

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS MARCOS: UNO DISEÑADO CONVENCIONALMENTE, Y OTRO CON DISPOSITIVOS TADAS¹

Eduardo Ruiz, Raúl Mejía y Sonia E Ruiz

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
Apdo. Postal 70-472, Coyoacán, 04510 México, DF

ABSTRACT

Two multistory reinforced concrete frames are analyzed and compared according to their seismic responses and initial constructions costs; one designed with energy dissipation devices according to a criterion described in this paper, and the other conventionally designed. Both frames have the same vibration period (2.0 s). The frames are excited with a set of eleven simulated accelerograms. The following responses are compared: maximum overturning moments enveloped at the foundation, maximum axial force at the same level, maximum floor displacements, displacements ductility demands and plastic hinges in the frames. The initial construction and installation costs of the energy dissipation devices (TADAS) are also compared.

RESUMEN

Se analizan y comparan desde el punto de vista de respuesta sísmica y de costos iniciales de construcción dos marcos de 20 niveles de concreto reforzado, uno diseñado con disipadores de energía de acuerdo con un criterio mostrado en este artículo, y el otro diseñado de manera convencional. Ambos marcos poseen el mismo periodo fundamental de vibración (2.0 s). Los marcos se excitan con once acelerogramas simulados a partir del registro obtenido en terreno blando de la ciudad de México durante el sismo de septiembre de 1985. Se comparan los valores medios y las desviaciones estándar de los desplazamientos máximos, demandas de ductilidad de desplazamiento de los disipadores, momentos de volteo máximos del marco, fuerzas axiales máximas al nivel de la cimentación, articulaciones plásticas en los marcos y los costos iniciales de construcción.

¹ Una versión de este artículo se presentó en el XI Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica (1996).

INTRODUCCIÓN

Frecuentemente se utiliza la capacidad de desarrollar comportamiento histerético de los sistemas estructurales resistentes a cargas laterales, como el principal medio para absorber y disipar las demandas extraordinarias de carga que le imponen los sismos. En los últimos años se han intensificado los estudios sobre dispositivos externos de disipación de energía. Estos son capaces de reaccionar a las excitaciones sísmicas de manera propia para reducir el daño que inducen dichas sollicitaciones a la estructura principal. De esta forma no se depende exclusivamente de la ductilidad que puedan desarrollar los elementos estructurales.

En este artículo se estudia el comportamiento de marcos de concreto reforzado con dispositivos de control pasivo. El trabajo mecánico de dichos dispositivos es exclusivamente a flexión y es comparable con los sistemas de disipación de energía denominados TADAS (Tsai y col. 1993 a y b). Este sistema se caracteriza por absorber la energía de deformación provocado por los desplazamientos laterales en uno de los extremos del elemento disipador. El extremo inferior del elemento generalmente se encuentra articulado y conectado a dos contravientos que tienen como única función darle continuidad al sistema de disipación de energía principal (ver fig. 1). El criterio de diseño sísmico del marco con disipadores de energía pretende que el marco de concreto sufra daños menores y que el sistema disipador sea el que absorba en gran medida la energía histerética. En este estudio se comparan la respuesta sísmica estadística del marco convencional y del marco con disipadores. También se incluye una evaluación de costos de construcción de ambos marcos.

MODELOS ESTRUCTURALES

Los marcos analizados en este artículo son de 20 niveles de concreto reforzado. El primero fue diseñado de manera convencional y el segundo con dispositivos disipadores de energía localizados a todo lo alto de la crujía central. En la figura 1 se muestran los marcos analizados.

El marco convencional fue diseñado de acuerdo con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF, 1993; NTC, 1995) vigente en la

ciudad de México. El marco con disipadores fue diseñado siguiendo el criterio que se menciona adelante. Los elementos disipadores de energía trabajan exclusivamente a flexión. Se considera que los disipadores tienen un comportamiento histerético bilineal.

Las masas actuando en cada uno de los niveles para cada marco tienen valores que varían entre $16.83 \text{ t.s}^2.\text{m}^{-1}$ (en el primer nivel) y $12.55 \text{ t.s}^2.\text{m}^{-1}$ (en el último nivel). Los análisis elásticos de los marcos fueron hechos con el programa de cómputo **R.C. BUILDINGS** (1994) y los análisis inelásticos con el programa **DRAIN-2D** (Kannan y Powell, 1973). Los marcos se suponen desplantados en la zona III de la ciudad de México, que corresponde a un suelo altamente compresible. En este estudio no se tomó en cuenta la interacción suelo-estructura.

Se usaron once acelerogramas simulados a partir del acelerograma correspondiente al sismo del 19 de septiembre de 1985 componente E-W, registrado en la ciudad de México en la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Conviene primeramente dar las definiciones de algunos términos usados en este trabajo.

Marco convencional (MC): La característica básica de esta estructura es que cuenta con elementos que aportan rigidez (K_T) y resistencia (R_T) lateral únicamente por medio de las propiedades mecánicas y geométricas de trabes y columnas.

