% del sismo, el consumo de energía por fricción, no fue suficiente como para evitar que varias secciones de los elementos estructurales principales ingresaran en el rango inelástico, fig.24. Los dos marcos pudieron soportar el sismo, pero las deformaciones permanentes debido a la inelasticidad, seguramente son suficientes como para dejar a la estructura en muy mal estado y quizás fuera de servicio.

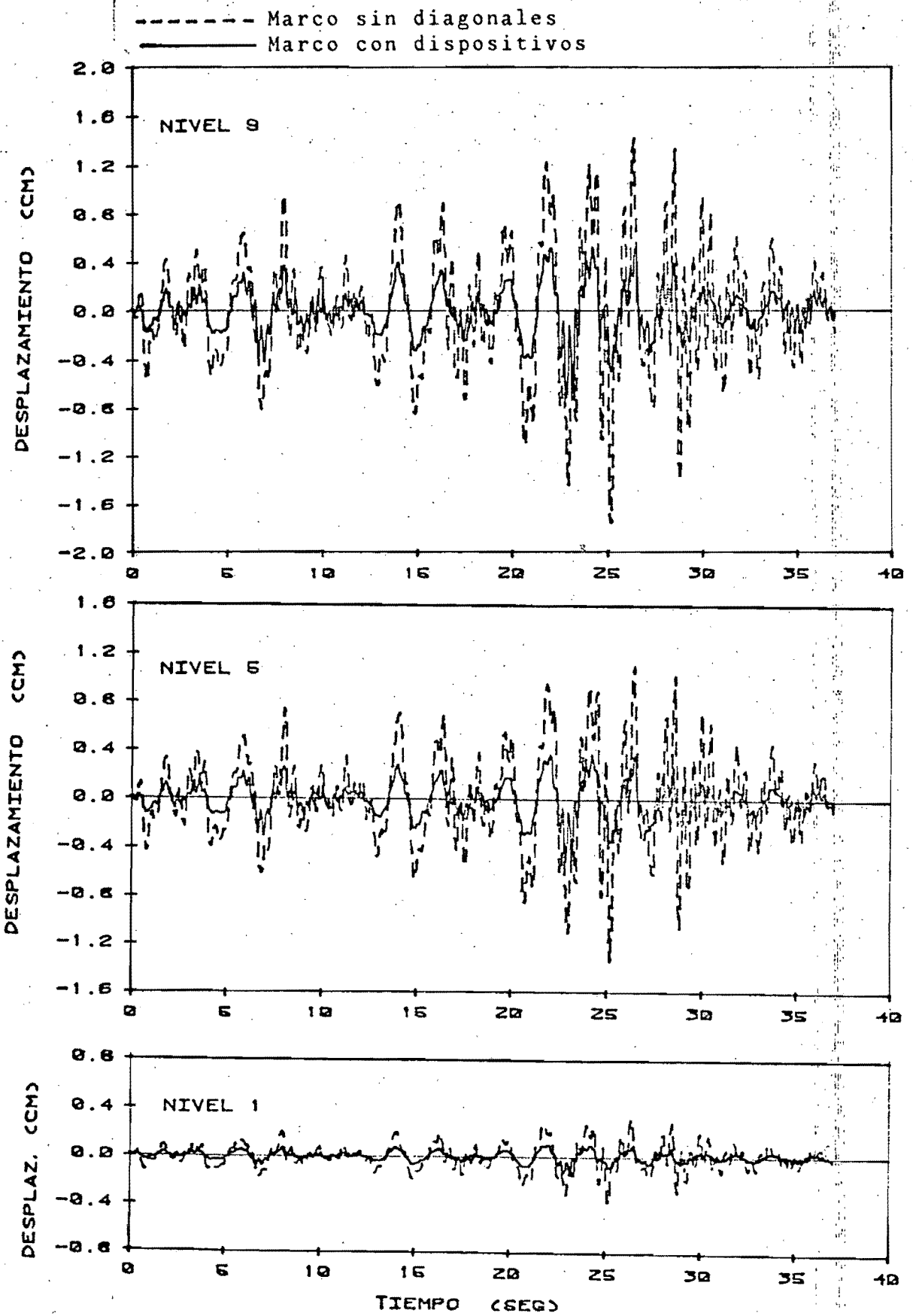
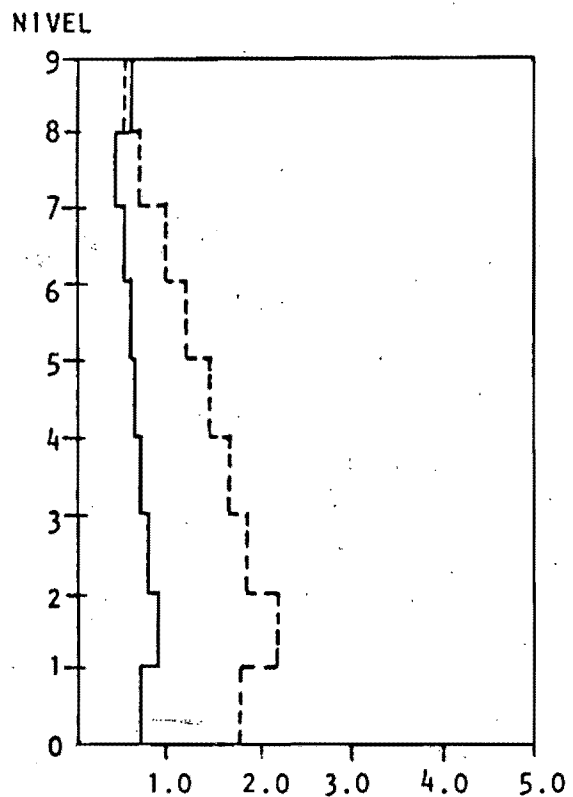
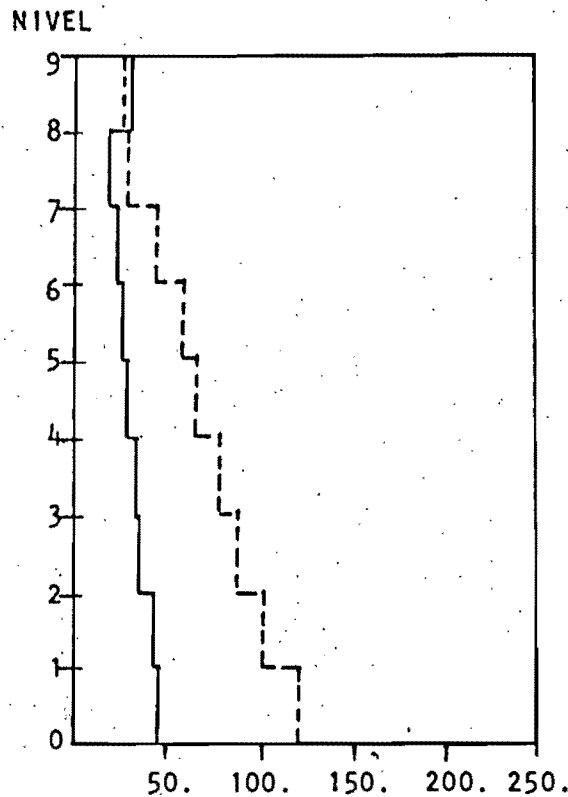


Fig. 11. Historia de desplazamiento horizontal de los niveles 9, 5 y 1, para un período dominante del suelo de 2. seg (sin escalar el tiempo ni la aceleración)

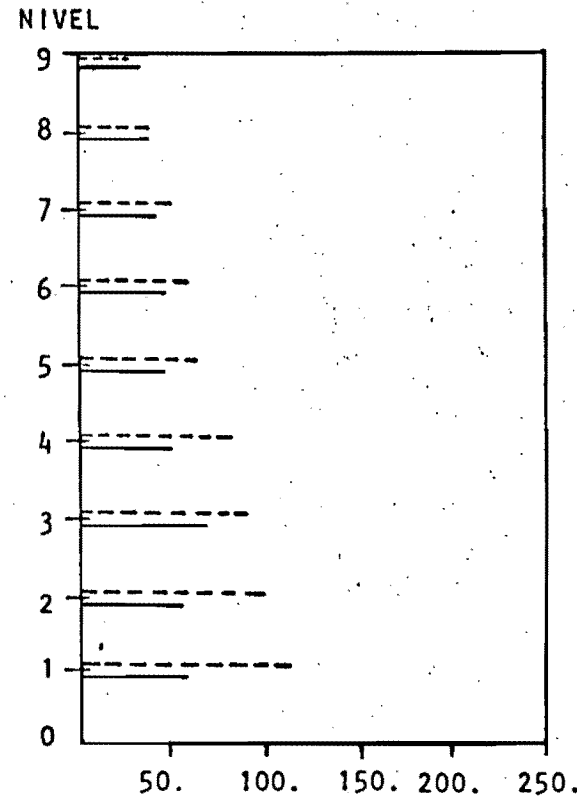
— Con dispositivo
 - - - Sin dispositivo



ENVOLVENTE DEL CORTANTE EN COLUMNAS (Ton.)



ENVOLVENTE DE MOMENTO EN COLUMNAS (T-cm)



ENVOLVENTE DE MOMENTO EN VIGAS (T-cm)

Fig. 12. Envolventes de cortante y momento sin escalar el tiempo ni la aceleración.

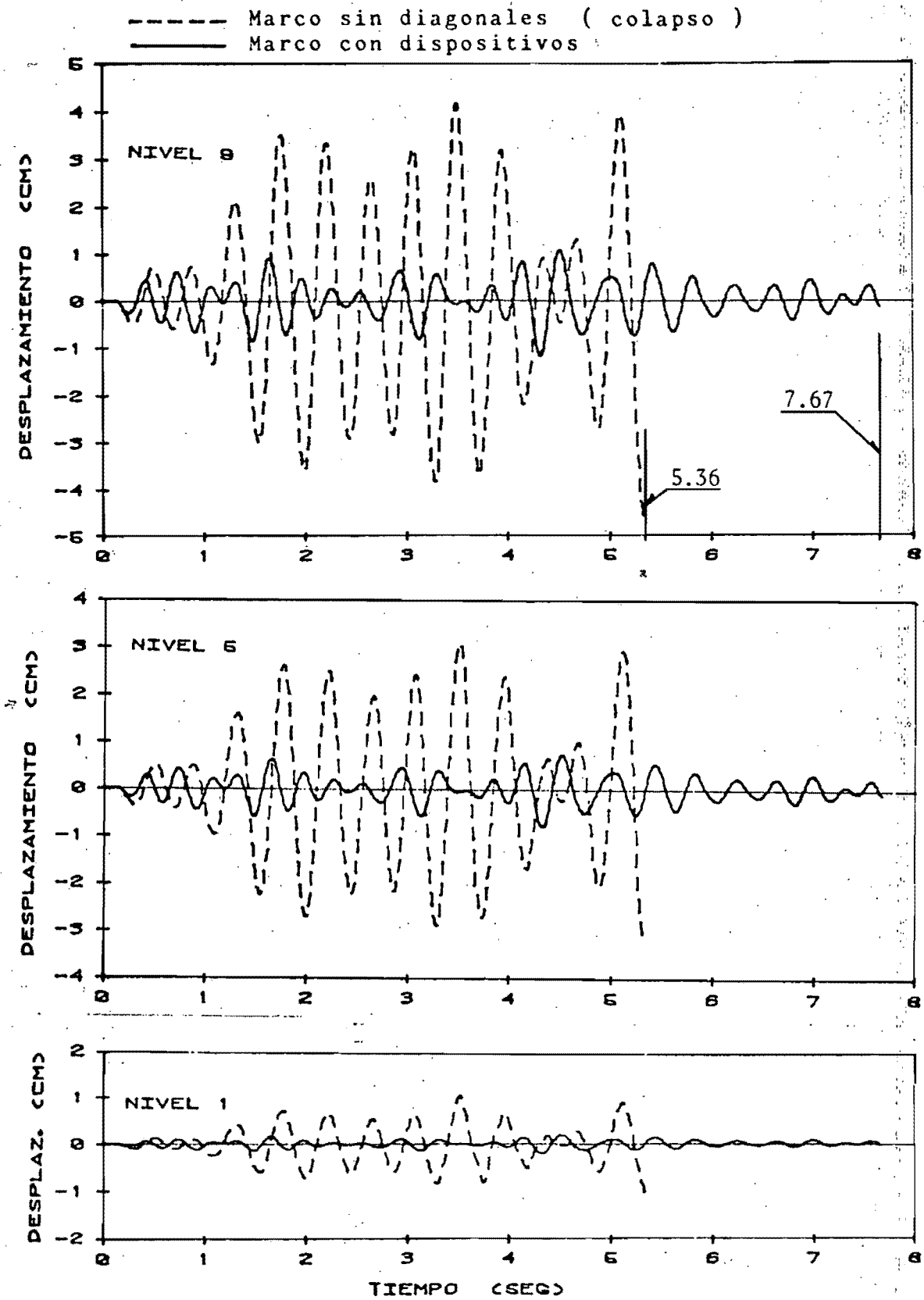


Fig. 13. Historia de desplazamiento horizontal de los niveles 9, 5 y 1, para un período dominante del suelo de 0.414 seg (resonancia del marco sin diagonales)

