

Modelación analítica de la respuesta de estructuras con disipadores de energía pasivos del tipo histeréticos ante cargas dinámicas

Gibrán Cano¹, César Dávalos², Abraham López², Víctor López², Marisela Soto², Iván Alvarado², Jorge Chavoya³

¹Estudiante del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

²Docente del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

³Profesor Investigador Titular B. Universidad de Guadalajara Centro Universitario de la Costa

Resumen

Este trabajo se enfoca en la modelación de disipadores de energía pasivos del tipo histerético con el objetivo de hacer más eficiente el método de contraventeos en estructuras. En los últimos años se ha estudiado la aplicación de estos disipadores de energía los cuales tiene como objetivo el disminuir la magnitud de los efectos ocasionados en la estructura por las fuerzas originadas por sismos. Se presenta un modelo de daño en el marco de referencia de plasticidad en grandes deformaciones para su evaluación analítica.

Palabras clave: Disipadores histeréticos, modelo daño, plasticidad.

Introducción

México cuenta con una serie de eventos sísmicos que presentan un factor de peligro significativo, un ejemplo de gran importancia es el sismo de 1985 el cual contó con una magnitud de 8.1 en la escala Richter. Se estima se tuvieron más de 10 000 decesos y cerca de 50 000 heridos, así también más de 770 edificios colapsados o severamente dañados. Otro ejemplo de gran magnitud es el sismo del 2012 en Ometepep guerrero, éste tiene como particularidad especial el ser el sismo con más réplicas registradas en

terremotos mexicanos ya que contó con cuarenta y cuatro eventos de magnitud superior a 4.5 en la escala Richter en un periodo de 30 días [1]. Mediante éstos y otros eventos similares se puede corroborar que las sollicitaciones sísmicas presentan un riesgo estructural importante por lo que es necesario desarrollar métodos y técnicas que ayuden a mitigar los daños que éstos puedan ocasionar.

Métodos basados en la disipación de energía para estructuras han sido utilizados no sólo

para proteger la integridad de la estructura misma, sino para proteger y proveer una mayor seguridad a los usuarios de éstas en la presencia de sismos. Se debe tener en mente que no sólo se obtendrá un beneficio monetario al mitigar los daños que se puedan presentar en la estructura; al implementar este tipo de dispositivos se tiene como objetivo principal el evitar la pérdida de vidas que es la causa más importante de la realización de este trabajo.

Un método convencional, utilizado para mitigar los efectos ocasionados en una estructura por la aparición de fuerzas externas originadas por sismos es el de contraventeos de marcos (braced frames) en el cual se trabaja con puntales de acero los cuales tienen como objetivo rigidizar la estructura en la aparición de cargas dinámicas que generan desplazamientos horizontales. Así mismo, éstos impactan de manera de diferente a la estructura de acuerdo a la configuración en la cual son colocados. Este es un método económico en comparación a los que tienen integrados un sistema de gatos hidráulicos, sin embargo, también es un método menos eficiente ya que estos al trabajar con base a la deformación que dichos disipadores presentan, provoca que sean más propensos a presentar algún daño en su estructura lo que genera que, aunque sean más baratos en primera estancia, el remplazo de estos genera un gasto extra lo que a su vez podría generar que este método se vuelva costoso. Algunos otros métodos que se utilizan como sistemas de control pasivos de respuesta sísmica son los de aislamiento sísmico y sistemas de efecto de masa [2].

Este trabajo se enfoca en la modelación de disipadores de energía pasivos del tipo histerético con el objetivo de hacer más eficiente el método de contraventeos en estructuras. En los últimos años se ha estudiado la aplicación de estos disipadores de energía los cuales tiene como objetivo el disminuir la magnitud de los efectos ocasionados en la estructura por las fuerzas originadas por sismos. Se cuenta con estudios en los cuales se muestra la eficiencia de dichos disipadores mediante la investigación de la capacidad que tienen para absorber energía de acuerdo a su geometría.