Marco sin disipadores (MSD): Se trata de la estructura anterior sólo que en este caso las secciones transversales de los elementos se reducen uniformemente en toda la altura. La rigidez de entrepiso del marco sin disipadores se define como $K_{sd} = \alpha_1 K_T$ y la resistencia de entrepiso como $R_{sd} = \beta_1 R_T$, donde α_1 y β_1 son menores que la unidad.

Sistema disipador (SD): Este se agrega al marco sin disipadores (MSD). Dicho sistema añade rigidez y resistencia al MSD. Estas se definen como $K_d = \alpha_2 K_T$ y $R_d = \beta_2 R_T$ respectivamente. La combinación de los dos sistemas anteriores (MSD + SD) dan como resultado el marco con

disipadores (MD) con rigidez $K_T = K_{sd} + K_d$, y resistencia $R_T = R_{sd} + R_d$. La figura 2 muestra los conceptos antes definidos.

DIMENSIONES DE LOS MARCOS

Parte de los objetivos de este estudio es comparar la respuesta estadística del MC con la del MD. Por ello, se inicia con el diseño del MC para después obtener el del MD. Con el fin de hacer el análisis comparativo se imponen las siguientes condiciones: (1) El período fundamental de vibración de los dos marcos es el mismo, y (2) los valores de α_1 y α_2 se mantienen constantes durante todo el proceso. Se hace hincapié que en un diseño práctico obviamente no es necesario imponer estas condiciones; sin embargo aquí se consideró adecuado hacerlo para poder comparar las respuestas de estructuras con periodo de vibración similar.

Marco convencional (MC)

Para obtener las secciones transversales preliminares de este marco se usó el modelo de marco plano. Se hicieron iteraciones con diferentes secciones transversales hasta lograr que el MC tuviera un periodo fundamental de vibración igual a 2 s y cumpliera con las especificaciones del RCDF. El periodo de vibración dominante del movimiento registrado en la SCT en 1985 es de 2 s. Con lo anterior, se obtuvieron secciones transversales de columnas de 1.20 x 1.20 m para los primeros cuatro niveles y de 0.80 x 0.80 m para los últimos cuatro niveles; las secciones transversales de las trabes resultaron de $b \times h = 0.45 \times 0.95$ m. La resistencia del concreto usada en los elementos fue igual a $f'_c = 200 \text{ kg cm}^{-2}$. Las rigideces laterales de entrepiso K_T variaron entre 26281 t m^{-1} (en el primer nivel) y 3269 t m^{-1} (en la azotea).

Marco sin disipadores (MSD)

A partir del marco convencional (MC) se obtiene una nueva estructura (MSD) con secciones transversales reducidas. Las secciones ($b' \times h'$) de los elementos del MSD se obtienen a partir de las dimensiones de los elementos del MC ($b \times h$), en función de la fracción de rigidez α_1 que toman los elementos de concreto. Para esto se utilizan las siguientes expresiones (Silva, 1993):

$$b' = \sqrt[4]{\alpha_1} b, \quad h' = \sqrt[4]{\alpha_1} h \quad (1)$$

Las expresiones (1) se obtienen suponiendo que la rigidez del marco depende únicamente de los momentos de inercia de los elementos que la forman. Los efectos por deformaciones axiales y de cortante se desprecian en este estudio. Se han realizado estudios en marcos estructurales sobre los valores que pueden tomar α_1 y α_2 (Silva y col. 1994). Estos han demostrado que se obtiene una buena respuesta estructural cuando se usan valores iguales a $\alpha_1 = 0.25$ y $\alpha_2 = 0.75$; que son los que se suponen en este análisis.

Las dimensiones de las secciones transversales de las columnas del MSD son de 0.85 x 0.85 m en los primeros cuatro niveles, y en los niveles cercanos a la azotea son de 0.57 x 0.57 m; las dimensiones de la trabes son de $b' \times h' = 0.32 \times 0.67$ m. La rigidez lateral del marco sin disipadores se aproxima a $K_{sd} = 0.25 K_T$. El período de vibración de este marco con las secciones reducidas es de 3.8 s. Para incrementar la rigidez lateral del MSD y obtener un periodo de vibrar similar al del MC (2.0 s), se agregaron diagonales y disipadores de energía (tipo TADAS) según se muestra en la figura 2.

RESISTENCIA DE LOS MARCOS

Marco convencional (MC)

El MC se diseñó con un coeficiente sísmico igual a 0.2 g (g, gravedad) de acuerdo con el RCDF, con un factor de comportamiento sísmico $Q = 2$. El diseño de los elementos se hizo con la condición de carga más desfavorable de acuerdo con las siguientes combinaciones de carga:

$$1.4 (D + L_{\max}) \quad (2)$$

$$1.1 (D + L_{\text{inst}} + E) \quad (3)$$

donde 1.1 y 1.4 son factores de carga; D, L_{\max} , L_{inst} y E representan la carga muerta, viva máxima, viva instantánea y sísmica, respectivamente.

