



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Respuesta sísmica de una
estructura equipada con
contraventeos convencionales y
restringidos al pandeo
colocados de manera alternada**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Miriam Sebastian Salinas

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Contenido

Resumen	3
Dedicatoria	4
Agradecimientos	4
1 Introducción	5
1.1 Antecedentes	5
1.2 Alcances	7
1.3 Objetivos.....	7
1.4 Organización de tesis	8
2 Disipadores de energía sísmica	8
2.1 Metálicos.....	8
2.2 Friccionales	9
2.3 Fluidos viscosos	10
2.4 Viscoelásticos	10
2.5 Disipadores utilizados para este estudio	11
2.5.1 Descripción	11
2.5.2 Rigidez	12
2.5.3 Resistencia.....	13
3 Estructura estudiada	13
3.1 Descripción	13
3.2 Cargas	14
3.3 Casos de estudio	15
3.4 Diseño	17
3.4.1 Caso 1.....	17
3.4.2 Caso 2.....	18
3.4.3 Caso 3.....	19
3.5 Movimientos sísmicos.....	19
4 Resultados	21
4.1 Propiedades dinámicas de la estructura	21
4.2 Curvas de capacidad	23
4.3 Respuesta sísmica.....	24

4.3.1	Desplazamientos.....	24
4.3.2	Distorsiones de entrepiso.....	25
4.3.3	Fuerza cortante	27
4.3.4	Comportamiento de CRPs	28
4.3.5	Comportamiento de CCs.....	30
5	Conclusiones y recomendaciones	31
5.1	Conclusiones	31
5.2	Recomendaciones	32
	Referencias	33

Resumen

En esta tesis se presenta los resultados del análisis de un marco plano de 15 niveles, ubicado en la zona del lago de la Ciudad de México, equipado con disipadores de energía sísmica del tipo Contraventeos Restringidos al Pandeo (CRPs). Se estudiaron tres casos: 1) marco sin contraventeos, 2) marco con CRPs en todos los niveles, y 3) marco con CRPs y contraventeos convencionales (CCs) colocados de forma alternada. Los resultados muestran que, para el caso 1 (sin contraventeos) las distorsiones de entrepiso resultaron mayores que el límite establecido en el reglamento de construcciones vigente. Una vez que se colocaron los CRPs (caso 2), las distorsiones se redujeron a valores muy por debajo del límite reglamentario. Cuando se colocaron los CRPs y CCs de manera alternada (caso 3), las distorsiones de entrepiso se redujeron más, pero aumentó la demanda de fuerza cortante basal en la estructura, cosa que no ocurrió en el caso 2.

Dedicatoria

A mi madre, la mujer que más admiro y más amo, porque tu presencia y amor inmenso me han hecho salir adelante de las grandes pruebas, gracias por tantos cuidados, por tus consejos y por tu trabajo tan valioso durante estos 25 años. Todo lo bueno de mí te lo debo a ti.

A mi padre que con tanto cariño, esfuerzo y trabajo nos ha dado todo para salir adelante, tengo tu gran ejemplo y tu amor incondicional que me acompañan todos los días para superarme y ser mejor persona.

A mis hermanos, por ser tan increíbles, cada uno a su modo. Liz, gracias por consentirme tanto, por tu cariño, tus atenciones y por tu ejemplo de hermana mayor. Angel, gracias por cuidarme a tu manera, por las pláticas y risas de todos los días. Gracias por enseñarme tanto y por esta etapa tan bonita y feliz viviendo juntos.

A mi mayor alegría, mis sobrinos Nati y Fer por su dulce y tierno amor.

Agradecimientos

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla, gracias por haber dirigido esta tesis, por el tiempo y conocimiento invaluable en este trabajo. Siempre estaré profundamente agradecida por todo su apoyo y lo que ha hecho por mí. Gracias por su amistad durante estos años.

A la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Ingeniería por todo lo que me ha brindado durante esta etapa universitaria.

A mis sinodales, Dr. José Alberto Escobar Sánchez, M en I Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose, Ing. Héctor Alfredo Legorreta Cuevas, Ing. Ma. del Carmen Melo Díaz por tomarse el tiempo de leer este trabajo.

Ma. Del Carmen, gracias por su amistad durante estos años, por todo su cariño y por estar siempre ahí al pendiente de mí.

Ma. Elena Cano, gracias por haberme guiado en todo momento durante mis años en la universidad, gracias por la ayuda y empatía en los momentos más difíciles.

Amigos y compañeros que de alguna forma me brindaron su ayuda. Por su amistad y aventuras en esta etapa.

Omar, gracias por toda tu ayuda en mi proceso de titulación. Gracias por ser ese increíble amigo, y ser humano. Te quiero.

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Nuestro país se encuentra dentro de las regiones más sísmicas del mundo ya que interactúa con diferentes placas tectónicas como lo son Cocos y Rivera. La Ciudad de México (CMDX) es un receptor sísmico importante. Esto se debe a que recibe los efectos de diferentes fuentes sísmicas como se muestra en la Figura 1. Sumado a ello, existen efectos de sitio en gran parte la ciudad, principalmente en la zona de lago en la que fue construida la Ciudad de México.