Así mismo, se han realizado estudios en los cuales se utilizaron disipadores de energía elaborados con distintos materiales para poder determinar las diferentes ventajas y desventajas que provee el utilizar un material distinto al acero dulce. Gracias a esto, se puede tener más seguridad de que el material utilizado es el adecuado para trabajar como disipador de energía. Sin embargo, sólo se han realizado estudios sobre el comportamiento que tiene el disipador de energía por sí sólo en la presencia de fuerzas que simulan las fuerzas generadas por un sismo ([3], [4], [5]), y con respecto a la respuesta que presentará la estructura sólo se han realizado experimentos en los cuales se simula el efecto de un sismo en un en una mesa vibratoria del cual se mide por medio de sensores la respuesta que tiene la estructura [6]. Aunque se han realizado experimentos sobre la eficiencia que de dichos disipadores de energía presentan, existe escasa información sobre el análisis estructural y la respuesta que tendrá una estructura que cuenta con disipadores de

energía pasivos de tipo histérico ante la aparición de fuerzas ocasionadas por un sismo.

Dada la necesidad de entender y analizar de mejor manera el cómo los disipadores de energía trabajan en conjunto con la estructura, de acuerdo los estudios realizados sobre los disipadores de energía de tipo histérico, se modelará de forma numérica la respuesta que tendrá una estructura que cuenta con estos disipadores al estar comprometida por las fuerzas dinámicas generadas de un sismo. Con esto se podrá observar la forma en que estos disipadores de energía ayudan a mitigar los efectos ocasionados por un sismo.

Esto se llevará a cabo mediante la utilización del software MATLAB en el cual se elaborará un algoritmo en el cual se utilizará el modelo de matrices de rigidez para conocer las fuerzas que se presentan en una estructura. A dicho modelo se añadirá el algoritmo correspondiente a la deformación plástica que se genera en los dispositivos utilizados como disipadores de energía, mediante un modelo de daño, para que al interactuar entre sí estos modelos se obtenga una respuesta más apegada a la realidad de cómo es que dichos disipadores influyen en la estructura.

Mediante el modelo histérico de los disipadores de energía se podrá observar la relación entre las fuerzas que aparecen en la estructura por causa de un sismo y los desplazamientos que se generan por las mismas.

1.1 Justificación

La importancia de este trabajo recae en el problema que los sismos presentan al generar daños a una estructura, dichos daños generan que ésta se debilite y así pasa a generar un ambiente de peligro en el cual se puede presentar la pérdida de vidas por el posible colapso de dicha estructura.

Los disipadores de energía pasivos de tipo histérico, al ser un método económico, a diferencia de métodos que incorporan un sistema hidráulico de disipación de energía, generan una alternativa económica basada en su facilidad de colocación y, así mismo, su fácil remplazo por lo que es importante investigar la influencia que estos tienen en la mitigación de daños en una estructura.

Una cualidad que presenta este tipo de método es que al funcionar como un punto de falla disminuye la sobre carga que se presentaría en la estructura por causa de las fuerzas dinámicas generadas por un sismo.

Modelación analítica de disipadores histéricos

Se presentarán, de manera resumida, los principales puntos del algoritmo para la simulación analítica de disipadores histéricos ante cargas dinámicas.

2.1 Algoritmo de análisis estructural por medio del método de rigideces

Para determinar las funciones que realizará a cabo el algoritmo, se realizó una lista con una serie de pasos a seguir para llevar a cabo la determinación de la matriz de rigidez de una estructura. Se usó como base el algoritmo mostrado por Roberto Aguiar Falconí [7]; sin embargo, el algoritmo presentaba algunos errores por lo que se corrigió y se adaptó para alimentar información por medio de una hoja de cálculo – dicha información está dada en unidades de metros y toneladas.

1. Definición del número de nodos del sistema.
2. Definición de restricciones en apoyos.
3. Definición de la ubicación de los nodos de miembros por medio de coordenadas.
4. Definición de propiedades de miembros como lo son área, Inercia, Módulo de elasticidad.

5. Determinación de matriz de rigidez local.
6. Determinación de matriz de rigidez global.
7. Definición de fuerzas externas actuantes en nodos y miembros.
8. Solución de ecuaciones para determinar las fuerzas y desplazamientos locales de cada miembro.

En la siguiente subsección se mostrará la validación de esta implementación.

