

UTILIZACIÓN DE AMORTIGUADORES METÁLICOS EN ESTRUCTURAS DE BAJA ALTURA

Carolina Tovar

Área Tecnología. Escuela de Arquitectura Carlos Raúl Villanueva,
Facultad de Arquitectura y Urbanismo, UCV
catovar20@yahoo.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para el análisis de edificaciones de baja altura en las que se incorporan amortiguadores metálicos. Este proceso abarca desde el diseño del dispositivo hasta el análisis de la estructura sometida a una excitación sísmica. Para ello se analiza una edificación de concreto reforzado, a la que se incorporan disipadores de energía metálicos. Al aplicar el procedimiento de diseño formulado en las estructuras y configuraciones propuestas, se producen reducciones importantes en los desplazamientos laterales del sistema, lo cual representa un beneficio importante para la edificación, por lo que esta propuesta podría ser considerada como una opción de futura readecuación para este tipo de edificios.

Palabras clave: análisis estructural, disipación de energía, disipadores histeréticos, amortiguadores metálicos.

INTRODUCCIÓN

Los disipadores de energía metálicos, conocidos como amortiguadores histeréticos, se han desarrollado a nivel mundial como una opción atractiva, tanto para la rehabilitación de edificios existentes dañados por terremotos como para el diseño de nuevas estructuras sismorresistentes. Para implementar su uso frecuente es importante contar con procedimientos prácticos para el análisis y evaluación de la respuesta de los edificios (Benavent-Climent, 2011). Recientemente, organizaciones internacionales como FEMA (Federal Emergency Management Agency), SEAONC (Structural Engineers Association of Northern California) y ATC (Applied Technology Council) han propuesto normas para la inclusión de los amortiguadores en estructuras nuevas, sin embargo, aun no se presenta una posición única en cuanto a los procedimientos utilizados para analizar las estructuras que incluyan este tipo de dispositivos. En Venezuela existen escasos ejemplos del uso de amortiguadores en las estructuras, quizás debido principalmente a los altos costos que implican la adquisición, colocación y mantenimiento de los mismos. No obstante, la norma venezolana Covenin 1756-98 (Rev. 2001) “Edificaciones Sismorresistentes” autoriza el empleo de sistemas de control pasivo debidamente justificados analítica y experimentalmente, para reducir la respuesta sísmica (Covenin 1756, 2001). En Tovar (2008) se desarrolló una propuesta de disipador de energía metálico para edificaciones de baja altura, el cual fue caracterizado numérica y experimentalmente. En este trabajo se presenta la propuesta de una metodología para el análisis de estructuras que incluyan este tipo de dispositivos, a través de una aplicación numérica, en la que se analiza un pórtico de concreto reforzado que incluye el disipador en cuestión. El proceso va desde el diseño del dispositivo hasta el análisis de la estructura sometida a una familia de sismos.

786

METODOLOGÍA

Descripción del disipador

El disipador, cuya geometría puede ser vista en la figura 1, está conformado una caja metálica cerrada de dimensiones aproximadas de 15 cm x 15 cm x 32 cm; sus componentes se describen a continuación:

La parte externa, que consiste en cinco láminas de acero de 12 mm de espesor, están atornilladas conformando una caja. Las láminas laterales poseen cinco ranuras de 4mm de espesor; estas ranuras tienen bordes redondeados con acabado liso. La caja tiene solo tapa posterior. La parte interna consiste en tres láminas de acero de 12 mm de espesor, constituidas en una especie de letra “π” invertida. Las láminas verticales tienen cinco ranuras de 4mm de espesor con bordes redondeados de acabado liso. Esta pieza posee una tapa frontal.

La última parte constituye el elemento disipador propiamente dicho; está conformada por cinco láminas de 3 mm de espesor que irán a través de las ranuras de las partes externa e interna anteriormente descritas. Tienen como función disipar la energía inelásticamente a través de su deformación por flexión.

