

COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE MARCOS CON DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA Y SIN ELLOS

Francisco L. Silva González y Sonia E. Ruiz Gómez
Instituto de Ingeniería, UNAM

RESUMEN

Se realiza un análisis comparativo sobre las respuestas dinámicas inelásticas de un marco con dispositivos disipadores de energía, de un marco convencional diseñado con un factor de comportamiento sísmico $Q=1.5$ y de un marco convencional diseñado con $Q=4.0$. Estos últimos diseñados de acuerdo con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (1987). Los tres marcos tienen el mismo período inicial natural de vibración ($T=1.03s$) y se excitan con el acelerograma registrado en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en la ciudad de México durante el movimiento sísmico del 19 de septiembre de 1985. De las comparaciones se concluye que, para el marco analizado, el uso del sistema disipador es favorable para la reducción de su respuesta y daño estructural.

ABSTRACT

A comparative analysis is presented of the inelastic dynamic response of a frame with energy dissipation systems, of a conventional frame designed with a factor of seismic behaviour $Q=1.5$ and of a conventional frame designed with $Q=4.0$. The latter were designed in accordance with the Federal District Seismic Regulations (1987). The three frames have the same initial period of vibration ($T=1.03$) and are excited with the motion recorded at the parking lot of the Ministry of Communications and Transportations in México City during the September 1985 earthquake. The results show that, for the frame analyzed, the use of energy dissipation devices is favourable for the reduction of structural response and damage.

1. INTRODUCCIÓN

Existen tres alternativas con las que una estructura puede diseñarse para sobrevivir o reducir su respuesta ante un sismo severo. La primera de ellas consiste en absorber la energía cinética que le introduce el sismo dentro de la capacidad elástica de los materiales. La segunda estriba en el aprovechamiento de la ductilidad que es capaz de desarrollar la estructura, con lo que a cambio de reducción de la respuesta se presenta un daño estructural que depende de la magnitud del trabajo inelástico de los elementos. La tercer alternativa consiste en introducir amortiguamiento adicional que produzca reducciones de la respuesta sísmica sin tener que depender de la ductilidad que desarrollen los elementos del edificio. Esta última alternativa cada día tiene más aceptación entre los ingenieros estructuralistas, constructores y arquitectos.

En este trabajo se estudia la respuesta de tres marcos ante un sismo severo. Cada marco absorbe o disipa la energía sísmica de manera distinta. El primero de ellos se diseñó para absorber la energía sísmica dentro del intervalo de comportamiento elástico, el segundo emplea la ductilidad que son capaces de desarrollar los miembros estructurales, y el tercero cuenta con elementos disipadores de energía.

Los tres marcos tienen el mismo período inicial de vibración y se excitan con el mismo acelerograma, por lo que sus respuestas estructurales pueden compararse entre sí.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MARCOS

Los marcos analizados tienen 10 niveles y tres crujeas. Sus dimensiones y geometría se muestran en la figura 1. Las masas, que para efectos sísmicos se consideran concentradas en los niveles, varían de 5.82 ton·s²/m en el primer nivel a 4.06 ton·s²/m en el décimo. Las dimensiones de las secciones transversales de sus columnas se muestran en las Tablas 1 y 2. (El entrepiso 1 corresponde al inferior y el 10 al superior).

Para fines de diseño se considera que las estructuras se ubican en la zona del lago de la ciudad de México (zona III) y que se usan para oficinas.

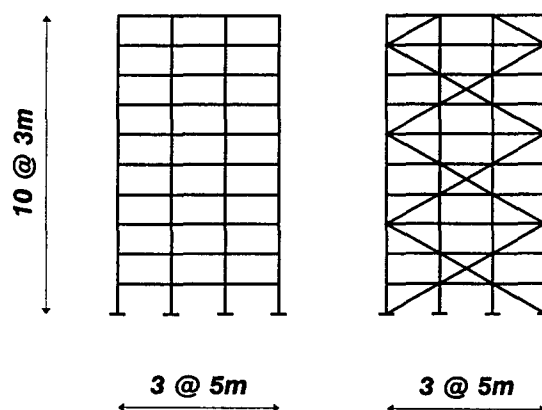


Fig 1. Dimensiones y geometría del marco convencional y del marco con disipadores

Tabla 1. Dimensiones de trabes y columnas del marco convencional.

Nivel	Columnas [cm]	Trabes [cm]
9 y 10	42	35 x 75
7 y 8	50	
5 y 6	54	
1 a 4	56	

Tabla 2. Dimensiones de trabes y columnas del marco con disipadores.

Nivel	Columnas [cm]	Trabes [cm]
9 y 10	30	25 x 53
7 y 8	35	
5 y 6	38	
1 a 4	40	

El marco con dispositivos disipadores se diseñó de forma tal que ni trabes ni columnas presentan deformaciones inelásticas, y la mayor parte de la energía sísmica se disipa a través de los dispositivos. Los disipadores están colocados en diagonales de acero. La rigidez axial y la fuerza de fluencia de cada sistema diagonal-disipador colocado en cada entrepiso se muestran en la Tabla 3.

el acelerograma registrado en la S.C.T. el 19 de septiembre de 1985, componente E-W. Para ello se utilizó el programa DRAIN-2D. Se consideró que las trabes tenían degradación de su rigidez. Los disipadores se modelaron como diagonales con comportamiento bilineal tanto en compresión como en tensión, sin degradación de rigidez ni resistencia.

Tabla 3. Rigidez axial y fuerzas de fluencia de un sistema diagonal-disipador.					
Entrepiso	Rigidez axial [ton/cm]	Fuerza de fluencia [ton]	Entrepiso	Rigidez axial [ton/cm]	Fuerza de fluencia [ton]
10	61.99	3.25	5	48.32	28.27
9	61.99	6.97	4	62.62	30.85
8	42.92	10.58	3	63.16	32.73
7	65.64	13.46	2	52.25	33.90
6	73.47	16.11	1	71.17	33.78

Los tres marcos se diseñaron para que tuviesen el mismo período inicial de vibración y para que fueran suficientemente flexibles. Para esto se siguió el criterio de diseño descrito por Silva (1993) y Silva y Ruiz (1993). Se hace ver que este criterio supone que la resistencia y la rigidez del sistema disipador son parámetros independientes entre sí.

En la Tabla 3 se observa que mientras la rigidez de los disipadores es casi constante en la altura del edificio, la resistencia es menor en su parte superior.

El marco con disipadores se diseñó de tal forma que la rigidez lateral del sistema disipador fuese igual al 75% de la rigidez total y que el marco de concreto tuviese el 25% restante.

3. MODELACIÓN ESTRUCTURAL Y EXCITACIÓN SÍSMICA

Se realizó un análisis dinámico inelástico paso a paso de los tres marcos. Estos se excitaron con

4. ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS SÍSMICAS

Las respuestas que se analizan en este trabajo son las siguientes:

- Los valores máximos de los desplazamientos de cada nivel con respecto al terreno.
- La historia de desplazamientos de entrepiso.
- La historia de las fuerzas axiales en las columnas 1 y 2 (ver figura 2).
- Las envolventes de las fuerzas axiales, momentos flexionantes y fuerzas cortantes en la línea de columnas α y β .
- Las envolventes de los momentos flexionantes en las trabes de las crujeas γ , δ y ϵ (ver figura 2).
- El patrón de articulaciones plásticas que se forma en cada marco.