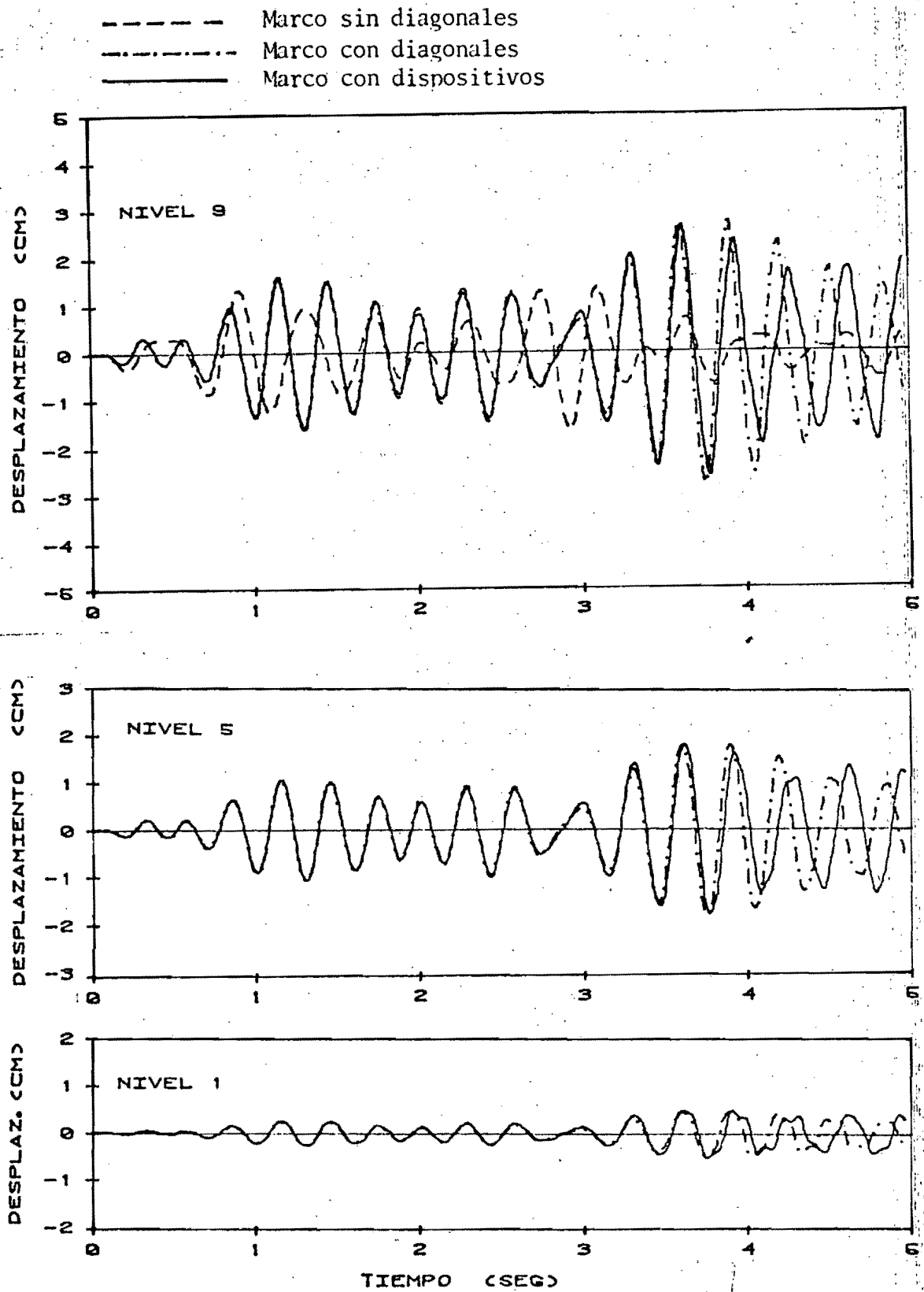
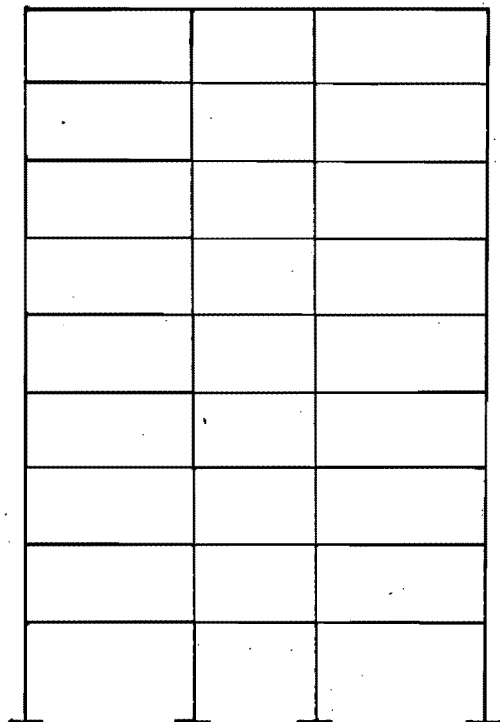


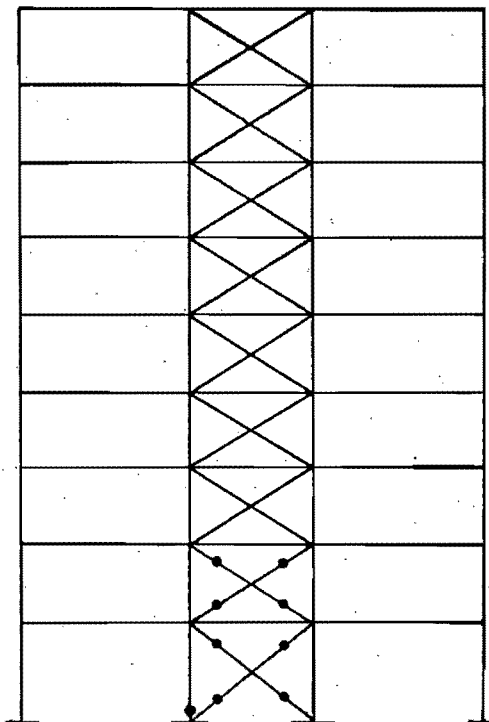
Fig. 14. Historia de desplazamiento horizontal de los niveles 9, 5 y 1, para un período dominante de 0.268 seg (resonancia del marco con diagonales)

MARCO SIN DIAGONALES



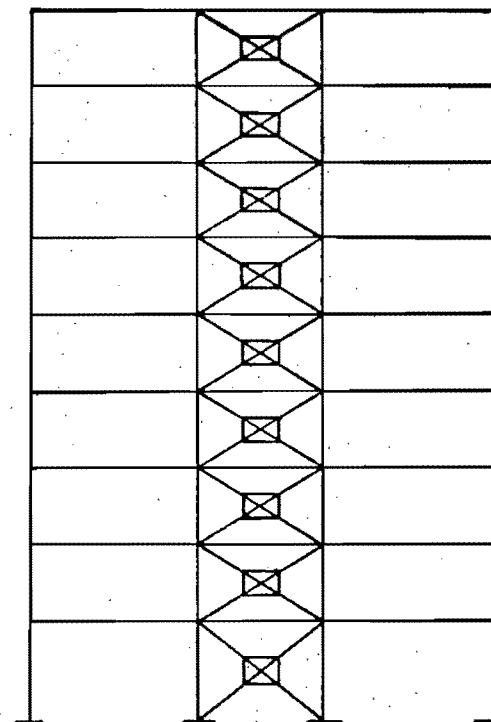
No hubo fluencia

MARCO CON DIAGONALES



fluyen las secciones

MARCO CON DISPOSITIVOS



Deslizaron los dispositivos de los 5 primeros niveles.

Fig. 15. Resumen de rótulas plásticas formadas, para un período dominante de 0.268 seg.

- Marco sin diagonales
- .-.- Marco con diagonales
- Marco con dispositivos

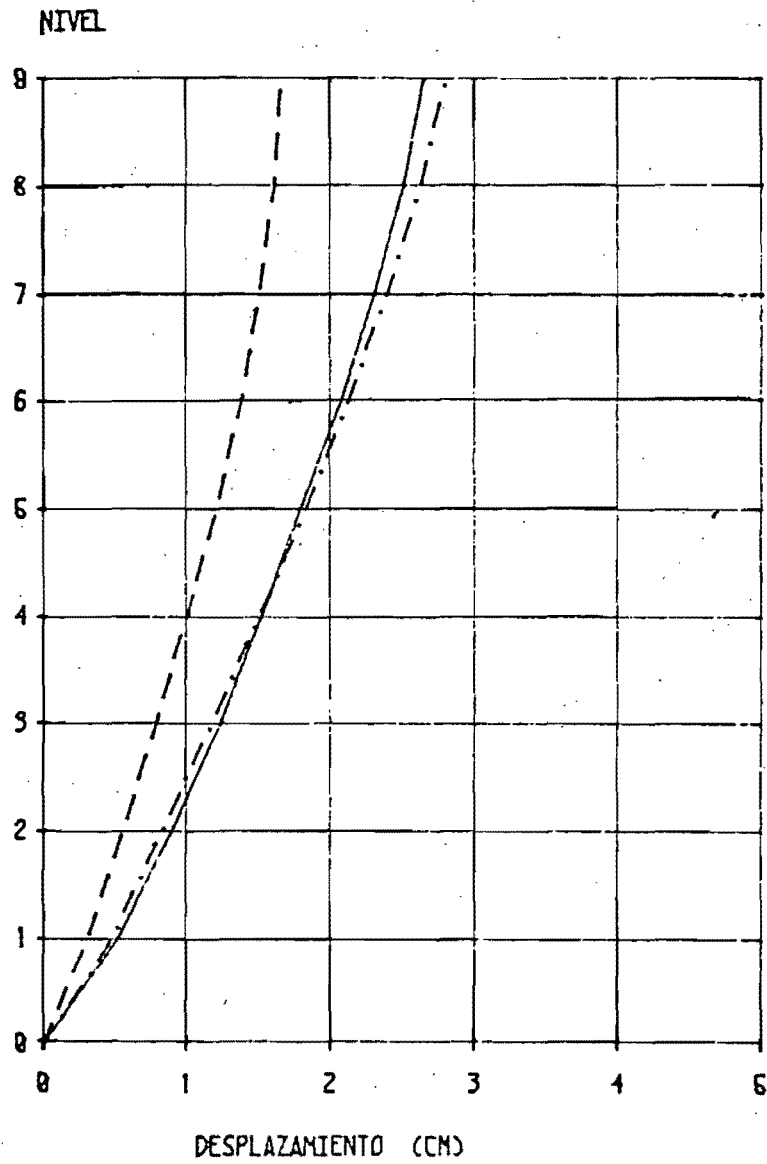


Fig. 16. Envolventes de desplazamiento horizontal para un período dominante de 0.268 seg.