Figura 1. Placas tectónicas que afectan la sismicidad en México [1].

A lo largo de la historia en México se han registrado diversos eventos de sismos. Tan sólo en los últimos 12 años, el Servicio Sismológico Nacional reportó 16,540 sismos en la República Mexicana con magnitud de momento igual o superior a 3.5. Es decir, en este país se registran casi cuatro sismos por día dentro de esos valores de magnitud [1].

Los sismos ocurridos en la CDMX nos ha mostrado lo vulnerables que son las estructuras ante estos eventos, ya sea porque sufren daños parciales o en el peor de los casos la pérdida total. Por este motivo es importante que se promueva el uso de sistemas de protección sísmica, como lo son los disipadores de energía sísmica.

Estos elementos, como su nombre lo indica, disipan la energía que llega a las estructuras. Su función principal es absorber la mayor cantidad de energía y concentrar la mayor parte de daño en su propia estructura, mientras que la estructura principal permanece con daño mínimo. El ahorro económico es muy importante y el tiempo de reparación es muy corto en comparación con aquellos requeridos para la reconstrucción de algún elemento convencional (como alguna columna que ha sufrido daños). Este tipo de disipadores proporcionan ahorros económicos y reducen tiempos de reparación.

Por otro lado, es relevante mencionar que los sistemas de protección sísmica no garantizan daño cero en las estructuras ante eventos sísmicos severos. Sin embargo, existe una gran probabilidad de que el daño sea menor y de que el desempeño dinámico de las estructuras sea muy superior al de estructuras convencionales. Más aún, si se considera que los requisitos de demandas sísmicas establecidos en la versión 2017 de las normas técnicas complementarios para diseño de por sismo [2] se han vuelto más rigurosos, lo que lleva a costos de construcción mayores. Usar disipadores de energía sísmica resulta ser una alternativa económicamente viable para lograr satisfacer los requisitos tan rigurosos de dichas normas [2].

Una de las grandes ventajas de los CRPs es que trabajan como fusibles estructurales. De manera análoga a como usamos fusibles eléctricos en nuestras casas, que nos ahorran daños que podrían ser lamentables, de manera similar un

disipador de energía permite grandes ahorros en una edificación, pues los costos de reparación se limitan a reemplazar dispositivos que hayan sufrido algún desgaste durante la ocurrencia de un terremoto de gran magnitud.

1.2 Alcances

Este trabajo busca identificar las ventajas y desventajas de equipar una estructura de mediana altura con disipadores de energía sísmica del tipo CRP, colocados en cada uno de sus niveles. También se estudia la alternativa de colocarlos de manera alternada, es decir, disipadores en algunos niveles y contraventeos convencionales en otros. Se compara la respuesta sísmica ante 12 eventos registrados en la zona del lago de la Ciudad de México.

1.3 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es mostrar el comportamiento de un edificio que se encuentra en la zona del lago de la CDMX y que cuenta con dispositivos de disipación sísmica y/o con contraventeos convencionales.

Los objetivos particulares son:

- Comparar la respuesta estructural sin disipadores, con disipadores colocados de manera continua, y con disipadores y contraventeos convencionales colocados de manera alternada.
- Estudiar las distorsiones de entre piso en cada uno de los casos.
- Impulsar el uso de sistemas de protección sísmica.
- Generar las conclusiones útiles a los ingenieros de la práctica profesional sobre el uso de CRPs en estructuras.
- Estudiar las ventajas y desventajas de los diferentes casos estudiados.

1.4 Organización de tesis

Esta tesis comienza con un capítulo introductorio. Después, en el capítulo 2, se describen los diferentes tipos de disipadores existentes en la práctica profesional así como los disipadores usados en esta tesis. En el capítulo 3 se describe la estructura estudiada. En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones de esta tesis.

2 Disipadores de energía sísmica

Un disipador sísmico tiene como función principal y como su nombre lo dice, disipar la energía con la finalidad de que las estructuras no sufran daños mayores durante un sismo. A continuación, se explican de manera breve, las diferentes características de disipadores existentes en el mercado.

2.1 Metálicos

Los disipadores metálicos (Figura 2) actúan de forma que fluyen los materiales componentes (que son sometidos a esfuerzos). Estos disipadores ofrecen medidas de rehabilitación o reforzamiento estructural sin comprometer de manera significativa la arquitectura.

Sus principales ventajas son:

- Tienen comportamiento predecible
- Son confiables a largo plazo
- Tienen buena resistencia ante factores de temperatura y ambientales

Algunas desventajas son:

- Pueden presentar desgaste después de un sismo severo.