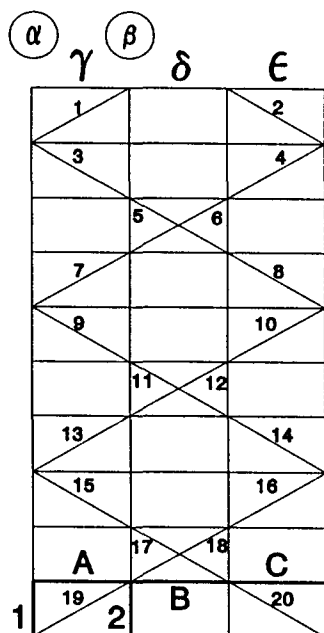


Fig 2. Elementos estructurales cuyos elementos mecánicos se analizan

- g) La historia del coeficiente sísmico (definido como la fuerza cortante basal entre el peso del marco) que se desarrolla en cada marco
- h) Para el marco con disipadores se analiza la energía disipada por cada dispositivo.
- i) La resistencia de entrepiso de los marcos convencionales. Para el marco con disipadores se obtiene la relación entre la resistencia del sistema disipador y la resistencia total de cada entrepiso ($\beta_2 = R_d/R_1$).
- j) Las demandas de ductilidad de los entrepisos de cada marco.

En las siguientes secciones al marco convencional diseñado con $Q=1.5$ se le llama *marco elástico* y al marco convencional diseñado con $Q=4.0$ *marco dúctil*.

4.1 Envolvente de los desplazamientos

En la figura 3 se muestran los valores máximos, obtenidos de un análisis paso a paso, de los desplazamientos de cada nivel respecto a la base de la estructura.

En este caso particular se observa que los desplazamientos de los niveles inferiores del *marco dúctil* son muy grandes y además mayores que los desplazamientos del *marco elástico*. Este hecho se puede explicar usando espectros de desplazamiento obtenidos de analizar sistemas de un grado de libertad, ya que el primer modo de vibración es el que domina en la respuesta de los tres marcos (los marcos en estudio son regulares en masa y en rigidez lateral).

En la figura 4 se muestra el espectro de desplazamientos elásticos ($\mu=1$) y los espectros de desplazamientos para un sistema elastoplástico de un grado de libertad para demandas de ductilidad $\mu=4$ y $\mu=6$. Los sistemas se han excitado con el movimiento SCT-EW. En esta figura se observa que en el rango de períodos de vibración cortos las demandas de desplazamientos inelásticos son mayores que las demandas de desplazamientos elásticos.

Esto también lo han observado otros investigadores en estudios previos (Veletsos y Newmark (1960), Osawa y Shibata (1961), Miranda (1993), Rodríguez (1993) y Ordaz *et al* (1993), entre otros). El rango de períodos en el cual la demanda de desplazamiento inelástico es mayor que la demanda de desplazamiento elástico, depende de la ductilidad del sistema y de las condiciones locales del sitio (Miranda (1993)).

Los tres marcos tienen un período inicial de vibración igual a 1.03 segundos. Para este período se observa que la demanda de desplazamiento inelástico es mayor que la demanda de desplazamiento elástico, por tanto se puede afirmar que los desplazamientos del *marco dúctil* son mayores que los del *marco "elástico"* debido a que el primero se encuentra en una zona "desfavorable" del espectro ya que en el rango de 0 a 1.5 segundos aproximadamente, a niveles altos de ductilidad se le asocian demandas altas de desplazamiento.

Los desplazamientos del *marco dúctil* también se ven incrementados debido a otras posibles causas:

- a) se consideró un modelo de degradación de rigidez en el comportamiento de sus elementos estructurales, lo que implica una disminución de su rigidez lateral inicial, y
- b) el efecto P- Δ es significativo ya que los desplazamientos del marco son considerables.

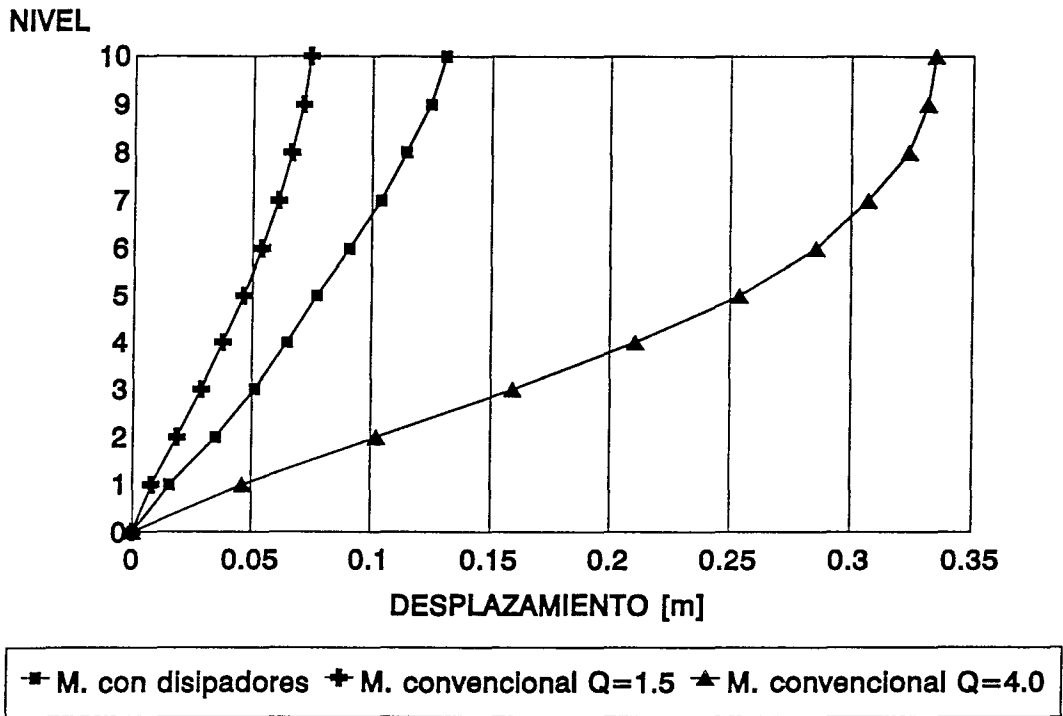


Fig 3. Desplazamientos máximos de cada nivel obtenidos del análisis paso a paso

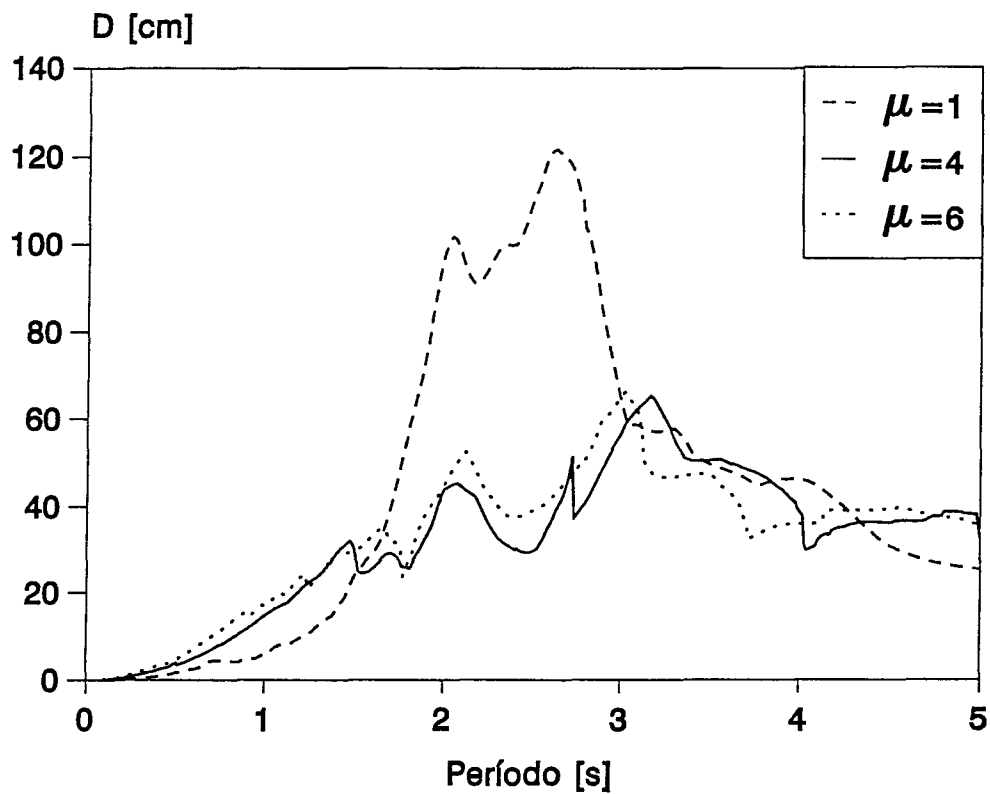


Fig 4. Espectros elasto-plásticos de desplazamiento, para STC-EW

4.2 Historia de desplazamientos relativos de cada entrepiso

En las figuras 5a, b y c se muestran las historias de desplazamientos relativos de los entrepisos 2, 3 y 4. Los desplazamientos relativos del marco "elástico" son mas regulares en el tiempo y se observa que estos desplazamientos son menores a los del marco con disipadores.