Los porcentajes de acero de refuerzo longitudinal en las columnas respecto al área total de la sección transversal variaron entre 1.03 y 3.30 %. En las trabes dichos porcentajes variaron entre 0.5 y 1.3 %.

Marco con disipadores (MD)

El criterio de análisis del MD supone que el marco sin disipadores resiste principalmente cargas verticales y que los disipadores sólo toman efectos horizontales. Para el diseño del MD se realizaron análisis ante las siguientes solicitaciones:

- I) El marco sin disipadores (MSD) sometido a acciones verticales únicamente, con las siguientes dos combinaciones de cargas:

$$1.4(D + L_{\max}) \quad (I.1)$$

$$1.1(D + L_{\text{inst}}) \quad (I.2)$$

- II) El marco con disipadores (MD) bajo la acción exclusiva de fuerzas horizontales. En este caso las cargas de diseño son 1.1 E. Las fuerzas sísmicas E de diseño se obtienen mediante un análisis sísmico modal espectral o utilizando varios acelerogramas representativos (independientes entre sí) del sitio donde se ubica la estructura.

Los efectos de las combinaciones de carga (I.2) y (II) se suman para obtener las fuerzas de diseño totales. Se diseña el marco con la combinación de carga más desfavorable.

En este estudio se hizo un análisis modal espectral con un factor de comportamiento sísmico $Q = 1$ usando el espectro de diseño correspondiente a la zona III de la ciudad de México. El coeficiente sísmico de diseño se tomó igual a 0.4 g.

El siguiente paso del diseño consistió en aplicar factores de reducción ϕ_D a las fuerzas internas resultantes del sistema disipador. De la selección de estos factores de reducción depende el buen comportamiento de la estructura. Para elegir los valores de ϕ_D se hicieron varios análisis paso a paso excitando al marco con el acelerograma SCT-1985. Los valores de ϕ_D se ajustaron iterativamente hasta lograr un buen comportamiento de los disipadores y permitiendo poco daño en el marco de concreto. Los valores ajustados de ϕ_D para el marco en estudio así como los valores de los momentos de fluencia de los disipadores con los que se obtuvo un buen comportamiento en el marco se muestran en la figura 3.

ESTADÍSTICA DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LOS MARCOS

En esta sección se evalúa la estadística de la respuesta del marco convencional (MC) y del marco con disipadores (MD) ante la acción de los once acelerogramas simulados. Las variables seleccionadas en este artículo para el estudio de la respuesta sísmica de los marcos son los valores medios y desviaciones estándar de los desplazamientos máximos respecto a la base, desplazamientos relativos de entrepiso, fuerzas axiales máximas en la cimentación, momentos de volteo máximos en la cimentación, demandas de ductilidad de desplazamiento de los disipadores y articulaciones plásticas en los marcos. Los resultados de estos análisis se describen a continuación.

Desplazamientos máximos horizontales

Los valores medios y las desviaciones estándar (σ) de los máximos desplazamientos de cada nivel respecto a la base se muestran en la Tabla 1. Se observa que los desplazamientos del MD son mayores en los niveles superiores en comparación con los del MC; sin embargo, en los niveles inferiores estos son similares.

Desplazamientos relativos máximos de entrepiso

La Tabla 1 también muestra que los valores medios de los desplazamientos relativos máximos de entrepiso en el MD se encuentran entre 4.04 cm (en el entrepiso 5) y de 1.70 (en el entrepiso 20). Las desviaciones estándar en el mismo marco varían entre 0.61 cm y 0.10 cm. Se observa que ambos marcos presentan desplazamientos relativos medios similares. Debido a esto es razonable realizar comparaciones entre ambas estructuras.

Demandas de ductilidad de desplazamiento de los disipadores

Se calcularon las demandas de ductilidad de desplazamiento en los disipadores (cociente del desplazamiento máximo relativo del disipador δ_{\max} entre el desplazamiento de fluencia δ_{fluen}). Los valores medios y las desviaciones estándar (σ) se muestran en la Tabla 2. Se observa que en los

primeros 7 niveles se obtuvieron las mayores demandas de ductilidad en los disipadores. Su valor medio máximo es de 2.87. Es decir, las demandas de ductilidad de los disipadores son bajas en este caso, con respecto a lo que son capaces de desarrollar. En el nivel 20, se obtuvo una demanda de ductilidad menor que uno, lo que significa que el disipador tuvo una respuesta elástica.