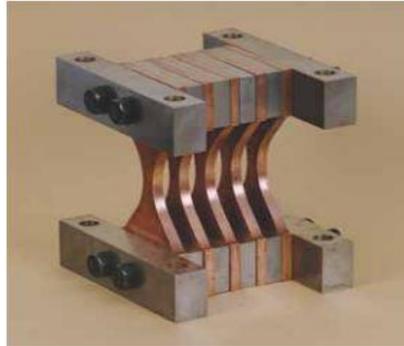


Figura 2. Disipador metálico [3].

2.2 Friccionales

Los disipadores friccionales (Figura 3) por medio de la fricción, como su nombre lo indica, disipan la energía de movimiento que se produce entregándola por medio de calor. La fuerza de fricción en cada conexión es igual al producto de la fuerza por el coeficiente de rozamiento, disipando de esta manera la energía.

Algunas de sus ventajas son:

- Se activan una vez que se alcanza determinado nivel de carga
- Insensibles a temperatura ambiente

Entre sus desventajas, se tienen:

- Existe incertidumbre de la activación de los dispositivos durante un sismo
- Aumentan la probabilidad de deformaciones residuales en la estructura

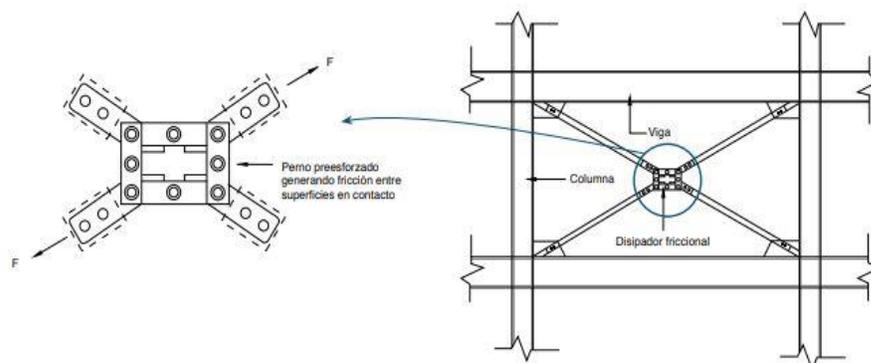


Figura 3. Disipador friccional [3].

2.3 Fluidos viscosos

Los disipadores viscosos disipan la energía cuando se aplica la fuerza a una velocidad dada. Esta fuerza actúa de manera contraria al movimiento generado de entrada. La energía que se disipa depende de un fluido que existe dentro del disipador.

Algunas de sus ventajas son:

- Se activan a pequeños desplazamientos
- Sus propiedades de temperatura y frecuencia son independientes

Entre sus desventajas, se tiene:

- Fugas del líquido viscoso



Figura 4. Disipador de fluido viscoso [3].

2.4 Viscoelásticos

Los disipadores viscoelásticos están conformados por placas metálicas con un material viscoelástico como se observa en Figura 5. La energía se disipa mediante el desplazamiento relativo entre dichas placas.

Algunas de sus ventajas son:

- Activación por medio de desplazamientos relativos
- Aportan rigidez y amortiguamiento a las estructuras.

Entre sus desventajas, se tiene:

- Su capacidad de deformación es limitada

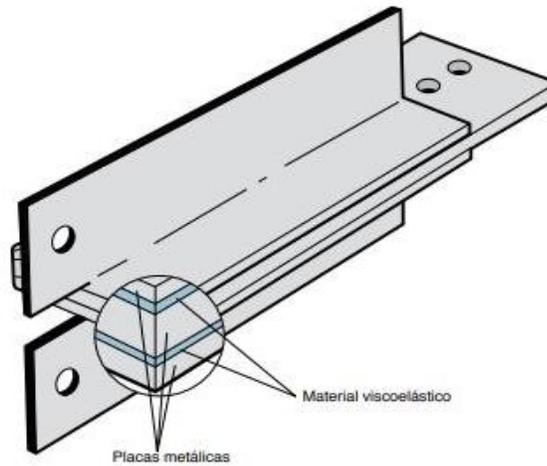


Figura 5. Disipador viscoelástico [3].

2.5 Disipadores utilizados para este estudio

2.5.1 Descripción

En este estudio se utilizaron disipadores histeréticos. En particular, contraventeos restringidos al pandeo (CRPs). Los CRPs, mostrados esquemáticamente en la Figura 6, se conforman por un núcleo de acero, y una camisa compuesta de un tubo metálico relleno de concreto. El núcleo y la camisa encuentran separados por un material desahderente, con la finalidad de que su deformación ocurra de manera independiente. El resultado de desahderir el núcleo y la camisa trae como consecuencia la disipación de energía mediante el comportamiento plástico del núcleo, como se muestra en la Figura 6.