Validación del algoritmo

Para determinar la matriz de rigidez de una estructura, el algoritmo presenta las siguientes entradas y salidas de información con el ejemplo de un edificio de dos plantas con 4 metros de claro y 2.5 metros de altura entre cada entrepiso. Así mismo, para fines prácticos se utilizaron perfiles cuadrados donde la sección para las columnas es de .4 m x .4 m y para las vigas .3m x .4m, ver Fig. 1.

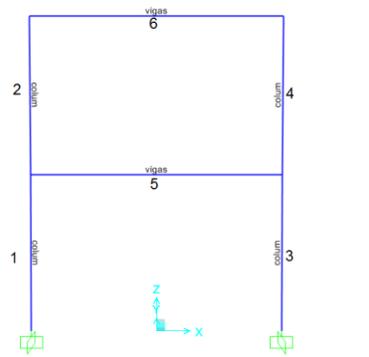


Figura (a)

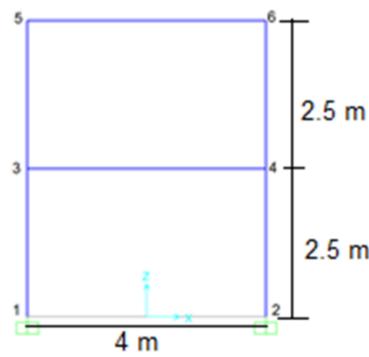


Figura (b)

Fig. 1. Caso de estudio de ejemplo, a) elementos, b) nodos.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del caso de estudio de ejemplo para corroborar que el algoritmo trabaje adecuadamente se encuentran en la Tabla 1 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Nodo	x (cm)	Y (cm)	Rotación (rad)
1	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000
3	0.0001277	-0.0000018	-0.0000624
4	0.0001275	-0.0000053	-0.0000487
5	0.0002831	-0.0000029	-0.0000544
6	0.0002796	-0.0000078	-0.0000222

Tabla 1. Resultados MATLAB de caso de estudio de ejemplo, desplazamientos.

Miembro	Nodo	Fuerza axial (Ton)	Fuerza cortante (Ton)	Momento(Ton-m)
1	1	2.486	1.708	3.254
	3	-2.486	-1.708	1.017
2	3	1.464	0.319	0.256
	4	-1.464	-0.319	0.542
3	2	7.115	2.292	3.738
	5	-7.115	-2.292	1.991
4	5	3.336	2.181	2.251
	6	-3.336	-2.181	3.201
5	3	0.111	1.021	-1.273
	5	-0.111	3.779	-4.243
6	4	2.181	1.464	-0.542
	6	-2.181	3.336	-3.201

Tabla 2. Resultados MATLAB de estudio de caso de ejemplo, Fuerzas en los miembros.

Para corroborar los datos obtenidos se hizo una comparación con los resultados obtenidos en la utilización del software SAP2000 en el cual se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3 y Tabla 4.

Nodo	x (cm)	Y (cm)	Rotación (rad)
1	0.00000	0.00000	0.00000
2	0.00000	0.00000	0.00000
3	0.00013	0.00000	-0.00006
4	0.00013	-0.00001	-0.00005
5	0.00030	0.00000	-0.00006
6	0.00029	-0.00001	-0.00002

Tabla 3. Resultados SAP2000 de estudio de caso de ejemplo, desplazamientos.

Miembro	Nodo	F. axial	F. cortante	Momento
1	1	2.497	1.708	3.285
	3	-2.497	-1.708	0.983
2	3	1.464	0.333	0.276
	4	-1.464	-0.333	0.556
3	2	7.104	2.293	3.751
	5	-7.104	-2.293	1.981
4	5	3.336	2.167	2.229
	6	-3.336	-2.167	3.189
5	3	0.125	1.033	-1.259
	5	-0.125	3.767	-4.210
6	4	2.167	1.464	-0.556
	6	-2.167	3.336	-3.189

Tabla 4. Resultados SAP2000 de estudio de caso de ejemplo, fuerzas en los miembros.

De acuerdo a los resultados obtenidos tanto de MATLAB como de SAP2000 se obtuvo la diferencia mostrada en las Tabla 5, donde los valores positivos representan una magnitud mayor en los resultados obtenidos de SAP2000.