Fuerzas axiales máximas a nivel de cimentación

Los valores medios y las desviaciones estándar de las fuerzas axiales actuando en la cimentación se muestran en la Tabla 3. Estas se obtuvieron de la combinación de las acciones gravitacionales con las sísmicas. Las fuerzas obtenidas toman en cuenta la contribución de las cargas transmitidas por las columnas y por las diagonales (en el caso del MD). La tabla 3 muestra que los valores medios más grandes de fuerzas axiales máximas actuando sobre la cimentación del MC corresponden a las columnas extremas A y D (ver fig. 1); sin embargo, los valores medios más grandes de estas fuerzas del MD corresponden a columnas interiores B y C. Este incremento de fuerzas se debe a la contribución de las fuerzas axiales de las diagonales que forman el sistema disipador localizadas en la crujía central (ver fig. 1)

Momentos de volteo máximos a nivel de la cimentación

Los momentos de volteo en los marcos se calcularon paso a paso en el tiempo, como la suma de los productos de las fuerzas cortantes sísmicas totales generadas en las columnas, por la correspondiente altura de entrepiso. La figura 4 muestra las historias de los momentos de volteo para el MC y el MD sujetos a la excitación SCT-1985. En la Tabla 4 se muestran los valores medios y desviaciones estándar de los momentos de volteo máximos. En dicha tabla se puede observar que el MD tiene un valor medio máximo 29 % más bajo que el asociado al MC. Lo anterior indica claramente que el MD da lugar a menores costos de cimentación que el MC.

Ciclos histeréticos de los disipadores

En la figura 5 se muestra el comportamiento histerético bilineal de los disipadores de los entrepisos 3, 9, 14 y 19 sujetos al acelerograma

SCT-1985. Se presenta el comportamiento del disipador asociando el momento flexionante con su rotación plástica. Se observa que los disipadores absorben más energía en los niveles inferiores que en los superiores (Ruiz E., 1995). Una alternativa de solución estructural, para marcos como el estudiado aquí, podría ser colocar disipadores sólo en sus niveles más bajos.

Articulaciones plásticas en los marcos

En la figura 6 se muestran las zonas donde se plastificó el material que forman los elementos del MC y del MD debido a las deformaciones por flexión al final de la excitación sísmica proporcionada por SCT-1985. Se presentan las máximas rotaciones plásticas en columnas y trabes localizadas en los extremos de dichos elementos. Se observa que las secciones que tuvieron mayor trabajo inelástico fueron las trabes del MD, a diferencia del MC, en donde la magnitud de las rotaciones plásticas de dichos elementos fue menor. Sin embargo, el mecanismo de falla que presenta el MD es aceptable, debido a que está regido por articulaciones plásticas en las trabes y en la base de las columnas, a diferencia del MC en donde hubo concentración de trabajo inelástico en los extremos de las columnas de los niveles intermedios (ver fig. 6), pudiendo incluso, presentarse una falla por entrepiso débil. La aparición de articulaciones plásticas en dichos niveles, provocó también que los desplazamientos relativos de entrepiso fueran mayores en esa zona (ver Tabla 1). Este comportamiento en los marcos se debió a la presencia de modos superiores que rigieron durante la excitación y que definieron la respuesta final que se presenta en la figura 6.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS

Enseguida se realiza un análisis comparativo de costos iniciales de ambos marcos. En este se incluyen costos de instalación del sistema disipador TADAS (Mejía, 1995). El análisis se realiza presupuestado a costos directos. La utilidad y los indirectos no se toman en cuenta debido que estos parámetros son particulares de cada empresa.

La Tabla 5 muestra el análisis comparativo de costos de ambos marcos. En esta tabla se observa que el marco con disipadores resulta un 45.46 % más caro que el marco convencional.

Por otro lado, en la Tabla 6 se muestra el análisis comparativo de costos tomando en cuenta el edificio completo incluyendo acabados. El edificio se supone formado por 4 marcos en dos direcciones ortogonales. En este análisis, el incremento de los costos del edificio con disipadores respecto al edificio convencional se incrementa sólo un 9.40 %. En este segundo caso se toman en cuenta todos los conceptos de obra que se requieren para que el edificio pueda entrar en operación. Como se puede deducir de las tablas, en los presupuestos no se incluyen costos de cimentación. Estos son más bajos para el edificio con disipadores que para el convencional, según se mencionó antes.

CONCLUSIONES

Los dos edificios que se analizan tienen períodos fundamentales de vibración iguales a 2 s, los que coinciden con el periodo de vibración del terreno. Esto hace que este estudio sea de particular interés. Se subraya el hecho de que el marco con disipadores que se analiza se refiere a una *estructura nueva* y no al refuerzo de un marco preexistente.

Las conclusiones que siguen se aplican con rigor a estos casos, pero no a otros con características distintas. Del estudio se deduce lo siguiente:

1. Si se diseñan apropiadamente edificios como el tratado en este estudio, con dispositivos disipadores de energía, se pueden reducir los daños que provocan los movimientos sísmicos en la estructura.
2. Los valores medios máximos de las demandas de ductilidad de desplazamientos de los disipadores para el caso estudiado resultaron bajos con respecto a lo que son capaces de desarrollar. Dichas demandas resultaron entre 2 y 3 en promedio. Se hace notar que los disipadores que se usan en este estudio podrían desarrollar una ductilidad mayor que la que demandaron; sin embargo, esto no fue posible lograrlo en el diseño debido a las restricciones de deformación lateral máxima que impone el RCDF 1993.
3. Se presentó una mayor cantidad de energía disipada en los dispositivos de los niveles más bajos del marco (ver figura 5).