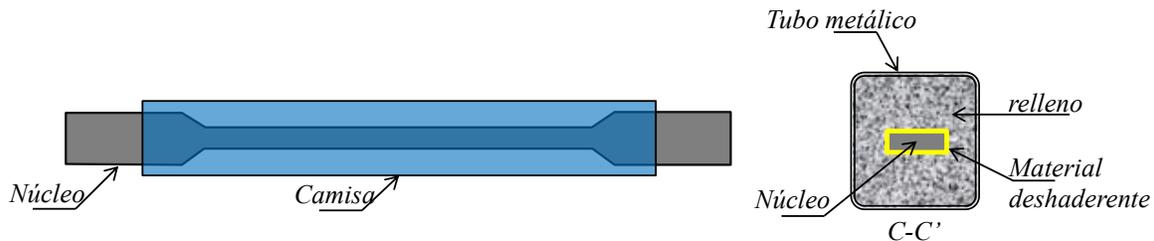


Figura 6. Esquema de un CRP [4].

Los CRPs logran tener un comportamiento histerético estable, simétrico en tensión y compresión, tal y como se muestra en la Figura 7.

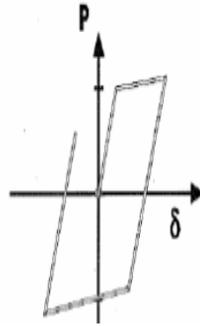


Figura 7. Comportamiento histerético [5].

Las propiedades mecánicas de los CRPs, que contribuyen a la resistencia y rigidez de una estructura se pueden calcular como se muestra en los siguientes subcapítulos:

2.5.2 Rigidez

La rigidez de un CRP se calcula de manera similar a un contraventeo convencional. La única diferencia es que la rigidez de los CRPs se multiplica por un factor que toma en cuenta la variación de la geometría del núcleo del dispositivo (ver Figura 6), ésta se calcula como:

$$K_{CRP} = fk \cdot \frac{EA}{L} \quad (1)$$

donde fk es el factor de rigidez que toma en cuenta las variaciones en la geometría del dispositivo, E es el módulo de elasticidad del acero, A es el área de la sección transversal más débil del núcleo del CRP, y L es la longitud total del dispositivo.

2.5.3 Resistencia

La resistencia de un CRP a carga axial se calcula como:

$$P_y = f_y A \quad (2)$$

donde f_y es el esfuerzo de fluencia del material que compone el núcleo y A es el área de la sección transversal más débil del núcleo del CRP.

3 Estructura estudiada

3.1 Descripción

La Figura 8 muestra la estructura estudiada. Se analizó un marco en 2D conformado por 15 niveles y cuatro crujías. Cada entrepiso tiene una altura de 3m y cada claro una distancia de 6 m a centros de ejes. Se consideró que la estructura se encuentra ubicada en la zona de lago de la CDMX. Las columnas y las trabes están compuestas por perfiles de acero (ver Tabla 1). Las columnas de los niveles 1 a 5, 6 a 10, y 11 a 15 están hechas a base secciones cajón de cuatro placas de 600x19 mm, 600x16 mm y 500x13 mm, respectivamente. Las trabes constan de perfiles W18x50. En cuanto a los materiales, se consideró acero estructural ASTM A992 con esfuerzo de fluencia nominal de $f_y=3520 \text{ kg/cm}^2$. El sistema de piso se consideró como un diafragma rígido. También se consideró base rígida (es decir, columnas empotradas en la base)

Tabla 1. Perfiles de acero de la estructura estudiada.

Niveles	Columnas Perfiles HHS, mm	Vigas
1-5	600x19	W18x50
6-10	600x16	W18x50
11-15	500x13	W18x50

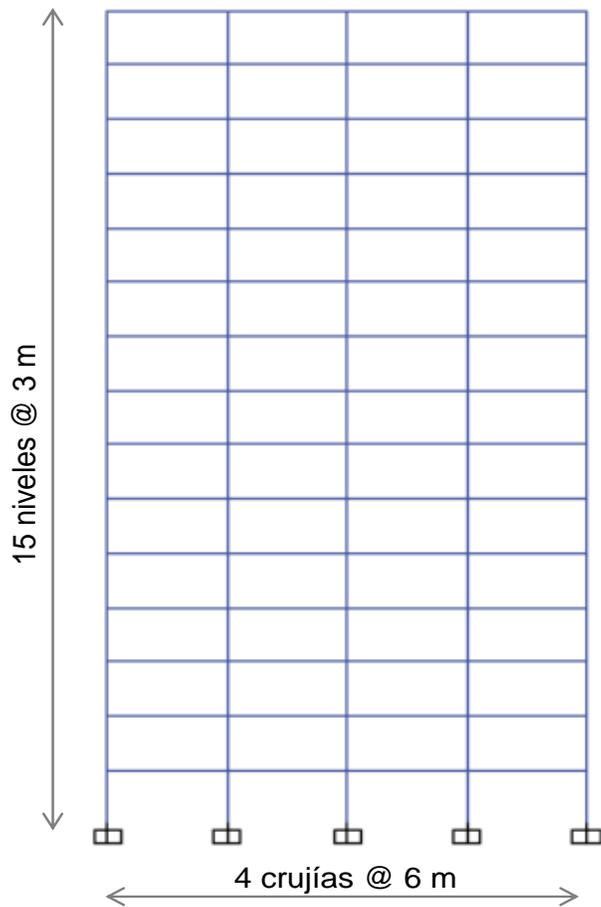


Figura 8. Configuración geométrica de la estructura estudiada.