Nodo	x (cm)	Y (cm)	Rotación (rad)
1	0.00%	0.00%	0.00%
2	0.00%	0.00%	0.00%
3	4.70%	0.00%	2.56%
4	4.85%	0.00%	0.62%
5	4.03%	0.00%	2.94%
6	4.25%	0.00%	3.60%

Tabla 5. Diferencia de resultados tabla 5 vs tabla 7, desplazamientos.

Se puede observar que las diferencias no son mayores a un 5% por lo que los resultados obtenidos con el algoritmo son estables con respecto al software SAP2000.

2.2. Algoritmo análisis dinámico – método Newmark- β .

Se generó un algoritmo en el programa computacional MATLAB capaz de generar un análisis dinámico de una estructura mediante la aplicación de una aceleración sobre la matriz de masas. Dicho algoritmo se generó mediante el seguimiento de los siguientes puntos.

1. Determinación de la matriz de rigidez de la estructura.
2. Definición de la matriz de masas condensada.
3. Definición de intervalos de análisis.

4. Definición de la aceleración aplicada al sistema.

5. Solución de ecuaciones para obtener la aceleración, velocidad y desplazamientos en cada paso de tiempo.

Validación del algoritmo

Por fines de control, se propone una ecuación de desplazamiento senoidal, cuya aceleración es dada por:

$$a(t) = -A\omega^2 \sin(\omega t) \quad \text{Ec. (1)}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{Ec. (2)}$$

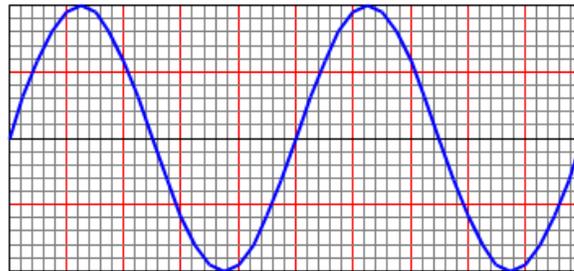


Fig. 2. Representación de aceleración senoidal dada la ec. (1).

Dados los resultados obtenidos con el algoritmo y SAP2000 se obtuvo la siguiente diferencia mostrada en la siguiente tabla, en las cuales se observan mayores desplazamientos en los resultados obtenidos por SAP2000.

Dados los resultados obtenidos con el algoritmo y SAP2000 se obtuvo la siguiente diferencia mostrada en la Tabla 6 en las cuales se observan mayores desplazamientos en los resultados obtenidos por SAP2000.

Nodo	Valor	% Dif. x (cm)
1	Max	0%
1	Min	0%
2	Max	6%
2	Min	6%
3	Max	3%
3	Min	3%
4	Max	0%
4	Min	0%
5	Max	3%
5	Min	3%
6	Max	5%
6	Min	5%

Tabla 6. Comparación de resultados caso de estudio, MATLAB vs SAP2000.

2.3. Análisis del comportamiento dinámico de estructuras con disipadores pasivos del tipo histeréticos

Para el desarrollo del algoritmo correspondiente al daño de los disipadores de energía empleados se utilizará un área efectiva dada por un rectángulo de 20 cm de largo y 10 cm de ancho. Así mismo se utilizará un Módulo de Young de 2040000 kg/cm² y un coeficiente de Poisson de 0.3. El algoritmo desarrollado se realizó mediante las siguientes consideraciones:

El esfuerzo de cizalladura es aplicado en los disipadores en cada paso de tiempo; éste es correspondiente a la fuerza horizontal que aparece en los nodos en que se encuentran colocados los disipadores de energía entre el área en cada paso de tiempo de dichos disipadores.

La deformación unitaria está dada por el esfuerzo de cizalladura entre el Módulo de cizalladura. Dado que el daño aplicado en el disipador de energía será presentado mediante la disminución del área de los

miembros de contraventeos unidos a dicho disipador se tomará un Módulo de cizalladura de 807692.4 dada la ecuación (3).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{Ec. (1)}$$

Disminución de área correspondiente a daño en disipadores. Para representar el daño dado en los disipadores de energía se tomará el porcentaje de daño obtenido y se aplicara a los elementos de contraventeo que se encuentran unidos al nodo del disipador, esto mediante la reducción del área de los elementos con respecto al porcentaje de daño lo que

generara una disminución en la rigidez de la estructura.