En el marco dúctil, a partir de los 58 s aproximadamente, los desplazamientos aumentan bruscamente, principalmente en los entrepisos 1 a 6. La parte fuerte del movimiento sísmico se encuentra entre los 57 y 65 segundos, aproximadamente.

En el marco con disipadores y en el marco dúctil se presenta una deformación permanente al final del movimiento sísmico, debida a las deformaciones inelásticas de sus elementos.

En la Tabla 4 se dan los valores máximos de los desplazamientos de cada entrepiso y de cada marco.

Se puede observar que los desplazamientos de entrepiso del marco con disipadores son muy similares entre sí. Lo mismo ocurre con los desplazamientos de entrepiso del marco "elástico". Los desplazamientos de estos dos marcos son menores que el desplazamiento máximo permitido por el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal

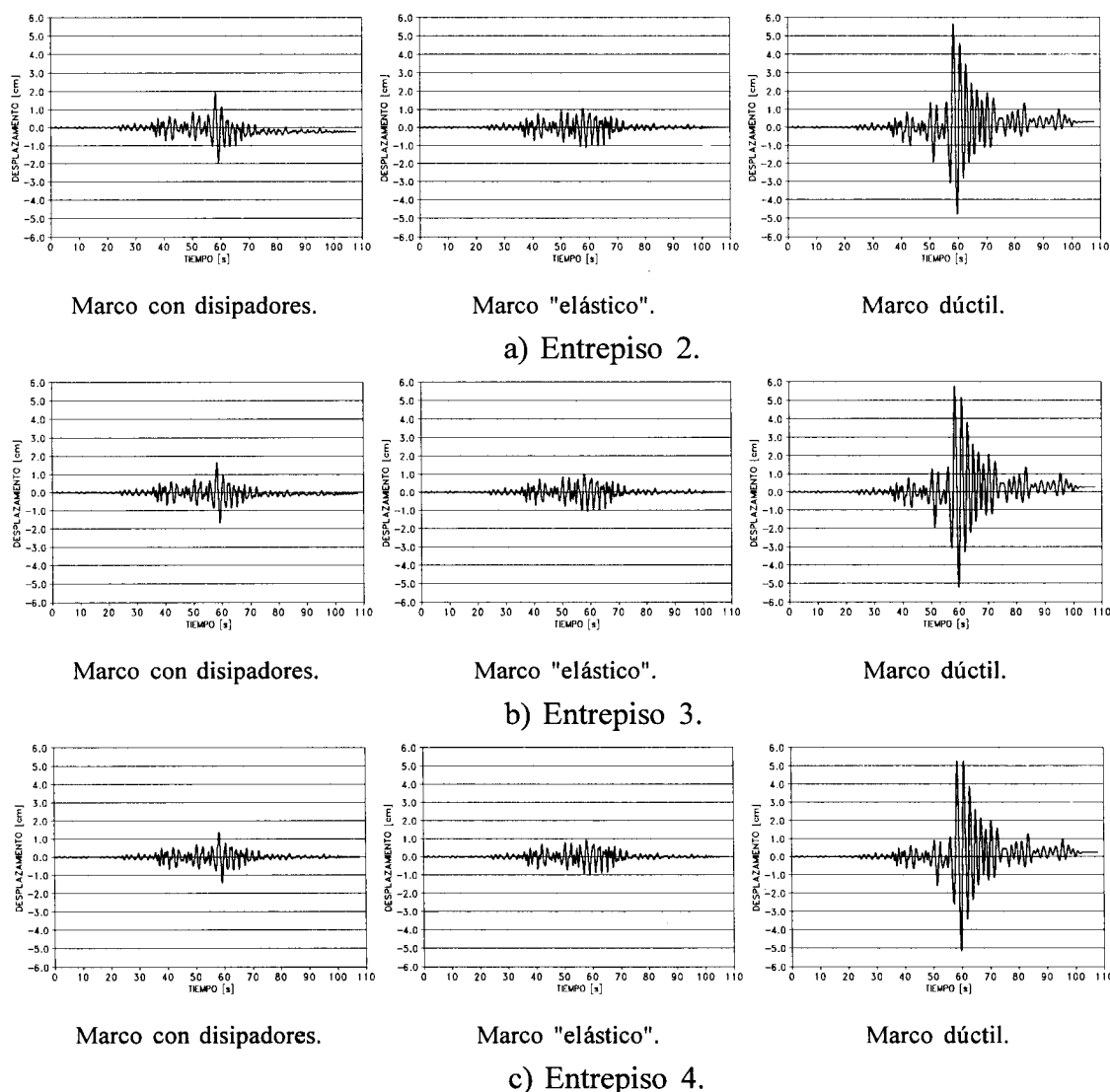


Fig 5. Historias de desplazamientos de los entrepisos 2, 3 y 4

Tabla 4. Desplazamientos máximos de entrepiso (cm).			
ENTREPISO	Marco		
	Con disipadores	"Elástico"	Dúctil
1	1.58	0.86	4.63
2	1.98	1.15	5.64
3	1.69	1.10	5.75
4	1.44	1.00	5.26
5	1.35	0.91	5.22
6	1.46	0.79	4.61
7	1.38	0.72	3.42
8	1.09	0.58	2.15
9	1.09	0.53	1.04
10	0.65	0.32	0.36

(RCDF-87) igual a 1.2% de la altura de entrepiso. En este caso este desplazamiento es igual a 3.6 cm.

En el *marco dúctil* se observa que los entrepisos inferiores se deforman del orden de 5cm que es mayor que el desplazamiento permitido. Los desplazamientos en este marco son excesivos, por lo que se pueden prever daños considerables en estos entrepisos. Se hace hincapié en que el *marco dúctil* fue diseñado de acuerdo con el RCDF-87, usando el método de análisis estático.

4.3 Historia de las fuerzas axiales que se desarrollan en las columnas 1 y 2

En las figuras 6a y b se muestra la variación en el tiempo de la fuerza axial que se desarrolla en las columnas 1 y 2 (ver figura 2).

En la columna 1, la variación de la fuerza axial es muy irregular en el tiempo, incluso llega a trabajar en tensión cuando la excitación es intensa. La historia de fuerzas axiales en la columna 2 es menos variable. Esta columna siempre trabaja en compresión.

La intensidad de la fuerza axial en las columnas 1 y 2 del *marco con disipadores* y la del *marco*

dúctil son aproximadamente iguales. La fuerza axial correspondiente al *marco "elástico"* es cerca de 15% mayor que la de los otros marcos.

La variación en el tiempo y la intensidad de la fuerza axial en las otras dos columnas del primer entrepiso son muy parecidas a las que se presentan en las figuras 6a y b.

4.4 Envoltentes de fuerzas axiales, fuerzas cortantes y momentos flexionantes en las líneas de columnas α y β

Los valores máximos de la fuerza axial que se presentan en las columnas son muy parecidos en los tres marcos (figuras 7 y 8) y aún más en la línea de columnas β ; pero se advierte una considerable disminución en las fuerzas cortantes y los momentos flexionantes cuando se usa el sistema disipador. Hay que señalar que las figuras 7 y 8 se refieren solo a las fuerzas axiales en las columnas. La fuerza total que actúa en la cimentación del *marco con disipadores* esta constituida por estas fuerzas más las que se desarrollan en los sistemas diagonal-disipador.

