

REFORZAMIENTO SÍSMICO DE UN EDIFICIO UBICADO EN LA ZONA DEL LAGO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Fernando Cueto Jiménez¹, Francisco García Álvarez², Héctor Guerrero Bobadilla³, José A. Escobar Sánchez⁴

RESUMEN

Se presenta una propuesta de reforzamiento de un edificio de 11 niveles ubicado en la zona del lago de la Ciudad de México, que sufrió daño durante el sismo del 19 de septiembre de 2017. La configuración en planta del edificio es irregular. Al analizar alternativas de refuerzo con sistemas convencionales, se observó que el edificio no logró cumplir con los requisitos establecidos en reglamentación vigente. Se recurrió entonces a alternativas innovadoras que incluyen disipación de energía. Los resultados muestran que el edificio logra un desempeño satisfactorio. Además, se evita incrementar la capacidad de la cimentación, pues eso resultaría económicamente inviable.

ABSTRACT

An upgrading proposal for an 11 storey building, located at the lakebed zone of Mexico City, is presented. The building suffered some level of damage during the Sep/19/2017 Earthquake. Its plan configuration is irregular. After analysing diverse upgrading alternatives using conventional approaches, it was observed that the code requirements were difficult to meet. Therefore, innovative passive dissipation systems were considered. The results show that these systems produced satisfactory behaviour of the upgraded structure. Furthermore, increasing the foundation capacity was not required, which would result in a non-economically viable solution.

INTRODUCCIÓN

Durante el sismo de Puebla, México del 19 de septiembre de 2017, se observó que el movimiento sísmico generó grandes daños en la zona de lago de la Ciudad de México, en donde los depósitos lacustres son muy blandos y compresibles, con altos contenidos de agua que favorecen la amplificación de las ondas sísmicas [1]. De los 38 edificios identificados por el gobierno de la Ciudad de México como colapsados, más del 80% se encuentran dentro de esta zona [2].

La nueva versión de las Nomas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo [3] se publicó meses después del evento sísmico, en diciembre de 2017. En la nueva reglamentación se aumentaron los coeficientes sísmicos para el diseño de edificaciones, por ello, las construcciones que fueron realizadas por reglamentos de versiones anteriores se encuentran por debajo de lo solicitado en ellas. De acuerdo con lo anterior un gran número de construcciones están obligadas a ser reforzadas para cumplir con las especificaciones del nuevo reglamento. A fin de no alterar la geometría ni el funcionamiento de las edificaciones es recomendable recurrir a alternativas innovadoras que incluyen elementos estructurales que disipan energía y aportan un amortiguamiento adicional a la estructura.

¹ Becario, Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, 04510, México, CDMX, Teléfono: 5623 3600; FCuetoJ@ii.unam.mx.

² Consultor en Ingeniería Estructural,

³ Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, 04510, México, CDMX, Teléfono: 5623 3600; HGuerreroB@ii.unam.mx.

⁴ Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, 04510, México, CDMX, Teléfono: 5623 3600; jess@pumas.iingen.unam.mx

En este artículo se presentan los resultados del reforzamiento de un edificio de 12 niveles que se ubica en la zona de lago de la Ciudad de México. El edificio cuenta con una geometría irregular en planta, en forma de "T". Se revisaron tres alternativas de reforzamiento. En la primera se consideraron amortiguadores viscosos y, en la segunda y tercera, amortiguadores histeréticos. Se comparan y discuten las mejoras en la respuesta de la estructura con las alternativas estudiadas.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La Figura 1 muestra la configuración del edificio estudiado. Éste se compone de un único cuerpo en forma de "T" en planta. La estructura data de los años 60s. Está resuelta a base de columnas metálicas con losas planas de concreto reforzado. Mientras que las columnas tienen una sección cajón de 30x27 cm hechas a base de placa de entre 19 mm y 9 mm, las losas tienen un peralte total de 47 cm y fueron hechas de concreto reforzado con resistencia nominal de 250 kg/cm². Las losas fueron aligeradas en la parte central usando tubos huecos de cartón comprimido. El edificio cuenta con algunos muros de mampostería y concreto reforzado, como se aprecia en la Figura 1.

El edificio tiene 11 niveles, un sótano y un apéndice de dos niveles. Es importante mencionar que seis columnas fueron encamisadas con concreto reforzado, como se aprecia en la vista en planta.