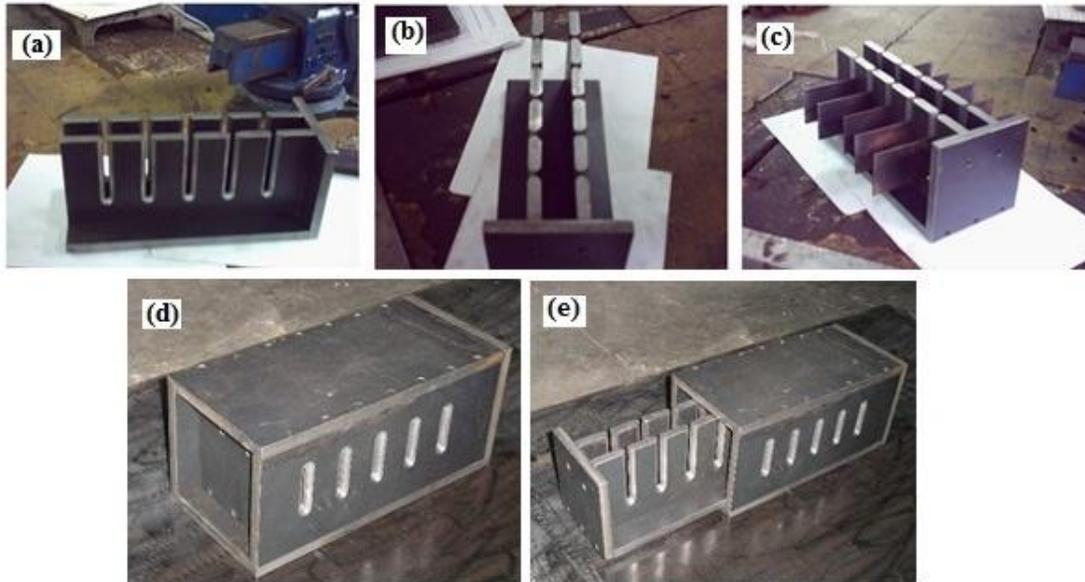


Figura 1. Partes y componentes del disipador de energía desarrollado. (a) Parte interna (vista lateral). (b) Parte interna (vista superior). (c) Parte interna con láminas cedentes. (d) Parte externa (caja). (e) Parte externa e interna integradas

El dispositivo se accionará a través del desplazamiento lateral experimentado por el edificio durante un terremoto. Esta acción se traduce en una carga aplicada en el centro de la tapa frontal, que hará que la parte interna se deslice dentro de la caja. Cuando esto ocurra, las láminas se deformarán a flexión hasta sobrepasar el límite elástico del material y comenzarán a disipar la energía introducida por el sismo. En la figura 2 (izquierda) se observan las posibles ubicaciones del dispositivo en una estructura aporcada (Kelly, Skinner y Heine, 1972) y en la figura 2 (derecha) se muestra la ubicación seleccionada para llevar a cabo esta investigación.