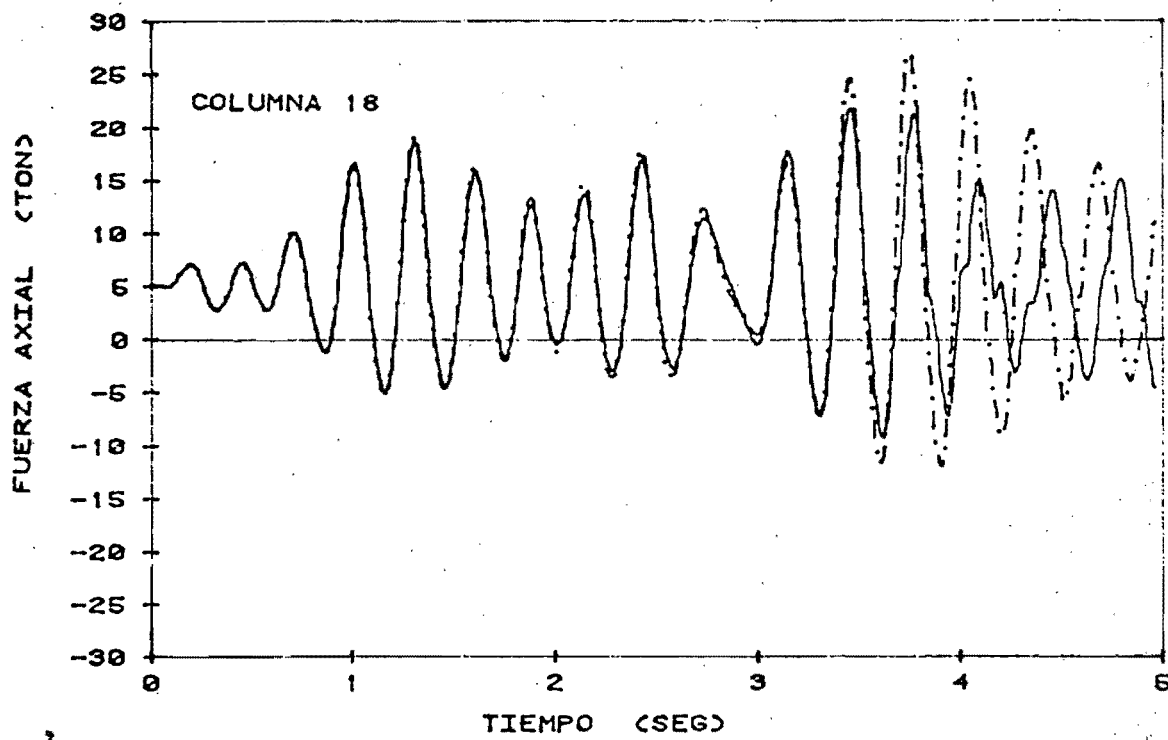
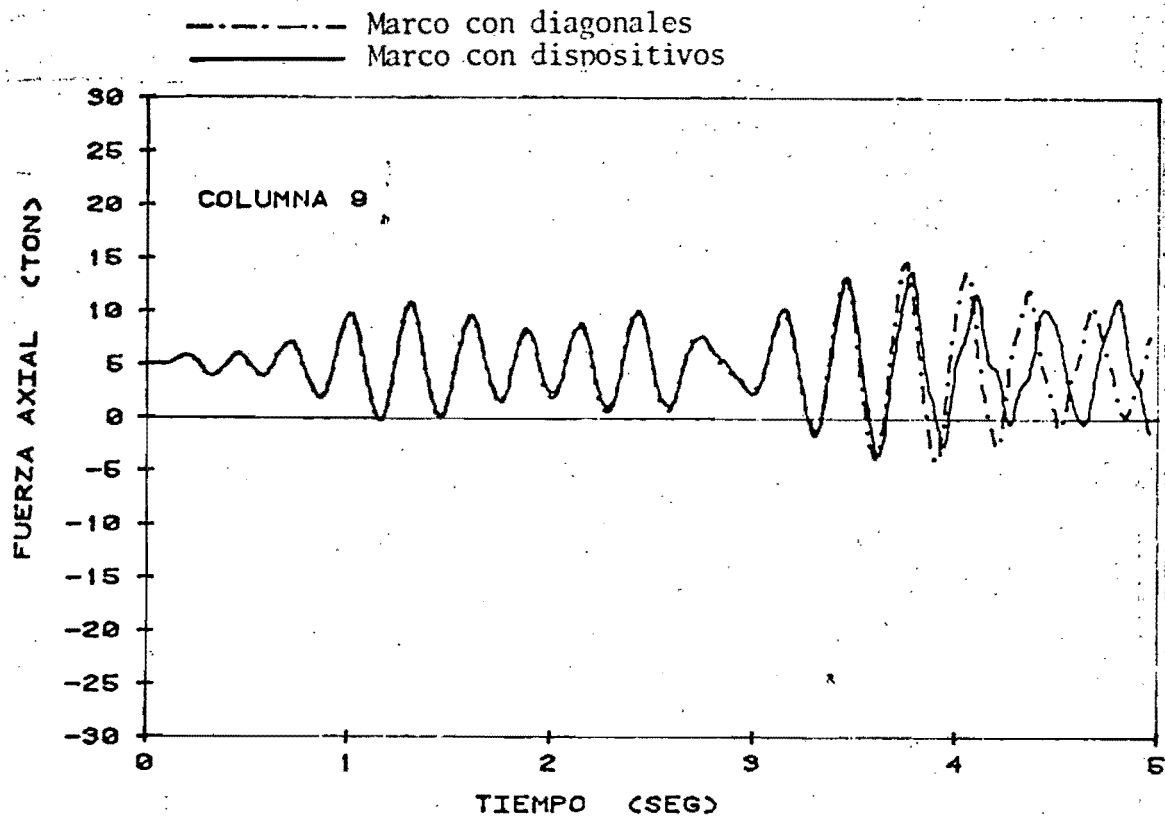


Fig. 17. Historia de fuerza axial de las columnas inferiores e interiores, para un período dominante de 0.268 seg.

- Marco sin diagonales
- .-.- Marco con diagonales
- Marco con dispositivos

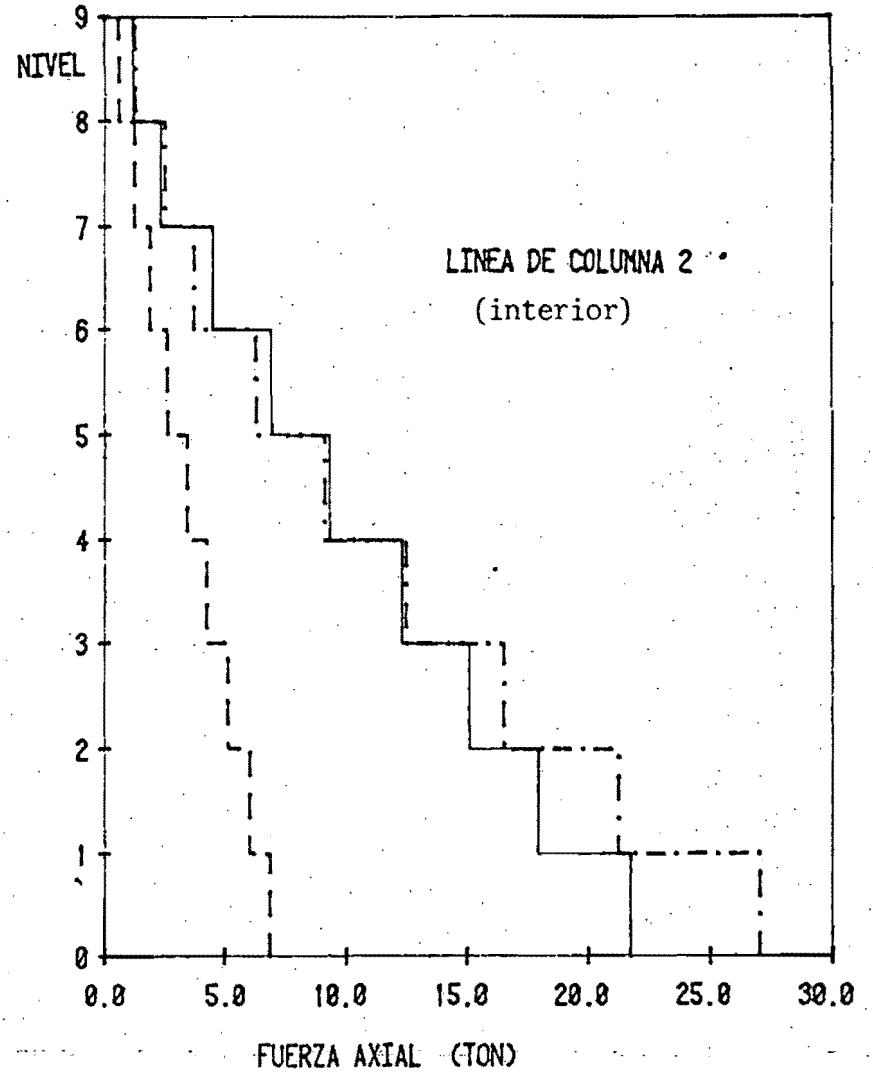
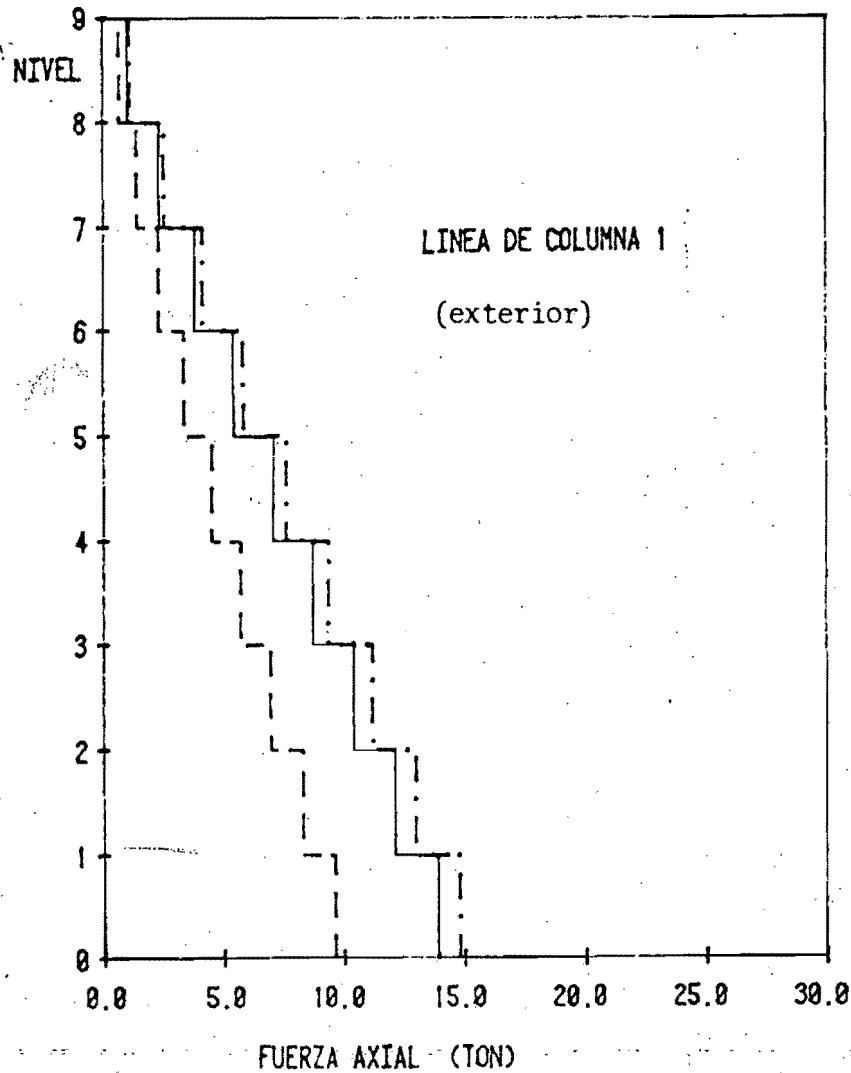


Fig. 18. Envolventes de fuerza axial para las líneas de columna exterior e interior, para un período dominante de 0.268 seg.