Las fuerzas cortantes (figuras 9 y 10) que actúan en la línea de columnas α del *marco con disipadores* son aproximadamente en promedio, del

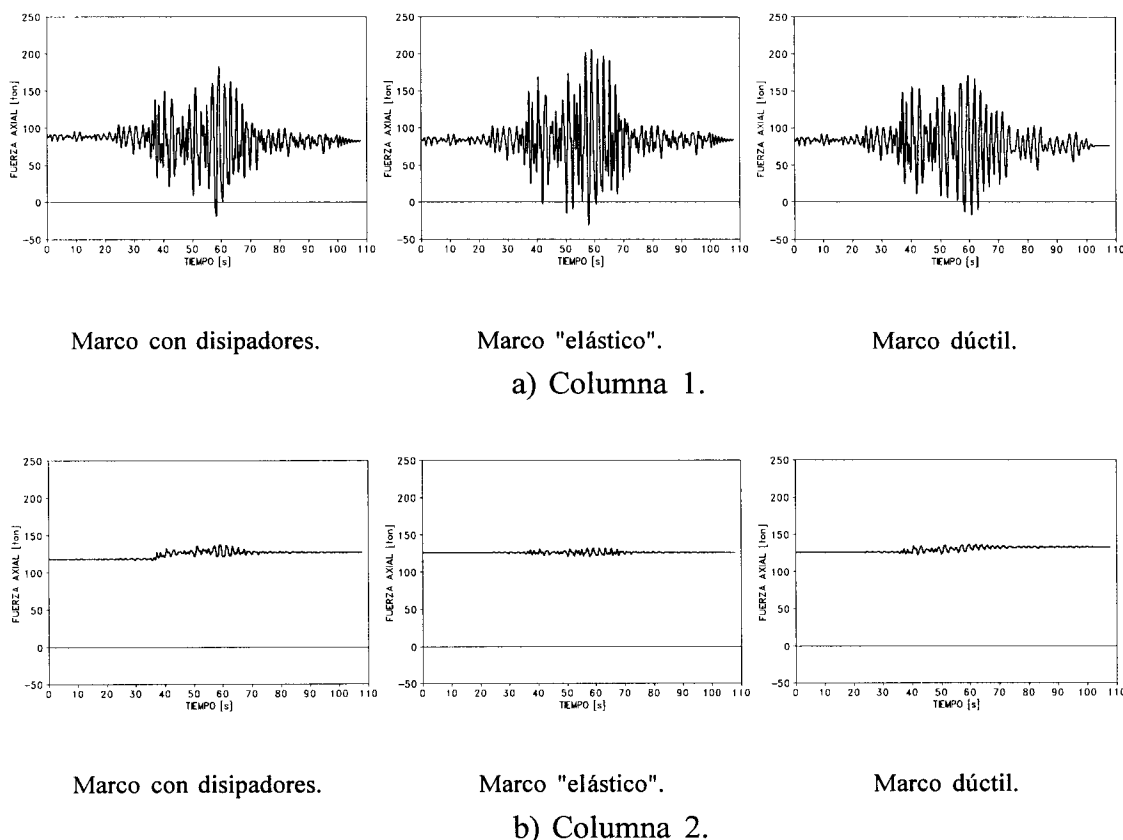


Fig 6. Historia de fuerzas axiales en las columnas 1 y 2 de los tres marcos analizados

orden de 54% menores que las que se desarrollan en la misma línea de columnas del marco "elástico" y 47% menores que las que actúan en las mismas columnas del marco dúctil. En la línea de columnas β del marco con disipadores son del orden de 60% menores que las del marco "elástico" y 56% menores que las del marco dúctil. Aquí también hay que señalar que las figuras 9 y 10 se refieren a las fuerzas cortantes que actúan sólo en las columnas. Los cortantes de entrepiso totales del marco con disipadores están constituidos por estas fuerzas más las que se desarrollan en los sistemas diagonal-disipador.

En lo que se refiere a los momentos flexionantes máximos en cada columna (figuras 11 y 12), los que se presentan en la línea de columnas α del marco con disipadores son 51% menores que las del marco "elástico" y 62% menores que las del marco dúctil. Los que actúan en las columnas de la línea β del marco con disipadores son 56% menores que las del marco "elástico" y 64% menores que las del marco dúctil. Un punto en las gráficas 10 y 11

corresponde al máximo, en valor absoluto, de los momentos flexionantes que actúan en cada extremo de una columna.

Se hace ver el siguiente aspecto interesante: las fuerzas cortantes que actúan en las columnas del marco "elástico" son mayores que las que se presentan en las columnas del marco dúctil. Respecto a los momentos flexionantes sucede lo contrario: los momentos flexionantes máximos en las columnas del marco "elástico" son menores que los que se presentan en las columnas del marco dúctil. Esto se debe a que las trabes del marco dúctil se articulan en sus extremos (ver incisos 4.5 y 4.6) permitiendo que las uniones viga-columna puedan girar con mayor libertad provocando un movimiento del punto de inflexión del perfil deformado de las columnas hacia uno de sus extremos, llegando estas, en algunas ocasiones a deformarse en curvatura simple. Por equilibrio de la unión viga-columna la suma de los momentos actuantes de las columnas tiene poco incremento (ya que las trabes se articularon en sus extremos), pero