3.2 Cargas

Se consideraron las cargas descritas en la Tabla 2, uniformemente distribuidas sobre las trabes del modelo. Por simplicidad, se consideraron las mismas cargas en todos los niveles del edificio. Es importante mencionar que el peso propio de los elementos estructurales se consideró directamente en el modelo matemático.

Tabla 2. Cargas consideradas.

Carga	Descripción	Valor
SCM	Carga muerta	1.6 t/m
CVA	Carga viva instantánea	1.44 t/m
CVM	Carga viva máxima	2 t/m

3.3 Casos de estudio

Se estudiaron tres casos de interés que se describen a continuación y se muestran en la Figura 9.

- **Caso 1.** Estructura sin disipadores. Se diseñó la estructura sin disipadores mediante métodos convencionales, es decir, a base de un modelo elástico lineal. Los detalles del diseño se describen en la sección 3.4.
- **Caso 2.** Estructura con CRPs en cada entrepiso. A la estructura del caso 1, se le agregaron disipadores tipo CRP. Éstos se diseñaron con la metodología propuesta por Guerrero et al. [6], misma que permite incrementar la capacidad de la estructura para controlar la demanda de desplazamientos laterales en ésta. Las propiedades calculadas de los CRPs se muestran en la Tabla 3. Se consideró una resistencia nominal del acero de los CRPs de $f_y=2530 \text{ kg/cm}^2$ (Acero ASTM A36).
- **Caso 3.** Estructura con CRPs y contraventeos convencionales (CCs) colocados de manera alternada. A partir de la estructura del caso 2, se reemplazaron los CCs de los entrepisos 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 15 por contraventeos convencionales con sección HSS 254x9.5 mm hechos de acero ASTM A992.

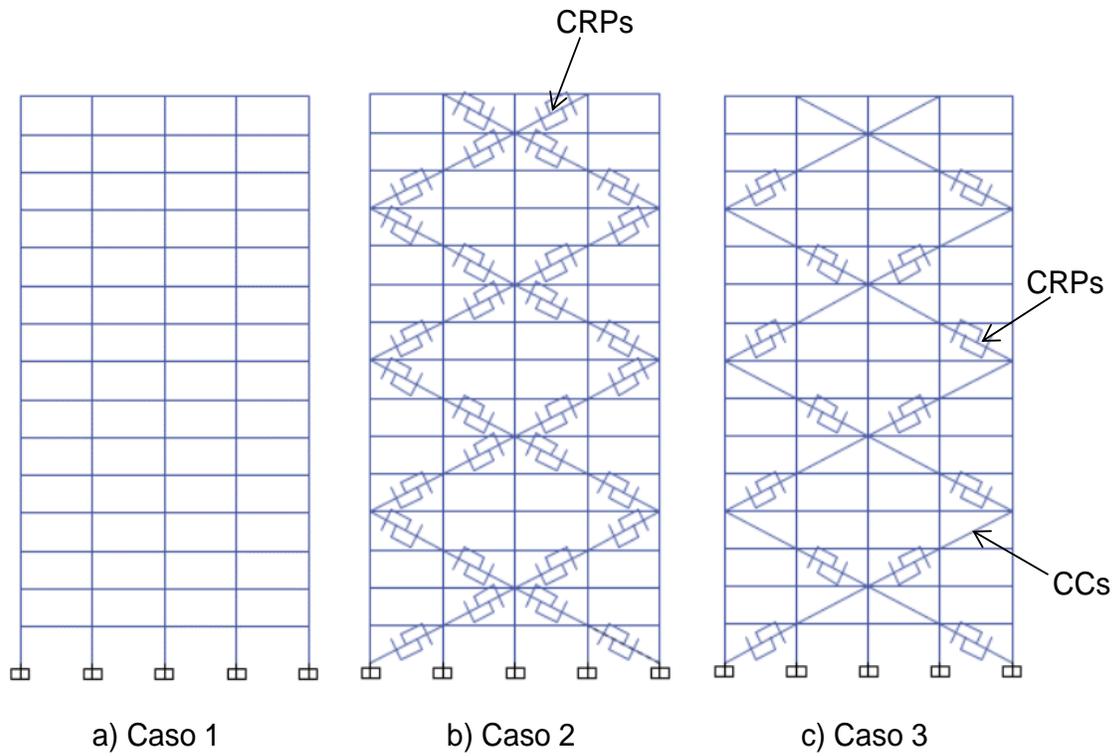


Figura 9. Esquemas de casos estudiados.

Tabla 3. Propiedades de los CRPs.

CRP	Niveles	Área núcleo, cm ²
Tipo 1	1-3	25
Tipo 2	4-6	20
Tipo 3	7-9	15
Tipo 4	10-12	10
Tipo 5	13-15	5

3.4 Diseño

Se realizó el diseño de cada uno de los casos descritos en la sección 3.3 como se detalla en las siguientes subsecciones.