En la siguiente subsección se mostrarán los resultados correspondientes al análisis del comportamiento dinámico bajo cargas senoidales.

Validación del algoritmo

Se realizó una comparativa del comportamiento de las siguientes tres estructuras, ver Fig. 3

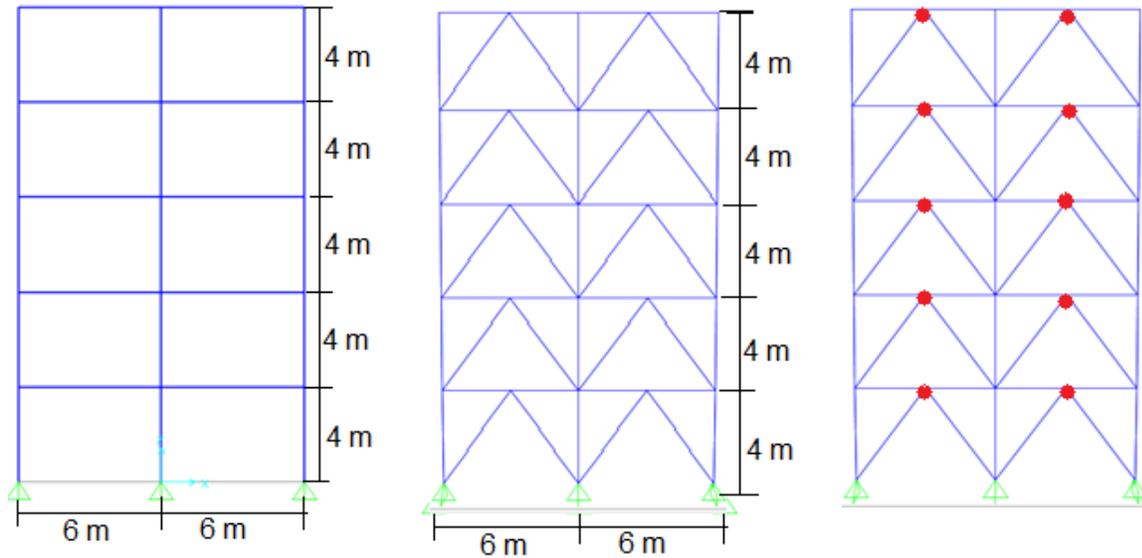


Figura (a)

Figura (b)

Fig. 3. Caso de estudio de ejemplo, a) Estructura caso 1 – sin contraventeo, b) Estructura caso 2 – con contraventeo, c) Estructura caso 3 – con contraventeo y disipadores del tipo hysterético.

Para determinar la matriz de masas se utilizó una carga muerta dada por el área tributaria de la losa de entrepiso de 20 cm de espesor mostrada en la Fig. 4 en la cual se consideró una densidad del concreto de 2400 kg/m^3 ,

también se consideró una carga muerta de muro de 150 kg/m^2 , así como también una carga viva de 245 kg/m^2 de acuerdo al reglamento de construcción de Cd. Juárez [8].

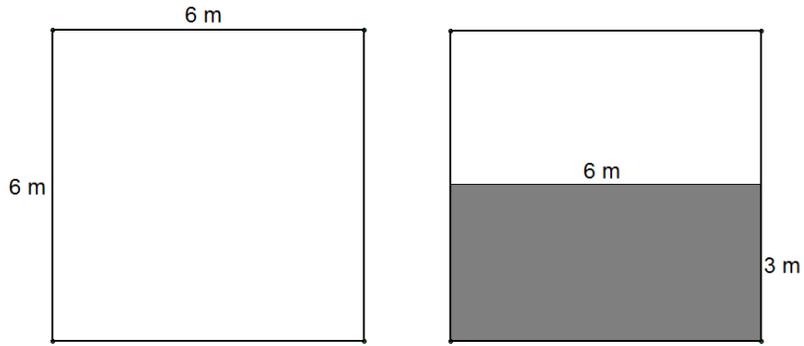


Figura (a) Figura (b)
 Fig. 4. Losa de entrepiso, a) Dimensiones b) Área tributaria.