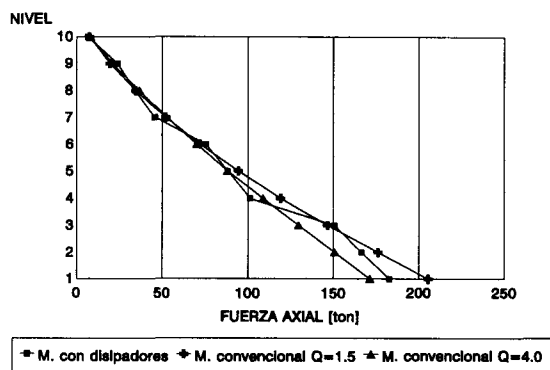


Fig 7. Fuerzas axiales en la línea de columnas α

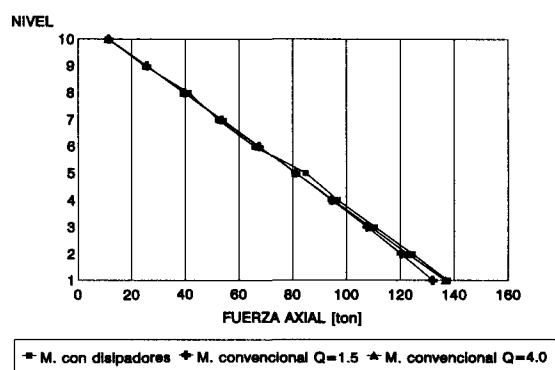


Fig 8. Fuerzas axiales en la línea de columnas β

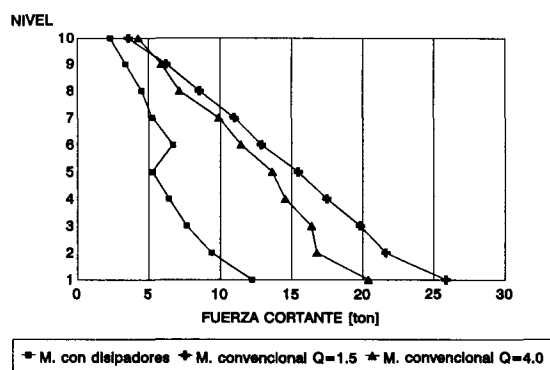


Fig 9. Fuerzas cortantes en la línea de columnas α

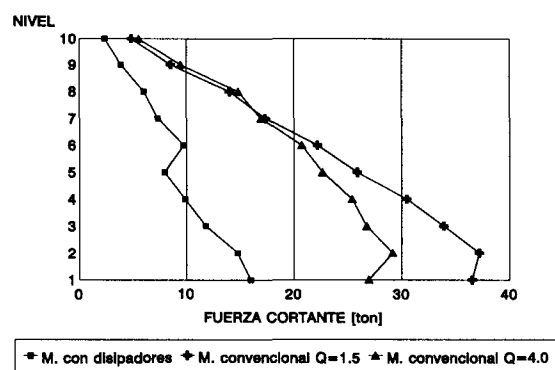


Fig 10. Fuerzas cortantes en la línea de columnas β

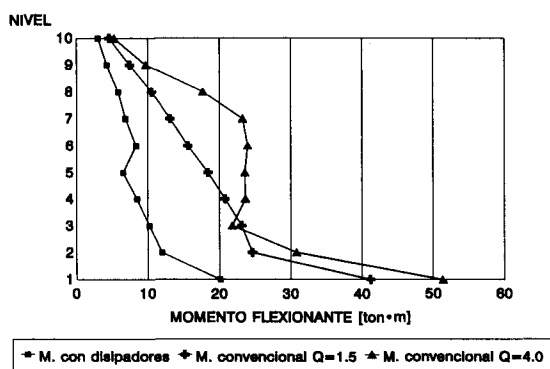


Fig 11. Momentos flexionantes en la línea de columnas α

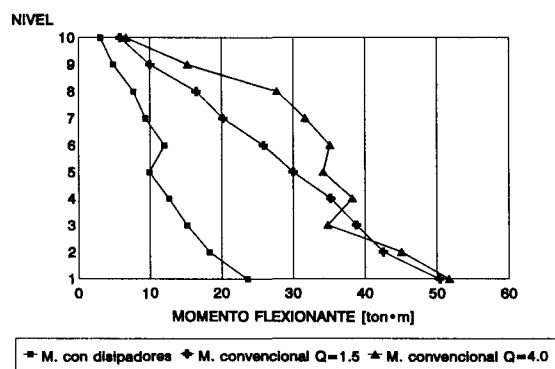


Fig 12. Momentos flexionantes en la línea de columnas β

esta suma no corresponde a contribuciones iguales de las dos columnas que llegan a la junta, debido a que estas están deformadas casi en curvatura simple. Como se mencionó anteriormente, un punto en las figuras 11 y 12 representa al máximo de los momentos que actúan en los extremos de una columna, según el razonamiento anterior este momento llega a ser del orden de 95% de la suma de los momentos que actúan en las trabes que llegan al extremo de la columna al cual le corresponde dicho momento máximo. En cambio las columnas del *marco "elástico"* se deforman con punto de inflexión muy cercano a la mitad de la longitud libre de la columna por lo que las contribuciones de momento de las columnas que llegan a una junta son muy similares y por tanto el máximo de los momentos que actúan en los extremos de una columna será del orden del 50% de la suma de los momentos que actúan en las trabes correspondientes. Esto explica porqué los momentos flexionantes del *marco elástico* son menores que los del *marco dúctil*. La razón del porqué las fuerzas cortantes que actúan en las columnas del *marco dúctil* son menores a las que actúan en las columnas del *marco "elástico"* es la misma. Cuando una columna se deforma en curvatura simple o muy cercana a ella, los cortantes son menores a los que se desarrollan cuando se deforma en curvatura doble con punto de inflexión a la mitad de la longitud de la columna.

Las envolventes de los elementos mecánicos para las otras dos líneas de columnas de los marcos son similares a las de las figuras 7 a 12.

Las comparaciones anteriores son válidas ya que todas las columnas trabajan en su intervalo de comportamiento elástico.

4.5 Envolvente de momentos flexionantes en las trabes de las crujías γ , δ y ϵ

En las figuras 13 a 15 se muestran las envolventes de los momentos flexionantes máximos en cada trabe de cada nivel y cada crujía.

Nuevamente se observa una notable disminución de los momentos flexionantes cuando se usan disipadores con respecto a cuando no se usan. Los momentos flexionantes que actúan en las trabes del *marco con disipadores* son en promedio 53% menores que los que actúan en las trabes del *marco*

"elástico" y 44% menores que los que actúan en las trabes del *marco dúctil*. Nótese que la magnitud de los momentos flexionantes en las trabes del *marco "elástico"* es mayor que la de los momentos de las trabes del *marco dúctil*. Esto último se debe a que las trabes del segundo marco se diseñaron con un factor de comportamiento sísmico mayor que las del primero, así las secciones extremas de las trabes del *marco dúctil* pudieron alcanzar sus momentos de fluencia, por lo que las trabes se articularon en sus extremos (ver figuras 16 a 18) y continuaron absorbiendo la energía sísmica dentro de su intervalo de comportamiento inelástico con poco incremento en el momento flexionante, mientras que las trabes del *marco "elástico"* lo hicieron dentro de su intervalo de comportamiento elástico permitiendo un crecimiento más notable del momento flexionante.

Ya que las trabes del *marco con disipadores* no se articulan puede sostenerse que el uso de disipadores disminuyó, en este caso, los momentos flexionantes actuantes en el marco.

Para tener una idea del comportamiento de las trabes véanse las figuras 16 a 18 en donde se grafica la relación de momento actuante y momento de fluencia. Se observa que este cociente, en las trabes de los niveles 1 a 9 del *marco dúctil*, es mayor que 1 lo cual significa que las trabes se articularon en sus extremos. El crecimiento máximo del momento respecto al de fluencia en este marco es de 25%. Para tener este crecimiento se necesitó una considerable rotación de la articulación plástica, ya que la pendiente de la segunda rama de la curva momento-rotación de las trabes es del 3% de la de la primera rama de dicha curva.

Se observa que las trabes del *marco "elástico"* tienen en promedio un factor de seguridad a la fluencia de 1.8 y las trabes del *marco con disipadores* de 1.4.

4.6 Articulaciones plásticas en los marcos

En las figuras 19 a 21 se muestran las zonas en las cuales el material se plastificó debido a deformaciones por flexión. Aquí se presentan las zonas de la trabe en las que la rotación de la articulación plástica es mayor. No se muestran en el caso de haberse presentado, las articulaciones plásticas de la zona cercana al centro del claro de la viga.

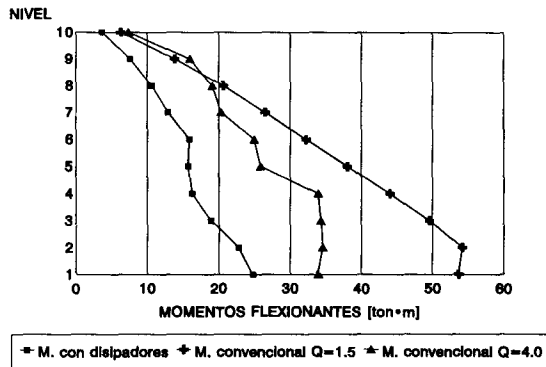


Fig 13. Momentos flexionantes máximos en las trabes de la crujía γ

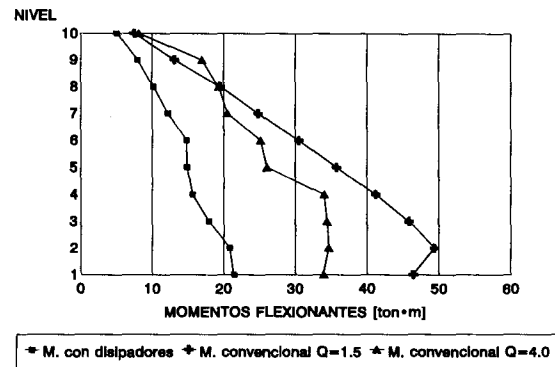


Fig 14. Momentos flexionantes máximos en las trabes de la crujía δ

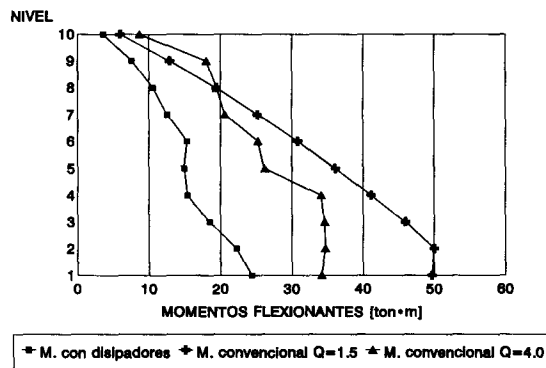


Fig 15. Momentos flexionantes máximos en las trabes de la crujía ϵ

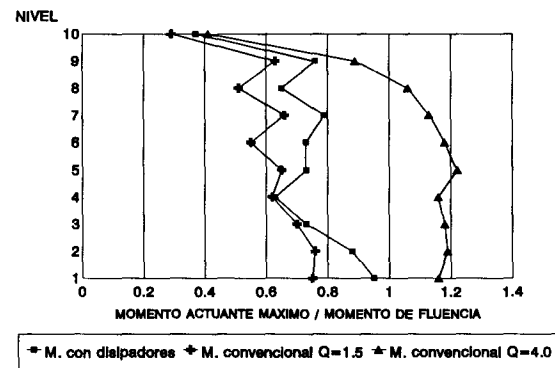


Fig 16. Relación de momento actuante y momento de fluencia de las trabes de la crujía γ