4. Los valores medios máximos de momentos de volteo en el marco con disipadores resultaron 29 por ciento más bajos que los asociados al marco convencional. Lo anterior indica claramente que el marco con disipadores da lugar a menores costos de cimentación que el marco convencional.
5. Los valores medios máximos de fuerzas axiales actuando a nivel de cimentación resultaron mayores en las columnas extremas de los ejes A y D del marco convencional (un 112 % mayor con respecto al marco con disipadores); en cambio para el marco con disipadores, las columnas interiores de los ejes B y C presentaron mayores valores medios máximos de fuerzas axiales (un 110 % mayor respecto al marco convencional).
6. El marco con disipadores tuvo una mejor respuesta inelástica en comparación con el marco convencional, en este último, hubo mayor cantidad de elementos plastificados.
7. El costo del sistema disipador representa el 23.2 % de los costos totales de construcción del edificio con disipadores.
8. Los costos de construcción del edificio con disipadores son 9.40 % más grandes que los del edificio convencional.
9. La comparación de porcentajes de costos de construcción de los edificios aquí estudiados, resultaron mayores que los obtenidos para un edificio convencional y otro con disipadores de 10 niveles previamente estudiado (Mejía, 1995).

AGRADECIMIENTO

Se agradecen los comentarios de L. Esteva y F. Silva. Este estudio fue realizado dentro del proyecto DGAPA-UNAM IN107695

REFERENCIAS

Departamento del Distrito Federal. "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto", Gaceta Oficial del R.C.D.F. 1987, México, D.F.

Departamento del Distrito Federal. "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal", Diario Oficial de la Federación, 3 de julio de 1987, México, D.F.

Enginnering Solutions & Services, Inc. "R.C. Buildings v2.12 & RCB Enhancer v3.1", Manual del usuario, 1994.

Kannan, A, y Powell, G. "General Purpose Computer Program for Inelastic Dynamic Response of Plane Structures", Report No. UCB/EERC 73-6, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley Ca. 1973.

Mejía, R. "Análisis Estructural y de Costos de un Edificio de 10 niveles Diseñado Convencionalmente y otro con Disipadores de Energía Sísmica", Trabajo de Tesis presentado en la Facultad de Ingeniería, UNAM, para obtener el título de Ingeniero Civil, abril, 1995.

Ruiz, E. "Análisis y diseño de un edificio de 20 niveles con disipadores de energía sísmica y sin ellos", Trabajo de Tesis presentado en la Facultad de Ingeniería, UNAM, para obtener el título de Ingeniero Civil, septiembre, 1995.

Ruiz, S.E., Urrego, O.E. y Silva, F.L. "Influence of spatial distribution of energy-dissipating bracing

elements on the seismic response of multistorey frames", *Earthquake Enginnering and Structural Dynamics*, vol. 24, 1995, pp 1511-1525.

Silva, F.L. "Criterio para Diseño Sísmico de Estructuras con Dispositivos Disipadores de Energía", Trabajo de Tesis presentado en la Facultad de Ingeniería, UNAM, para obtener el título de Ingeniero Civil, noviembre 1993.

Silva, F.L., Ruiz S.E., Urrego O.E. and González J. "Seismic Response of Buildings with Energy Dissipation Devices Designed Under Different Assumptions", 9th. International Seminar on Earthquake Prognostics; San José, Costa Rica 19-23 September 1994.

Tsai, K., Chen, H., Hong, S., y Su, Y. "Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction", *Earthquake Spectra*, vol. 9, no. 3, agosto 1993, pp 505-528.

Tsai, K., Li, J., Hong, C., Chen, H. y Su, Y. "Welded Steel Triangular Plate Device for Seismic Energy Dissipation", ATC-17-1, Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control. Vol. 2, pp 687-698, San Francisco, California, marzo 11-12, 1993.