3.4.1 Caso 1

Se supuso que la estructura fue diseñada y construida antes de 2017 [2], por lo que se realizó su diseño con base en las especificaciones del reglamento de construcciones de la Ciudad de México, en su versión 2004 [7]. Primero, se desarrolló un modelo numérico en el programa Etabs 2016 [8] de la estructura estudiada. Se colocaron las cargas de la sección 3.2 y se obtuvieron los periodos del modelo (ver Tabla 4). Se supuso que la estructura estaba localizada en la zona geotécnica IIIb y que se diseñó para un factor de comportamiento sísmico de $Q=4$. Con esos datos, se obtuvo el espectro de diseño que se muestra en la Figura 10 y se introdujo al programa de análisis. El programa calculó la respuesta de la estructura y revisó las capacidades de los elementos estructurales considerando la información modal de la Tabla 4. Resultó que los perfiles, descritos en la sección 3.1, tenían la capacidad necesaria para soportar las fuerzas sísmicas.

Tabla 4. Periodos de la estructura.

Modo	Periodo, s	Porcentaje de masa modal	Porcentaje de masa modal acumulada
1	2.51	77.1%	77.1%
2	0.81	10.2%	87.3%
3	0.45	4.05%	91.35%

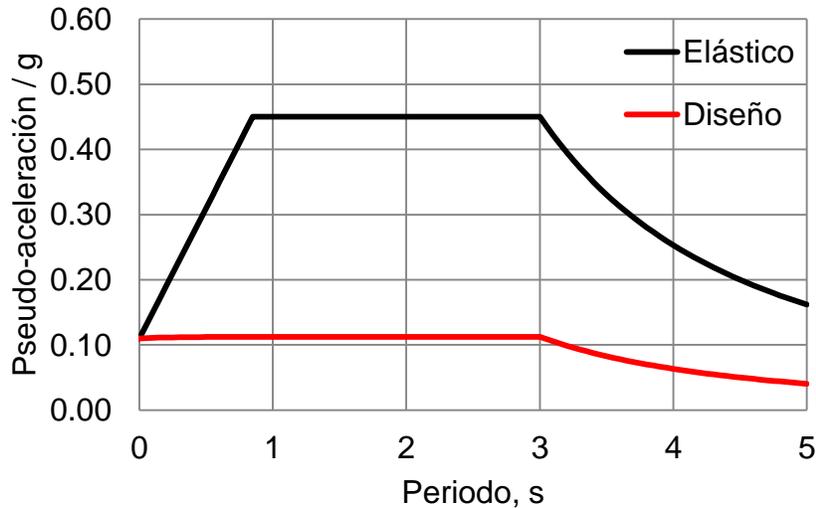


Figura 10. Espectros elástico y de diseño según el reglamento de la Ciudad de México versión 2004.

3.4.2 Caso 2

Con la finalidad de mejorar el desempeño de la estructura, se le introdujeron disipadores de energía sísmica del tipo contraventeos restringidos al pandeo (CRPs). Para diseñar los CRPs, se hizo uso de la metodología propuesta por Guerrero et al. [9] que consiste en hacer un diseño basado en el control de los desplazamientos laterales. Para ello, el método hace uso de un oscilador dual de un grado de libertad equivalente que toma en cuenta las propiedades de la estructura y los CRPs. El método usa registros sísmicos y somete al oscilador equivalente a análisis dinámicos paso a paso para encontrar la respuesta dinámica. Al final, los desplazamientos máximos, producidos por cada registro sísmico, son promediados y comparados contra límites preestablecidos. Se consideró que los CRPs incrementaron la capacidad de carga lateral de la estructura en un 30%, con ello se obtuvieron las áreas de los CRPs descritas en la Tabla 3.

3.4.3 Caso 3

Para el caso 3, simplemente se reemplazaron los CRPs de los entresijos 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 15 por contraventeos convencionales (CCs) con sección HSS 254x9.5 mm hechos de acero ASTM A992. Todos los CCs usados tenían el mismo perfil en todos los niveles. Se revisó que los CCs tuvieran por lo menos el doble de la capacidad de los CRPs de entresijos adyacentes. Esto con la finalidad de que permanecieran elásticos durante la ocurrencia de algún movimiento sísmico. Se revisó la carga de fluencia y la carga crítica de pandeo de los CCs, que resultaron ser $P_y=320$ t y $P_{cr}=410$ t, respectivamente.