El desplazamiento horizontal de cada entrepiso se muestra en las siguientes figuras - para los tres casos.



Fig. 5. Desplazamientos generados en el tiempo para el caso 1, tiempo (abscisas, segundos), Desplazamientos (ordenadas, metros).



Fig. 6. Desplazamientos generados en el tiempo para el caso 2, tiempo (abscisas, segundos), Desplazamientos (ordenadas, metros).

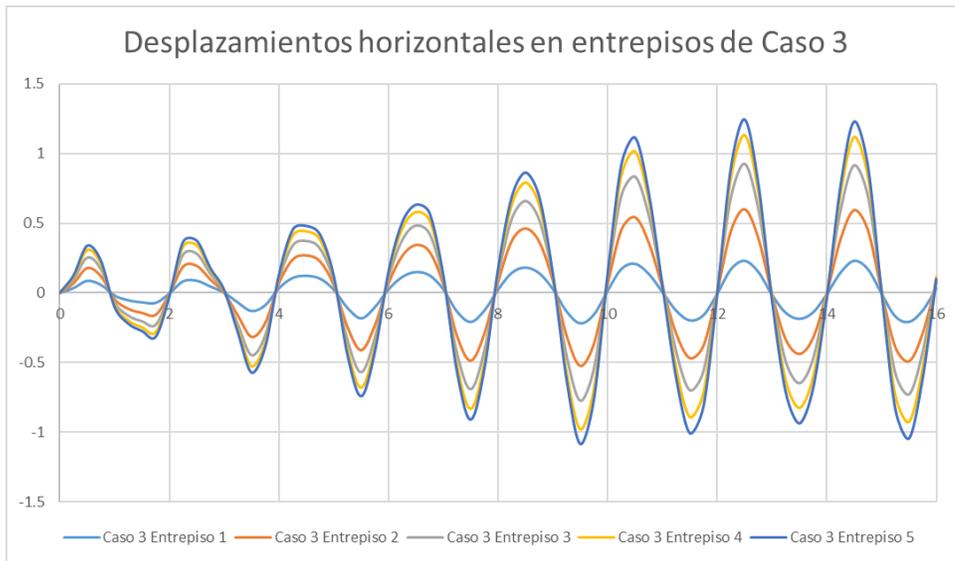


Fig. 7. Desplazamientos generados en el tiempo para el caso 3, tiempo (abscisas, segundos), Desplazamientos (ordenadas, metros).

De acuerdo a la Fig. 5 y Fig. 6 en las cuales se muestran los resultados obtenidos del análisis dinámico correspondiente al caso 1 y

2, se puede observar que en el entrepiso 5, correspondiente al entrepiso superior de la

estructura, es en el que se presenta un mayor desplazamiento horizontal.

En la Fig. 7 se puede observar el cómo es que los desplazamientos horizontales incrementan a medida que pasa el tiempo – conforme pasa el tiempo el daño de los disipadores incrementa lo que hace que la estructura presenta menor rigidez

horizontal, esto genera que a medida que esto ocurre se presenten mayores desplazamientos horizontales.

Así mismo, se llevó a cabo un estudio de cómo fue el comportamiento del daño en los disipadores mostrado en la Fig. 8.

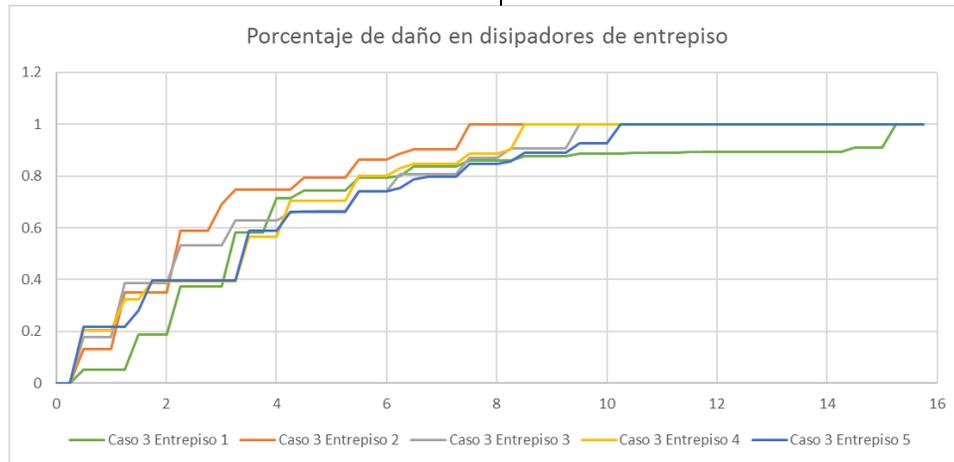


Fig. 8. Daño generado en el tiempo para el caso 3, tiempo (abscisas, segundos), Porcentaje de daño (ordenadas).