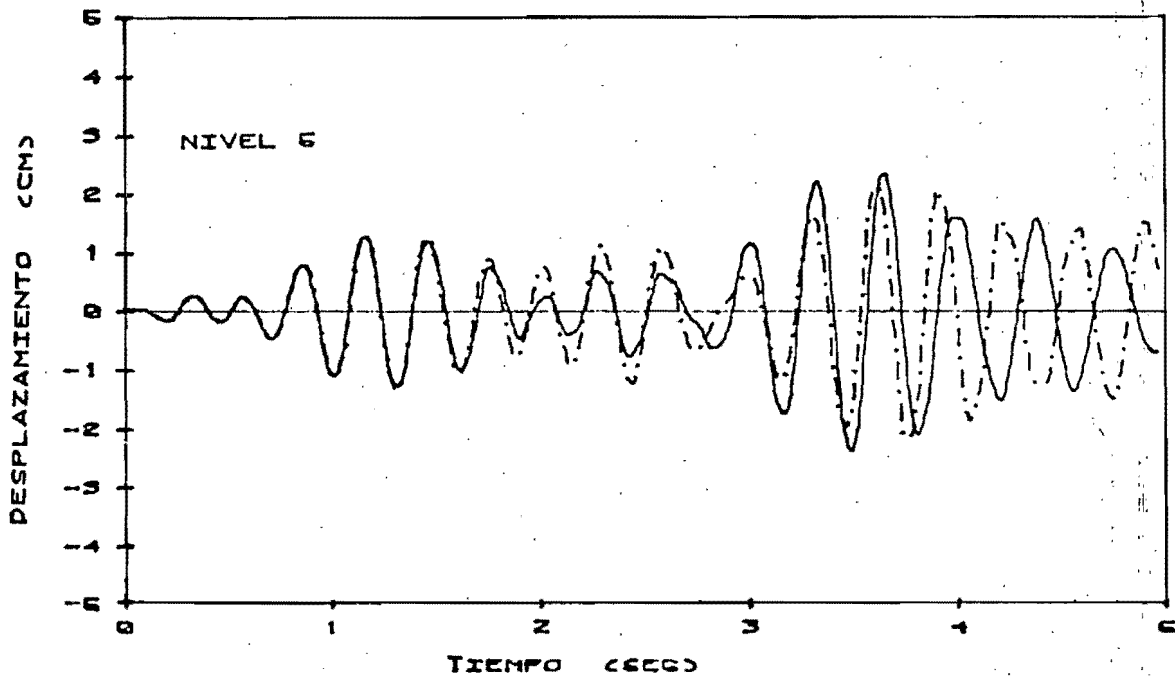
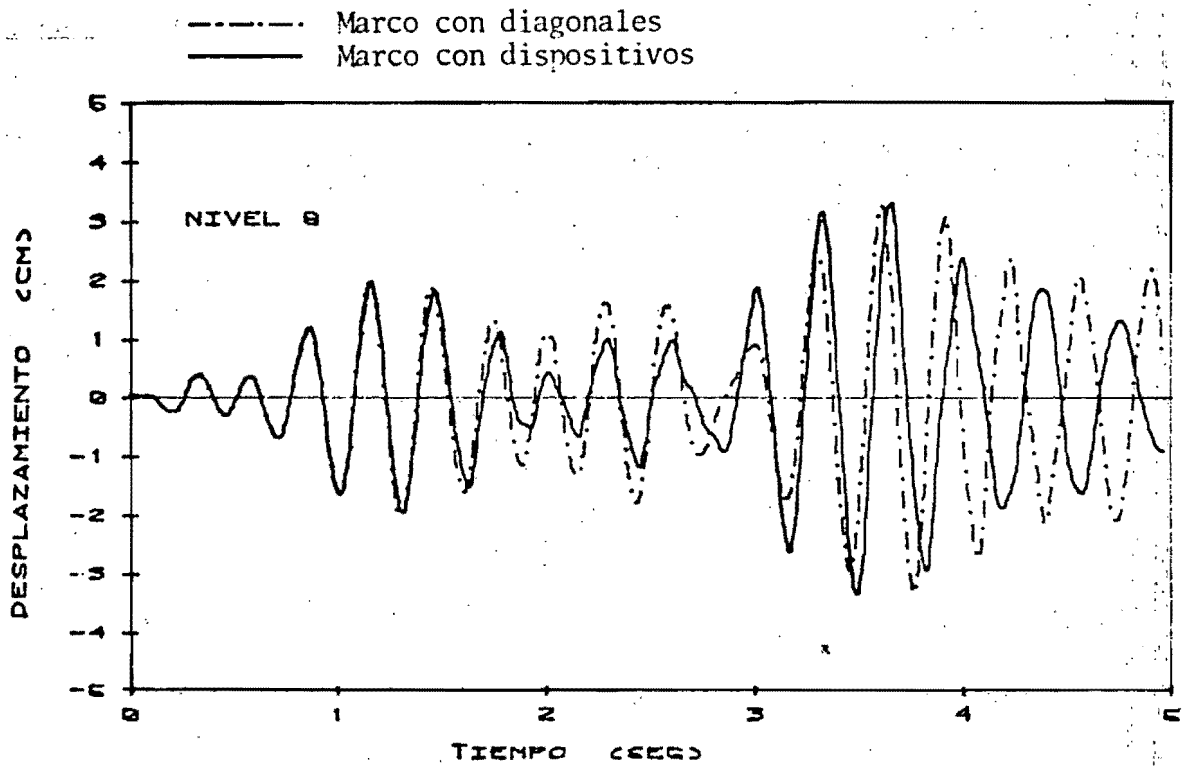


Fig. 19. Historia de desplazamiento horizontal de los niveles 9 y 5, para un período dominante de 0.268 seg y amplificado el sismo en 25.%

--- Marco con diagonales
— Marco con dispositivos

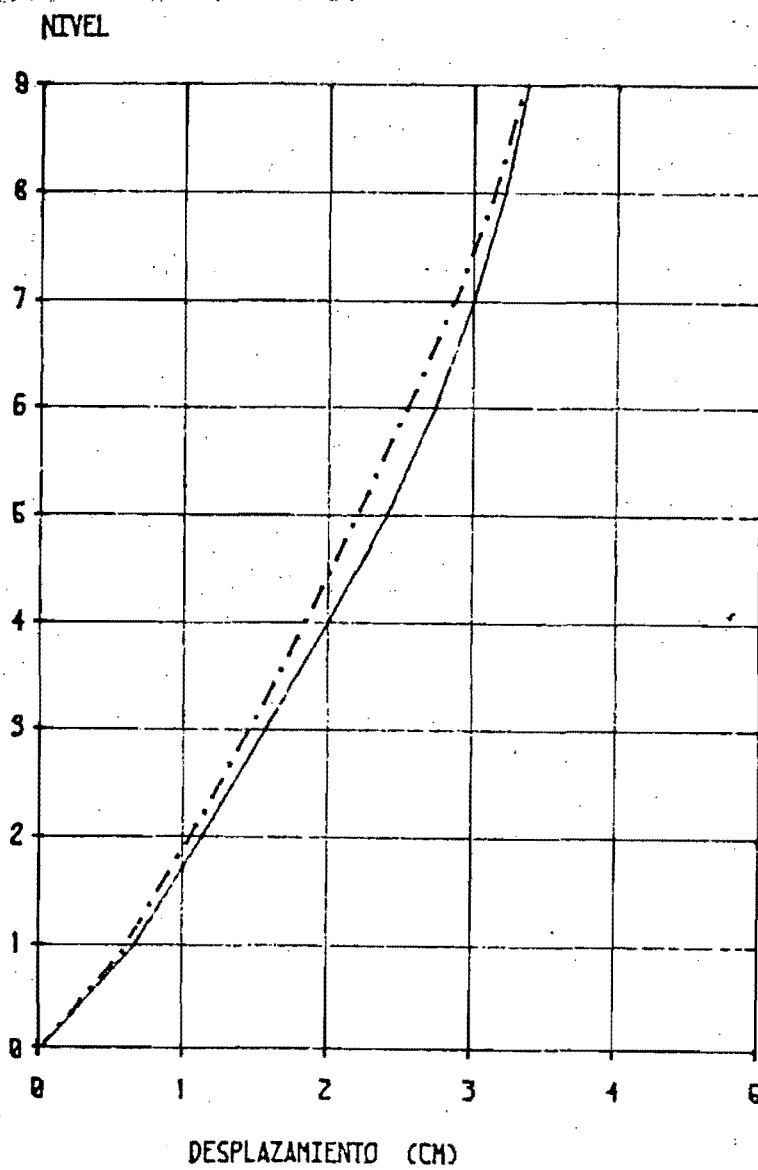


Fig. 20. Envolventes de desplazamiento horizontal para un período dominante de 0.268 seg y amplificado el sismo en 25.%.

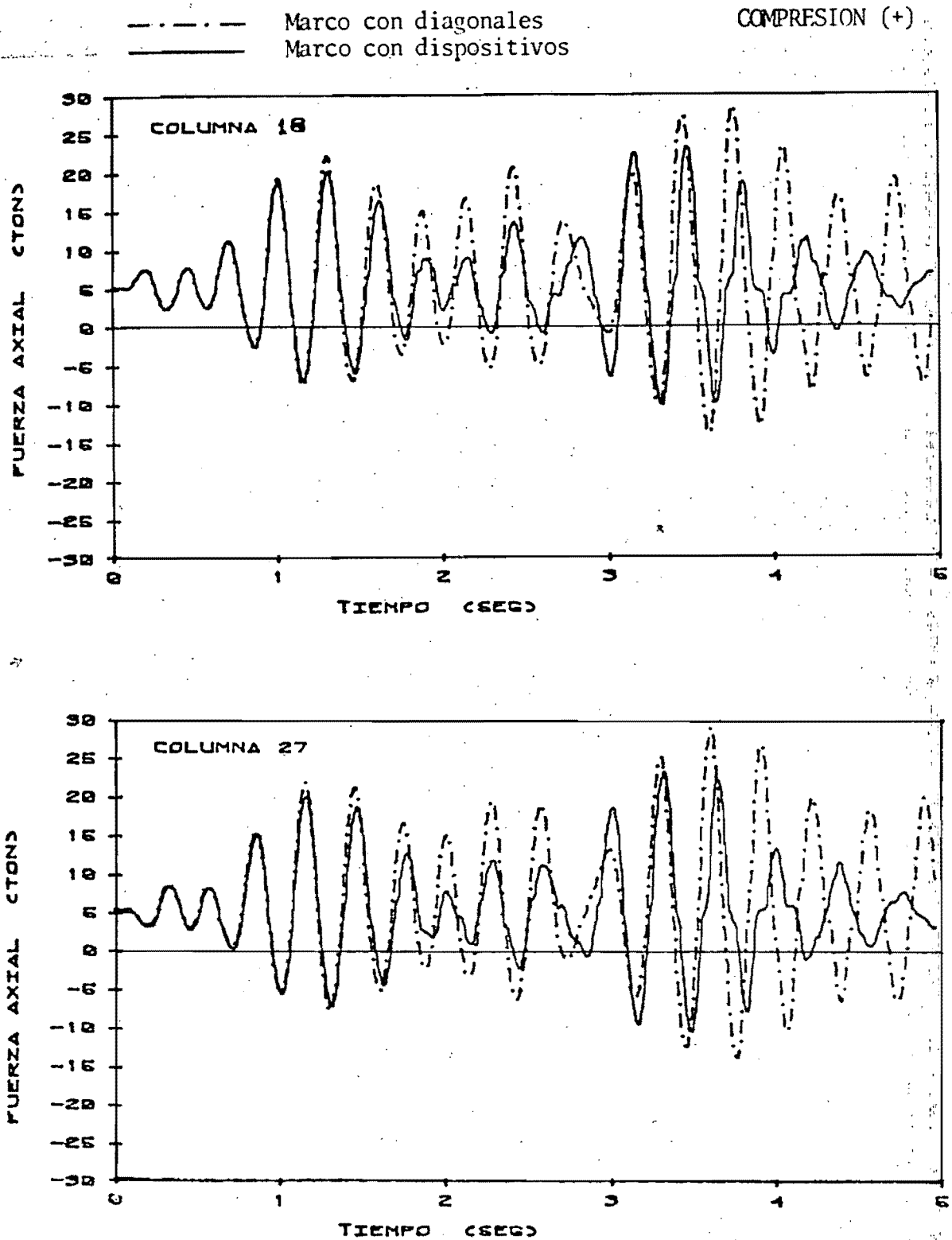


Fig. 21. Historia de fuerza axial en las columnas inferiores-externas, para un período dominante de 0.268 seg y amplificado el sismo en 25.%