Tabla 1. Estadística de los desplazamientos máximos

a) Desplazamientos con respecto a la base					b) Desplazamientos de entrepiso				
Nivel	MC		MD		Entrepiso	MC		MD	
	Media	σ	Media	σ		Media	σ	Media	σ
20	53.42	4.20	62.50	4.79	20	1.10	0.15	1.70	0.10
19	52.31	4.21	60.79	4.72	19	1.44	0.22	2.10	0.17
18	50.87	4.37	58.69	4.66	18	1.78	0.20	2.48	0.19
17	49.09	4.42	56.21	4.54	17	1.63	0.20	2.61	0.23
16	47.47	4.46	53.60	4.39	16	1.75	0.18	2.76	0.19
15	45.72	4.49	50.84	4.29	15	1.91	0.15	2.89	0.20
14	43.81	4.51	47.95	4.19	14	1.96	0.24	3.05	0.20
13	41.85	4.40	44.90	4.09	13	2.12	0.19	3.14	0.24
12	39.73	4.32	41.77	4.02	12	2.34	0.26	3.19	0.20
11	37.39	4.24	38.58	3.94	11	2.49	0.19	3.25	0.20
10	34.89	4.13	35.33	3.85	10	3.13	0.46	3.32	0.26
9	31.77	3.79	32.01	3.75	9	3.65	0.31	3.42	0.32
8	28.11	3.52	28.59	3.59	8	3.89	0.52	3.62	0.48
7	24.21	3.05	24.96	3.23	7	3.94	0.54	3.82	0.56
6	20.27	2.55	21.15	2.77	6	4.01	0.58	4.03	0.61
5	16.26	2.00	17.11	2.25	5	3.91	0.56	4.04	0.54
4	12.35	1.48	13.08	1.79	4	3.74	0.50	3.95	0.57
3	8.60	1.02	9.13	1.22	3	3.47	0.40	3.75	0.48
2	5.14	0.68	5.37	0.74	2	2.98	0.30	3.27	0.42
1	2.16	0.42	2.10	0.32	1	2.16	0.42	2.10	0.30

Tabla 2. Demandas de ductilidad de desplazamiento de disipadores

Entrepiso	Media	σ
20	0.38	0.02
19	1.19	0.10
18	2.12	0.22
17	2.16	0.23
16	2.23	0.22
15	2.14	0.20
14	1.98	0.18
13	2.15	0.18
12	2.33	0.20
11	2.13	0.18
10	1.96	0.18
9	1.96	0.29
8	2.14	0.34
7	2.33	0.27
6	2.55	0.17
5	2.71	0.20
4	2.87	0.19
3	2.85	0.23
2	2.69	0.26
1	2.53	0.16

Tabla 3. Estadísticas de las fuerzas axiales máximas sobre la cimentación (t)

Marco		Columna A		Columna B		Columna C		Columna D	
		C	T	C	T	C	T	C	T
M C	Media	1604.99	958.25	647.33	—	645.77	—	1606.52	957.22
	σ	20.95	21.28	2.40	—	2.18	—	18.95	19.52
M D	Media	756.20	413.56	1358.92	749.37	1356.61	750.23	755.84	414.05
	σ	15.38	22.45	38.40	39.67	35.82	37.37	17.23	20.41

C = Fuerza de compresión , T = Fuerza de tensión.

Tabla 4. Estadísticas de los momentos de volteo máximos (t·m)

Marco	Máximo (+)		Máximo (-)	
	Media	σ	Media	σ
M C	30223.08	399.61	30285.17	500.98
M D	21530.41	655.94	21594.76	643.89

Tabla 5. Costos del marco convencional y del marco con disipadores

CONCEPTO	MARCO CONVENCIONAL	MARCO CON DISIPADORES
PARTIDA: TRABES		
ACERO LONGITUDINAL	122,869.41	74,345.24
ACERO TRANSVERSAL	15,062.11	16,161.00
CONCRETO	62,842.50	31,517.50
CIMBRA	49,350.00	34,860.00
PARTIDA: COLUMNAS		
ACERO LONGITUDINAL	90,883.01	130,889.53
ACERO TRANSVERSAL	36,444.13	11,104.00
CONCRETO	86,562.00	43,676.50
CIMBRA	48,495.00	34,420.00
PARTIDA: TADAS		
ACERO ESTRUCTURAL A-36 (INCLUYE SOLDADURA) ANCLAS DE ALTA RESISTENCIA A-325 (VARIOS DIÁMETROS)		368,520.00
TOTAL \$:	512,508.16	745,493.77
US \$:	65,706.18	95,576.12
INCREMENTO C/R M.C. :		45.46%

Tabla 6. Costos del edificio convencional y del edificio con disipadores

CONCEPTO	EDIFICIO CONVENCIONAL	EDIFICIO CON DISIPADORES
PARTIDA: TRABES		
ACERO LONGITUDINAL	982,952.88	594,761.92
ACERO TRANSVERSAL	120,496.88	129,288.00
CONCRETO	502,740.00	252,140.00
CIMBRA	394,800.00	278,880.00
PARTIDA: COLUMNAS		
ACERO LONGITUDINAL	727,064.08	1'047,116.24
ACERO TRANSVERSAL	291,553.04	88,832.00
CONCRETO	692,496.00	349,412.00
CIMBRA	387,960.00	275,360.00
PARTIDA: SISTEMA DE PISO, INSTALACIONES DIVERSAS, ACABADOS		
LOSA DE ENTREPISO DE 10 cm	887,115.60	887,115.60
ACABADOS GENERALES	4'648,518.00	3'873,765.00
INSTALACIONES DIVERSAS	1'950,000.00	1'950,000.00
PARTIDA: TADAS		
ACERO ESTRUCTURAL A-36 (INCLUYE SOLDADURA) Y ANCLAS DE ALTA RESISTENCIA A-325 (VARIOS DIÁMETROS)		2'948,160.00
TOTAL \$:	11'585,696.48	12'674,830.76
U.S. \$:	1' 485,345.70	1'624,978.30
INCREMENTO C/R AL E.C. :		9.40%