787

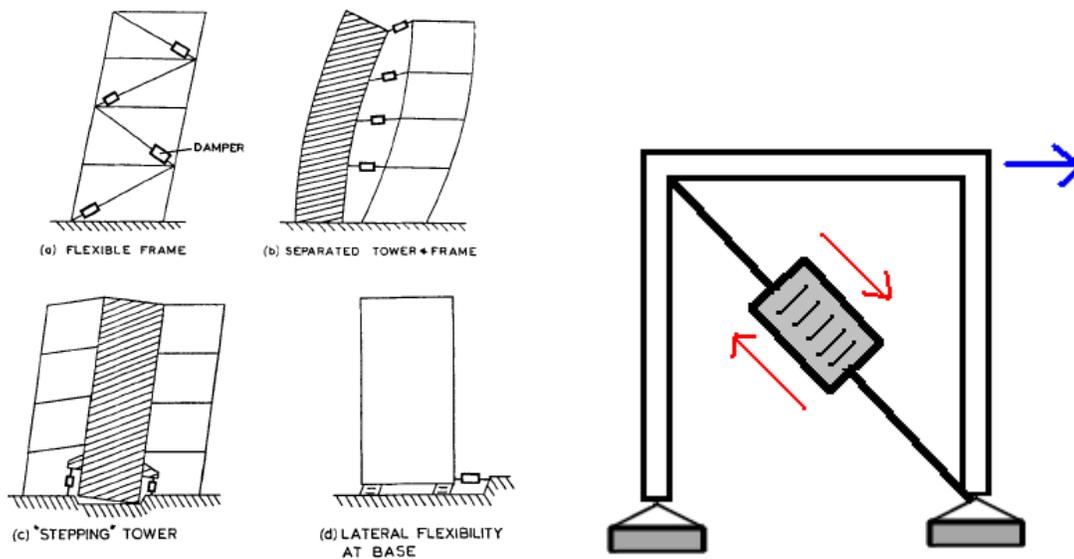


Figura 2. Incorporación del dispositivo en una estructura aporcada

Sistema y propiedades

La estructura analizada corresponde a una edificación de concreto reforzado. En la figura 3 se muestra el plano de planta de la edificación y la elevación de uno de los pórticos en dirección longitudinal. La estructura está conformada por siete pórticos en dirección transversal, separados a 7,20 m y seis pórticos en dirección longitudinal separados a 7,20 m y 3,60 m. En el sistema resistente todas las columnas son de sección cuadrada de 0,40 m x 0,40 m; las vigas en dirección longitudinal son altas de sección rectangular de 0,40 m x 0,60 m y las vigas en dirección transversal son planas de sección rectangular de 0,50 m x 0,30 m.

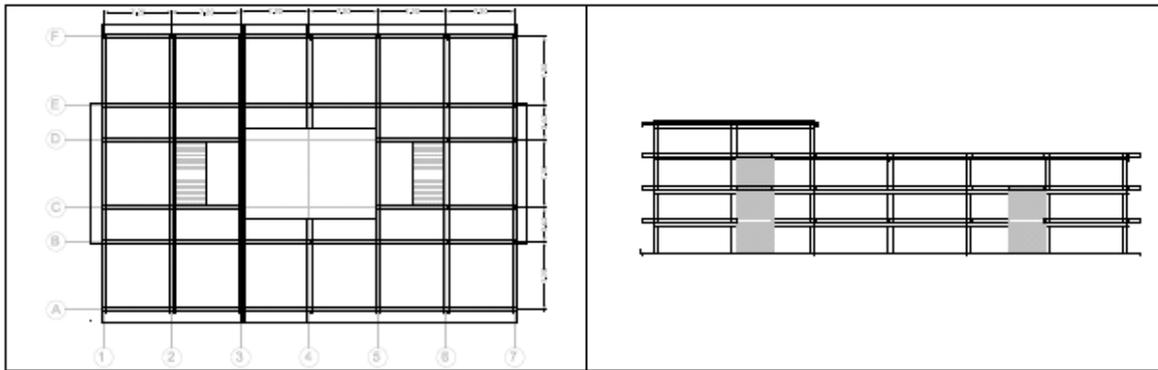


Figura 3. Plano de planta (izquierda) y pórtico en dirección longitudinal (derecha)

Fuente: Sosa y Taboada (2007).

788

Para efectos de esta investigación se tomó uno de los pórticos transversales más cargados de la estructura descrita anteriormente. Se modeló como un pórtico plano de tres pisos, con período fundamental (T) de 1,00 s, masas concentradas en el centro de las vigas, tomando la condición de diafragma rígido y considerando un amortiguamiento (ξ) de 5% para cada uno de los modos de vibración. En la figura 4 se observa el sistema estudiado y sus propiedades dinámicas se muestran en el cuadro 1. La rigidez K_f es la rigidez total del piso. Se consideró una resistencia para el concreto (f'_c) de 21 MPa y un módulo de elasticidad (E_c) de 20.942 MPa.