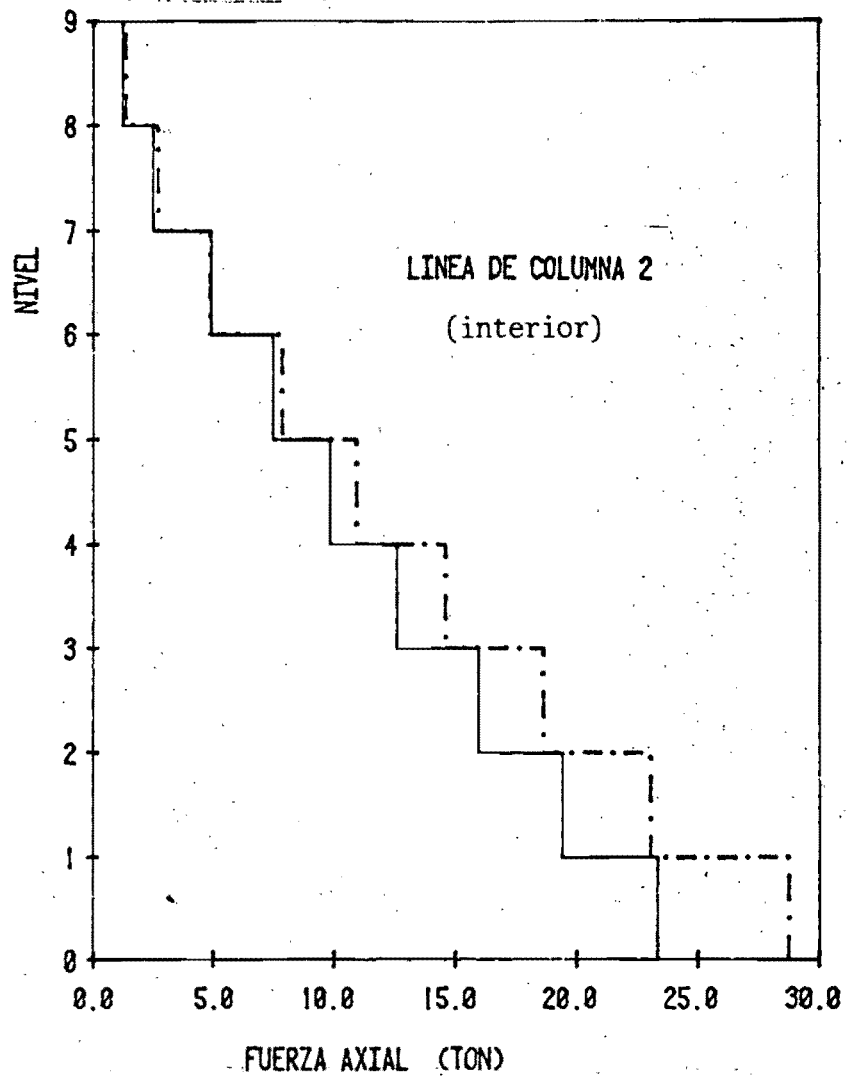
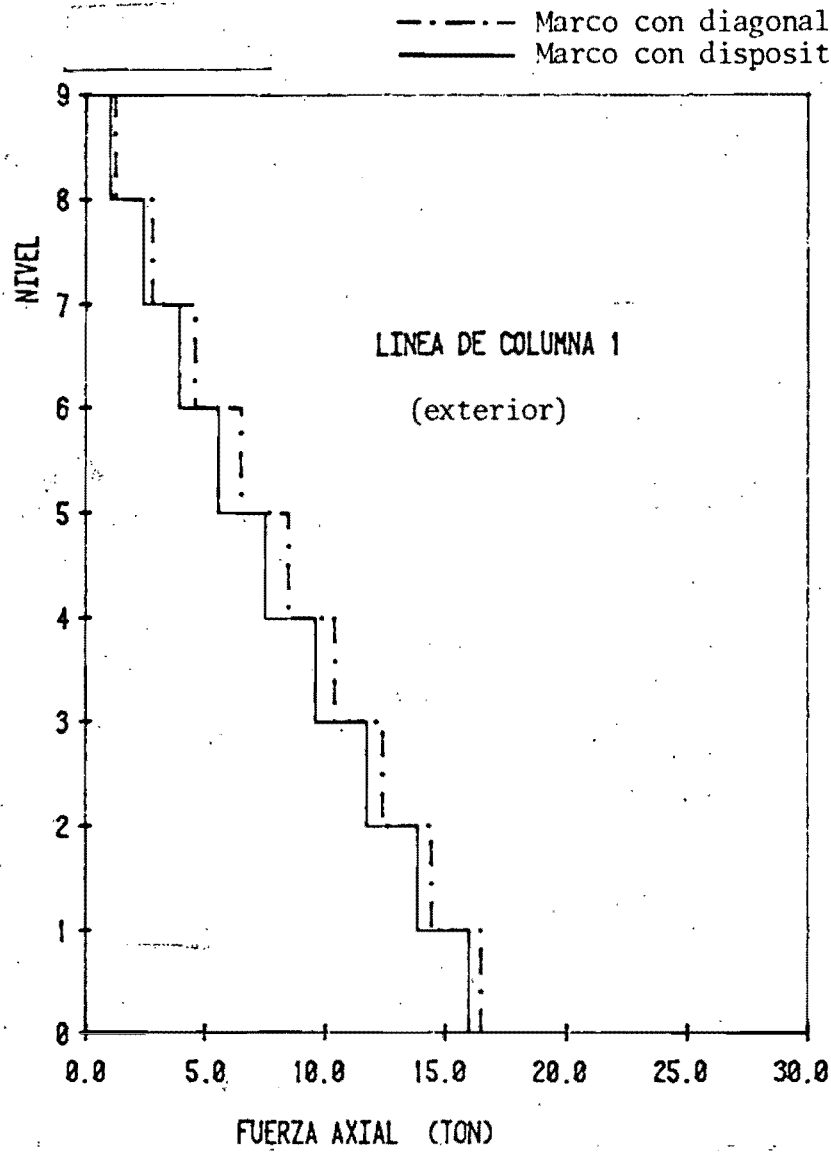


Fig. 22. Envolventes de fuerza axial para las líneas de columnas exterior e interior, para un período dominante de 0.268 seg y amplificado el sismo en 25.%

Deslizaron los dispositivos de los 6 primeros niveles.

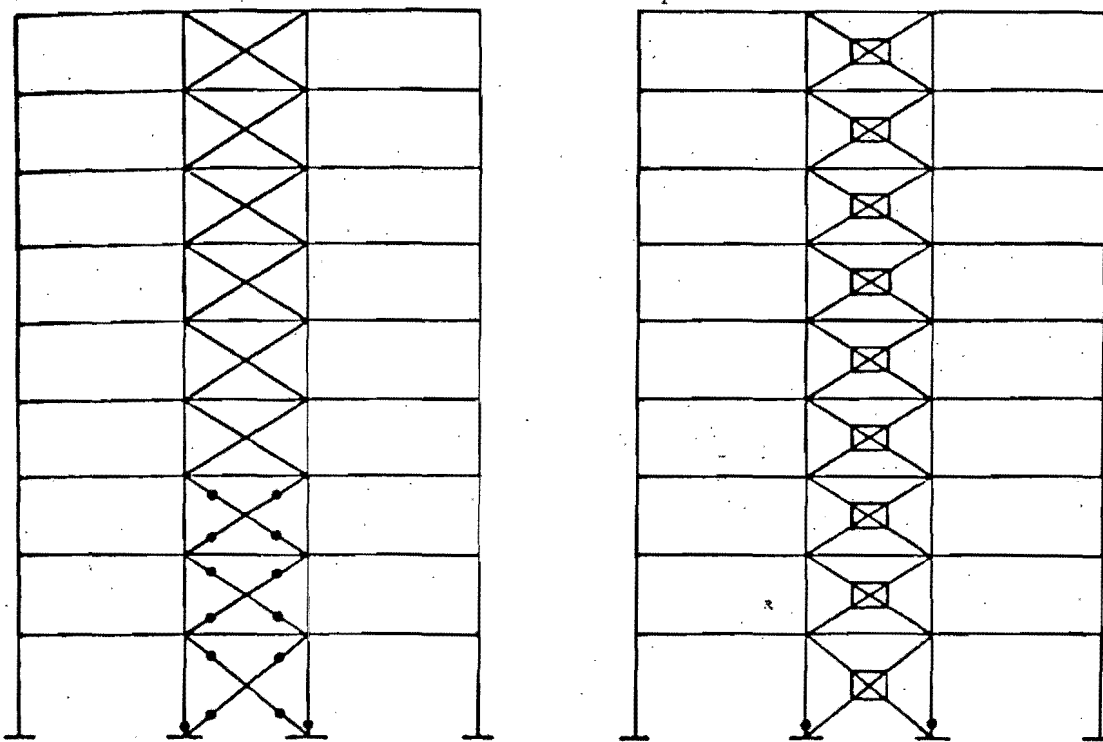


Fig. 23. Resumen de rótulas plásticas formadas para un período dominante de 0.268 seg y amplificado el sismo en 25.%

Deslizaron los dispositivos de los 7 primeros niveles

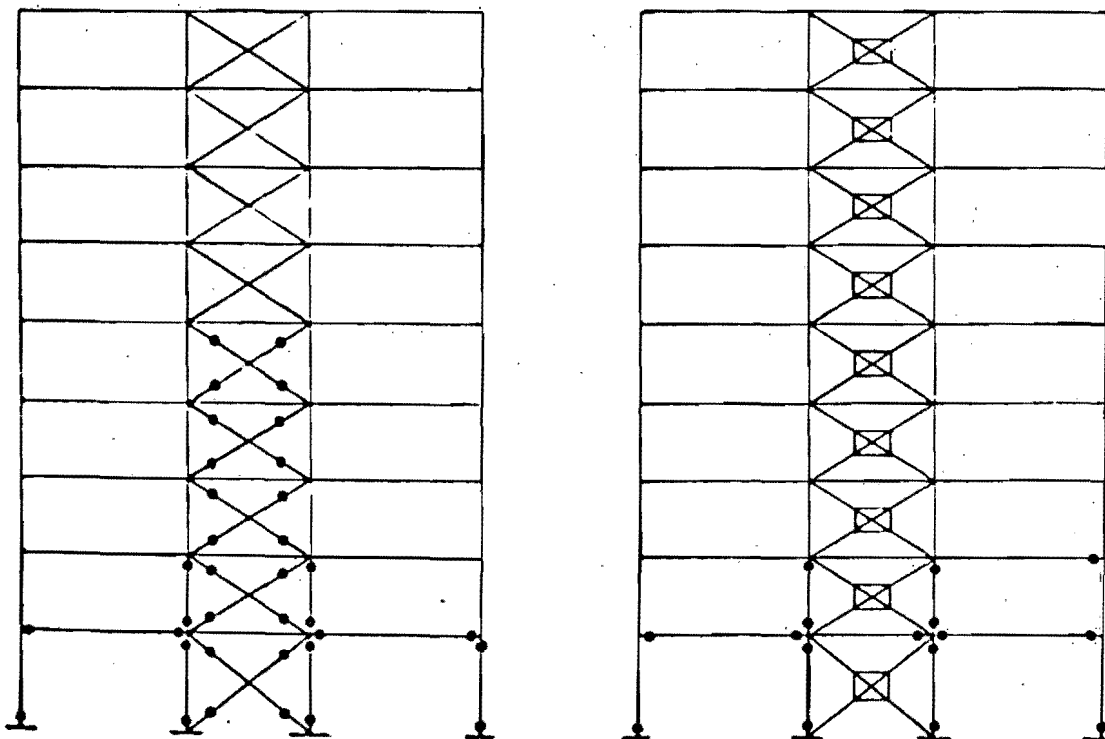


Fig. 24. Resumen de rótulas plásticas formadas para un período dominante de 0.268 seg y amplificado el sismo en 100.%

6.- OTRAS DISTRIBUCIONES DE AMORTIGUADORES

Si el consumo de energía por fricción fuese masivo, es decir, que los dispositivos deslicen simultáneamente, la respuesta de la estructura sería considerablemente reducida; esto sugiere una distribución de amortiguadores y a su vez cada uno inclusive con una carga de deslizamiento distinta según las condiciones del marco, pues puede suceder como en el caso del que está en estudio, que la relación resistencia/solicitación del primer piso sea la menor de todas, lo que hace que las incursiones en el rango inelástico de los elementos principales y el trabajo de los dispositivos vaya progresando paulatinamente del nivel inferior hacia los superiores.

En la Ref.11 se proponen varias soluciones de distribución de amortiguadores, algunas de las cuales se reproducen en la fig.25. Cada una de ellas puede ser más útil que otra para un determinado marco, en el que inclusive por razones arquitectónicas podría elegirse un tipo de distribución que estructuralmente funcione.

En los edificios que ya están construidos y que requieren de amortiguadores, la distribución puede ser cualquiera de las soluciones mencionadas según las características estructurales que se tengan, pero si desde el cálculo ya se concibe la idea de este amortiguamiento adicional, la sencillez, economía y el trabajo en conjunto serían los factores que determinen la distribución a utilizarse.