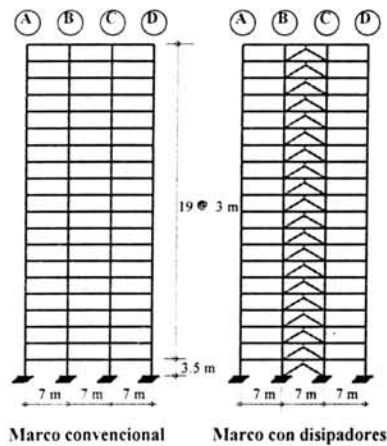


Fig 1. Marcos analizados en este estudio

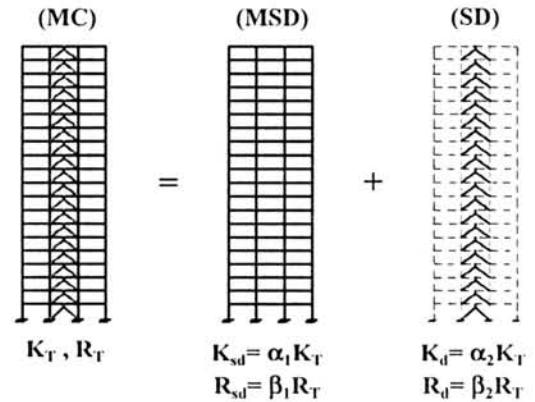


Fig 2. Rigideces y resistencias del marco con disipadores

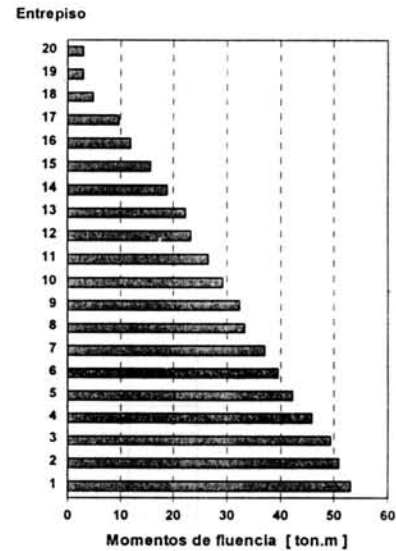
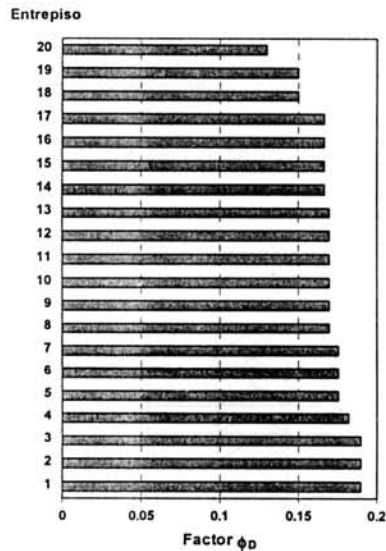
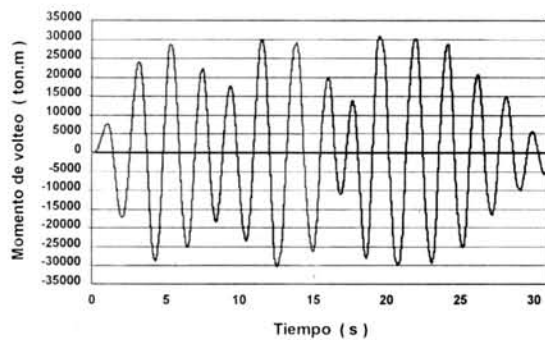
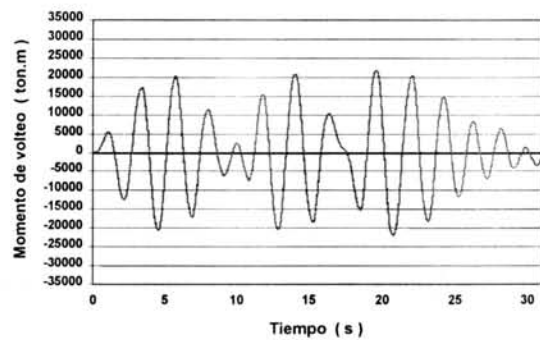