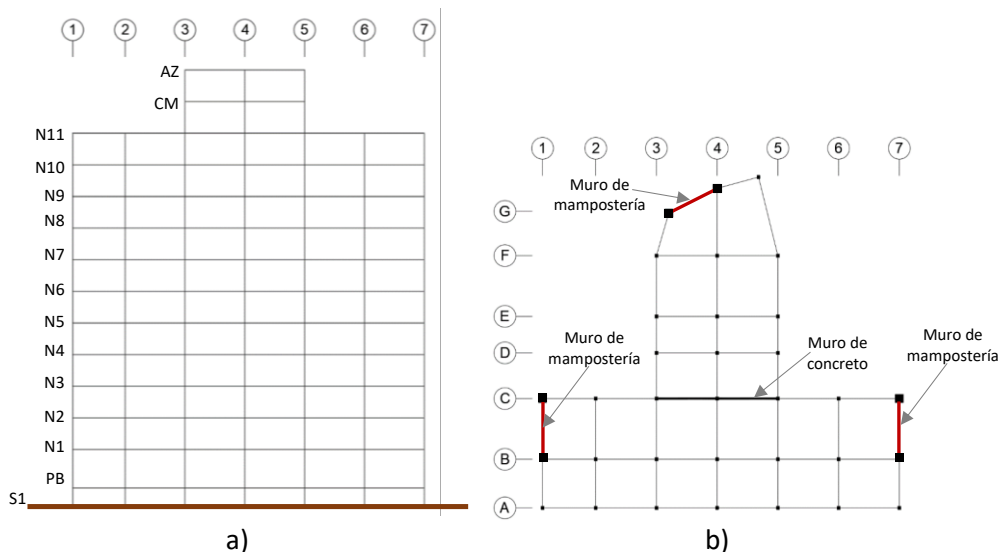


Figura 1. Vistas generales del edificio estudiado: (a) Elevación Eje A y (b) Vista en planta

PROPUESTAS DE REFORZAMIENTO

Después de negociar con los involucrados en el proyecto, se decidió realizar tres propuestas de reforzamiento, mismas que se enlistan a continuación:

1. Reforzamiento con disipadores sísmicos viscosos
2. Reforzamiento con disipadores histeréticos del tipo contraventeos restringidos contra pandeo (CRPs)
3. Reforzamiento con disipadores tipo CRPs y contraventeos convencionales (CC) colocados de manera alternada.

PROPUESTA 1. REFORZAMIENTO CON DISIPADORES SÍSMICOS VISCOSOS.

La Figura 2 muestra la propuesta de reforzamiento con los amortiguadores viscosos. Ésta contempla el uso de 29 disipadores sísmicos viscosos los cuales se implementarían en las crujías en la Figura 1. En la Tabla 1 se muestran las características de los disipadores considerados. Nótese que los disipadores se colocan de manera alternada con contraventeos convencionales, cuya sección transversal es de cajón de 250 x 13 mm en los niveles 1 a 7 y de 150 x 6 mm en niveles superiores. Los contraventeos convencionales están hechos con un acero con resistencia nominal $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$.