Con la idea de obtener un trabajo simultáneo y menos individual de los dispositivos inferiores y debido a que el primer piso es el más solicitado y sus dos diagonales las más deformadas, se propone dos tipos de distribución: el primero, un amortiguador colocado en la crujía central de todos los niveles, junto con dos adicionales (exteriores) en el primer nivel, y el segundo, con uno en cada crujía central desde el tercero hasta el último nivel y dos colocados simétricamente en el primero y segundo, como se ve en la fig.28 (b) y (c).

La respuesta de los marcos con las distribuciones propuestas se compara con aquel que tiene solamente diagonales en todas las crujeas centrales, fig.26 (a), en los tres siguientes análisis:

- a.- El marco con el primer tipo de distribución sometido al sismo en el que no se modifica la aceleración pero sí el tiempo, para obtener un periodo dominante de 0.268 seg.
- b.- El mismo marco anterior pero con la señal amplificada en 25.% y con un periodo dominante de 0.30 seg.
- c.- El marco con el segundo tipo de distribución y la señal amplificada 25.% con un periodo dominante de 0.30 seg.

Para el primer caso, el marco tiene un periodo fundamental de 0.25 seg que es el 93.% del periodo dominante con el cual se le está vibrando, lo que significa que se encuentra en la rama ascendente, a la izquierda del pico del espectro, razón por la cual, está en una situación peligrosa (muy cerca de la condición de resonancia) y en desventaja respecto al marco cuya respuesta se va a comparar, pues éste, tiene un periodo de 0.268 seg que irá aumentando conforme las secciones de sus elementos se vayan plastificando, logrando con ello, salirse de la resonancia. El desplazamiento del nivel 9 y la fuerza axial en la columna 18 que se presentó en la fig.26, confirman lo anterior, pues se ve claro que existe un desfase en la respuesta del marco que no tiene dispositivos respecto al que sí los tiene; en cuanto a la amplitud, se nota que antes de los 3. seg el marco que tiene el periodo fundamental menor, va respondiendo más fuerte porque se está metiendo al pico del espectro. En el tramo final, el amortiguamiento conseguido disminuye la amplitud haciendo más pequeños los picos. En la fig.27 las envolventes de fuerza axial muestra la diferencia de resultados que se obtiene para este análisis y la ventaja de los dispositivos. En el un marco fluyeron las diagonales de los dos primeros pisos y el extremo que va al apoyo de una columna interior, mientras que en el amortiguado, deslizaron los dispositivos de cuatro niveles a partir del segundo sin fluencia de vigas ni columnas.

Para el segundo caso el sismo se amplifica en 25.% y se modifica el tiempo de tal manera que se logra un periodo dominante de 0.30 seg, que hace que los dos periodos fundamentales se encuentren en la rama ascendente antes del pico del espectro. Para lograr que trabajen simultáneamente los tres dispositivos colocados en el primer nivel junto con los de niveles superiores, se disminuye la carga de deslizamiento de los primeros a un 80.%. Los dos marcos pudieron soportar la señal sísmica completa aunque en el uno

existieron varias secciones que fluyeron; un resumen de rótulas plásticas formadas en este análisis se ve en la fig.28 (a) y (b) notándose una considerable diferencia en lo que tiene que ver con la inelasticidad, pues en el marco amortiguado donde no deslizó únicamente el dispositivo del último nivel, apenas empezaban a fluir las 2 secciones indicadas. Cabe recalcar que el deslizamiento de las placas de los dispositivos, no se considera como daño estructural.

Por último en el tercer caso, el sismo es igual que en el anterior y el marco amortiguado es del segundo tipo propuesto (periodo fundamental de 0.24 seg), con la característica adicional de que se disminuye a un 30.% la carga de deslizamiento de los dispositivos colocados en los dos primeros y dos últimos niveles, para conseguir un consumo de energía distribuido en toda la estructura. En este análisis, con excepción del dispositivo del último nivel, todos deslizaron y trabajaron disipando energía, sin haberse formado ninguna rótula en vigas ni columnas, lo que significa que existe un comportamiento que permanece en el rango elástico, a diferencia del marco que no tiene amortiguadores en el que como ya se dijo, hubo varias secciones que fluyeron; la fig.28 (a) y (c) representan este caso de vibración.

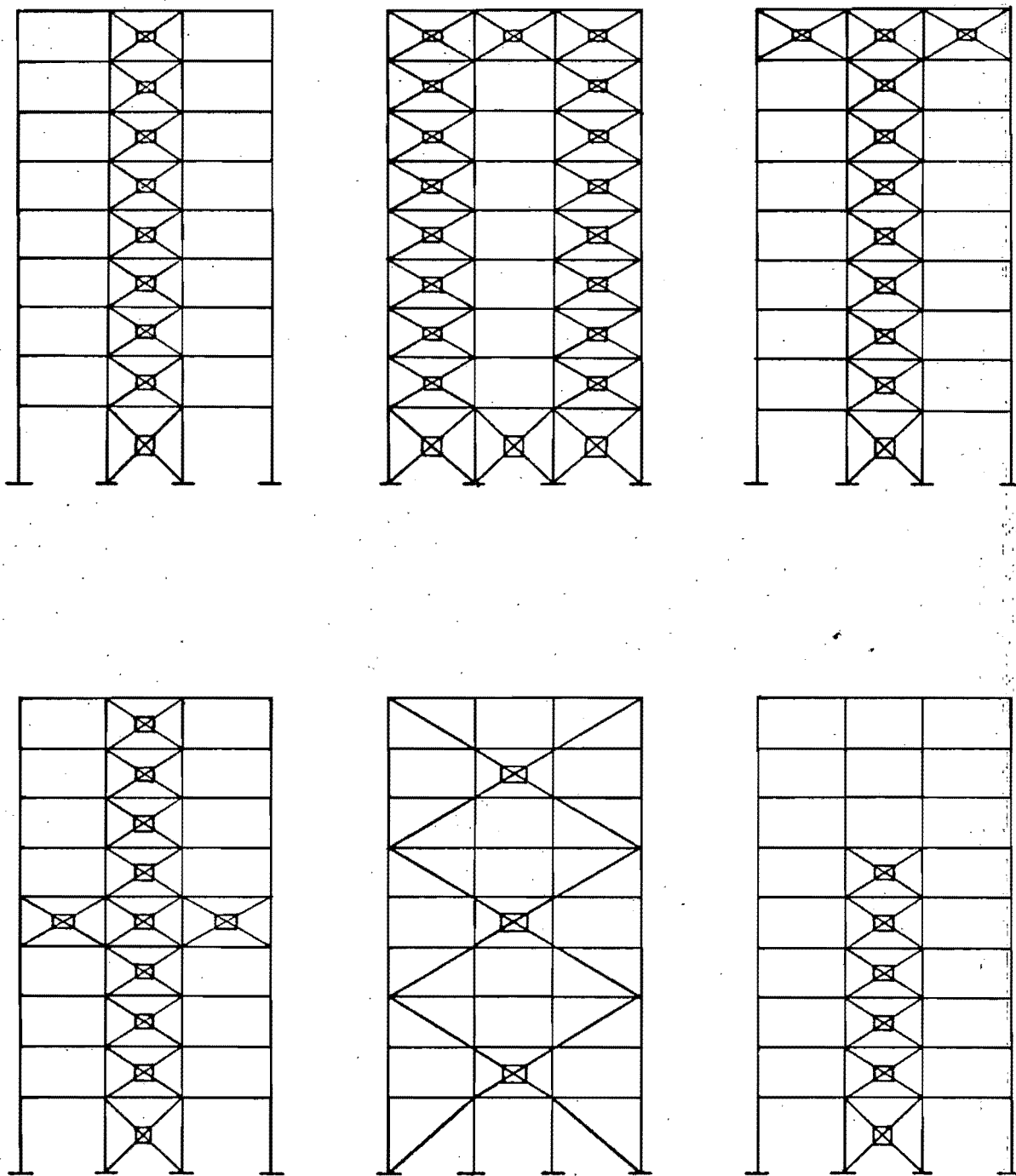


Fig. 25. Varias posibilidades de distribución de dispositivos en el marco.

--- Marco con diagonales
— Marco con dispositivos (con 2 adicionales en el primer nivel)

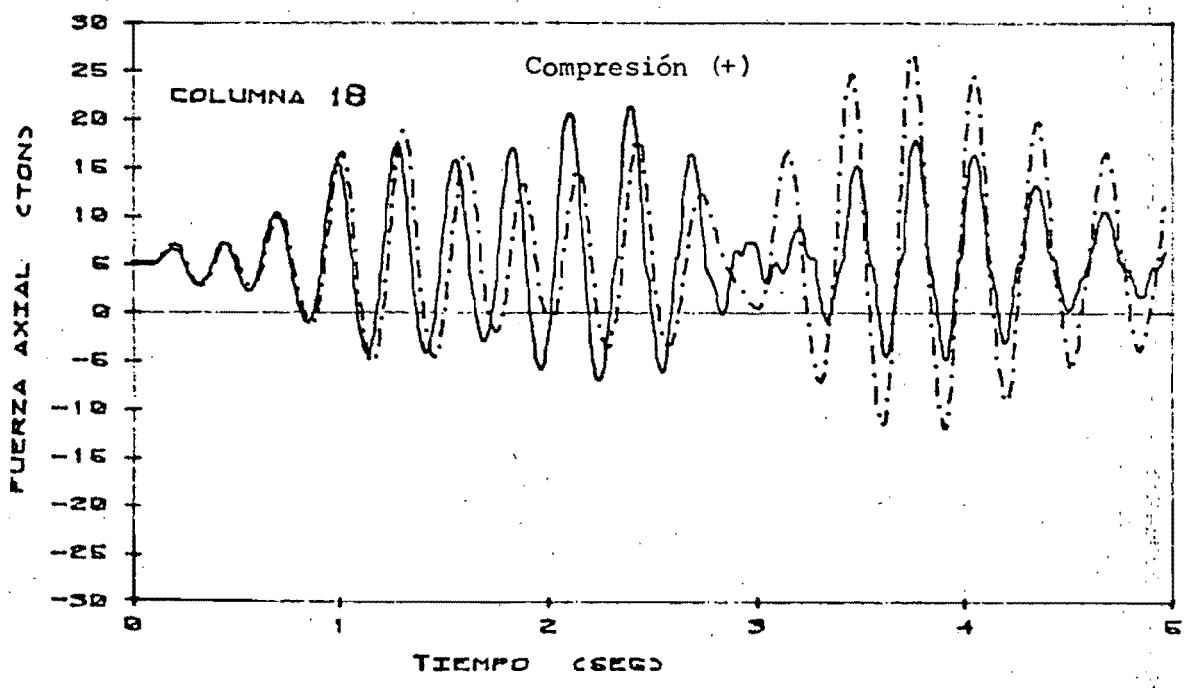
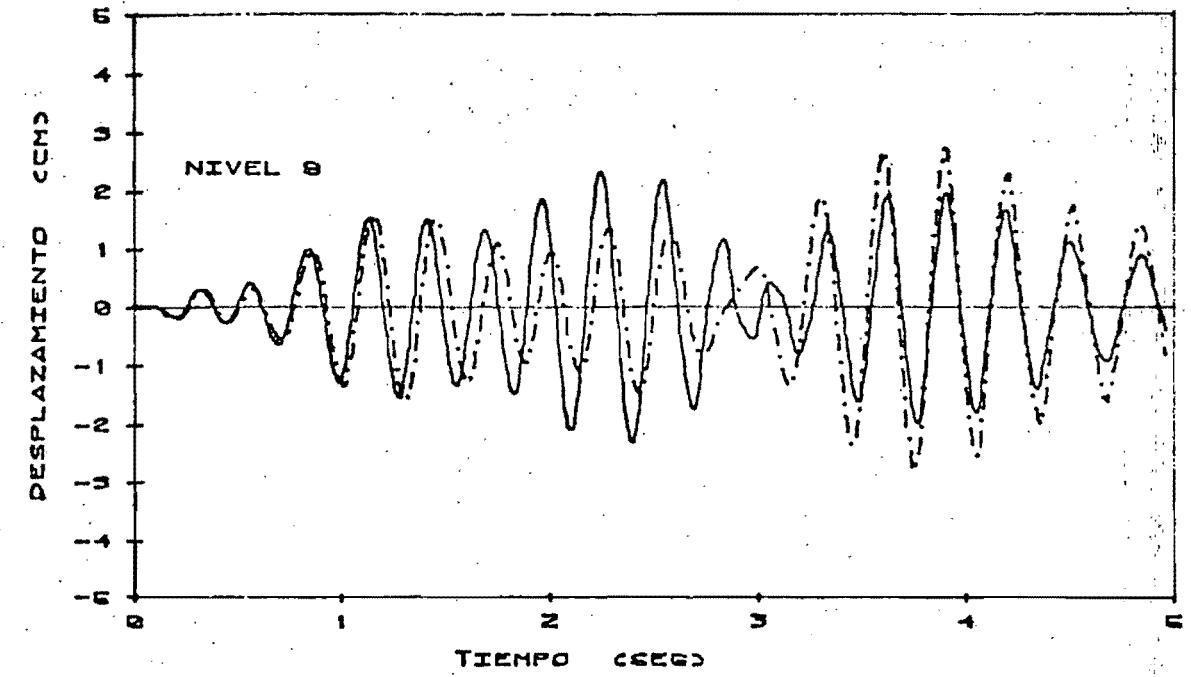


Fig. 26. Historia de desplazamiento y de fuerza axial, para un período dominante de 0.268 seg sin amplificación del sismo.