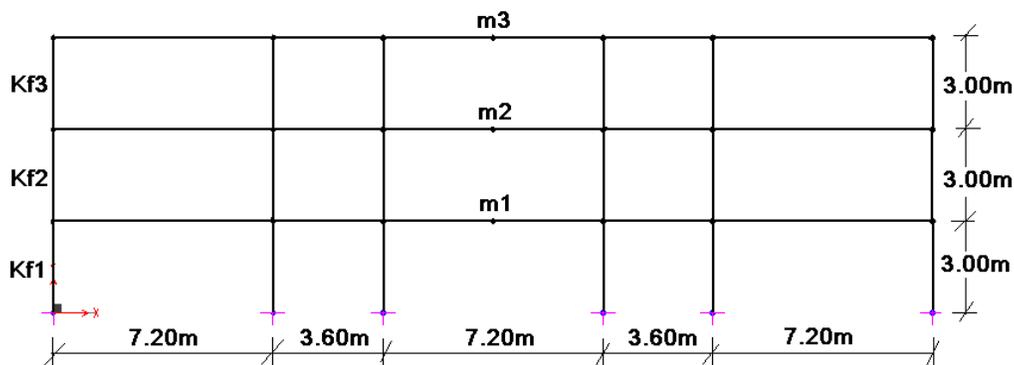


Figura 4. Sistema estudiado

Cuadro 1. Propiedades dinámicas del sistema estudiado

Sistema estructural	Piso	m (1×10^3 kg)	K_f (1×10^6 N/m)
Pórtico	1	598,21	228,06
	2	598,21	228,06
	3	539,64	228,06

Metodología de diseño

Con base en el procedimiento presentado por Tsai, Chen, Hong y Su (1993) y las consideraciones de diseño explicadas en Soong y Dargush (1997), se propone la siguiente metodología de análisis para la inclusión de amortiguadores metálicos a una estructura:

- Analizar el sistema sin amortiguadores y determinar así la rigidez (K_f) de cada piso de la estructura.
- Decidir la ubicación de los dispositivos y considerar que el sistema de amortiguamiento adicional estará conformado por el amortiguador propiamente dicho y los elementos que lo conectarán a la estructura; en este caso, consisten en brazos rígidos de acero constituidos por perfiles tubulares de sección cuadrada, que en conjunto aportarán una rigidez adicional al sistema (K_a).
- Utilizando las propiedades obtenidas de la evaluación experimental, obtener un amortiguador viscoso equivalente, tomando en cuenta la rigidez elástica obtenida del ensayo (K_d) y determinando su constante de amortiguamiento equivalente (C_e), según el procedimiento descrito por Hanson y Soong (2001).
- Establecer una relación entre la rigidez de cada piso (K_f) y la rigidez del conjunto amortiguador (K_a); esta relación se denota como SR .

$$SR = \frac{K_a}{K_f} \quad (1)$$

En este trabajo se adoptó un valor de SR cercano a 2.

- Adaptar los valores de K_d y K_a según el valor de SR seleccionado y determinar los valores de rigidez de piso de la estructura, ahora con los amortiguadores incorporados.
- Analizar la estructura con amortiguadores y repetir los pasos 3 y 4 hasta obtener los resultados deseados para el sistema.

- Rediseñar los amortiguadores, tomando en cuenta sus propiedades elásticas.

La siguiente expresión se utilizó para estimar la rigidez elástica (Kd) obtenida en el ensayo:

$$Kd = N \cdot \frac{E \cdot b \cdot h^3}{0.42 \cdot L^3} \quad (2)$$

En la que N representa el número de láminas del amortiguador, E es el módulo de elasticidad del acero, b es la anchura de las láminas, h es su espesor y L su longitud. Esta relación fue desarrollada en Tovar (2008).