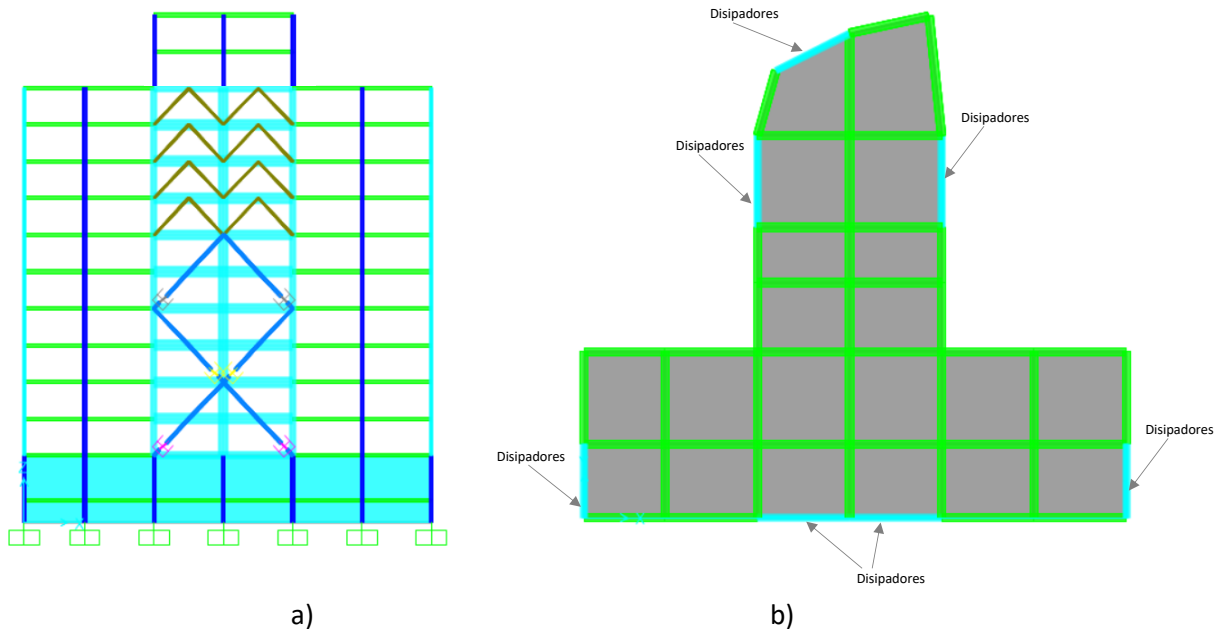


Figura 2. Propuesta de reforzamiento con amortiguadores viscosos:
(a) Elevación Eje A y (b) Vista en planta

Tabla 1. Características de los disipadores sísmicos viscosos

Tipo de disipador	Cantidad	Rigidez	Coefficiente de amort. (t.s/mm)	Exponente de amortiguamiento
1	12	0	267	0.4
2	10	0	178	0.4
3	7	0	90	0.4

Para lograr una adecuada conexión de los disipadores viscosos a la estructura existente, se implementaron marcos internos metálicos en cada crujía en donde se presenta ya sea un disipador o un contraventeo convencional. Los marcos se formaron por vigas W12x56 de acero ASTM A992 ($f_y=3,520 \text{ kg/cm}^2$).

PROPUESTA 2. REFORZAMIENTO CON DISIPADORES HISTERÉTICOS DEL TIPO CONTRAVENTEOS RESTRINGIDOS CONTRA PANDEO (CRPs)

La propuesta de reforzamiento de la estructura con disipadores sísmicos tipo CRP se muestra en la Figura 3. Se aprecia que el arreglo es igual a aquel con disipadores viscosos. En total se usan 58 disipadores. En la Tabla 2 se muestran las características de los disipadores considerados, obtenidas de la metodología propuesta por Guerrero et al. [6] la cual realiza un diseño por desempeño basada en el control de las demandas de desplazamientos laterales. Para la conexión entre los disipadores, también se propuso usar los mismos marcos interiores metálicos descritos en la sección anterior a base de perfiles W12x56.

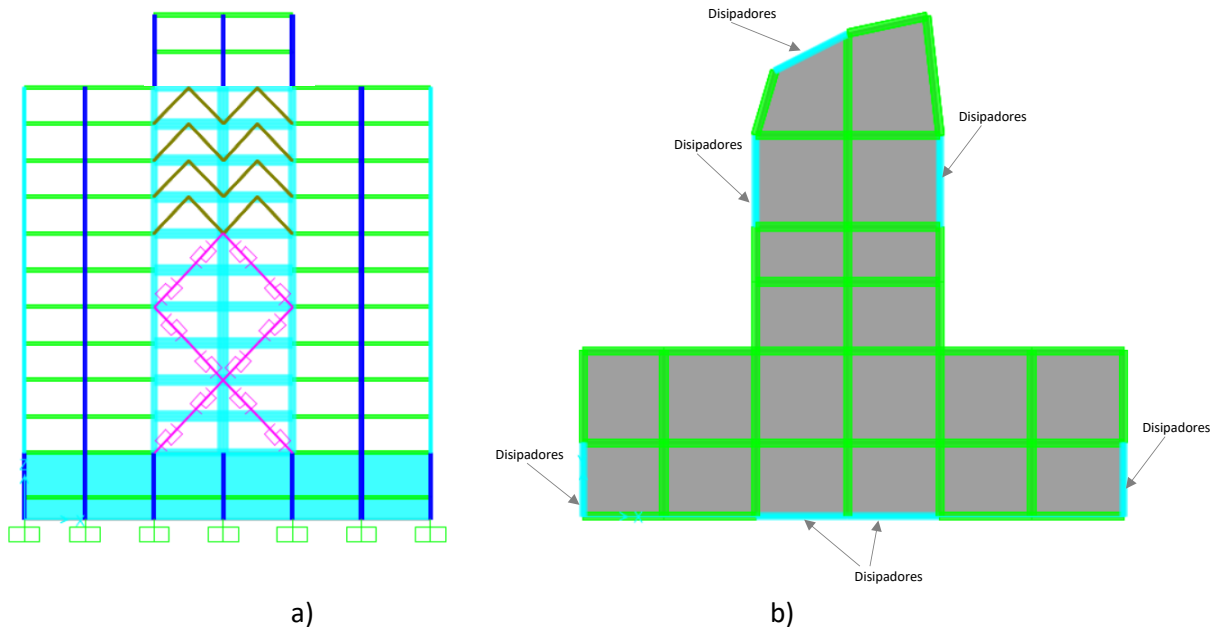


Figura 3. Propuesta de reforzamiento con amortiguadores histeréticos:
(a) Elevación Eje A y (b) Vista en planta

Tabla 2. Características de los disipadores tipo CRP para la propuesta 2.