Fig 3. Valores de ϕ_D y momentos de fluencia de los disipadores



Marco convencional



Marco con disipadores

Fig 4. Momentos de volteo en marcos sujetos al acelerograma de SCT-1985

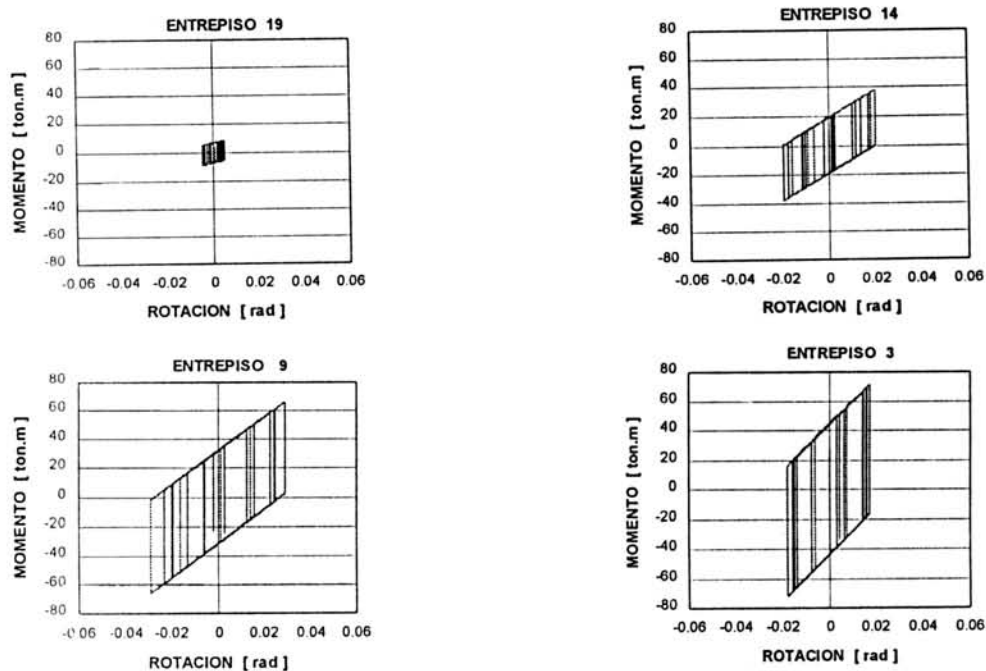


Fig 5. Ciclos histeréticos de disipadores en cuatro entrepisos.
Excitación: acelerograma SCT-1985

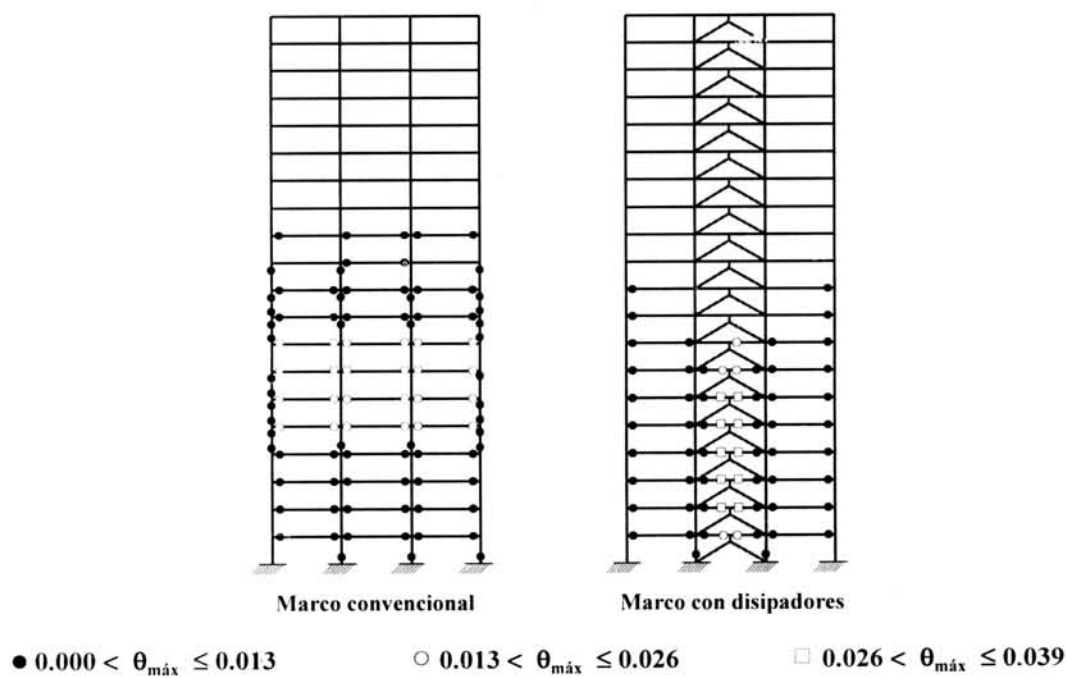


Fig 6. Rotaciones plásticas en los marcos, en radianes