3.5 Movimientos sísmicos

Para evaluar el comportamiento sísmico de la estructura estudiada, se seleccionaron 12 registros de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes [10]. Se seleccionaron movimientos sísmicos de la zona IIIb de la Ciudad de México, justo en donde se supuso la ubicación del edificio. Los doce registros fueron procesados mediante una corrección de línea base y un filtrado tipo *pasabanda* en el programa Degtra [11]. Una vez filtrados, se obtuvieron los espectros de pseudo-aceleración de las dos componentes horizontales y el espectro combinado SRSS, es decir, un espectro con la raíz cuadrada de la suma de las dos componentes horizontales elevadas al cuadrado. Los 12 registros SRSS fueron escalados de manera independiente hasta que el promedio de ellos fuese igual o mayor al espectro del reglamento, multiplicado por un factor de 1.3 según se requiere en el capítulo 6.2 de ese reglamento. Mientras que los resultados de los espectros SRSS escalados se muestran en la Figura 11, la Tabla 5 muestra el listado de los registros con sus datos más relevantes. Es importante aclarar que, dado que la estructura estudiada está en 2D, para los análisis dinámicos de este trabajo sólo se consideró componente mayor de los registros sísmicos.

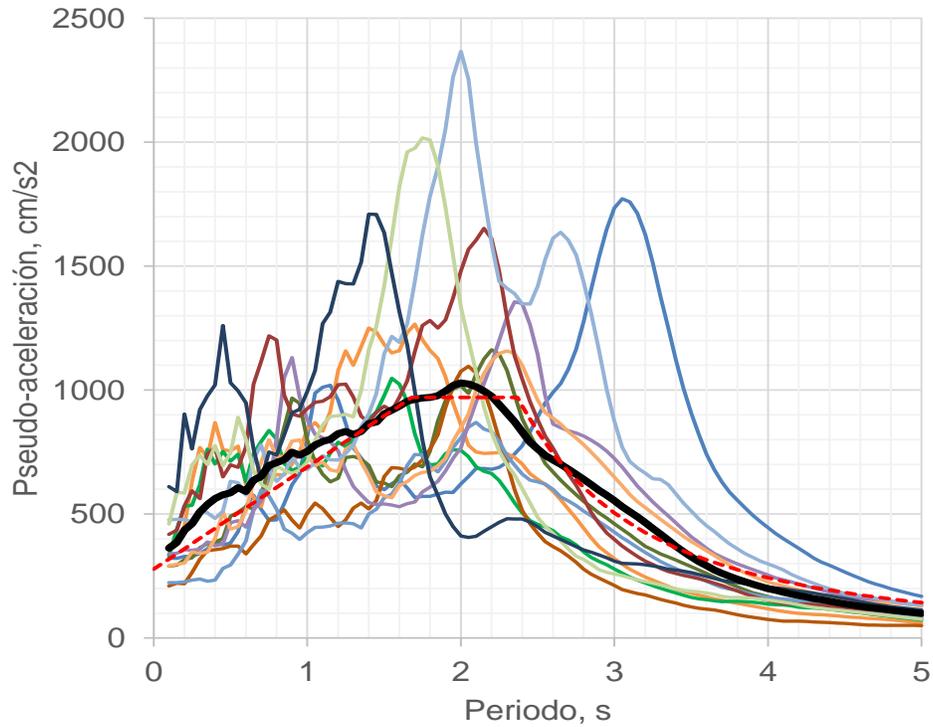


Figura 11. Espectros SRSS de los registros seleccionados.

Tabla 5. Datos de los registros sísmicos seleccionados.

Estación	Fecha del evento	Acel. Máxima, Gal	Factor de escala
BA49	25/04/1989	58.97	4
CCCL	19/09/2017	85.53	3
CI05	19/09/2017	114.24	2
CI05	25/04/1989	54.33	4
CI05	30/09/1999	41.69	4
CJ03	25/04/1989	40.72	4
CO56	25/04/1989	72.99	4
LI58	25/04/1989	40.93	5
PCJR	19/09/2017	98.67	3
SCT1	19/09/1985	161.63	2.5
SCT2	19/09/2017	91.68	3
SI53	19/09/2017	177.56	2.5

4 Resultados

4.1 Propiedades dinámicas de la estructura

Los periodos de vibrar de la estructura para el caso 1 fueron presentados en la Tabla 4. Estos se repiten en la Tabla 6 por conveniencia junto con los periodos para los casos 2 y 3 estudiados. Nótese que sólo se presentan tres modos para cada caso porque son los más relevantes, al mover una masa modal efectiva acumulada mayor al 90%. Adicionalmente, las figuras 12 a 14 muestran imágenes de cada uno de los modos para cada caso estudiado. Se puede ver que los periodos de los casos 2 y 3 son menores porque la estructura se vuelve más rígida. Incluso el caso 3 es un poco más rígido que el caso 2 porque los contraventeos convencionales eran intencionalmente más rígidos y más resistentes que los CRPs. Esto se hizo con la finalidad de que no presentaran falla durante un movimiento sísmico.

Tabla 6. Periodos de la estructura para los casos 1 a 3.