Para la obtención de las respuestas de las estructuras con y sin amortiguadores se realizó un análisis lineal usando el programa SAP 2000 (SAP 2000, 2012), con los acelerogramas de El Centro, Taft y Miyagi-Oki. Los acelerogramas fueron normalizados para una aceleración máxima de 0,30 g. Para ver el efecto de los amortiguadores en las estructuras, se comparan sus desplazamientos laterales, cortantes por piso, períodos de vibración y amortiguamiento modal. En este trabajo solo se presenta el efecto en los desplazamientos laterales por ser el más significativo al nivel de control normativo y presencia de daños en el edificio. En la presentación de los resultados se ha denotado como “caso S/A” a la estructura sin amortiguadores y como “caso C/A” a la estructura con amortiguadores. La figura 5 muestra la disposición adoptada para los amortiguadores, siguiendo las recomendaciones para posición y número de dispositivos dadas en Tovar (2008).

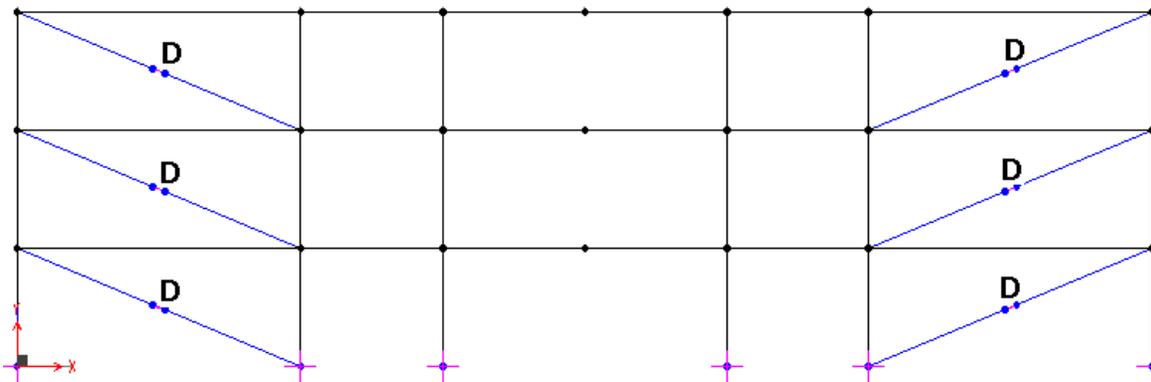


Figura 5. Disposición adoptada para los amortiguadores

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología explicada anteriormente se aplicó de forma iterativa hasta obtener niveles importantes de reducción en la respuesta de la estructura, considerados en este trabajo alrededor de 50%. Se comenzó utilizando el amortiguador con sus propiedades originales, esto es, una rigidez elástica (Kd) obtenida del ensayo de $1,90 \times 10^6$ N/m y una constante de amortiguamiento equivalente (C_e) de $0,049 \times 10^6$ N-s/m, un número de láminas (N) igual a 5, espesor (h) de 0,003 m, longitud (L) igual a 0,126 m y anchura (b) de 0,050 m. En el cuadro 2 se muestran los valores

finales adoptados para la rigidez por piso, incluyendo los amortiguadores (Ka), la rigidez elástica del amortiguador (Kd) y la correspondiente constante de amortiguamiento equivalente (Ce).

Cuadro 2. Valores adoptados para la rigidez del piso con amortiguadores (Ka), la rigidez del amortiguador (Kd) y su constante de amortiguamiento equivalente (Ce)

Piso	Ka (1×10^6 N/m)	Kd (1×10^6 N/m)	Ce (1×10^6 N-s/m)
1	445,76	228,063	2,93
2	445,76	37,54	0,98
3	222,88	228,063	2,93

En el cuadro 3 se aprecian los valores obtenidos para los amortiguamientos en cada modo de la estructura (ξ_n). Nótese que los amortiguamientos modales muestran un incremento importante; así, se observa que en el primer modo el amortiguamiento prácticamente se duplica y en los modos subsiguientes prácticamente se triplica y cuadruplica, respectivamente.