Se puede ver cómo es que se genera el daño en los disipadores de energía, es decir, se puede ver que el daño se genera mediante se

produce la carga en la estructura y permanece constante mientras se produce la descarga.

Conclusiones

Conforme a los resultados obtenidos aplicando el método de Newmark- β y llevando a cabo la validación correspondiente con el programa computacional SAP2000, se obtuvieron resultados satisfactorios dado que se requieren pocos parámetros para la aplicación de este método en comparación a otros como lo es el de Newmark $\gamma\beta$ o el método Generalized- α . Así mismo, el algoritmo utilizado para el daño en los disipadores presenta resultados adecuados analíticamente para la investigación dada, sin embargo, es necesario realizar un trabajo más específico en dicho

algoritmo mediante la ampliación de este a su modelación numérica mediante la aplicación del método de los elementos finitos.

De acuerdo a la comparación de los resultados obtenidos, la aplicación del contraventeo de los marcos presenta una mejor opción en la reducción de desplazamientos horizontales. Se debe tener en cuenta que, mediante estos, los esfuerzos que se presentan son tomados por la estructura en su totalidad, sin embargo, mediante los disipadores de energía pasivos de tipo histerético se pretende focalizar dichos esfuerzos y así generar una zona de falla controlada.

Mediante los resultados obtenidos se puede observar que dicha falla se genera mediante la sobrecarga que aparece a medida que aumentan los desplazamientos en la estructura como se muestra en la

Fig. 9. Relación entre el daño y los desplazamientos generados.

Bibliografía

- [1] N. M. Orozco, «Forbes mexico,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.forbes.com.mx/los-8-sismos-mas-catastroficos-en-la-historia-de-mexico/>.
- [2] J. A. Oviedo y M. d. P. Duque, «SISTEMAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES,» vol. 6, n° p. 105-120, 2006.
- [3] D. R. Teruna, T. A. Majid y B. Budiono, «Hindawi Publishing Corporation,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.hindawi.com/journals/ace/2015/631726/>.
- [4] R. W. Chan, «Experimental study of perforated yielding shear panel device for passive energy dissipation,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X13002514>.
- [5] J. Choia y D. Y. Abebeb, «Hysteresis Characteristics of Shear Panel Damper using SLY120,» ELSEVIER, 2014. [En línea]. Available:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212670814000669>.

[6] N. M. Orozco, «Forbes mexico,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.forbes.com.mx/los-8-sismos-mas-catastroficos-en-la-historia-de-mexico/>.

[7] R. A. Falconi, «Análisis matricial de estructuras,» Escuela politecnica del ejercito, 2004, pp. 471-493.

[8] M. D. JUÁREZ, REGLAMENTO DE CONSTRUCCIÓN PARA EL MUNICIPIO DE JUÁREZ NORMAS TECNICAS COMPLEMENTARIAS, Cd. Juárez: <http://cicjuarez.org>.

Fig. 8. En ésta, el daño del disipador aumenta al momento que se genera una sobrecarga en él por medio de los desplazamientos generados y así mismo, se mantiene constante cuando se genera la sobrecarga.

Así también, mediante esta investigación se observa la forma en que la magnitud de los desplazamientos se incrementa conforme se genera el daño en los disipadores y la estructura pasa de ser, una que cuenta con el contraventeo de marcos a una sin ellos. Esto dado que al dañarse dichos disipadores reduce la rigidez horizontal de la estructura lo que da como consecuencia mayores

desplazamientos con la misma fuerza aplicada.