-.-.-.- Marco con diagonales
 — Marco con dispositivos (con 2 adicionales en el primer nivel)

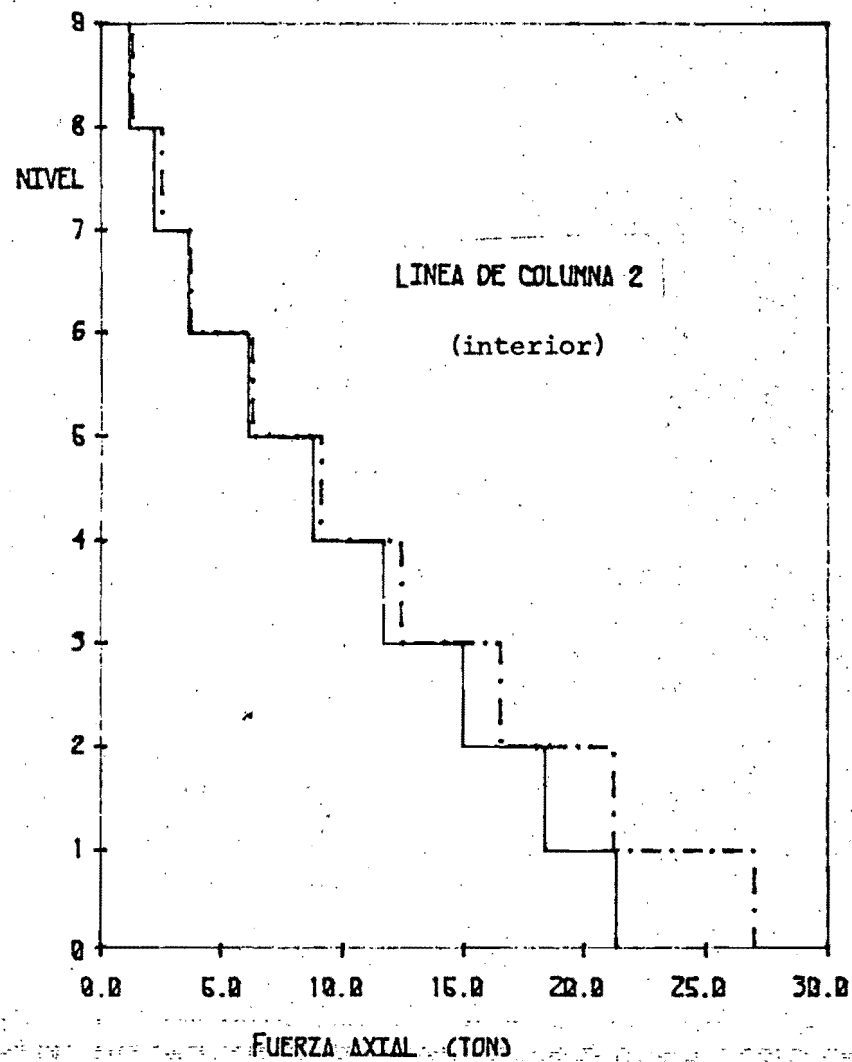
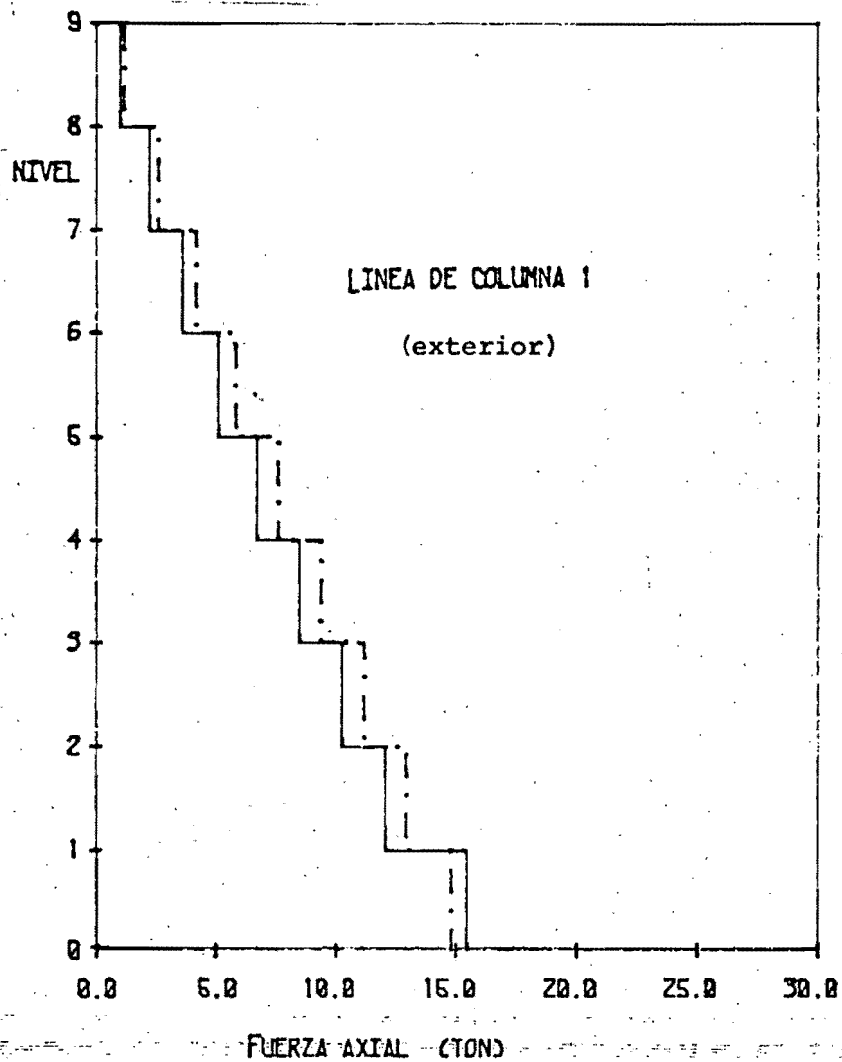
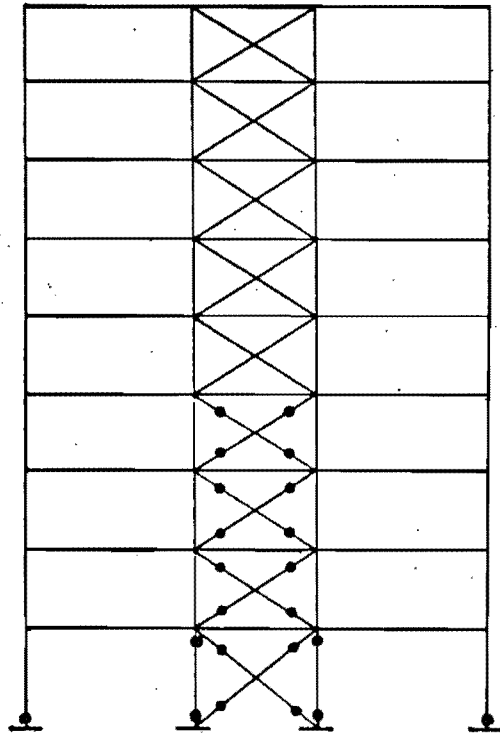
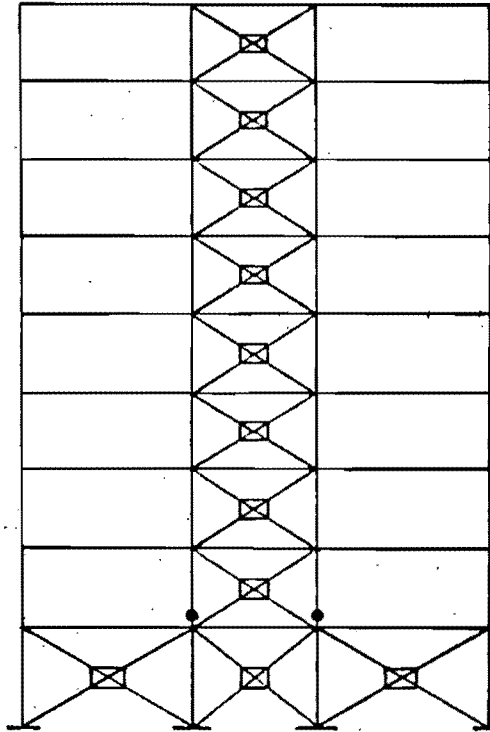


Fig. 27. Envolvente de fuerza axial para las líneas de columna exterior e interior, para un período dominante de 0.268 seg, sin amplificación del sismo.



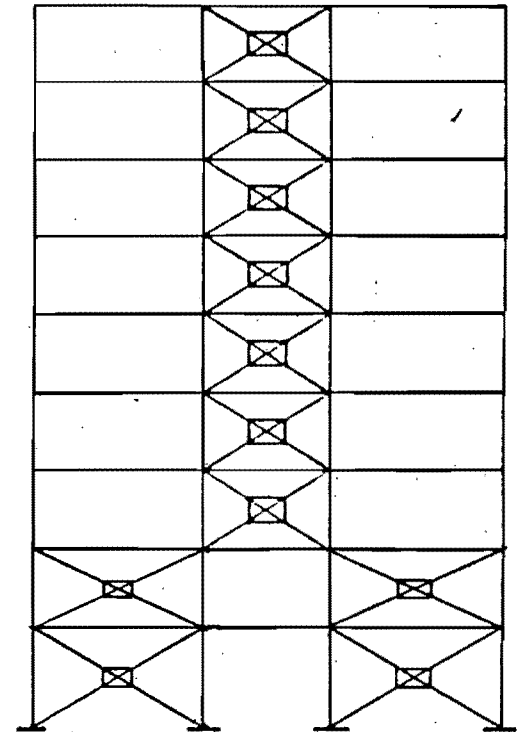
a) Inelástico.

Deslizaron todos los dispositivos, a excepción del colocado en el último nivel.



b) Reducido a 80.% la carga de deslizamiento en los dispositivos del primer nivel. Inelástico.

Deslizaron todos los dispositivos, a excepción del colocado en el último nivel. Elástico.



c) Reducido a 80.% la carga de deslizamiento en los dispositivos de los dos primeros y últimos niveles.

Fig. 28. Resumen de rótulas plásticas del marco sin y con dispositivos en dos tipos de distribución propuestos, para un período dominante de 0.30 seg y una amplificación del sismo de 25.%

7.- AMORTIGUAMIENTO VISCOSO EQUIVALENTE

En todos los casos de estudio que aquí se han hecho, se ha considerado que el amortiguamiento viscoso que corresponde al marco es de 2.% para el rango elástico.

Como no se dispone de un programa especial de computadora en el que se represente el comportamiento real del dispositivo; se adapta a los que ya se han usado para análisis dinámico (DRAIN) con su consiguiente aproximación; en este trabajo se ha tomado en cuenta el modelo simplificado de Pall [11].

Para encontrar el valor de amortiguamiento viscoso equivalente, que represente la disipación de energía por fricción lograda en los dispositivos, se utiliza dos criterios: igual desplazamiento horizontal máximo del nivel superior y, que la estructura que no tiene amortiguadores en la que hubo fluencia de varias secciones, permanezca en el rango elástico como lo está aquella que si tiene. Esto se consigue usando el mismo programa de análisis y el marco inelástico, al que paulatinamente se le va aumentando el amortiguamiento hasta cumplir con uno de los dos criterios mencionados.