Tipo de disipador	Cantidad	Rigidez (t/mm)	Carga fluencia (t)	Relación de rigidez post-fluencia	Área del núcleo del CRP (cm ²)
1	14	40,000	150	0.03	53.9
2	14	32,000	120	0.03	43.1
3	14	24,000	90	0.03	32.3
4	10	16,000	60	0.03	21.6
5	6	8,000	30	0.03	10.8

PROPUESTA 3. REFORZAMIENTO CON DISIPADORES TIPO CRP Y CONTRAVENTEOS CONVENCIONALES (CC)

La propuesta de reforzamiento número 3 se muestra en la Figura 4. Como se puede observar, se consideraron 29 disipadores tipo CRP y contraventeos convencionales (CCs). Los disipadores se colocaron de manera alternada con los CCs hasta el nivel 7, después se colocaron contraventeos convencionales solamente. Las propiedades de los disipadores de la propuesta 3 se muestran en la Tabla 3. Otra vez, se colocaron marcos interiores metálicos a base de perfiles W12x56 para la conexión de CRPs y CCs.

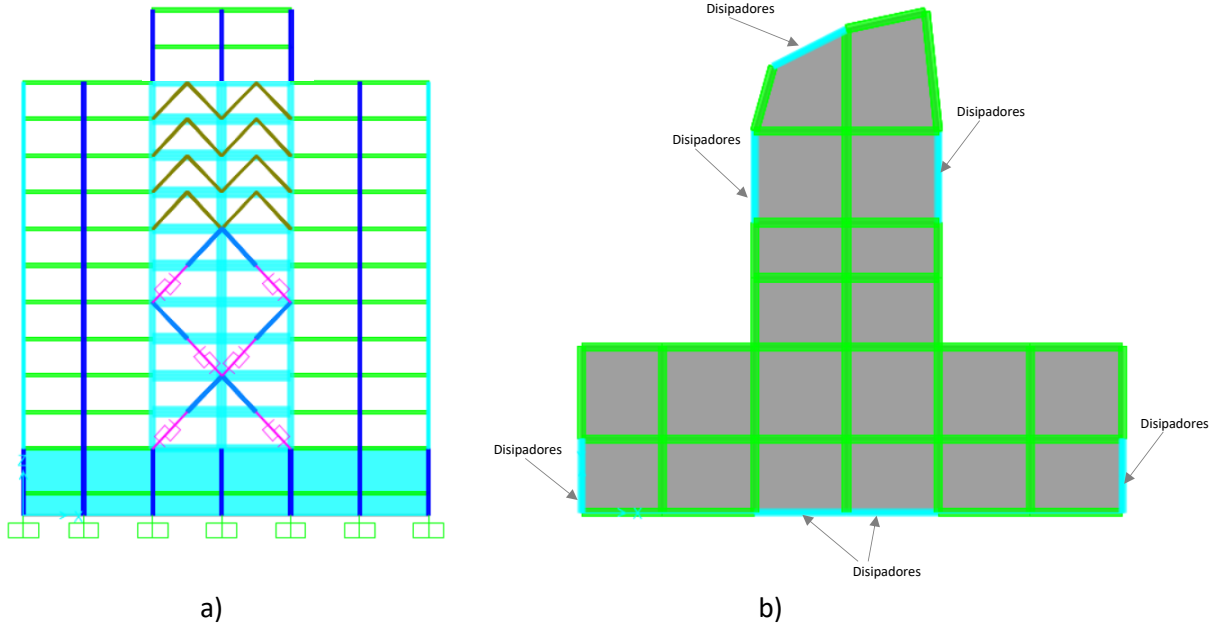


Figura 3. Propuesta de reforzamiento con CRPs y contraventeos convencionales colocados de manera alternada: (a) Elevación Eje A y (b) Vista en planta

Tabla 3. Características de los disipadores sísmicos viscosos

Tipo de disipador	Cantidad	Rigidez (t/mm)	Carga fluencia (t)	Relación de rigidez post-fluencia	Área del núcleo del CRP (cm ²)
1	7	40,000	150	0.03	53.9
2	7	32,000	120	0.03	43.1
3	7	24,000	90	0.03	32.3
4	5	16,000	60	0.03	21.6
5	3	8,000	30	0.03	10.8

ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

Se realizó un modelo de la estructura en el programa SAP2000 v19 [7]. En esta sección se describen las consideraciones del modelo y los movimientos sísmicos considerados.