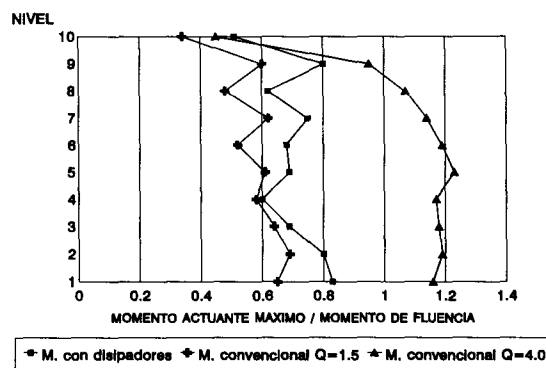


Fig 17. Relación de momento actuante y momento de fluencias de las trabes de la crujía δ

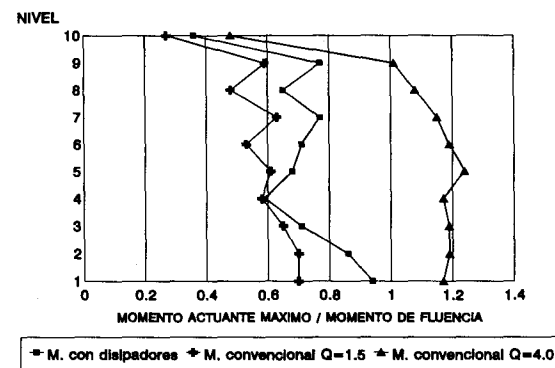


Fig 18. Relación de momento actuante y momento de fluencia de las trabes de la crujía ϵ

En el *marco con disipadores* (figura 19) no existen articulaciones plásticas en traveses ni columnas. Los disipadores son los únicos elementos que experimentan deformaciones inelásticas.

El *marco "elástico"* (figura 20) se comportó elásticamente durante el sismo.

A diferencia de los otros marcos, en el *marco dúctil* (figura 21) existen secciones de elementos que se plastificaron. Se observa que los elementos que trabajaron en el intervalo de comportamiento inelástico son las traveses. El mecanismo de falla potencial del marco es aceptable ya que está definido por articulaciones plásticas en las traveses y en los apoyos del marco. No se presentan mecanismos de falla de entrepiso, ya que el marco se diseñó tratando de evitarlos. Sin embargo, debido a los grandes desplazamientos de los niveles inferiores del marco (ver figura 3 y Tabla 4), las rotaciones plásticas en las traveses son muy grandes. En este marco parte de la energía introducida por el sismo se disipa en dichas articulaciones, a cambio de un daño considerable en las traveses.

La nomenclatura usada en la figura 21 es la siguiente:

$$\bigcirc \quad 0.000 < \theta_{\max} \leq 0.007$$

$$\square \quad 0.007 < \theta_{\max} \leq 0.014$$

$$\bullet \quad 0.014 < \theta_{\max} \leq 0.021$$

donde la rotación máxima acumulada (θ_{\max}) está expresada en radianes. Las deformaciones plásticas acumuladas de los disipadores son menores que 16 cm.

4.7 Coeficiente sísmico asociado a cada marco

Para comparar el cortante basal de diseño con el cortante basal máximo que se desarrolla durante el sismo, se grafica en seguida la variación de la relación cortante basal entre peso de la estructura, la cual se designa como coeficiente sísmico. En la Tabla 5 se compara para cada marco el valor del coeficiente sísmico de diseño con el valor máximo del mismo coeficiente que ocurre durante el sismo. El peso total del marco es 546.04 ton. El coeficiente sísmico de diseño es igual a $0.4 / Q$, donde Q es el factor de comportamiento sísmico que para el *marco con disipadores* es $Q=1.36$ según se deduce más adelante, para el *marco "elástico"* es $Q=1.5$ y para el *marco dúctil* $Q=4.0$.

De la Tabla 5 y las figuras 22a, b y c se observa que los coeficientes sísmicos de diseño del

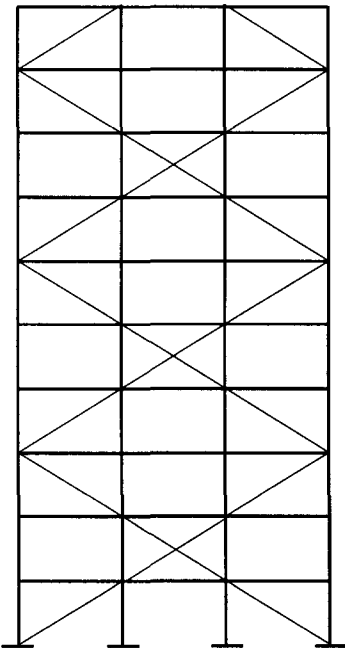


Fig 19. M con disipadores

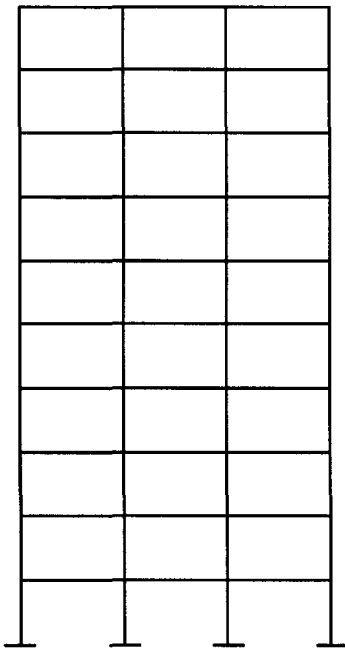


Fig 20. Marco "elástico"

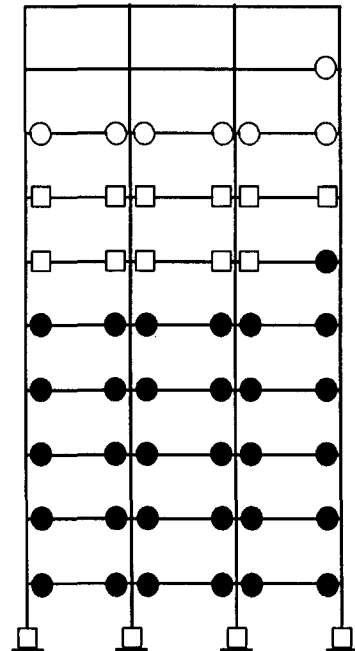


Fig 21. Marco dúctil

Tabla 5. Coeficiente sísmico.				
Marco	Cortante basal máximo [ton].	Tiempo [s]	Coeficiente sísmico máximo	Coeficiente sísmico de diseño, c / Q
Con disipadores	117.98	59.24	0.216	$0.4/1.36=0.29$
Elástico	122.45	59.00	0.224	$0.4/1.5=0.267$
Dúctil	96.11	58.38	0.176	$0.4/4=0.1$

marco con disipadores y del *marco "elástico"* son mayores que el coeficiente sísmico que se desarrolla en ellos. A esto se debe el buen comportamiento de estos marcos. En cambio, el coeficiente sísmico del *marco dúctil* excede al de diseño en aproximadamente un 76%, es decir, las fuerzas inducidas por el movimiento sísmico fueron mayores que las de diseño. Esta es otra de las causas del porqué los desplazamientos y por tanto las rotaciones plásticas del *marco dúctil* hayan sido tan grandes. Lo anterior se debe a que en la zona de períodos para la cual las demandas de desplazamientos inelásticos son mayores a las demandas de desplazamientos elásticos, al diseñar estructuras dúctiles con espectros elásticos reducidos por los factores de comportamiento sísmico (Q) se subestiman los desplazamientos inelásticos y por tanto las fuerzas que se generaran en dichas estructuras.