Cuadro 3. Valores obtenidos para el amortiguamiento en cada modo (ξ_n)

Modo	ξ_n (%)	
	Caso S/A	Caso C/A
1	5,00	9,36
2	5,00	18,13
3	5,00	20,56

La variación de los desplazamientos laterales por entrepiso se observa en la figura 6. La estructura sin amortiguadores exhibe desplazamientos laterales que oscilan entre 0,041 m y 0,15 m. Se aprecia que al incluir los dispositivos los desplazamientos experimentan una reducción significativa. En la figura 6(a), que muestra los desplazamientos obtenidos en la estructura para el sismo El Centro, en el primer piso se produce un desplazamiento lateral de 0,0653 m (S/A) y 0,022 m (C/A); la reducción es en término medio 66%. En el piso 2 la disminución registrada es 52% en término medio y en el tercero es 51%.

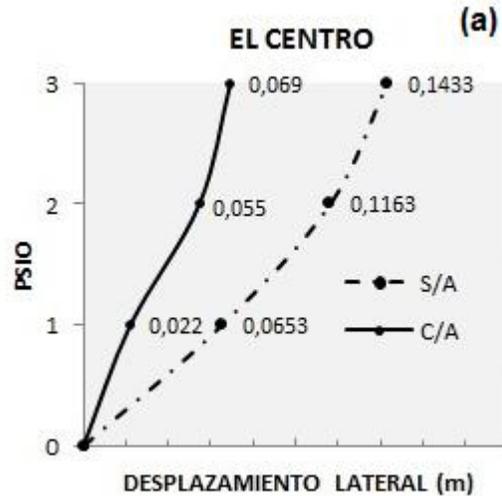


Figura 6(a). Desplazamiento lateral (en metros) de la estructura sin amortiguadores (S/A) y de la estructura con amortiguadores (C/A). Sismo: El Centro.

La figura 6(b) exhibe los desplazamientos obtenidos en la estructura para el sismo Miyagi-Oki. En el primer piso se produce un desplazamiento lateral de 0,041m (S/A) y 0,012m (C/A); la reducción es en término medio de 70%. En el piso 2 la disminución registrada es 60% en término medio y en el tercero es 62%.

792

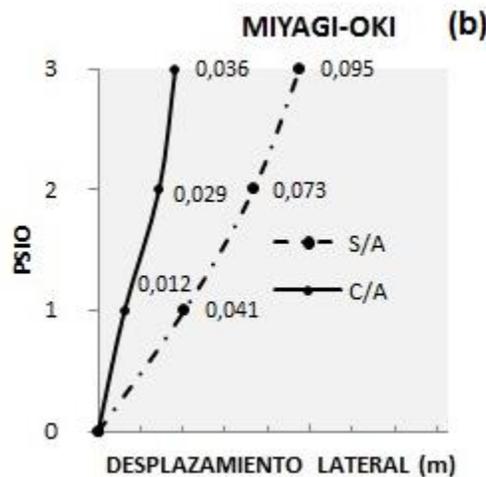


Figura 6(b). Desplazamiento lateral (en metros) de la estructura sin amortiguadores (S/A) y de la estructura con amortiguadores (C/A). Sismo: Miyagi-Oki.

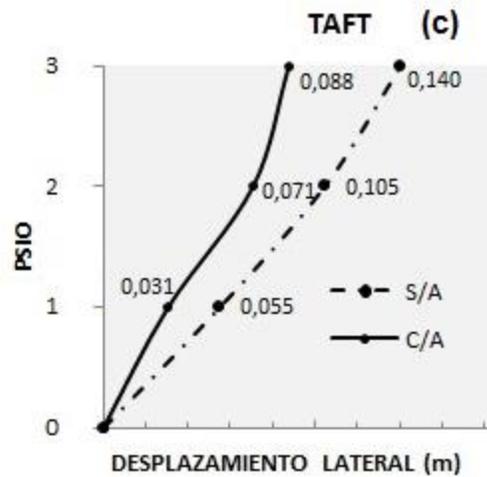


Figura 6(c). Desplazamiento lateral (en metros) de la estructura sin amortiguadores (S/A) y de la estructura con amortiguadores (C/A). Sismo: Taft.