MODELO

La figura 5 muestra el modelo desarrollado en SAP2000 v19 [7]. Las columnas se modelan a base de elementos tipo *frame* o barras. La contribución a la rigidez lateral del sistema de piso se modeló a través de trabes con ancho equivalente de 50 cm. Para el caso de los muros se utilizaron elementos cascarón con el espesor correspondiente. La base de la estructura se modeló empotrada. Las masas sísmicas consideradas en cada nivel fueron 775 toneladas, lo que incluye peso propio, sobre carga y carga viva instantánea de acuerdo al Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México [8]. Los disipadores de energía se modelaron a base de elementos tipo link con las propiedades enlistadas en las tablas 1 a 3, respectivamente.

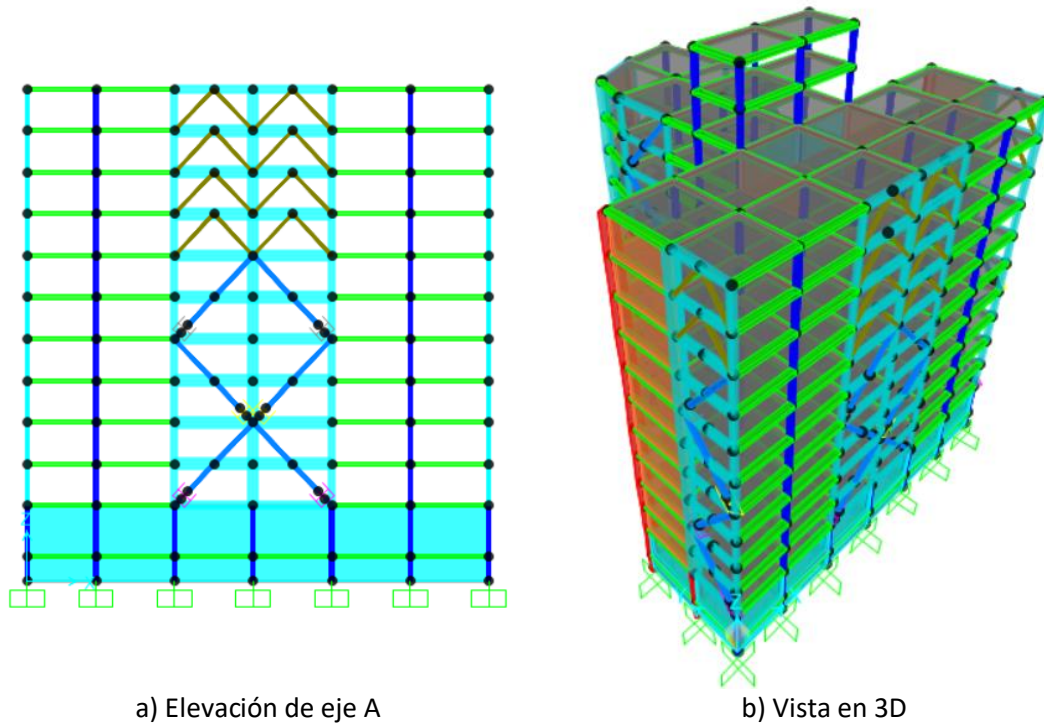


Figura 5. Modelo de la estructura en SAP2000.

MOVIMIENTOS SÍSMICOS

La sección 6.2.1 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo en su versión 2017 [3], define los criterios para la selección y escalamiento de movimientos sísmicos. Para el análisis dinámico no lineal paso a paso de una estructura desplantada en un sitio con periodo dominante igual o mayor a 2 segundos, se deben utilizar no menos de doce parejas de acelerogramas con intensidades, duraciones y contenido de frecuencias similares a los movimientos del terreno registrados durante terremotos reales. De igual forma, como lo definen las normas, se deben obtener los espectros de respuesta de las parejas de acelerogramas y sus ordenadas espectrales se deben combinar usando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (o regla SRSS, como se conoce comúnmente). Los acelerogramas se deben afectar por un factor de escalamiento. Este factor debe generar ordenadas espectrales SRSS mayores que 1.3 veces las correspondientes a los espectros de diseño para periodos naturales que oscilen entre 0.2 y 1.3 veces el periodo natural del modo dominante de vibrar de la estructura [3]. En la Figura 6 se muestran los espectros SRSS de los acelerogramas seleccionados, ya escalados, y en Tabla 4 se muestran los datos más relevantes de los registros sísmicos seleccionados para realizar el análisis dinámico no lineal [4-5].