En las figuras 22a, b y c se dibujan líneas horizontales para representar el valor del coeficiente sísmico de diseño, de esta forma se pueden ver los instantes en que se excede dicho valor en el *marco dúctil* (las figuras 22a, b y c tienen la misma escala).

4.8 Disipación de energía

En esta sección se estudia la disipación de energía solamente en el *marco con disipadores*. Los dispositivos se modelaron con el elemento "TRUSS" del programa DRAIN-2D. Los ciclos histeréticos que se muestran en las figuras 23a y b representan con bastante aproximación el comportamiento real de los disipadores.

En las figuras 23 a y b se muestran los ciclos histeréticos del disipador 1 y del disipador 19 (ver figura 2). Las gráficas se encuentran a la misma escala.

Se observa que el disipador del entrepiso superior trabaja menos en comparación con el del entrepiso inferior. Lo anterior hace ver que es deseable el estudio de otros arreglos de disipadores: por ejemplo, uno en que dichos dispositivos se concentren sólo en los entrepisos inferiores.

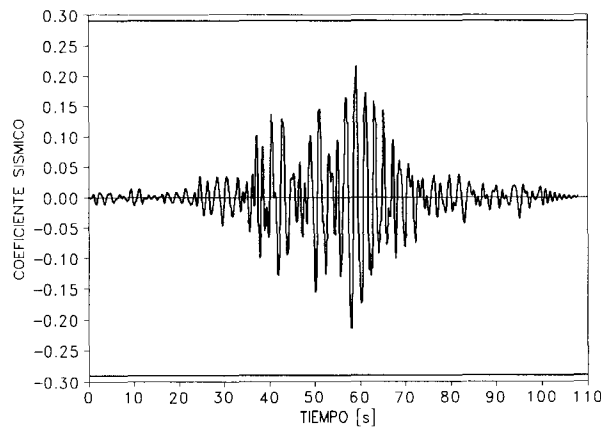
4.9 Resistencias y ductilidades de entrepiso

En esta sección se calculan las relaciones de cortante contra deformación de entrepiso de cada marco en estudio. Para el *marco con disipadores* se calculan dos curvas (figura 24b) de este tipo: una para el marco sin disipadores y otra para el marco incluyendo disipadores.

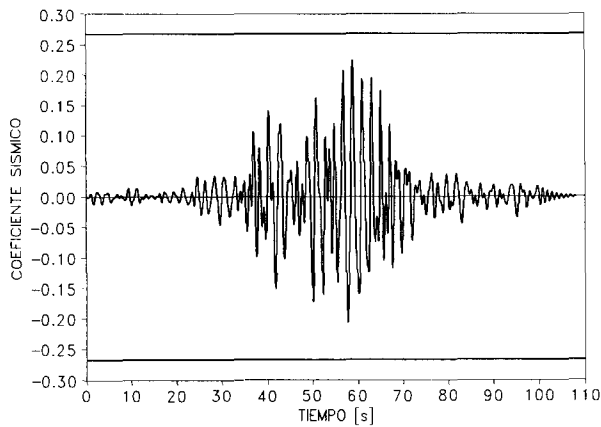
Las curvas se obtienen con un análisis estático inelástico paso a paso. Con estas curvas se obtiene la fuerza cortante de fluencia y el desplazamiento de fluencia de entrepiso. Con estos dos valores se puede calcular:

- 1) La demanda de ductilidad de cada entrepiso durante el sismo. (Esta se puede comparar con la ductilidad global de diseño definida en parte por el factor de comportamiento sísmico Q)
- 2) La relación $\beta_1 = R_{sd}/R_T$. Donde R_T es la resistencia del *marco con disipadores*, y R_{sd} es la resistencia de este marco cuando se le suprimen los disipadores, llamado *marco sin disipadores*.

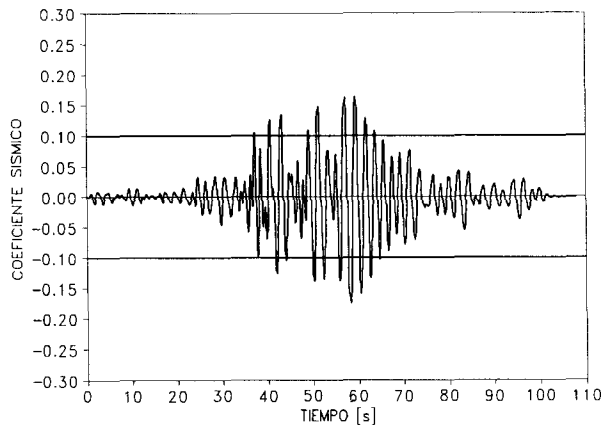
En la Tabla 6 se resumen los valores de las resistencias de entrepiso del *marco sin disipadores*, del *marco con disipadores* y de la relación β_1 que es el cociente de los dos valores anteriores.



a) Marco con disipadores.



b) Marco "elástico".



c) Marco dúctil.

Fig 22. Coeficiente sísmico asociado a los tres marcos

Con los valores de la Tabla 6 se puede estimar el porcentaje de la resistencia total del entrepiso que debe proporcionarse al sistema disipador para no tener daño estructural, cuando se analice un marco como el presente y un arreglo de disipadores similar.

En la Tabla 7 se muestran los valores de las resistencias, de los desplazamientos de fluencia y de la ductilidad de entrepiso del *marco con disipadores*, del *marco "elástico"* y del *marco dúctil*.

La demanda de ductilidad de entrepiso D_e se calcula con la siguiente expresión

$$D_e = \frac{x_{mdx}}{x_y}$$

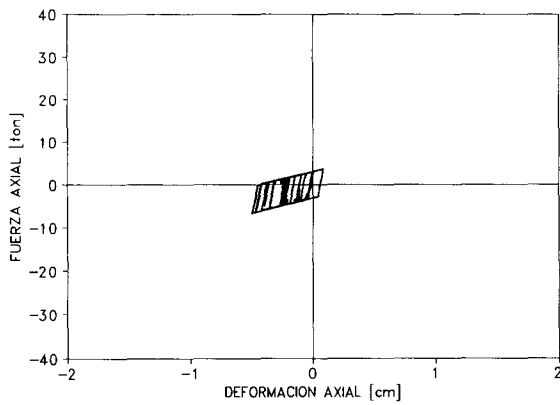
donde x_{max} es el desplazamiento relativo máximo que tiene el entrepiso durante el sismo (ver Tabla 4) y x_y es el desplazamiento en el cual se inicia el comportamiento inelástico del entrepiso (ver figuras 24a y b).

Los valores de las relaciones de resistencia β_1 que se calculan en la Tabla 6 son prácticamente del mismo orden. El valor promedio de β_1 es 0.5, lo cual indica que para que el *marco con disipadores* no tenga daño, el sistema disipador debe proporcionar cerca de un 50% de la resistencia total de entrepiso. Puede decirse que esta condición es suficiente, pero no necesaria y que se aplica para arreglos de disipadores similares al que se ha estudiado aquí y para cuando el sistema disipador posee un 75% de la rigidez total de entrepiso.