Se eligieron tres casos para los cuales se obtuvo el amortiguamiento como porcentaje del crítico: el primero, corresponde a la excitación y a los marcos cuya respuesta se encuentra en la fig. 13, en la que para un valor de 42.%, es decir, un 40.% de incremento se logró igualar el desplazamiento horizontal máximo del último nivel, que significa un resultado muy alto pero que se necesita para sacar del colapso a una estructura; cabe aclarar que el marco sin diagonales se encuentra en desventaja, porque está en resonancia, mientras que el otro tiene un periodo fundamental menor que queda fuera de la zona de peligro del espectro; en el segundo caso se tomó la respuesta correspondiente al marco con diagonales en el que fluyeron varias secciones y al que tiene dispositivos que se mantuvo elástico como se presenta en la fig.14 y fig.15; se necesitó 5.% para eliminar la inelasticidad, del cual 3.% corresponde a la energía consumida mecánicamente; finalmente el tercer caso tiene que ver con los marcos que se muestran en la

fig.28 (a) y (c) en donde existe una gran inelasticidad en el uno mientras que el otro sigue elástico; se requirió un amortiguamiento total de 11.2% para eliminar todas las rótulas plásticas, que quiere decir un adicional de 9.2% debido al trabajo de los dispositivos.

El hecho de que una estructura pudiera tener un porcentaje de amortiguamiento adicional proporcionado por algún sistema como por ejemplo el que se ha usado en este trabajo, hace que el daño estructural se reduzca considerablemente, pues no se consume energía sísmica únicamente por inelasticidad de los elementos sino también por el buen funcionamiento del sistema amortiguador, con lo que se lograría disminuir en forma notable la respuesta y posiblemente evitar inclusive el colapso cuando el sismo es severo.

8.- DESLIZAMIENTO DE LOS AMORTIGUADORES

El mecanismo amortiguador se diseña para que no se deslice si no llega a un valor determinado de carga, lo que significa que no habría ningún consumo de energía, pero si el sismo es tal que logra activar el deslizamiento, se necesita conocer la longitud de la guía a través de la cual se mueve el tornillo micrométrico que une las placas entre las cuales va a existir la fricción.

Para ello, utilizando el marco provisto de dispositivos y un sismo que se incrementó en 100%, se realizó un análisis y se obtuvo la carga y la deformación de una de las diagonales del primer piso. En la fig.29 se muestra una historia de deformación de la diagonal 18 que fue la más solicitada, en la que el pico máximo corresponde a un alargamiento total de 1.11 cm del cual 0.95 cm representa el tramo inelástico, que es la longitud que se desliza el dispositivo en el un sentido. El gráfico superior de la misma figura, permite identificar en qué tiempo y en qué intervalo está sucediendo la plastificación.

Otro criterio para calcular cuánto se puede deslizar el dispositivo, es a partir de utilizar un porcentaje de desplazamiento horizontal de entrepiso que se pueda suceder en un sismo y con ello calcular lo que se alargaría la diagonal. Si se considera por ejemplo un 12 por mil, que representa 1.4 cm para el primer entrepiso del marco en estudio, la diagonal se alargaría 1. cm (en el un sentido), de tal manera que si se colgaría los dispositivos en el prototipo de este modelo a escala 1/3, se requeriría por lo menos una longitud total de 6. cm.

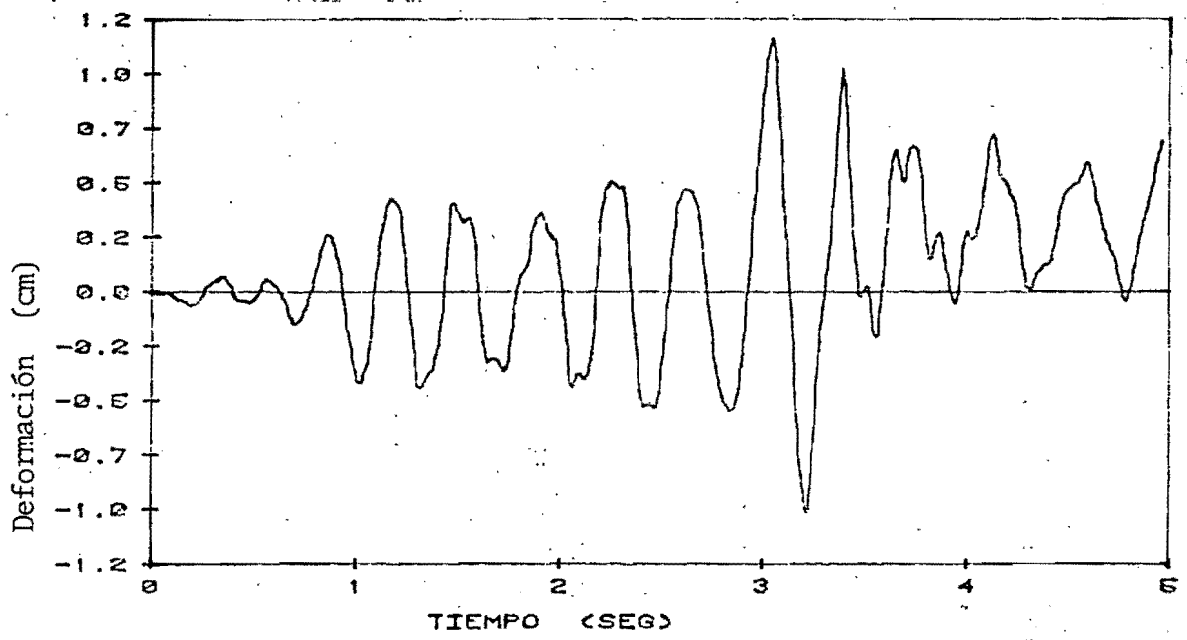
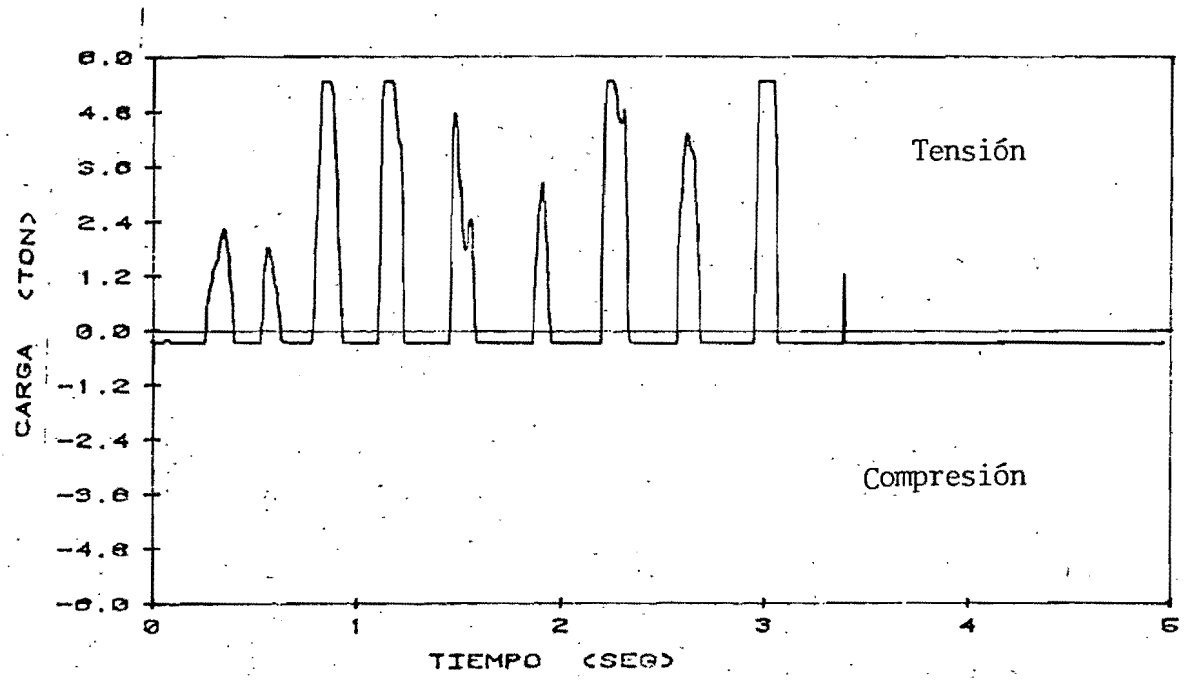


Fig. 29. Historia de carga y deformación de la diagonal 18, cuando el sismo se duplicó.

9.- CONCLUSIONES:

La respuesta sísmica, en forma general, es menor para el marco con amortiguamiento adicional, a pesar de la aproximación que se ha hecho para modelarlo. Las acciones en las barras y la carga vertical que llega a los apoyos fueron disminuidas.

El amortiguamiento producido por el deslizamiento de los dispositivos, hace que el periodo de la respuesta se modifique y que a su vez dependa de la excitación, pues si ésta es severa, el consumo de energía en forma mecánica será más y mejor, porque habrá un trabajo de más número de dispositivos y cada uno de ellos disipará mayor cantidad de energía, postergando así la fluencia de los elementos estructurales.

La distribución de amortiguadores, junto con una variación de la carga de deslizamiento en los diferentes niveles, produce un consumo masivo de energía que se reparte en toda la estructura, obteniendo un mejor amortiguamiento por un trabajo en conjunto antes que individual. Esta optimización que se pueda conseguir, depende de las características estructurales.

Para el marco en estudio y utilizando una distribución de dispositivos que se propone en este caso, se obtiene un valor de amortiguamiento viscoso equivalente adicional de 9% del crítico, que corresponde únicamente a la disipación de energía por fricción. Si una estructura pudiera disponer de este porcentaje de amortiguamiento, su capacidad para resistir los sismos aumentaría considerablemente.



DEPFI

REFERENCIAS

- 1.- Alvarado, W., "Análisis paso a paso de un modelo sometido al acelerograma SCT-19-SEP-85 con y sin dispositivos amortiguadores", Trabajo de Investigación presentado a la DEFFI - UNAM, México, D.F., Octubre-1987.
- 2.- Filiatrault, A., Cherry, S., "Seismic Tests of Friction Damped Steel Frames", Proceedings - Third Conference on Dynamic Response of Structures, ASCE, Held at Los Angeles, 1986.
- 3.- Huckelbridge, A.A., "Earthquake Simulation Tests of a Nine Story Steel Frame with Columns Allowed to Uplift", Report No. UCB/EERC-77/23, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, USA, Aug-1977.
- 4.- Jaramillo, J.D., "Torsión Sísmica de Edificios", Tesis de Maestría, DEFFI-UNAM, México, D.F., Abril-1987.
- 5.- Kanaan, A., Powell, G., "General Purpose Computer Program for Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures", Report No. UCB/EERC-73/6, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, USA, April-1973.
- 6.- Maison, B., Neuss, C., "SUPER-ETABS: An Enhanced Version of the ETABS Program", A Report to the National Science Foundation, J.G. Bouwkamp, Inc., Berkeley, California, January-1983 (Micro-Conversion, Feb-1985).
- 7.- Mena, E., et al, "Catálogo de acelerogramas procesados del sismo del 19 de septiembre de 1985", Parte I, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F., No. 497, Julio-1986.
- 8.- Ocampo, R., Del Valle, E., Escamilla, S., "Reporte sobre el comportamiento de un modelo de nueve niveles en el que se ensayó el dispositivo desarrollado por el Dr. Avtar Fall", Presentado a la Secretaría General de Obras del Departamento del D.F., México, 1987.

- 9.- Pall, A.S., Verganelakis, V., Marsh, C., "Friction Dampers for Seismic Control of Concordia University Library Building", Fifth Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Canada, July-1987.
- 10.- Pall, A.S., "Energy Dissipation Devices for Aseismic Design of Buildings", Proceedings of a Seminar and Workshop on Base Insolation and Passive Energy Dissipation, Applied Technology Council (ATC), March-1986.
- 11.- Pall, A.S., Marsh, C., "Response of Friction Damped Braced Frames", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST6, June-1982.
- 12.- Paz, M., "Structural Dynamics : Theory and Computation", Van Nostrand Reinhold Company, U.S.A., 1980.
- 13.- Powell, G., "DRAIN-2D User's Guide", Report No. UCB/EERC-73/22, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, USA, Oct-1973.