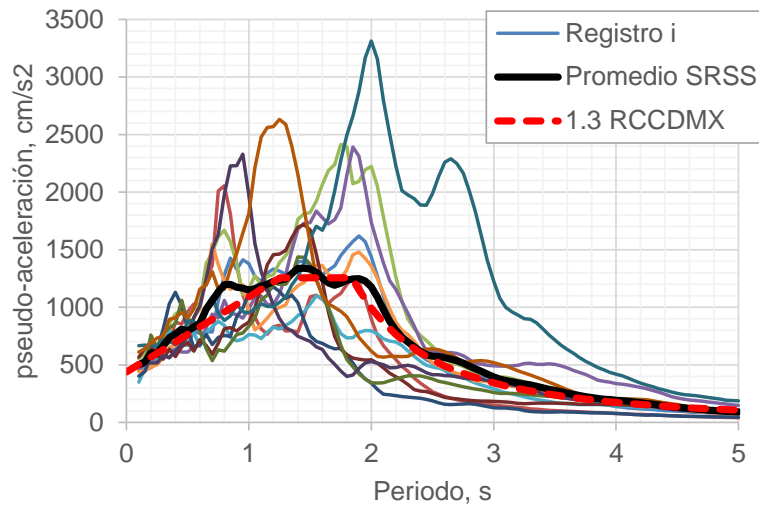


Figura 6. Espectros SRSS escalados de los acelerogramas seleccionados.

Tabla 4. Registros sísmicos ocupados para el análisis dinámico no lineal

ID	Componente	Estación	Fecha de sismo	Sentido	Δt	# de muestras	Factor de escalamiento	Aceleración máxima absoluta (gal)
1	X	CI05	20/03/2012	N00E	0.02	5549	6.3	49.20
1	Y	CI05		N90W	0.02			-57.93
2	X	CI05	16/06/2013	S00E	0.02	3162	10.5	31.37
2	Y	CI05		N90W	0.02			-28.63
3	X	CI05	18/04/2014	S00E	0.02	5413	10.5	42.17
3	Y	CI05		N90W	0.02			-31.94
4	X	CI05	08/09/2017	S00E	0.02	6784	10.5	34.15
4	Y	CI05		N90W	0.02			-26.23
5	X	CI05	19/09/2017	S00E	0.02	3114	2.1	98.75
5	Y	CI05		N90W	0.02			-114.24
6	X	CI05	16/02/2018	S00E	0.02	6198	10.5	28.91
6	Y	CI05		N90W	0.02			-29.81
7	X	IB22	11/12/2011	N00E	0.02	4931	8.4	29.64
7	Y	IB22		N90W	0.02			22.81
8	X	IB22	19/09/2017	N00E	0.02	3091	2.1	119.01
8	Y	IB22		N90W	0.02			-160.88
9	X	SI53	19/09/2017	S00E	0.02	3264	2.1	0.14
9	Y	SI53		N90W	0.02			-0.33
10	X	ME52	14/09/1995	N00E	0.02	2912	1.4	27.37
10	Y	ME52		N90E	0.02			21.33
11	X	SCT1	19/09/1985	N90E	0.02	4247	3.5	161.63
11	Y	SCT1		N00E	0.02			93.78
12	X	UC44	25/04/1989	N00E	0.02	2804	9.1	52.75
12	Y	UC44		N90W	0.02			39.83

Los registros seleccionados fueron procesados como sigue: 1) se hizo una corrección de línea base normal; 2) se aplicó un filtro tipo *Butterworth* (Pasa-banda) para un intervalo de frecuencias entre 0.1 y 40 Hz (se consideró un número de *polos* de 8); y 3) se aplicó un *taper* del 5% a la señal.

RESULTADOS

Después de realizar los análisis del modelo para las tres propuestas de reforzamiento, con las 12 parejas de registros sísmicos, en las dos direcciones ortogonales, se graficaron el promedio de las distorsiones de entrepiso en las dos direcciones horizontales. En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos en los ejes “X” y “Y”. Para fines de comparación, también se muestra el promedio de las distorsiones de entrepiso para el caso sin reforzar.