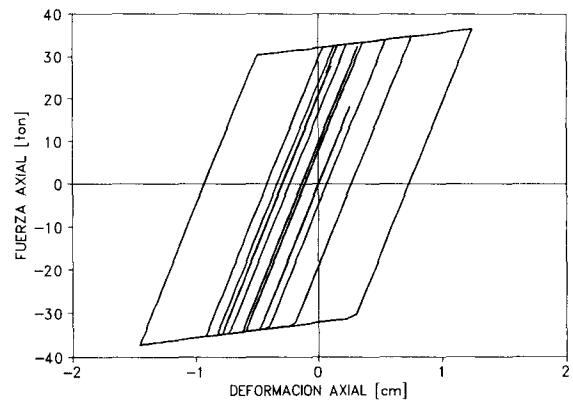
De la Tabla 7 se deduce lo siguiente:

- Resulta obvio que las resistencias (V_R) y los desplazamientos de fluencia de entrepiso sean más grandes en el *marco "elástico"* que en los otros dos marcos. En promedio las resistencias de entrepiso del *marco con disipadores* y del *marco dúctil* son un 28% y un 52% menores, respectivamente que las del *marco "elástico"*.
- Los desplazamientos de fluencia de entrepiso presentan también diferencias de este orden (19% y 51% menores, respectivamente).
- Las demandas de ductilidad de entrepiso tienen diferencias más notables. Las demandas de

Comparación de la respuesta sísmica de...

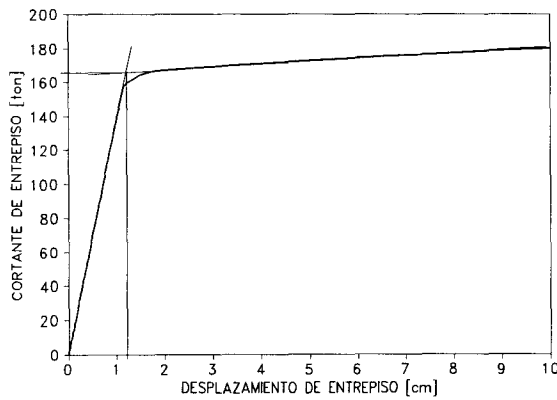


a) Disipador 1

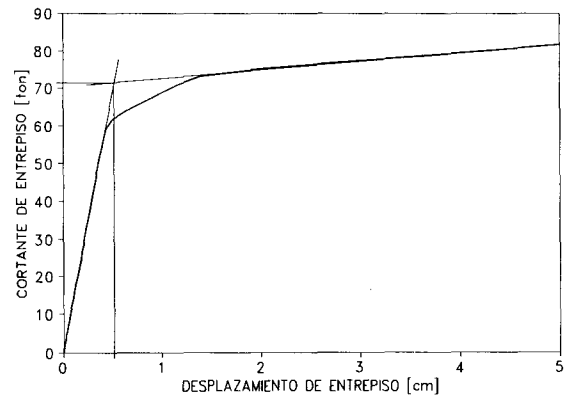


b) Disipador 19

Fig 23. Ciclos histeréticos de dos disipadores

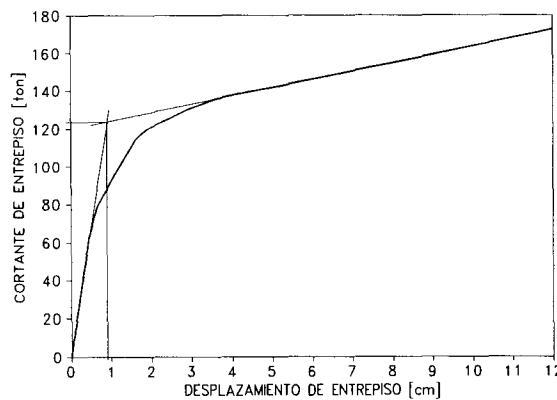


Marco "elástico".

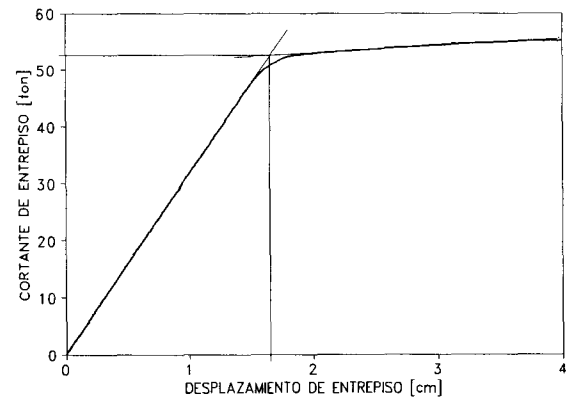


Marco dúctil.

Fig 24a. Desplazamientos y fuerzas de fluencia correspondientes al entrepiso 1 de los marcos analizados



Marco con disipadores.



Marco sin disipadores.

Fig 24b. Desplazamientos y fuerzas de fluencia correspondientes al entrepiso 1 de los marcos analizados

Tabla 6. Valores del factor β_1 del marco con disipadores.			
Entrepiso	Resistencia de entrepiso (V_R) [ton]		β_1
	<i>M. sin disipadores</i>	<i>M. con disipadores</i>	
1	52.7	124.0	0.43
2	51.3	112.8	0.45
3	49.5	106.7	0.46
4	46.6	100.0	0.47
5	42.8	89.0	0.48
6	38.1	74.0	0.51
7	32.0	59.6	0.54
8	25.4	47.0	0.54
9	18.2	35.0	0.52
10	9.6	16.3	0.59

Tabla 7. Demandas de ductilidad de entrepiso.												
En- tre- piso	<i>M. con disipadores</i>				<i>Marco "elástico"</i>				<i>Marco dúctil</i>			
	V_R ton	x_y cm	x_{max} cm	D_e	V_R ton	x_y cm	x_{max} cm	D_e	V_R ton	x_y cm	x_{max} cm	D_e
1	124.0	0.93	1.58	1.70	166.5	1.19	0.86	0.72	71.9	0.52	4.63	8.90
2	112.8	1.22	1.98	1.62	160.0	1.66	1.15	0.69	68.3	0.70	5.64	8.06
3	106.7	1.24	1.69	1.36	127.9	1.40	1.10	0.79	64.7	0.75	5.75	7.67
4	100.0	1.18	1.44	1.22	122.2	1.38	1.00	0.72	59.7	0.65	5.26	8.09
5	89.0	1.10	1.35	1.23	113.7	1.38	0.91	0.66	55.0	0.70	5.22	7.46
6	74.0	1.00	1.46	1.46	102.9	1.27	0.79	0.62	48.8	0.60	4.61	7.68
7	59.6	1.10	1.38	1.25	87.9	1.24	0.72	0.58	41.7	0.60	3.42	5.70
8	47.0	0.74	1.09	1.47	70.9	1.07	0.58	0.54	34.5	0.54	2.15	3.98
9	35.0	0.94	1.09	1.16	47.5	1.00	0.53	0.53	26.7	0.55	1.04	1.89
10	16.3	0.57	0.65	1.14	30.9	0.80	0.32	0.40	15.4	0.40	0.36	0.90

- Osawa, Y. y Shibata A.**, "Characteristic of the nonlinear response of one mass systems under earthquake excitations". Trans. Arch. Inst. Japan, N° 69, 401-404, 1961. (en japonés). Mencionado en Wakabayashi, M. "Diseño de estructuras sismorresistentes", 97-99, McGraw Hill.
- Rodríguez, M.**, "A measure of the capacity of earthquake ground motions to damage structures". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 23, 627-643, 1994.
- Silva, F.L.**, "Criterio para diseño sísmico de estructuras con disipadores de energía". Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM, octubre de 1993.
- Silva, F.L. y Ruiz, S.E.**, "Consideraciones sobre el diseño sísmico de marcos con dispositivos disipadores de energía". Memoria del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, México, 863-869, octubre de 1993.
- Veletsos, A.S. y Newmark N.M.**, "Effect of inelastic behavior on the response of simple systems to earthquake motions". Proc. Second World Conf. Earthquake Eng., Tokyo, 2, 895-912, 1960.