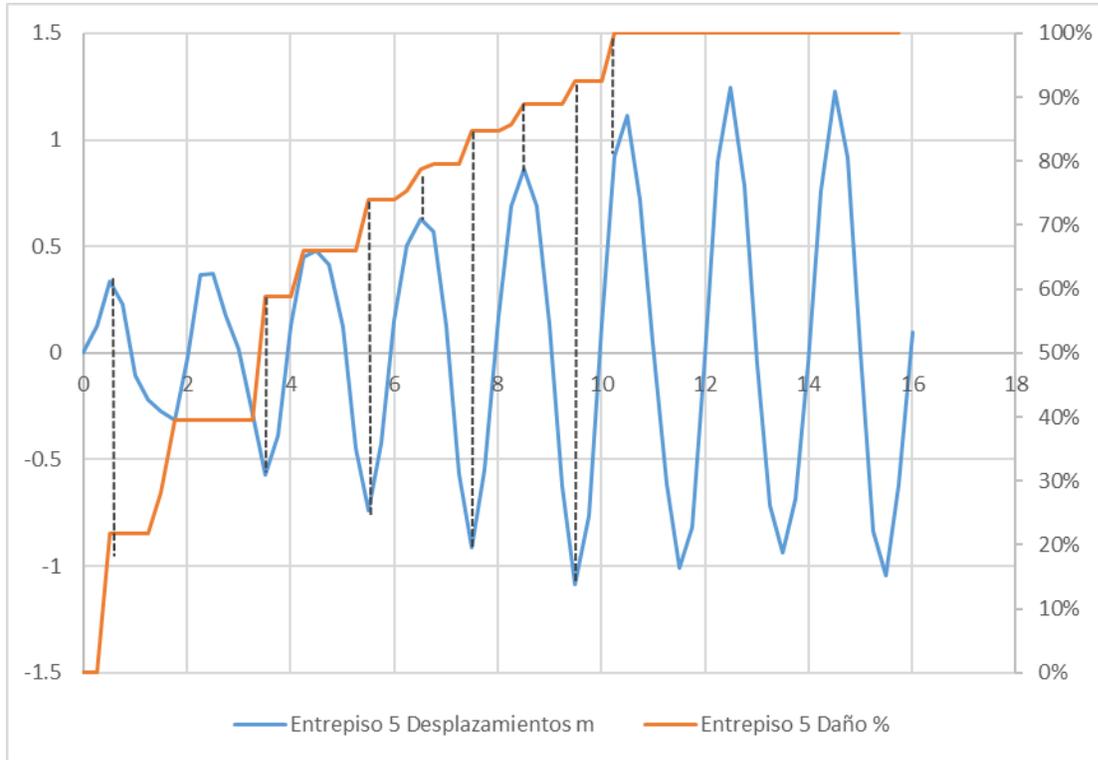


Fig. 9. Relación entre el daño y los desplazamientos generados.

Bibliografía

[1] N. M. Orozco, «Forbes mexico,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.forbes.com.mx/los-8-sismos-mas-catastroficos-en-la-historia-de-mexico/>.

[2] J. A. Oviedo y M. d. P. Duque, «SISTEMAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES,» vol. 6, n° p. 105-120, 2006.

[3] D. R. Teruna, T. A. Majid y B. Budiono, «Hindawi Publishing

Corporation,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.hindawi.com/journals/ace/2015/631726/>.

[4] R. W. Chan, «Experimental study of perforated yielding shear panel device for passive energy dissipation,» 2013. [En línea]. Available:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X13002514>.

[5] J. Choia y D. Y. Abebeb, «Hysteresis Characteristics of Shear Panel Damper using SLY120,» ELSEVIER, 2014. [En línea]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212670814000669>.

[6] N. M. Orozco, «Forbes mexico,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.forbes.com.mx/los-8-sismos->

mas-catastroficos-en-la-historia-de-mexico/.

[7] R. A. Falconi, «Análisis matricial de estructuras,» Escuela politecnica del ejercito, 2004, pp. 471-493.

[8] M. D. JUÁREZ, REGLAMENTO DE CONSTRUCCIÓN PARA EL MUNICIPIO DE JUÁREZ NORMAS TECNICAS COMPLEMENTARIAS, Cd. Juárez: <http://cicjuarez.org>.