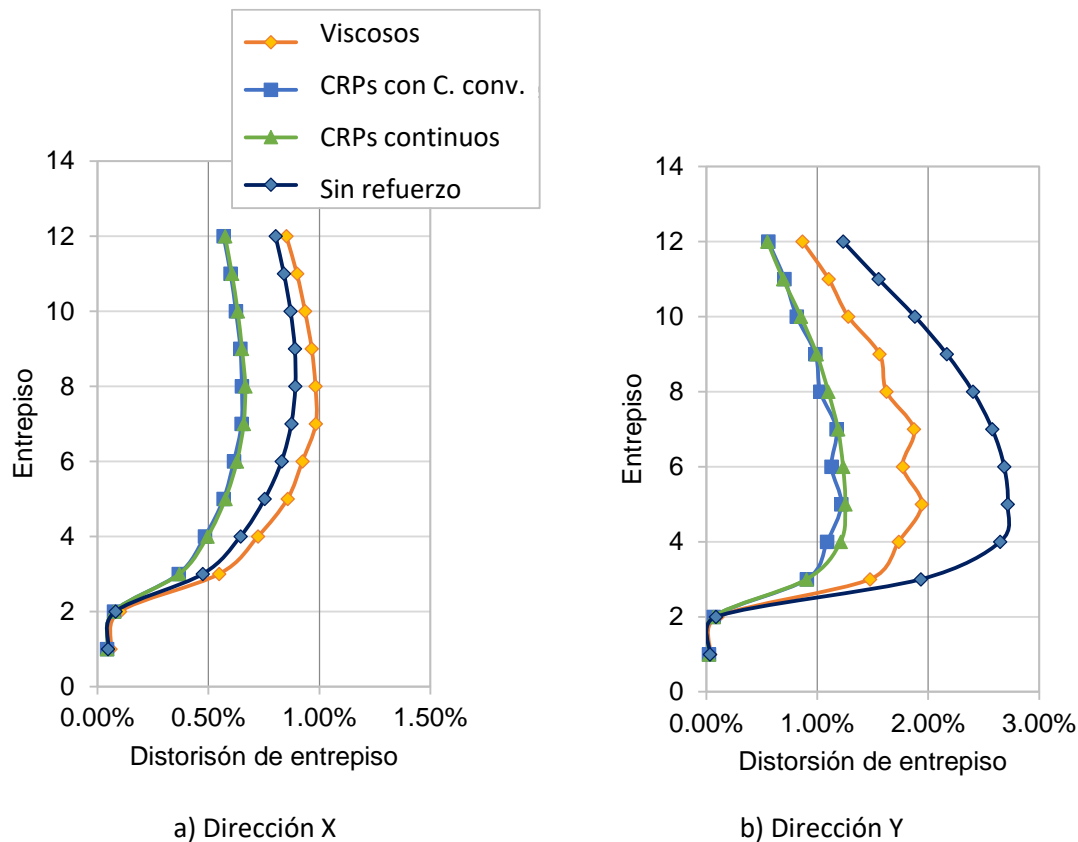


Figura 7. Distorsiones de entrepiso promedio en el edificio estudiado.

De la Figura 7a se puede observar que en la dirección X, el promedio de las demandas de distorsión de entrepiso están por debajo del 1%, lo que claramente muestra que el desempeño de la estructura, en esa dirección, es muy bueno y probablemente no habrá daños significativos. Este comentario se basa en el hecho de que las estructuras a base de marcos presentan daño estructural despreciable para demandas de distorsión de entrepiso menores al 1%. Es importante notar que el efecto de los disipadores viscosos incrementó las demandas para esta estructura en particular; mientras que, para el caso de los amortiguadores histeréticos, las demandas de distorsión de entrepiso se redujeron importantemente para ambas propuestas. Lo que permite tener demandas de distorsión de entrepiso promedio inferiores a 0.007 y, en consecuencia, menos daños probables ante la ocurrencia de un movimiento sísmico de gran intensidad.

En la Figura 7b se aprecia que, si no se hiciera el reforzamiento con los disipadores, las demandas de distorsión de entrepiso estarían cercanas al 3%, lo que resultaría difícil de acomodar por la estructura y muy probablemente estaría en riesgo de colapso. Al incluir disipadores de energía en el modelo de la estructura, ambos tipos de



disipadores reducen las demandas de distorsión de entrepiso de manera importante. Mientras que los disipadores viscosos reducen las demandas a valores cercanos al 2%, los disipadores histeréticos logran reducir las distorsiones de entrepiso a valores de 1.3%. Evidentemente los disipadores histeréticos resultaron mejores para esta estructura en particular. Nótese que estos resultados deben ser interpretados con cautela, pues son resultados particulares para el edificio estudiado.

Comparando los resultados de las propuestas 2 y 3 (es decir, con disipadores histeréticos colocados de manera continua o con disipadores colocados alternadamente con contraventeos convencionales), se puede ver que las demandas de distorsión son muy similares en ambas direcciones. La única ventaja entonces de la propuesta 3 es que se podría tener un ahorro al usar menos disipadores y sustituirlos por contraventeos convencionales. Sin embargo, se debe tener especial cuidado para no generar un efecto adverso debido a los contraventeos convencionales. En otras palabras, se deben diseñar los contraventeos convencionales para evitar que se pandeen.