En la figura 6(c) se aprecian los desplazamientos obtenidos en la estructura para el sismo Taft. Nótese que en el primer piso se produce un desplazamiento lateral de 0,055 m (S/A) y 0,031 m (C/A); la reducción es en término medio de 43%. En el piso 2 la disminución registrada es 32% en término medio y en el tercero es 37%.

De los resultados presentados anteriormente se deriva que la inclusión de los amortiguadores en la estructura investigada conlleva un beneficio importante en la misma al reducir notablemente su respuesta, expresada en términos de los desplazamientos laterales. Conviene entonces considerar la utilización de estos dispositivos como una opción de futura readecuación para este tipo de sistemas. Es importante dejar claro que para producir estos efectos hubo que redimensionar los amortiguadores, aumentando el número y espesor de las láminas cedentes. Estos valores se pueden observar en el cuadro 5.

Cuadro 5. Dimensiones modificadas para los amortiguadores

Kd (1×10^6 N/m)	N	b (m)	h (m)	L (m)
37,54	10	0,05	0,0635	0,126
112,62	15	0,05	0,0635	0,126

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se presenta una metodología de diseño para la inclusión de disipadores de energía metálicos en una estructura, que incluye el diseño del dispositivo incorporado.

Al aplicar el procedimiento de diseño señalado en las estructuras y configuraciones investigadas, el dispositivo incorporado produce reducciones significativas en la respuesta del sistema, expresada en términos de los desplazamientos laterales por piso; se registraron reducciones entre 30% y 70%, aproximadamente, hecho que se traduce en un beneficio importante para la estructura, por lo que conviene entonces considerar esta propuesta como una opción de futura readecuación para este tipo de sistemas. Al analizar estructuras con amortiguadores resulta adecuado estudiar su respuesta bajo una amplia gama de posibles acelerogramas o excitaciones que puedan ocurrir en el sitio; de esta manera podrá preverse si los dispositivos tendrán o no el efecto esperado en el sistema estudiado. Entre las investigaciones futuras la metodología de adaptará para realizar análisis no lineales de las estructuras y de los amortiguadores y verificar el comportamiento efectivo de los elementos resistentes y la eficacia de los dispositivos.

REFERENCIAS

- Benavent-Climent, A. (2011). An energy-based method for seismic retrofit of existing frames using hysteretic dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, pp. 1385-1396.
- Covenin-Mindur 1756-2001 (2001). *Edificaciones sismorresistentes*. Caracas: Comisión Venezolana de Normas Industriales.
- Kelly, J., Skinner, R. y Heine, A. (1972), Mechanism of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures. *Bull. N. Z. Natl. Soc. Earthquake Eng.*, vol. 5(3), pp. 63-88.
- Hanson, R.D. y Soong, T.S. (2001). *Seismic design with supplemental energy dissipation devices*, Monograph N° 8. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute.
- SAP 2000 Advanced 14.0.0, Structural Analysis Program, Copyrigh 1976-2012, Computer and Structure, Inc.
- Soong, T.T. y Dargush, G.F. (1997). *Passive energy dissipation system in structural engineering*. London (UK)-New York (USA): John Wiley and Sons.
- Sosa, M. y Taboada, A. (2007). Evaluación del riesgo sísmico en edificaciones escolares tipo cajetón cerrado. Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Tovar, C. (2008). Utilización de disipadores de energía en edificaciones de baja altura. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Tsai, K-C, Chen, H-W, Hong, C-P y Su, Y-F. (1993). Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake Spectra*, vol. 9(3), pp. 505-528.