Con la finalidad de verificar que los contraventeos convencionales no presentarán problemas de pandeo, se realizó una comparación entre la demanda máxima de carga axial en el elemento más demandado en compresión y su carga crítica de pandeo. Para calcular la carga crítica de pandeo se usó la ecuación (1).

$$Carga\ crítica\ de\ pandeo = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \tag{1}$$

donde E es el módulo de elasticidad del material, I el momento de inercia de la sección transversal del contraventeo y L su longitud.

En la Figura 8 se puede observar que las demandas máximas de carga axial en compresión en el contraventeo más esforzado son menores a la carga crítica de pandeo, lo que permite verificar que, para la estructura estudiada, los contraventeos convencionales no tendrán problemas de pandeo.

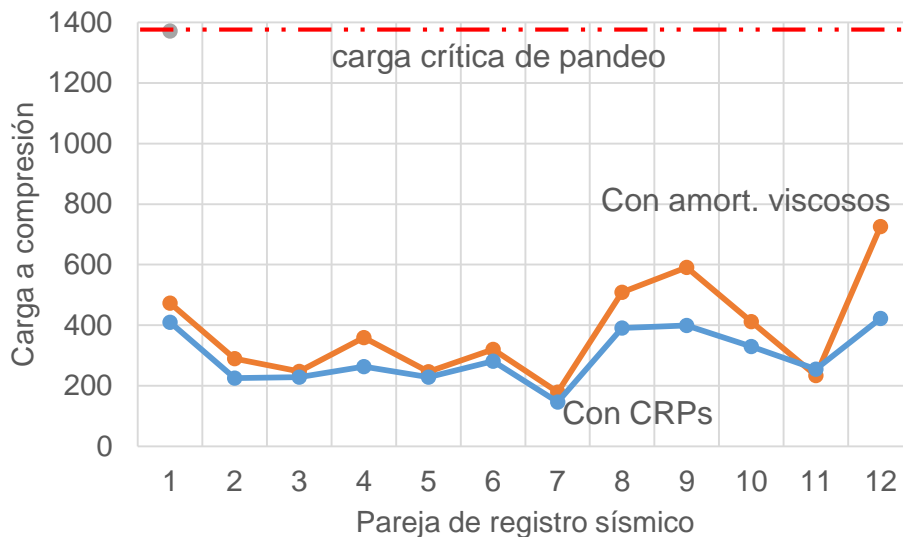


Figura 8. Demandas máximas de carga axial en contraventeo más esforzado.

CONCLUSIONES

Se realizó el reforzamiento de un edificio existente con dos tipos de energía sísmica. El edificio fue sometido un grupo de movimientos sísmicos escalados según la reglamentación vigente. Se evaluó el comportamiento del edificio en términos de la distorsión de entrepiso, antes y después de ser rehabilitado. Se pudo observar que los

disipadores de energía sísmica ayudan a llevar a la estructura a una zona de seguridad muy conveniente con distorsiones de entrepiso menores a los límites establecidos en el reglamento actual. El uso de disipadores viscosos e histeréticos resultó conveniente para rehabilitar la estructura. Los dispositivos histeréticos generaron un mejor desempeño sísmico para la estructura estudiada de manera particular. Para otras condiciones estructurales o del suelo, las conclusiones podrían ser diferentes.

AGRADECIMIENTOS

El tercer autor agradece a la DGAPA-UNAM por el financiamiento brindado durante este estudio. El primer y el tercer autores agradecen al Instituto de Ingeniería de la UNAM por las facilidades brindadas para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

1. Ovando-Shelley E, Ossa A, Romo MP (2007). **The sinking of Mexico City: its effects on soil properties and seismic response**. Soil Dyn Earthq Eng, 2007; 27:333-43
2. APPyRCDMX (2018). **Atlas Público de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México**. Ciudad de México.
3. NTCDS (2017). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo Gobierno de la Ciudad de México. Ciudad de México.
4. CIRES (2018). **Centro de Instrumentación y Registro Sísmico**. Ciudad de México.
5. BDMSF (2000). **Base de datos Mexicana de Sismos Fuertes**. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Ciudad de México.
6. Guerrero H, Ji T, Teran-Gilmore A, Escobar JA (2016). **A Method for Preliminary Seismic Design and Assessment of Low-Rise Structures Protected with Buckling-Restrained Braces**. Engineering Structures, 123:141-154.
7. SAP2000 (2018). **Structural Analysis Program v19**. Computer and Structures Inc. California, EUA.
8. RCCDMX (2017). Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México. Gobierno de la Ciudad de México.