Modo	Caso 1	Caso 2	Caso 3
1	2.51 s	1.37 s	1.12 s
2	0.81 s	0.50 s	0.39 s
3	0.45 s	0.29 s	0.22 s

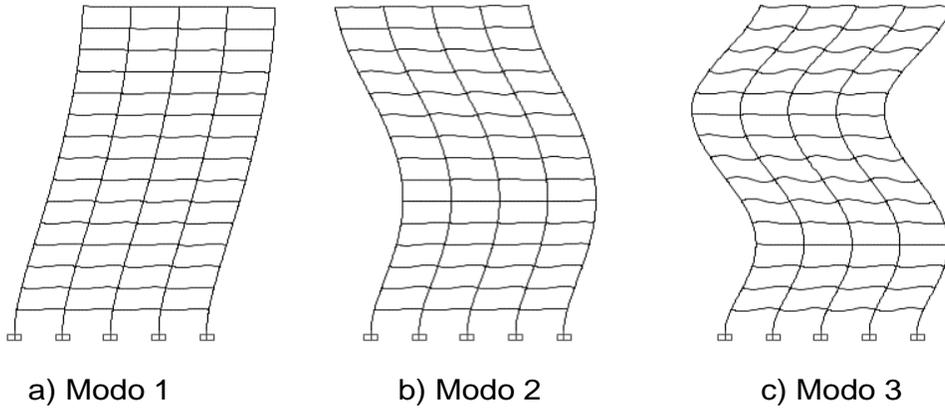


Figura 12. Modos de vibrar de la estructura para el caso 1.

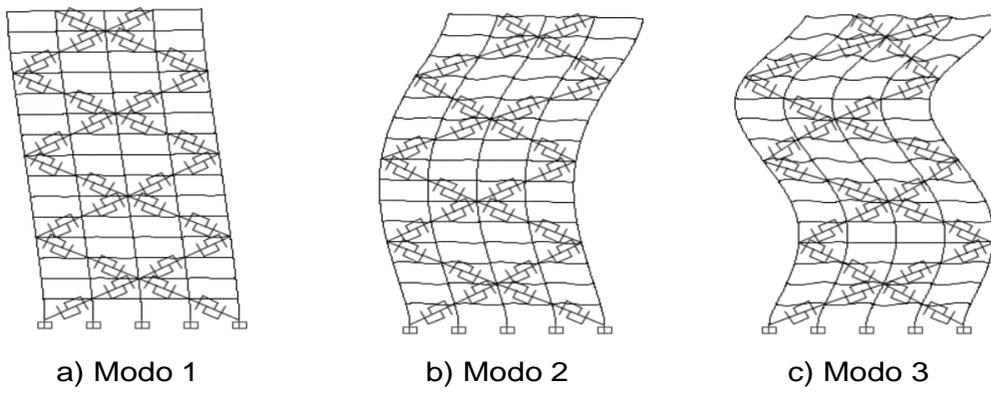


Figura 13. Modos de vibrar de la estructura para el caso 2.

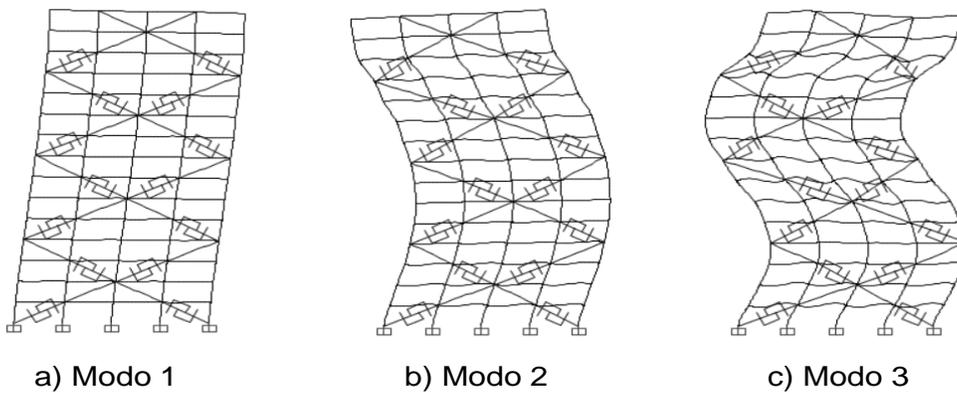


Figura 14. Modos de vibrar de la estructura para el caso 3.

4.2 Curvas de capacidad

Las curvas de capacidad se analizan para estimar el desplazamiento que provoca fluencia en la estructura, así como el posible mecanismo de colapso. En la Figura 15 se muestran las curvas para los tres diferentes casos estudiados con la finalidad de obtener la capacidad resistente representada por la curva fuerza cortante-desplazamiento mejor conocida como curva *pushover*.

Se puede observar que para el caso 2 la fuerza cortante es mayor en comparación con el caso 1, esto se debe a que los CRPs utilizados toman una parte de las fuerzas aplicadas y ayudan a los elementos del marco. Por su parte, en el caso 3 se observa una resistencia mayor en la estructura, pero hay un comportamiento frágil para niveles de desplazamiento cercanos a los 600 mm, pues los elementos estructurales no pueden acomodar los niveles de esfuerzos demandados, y pierden capacidad súbitamente.

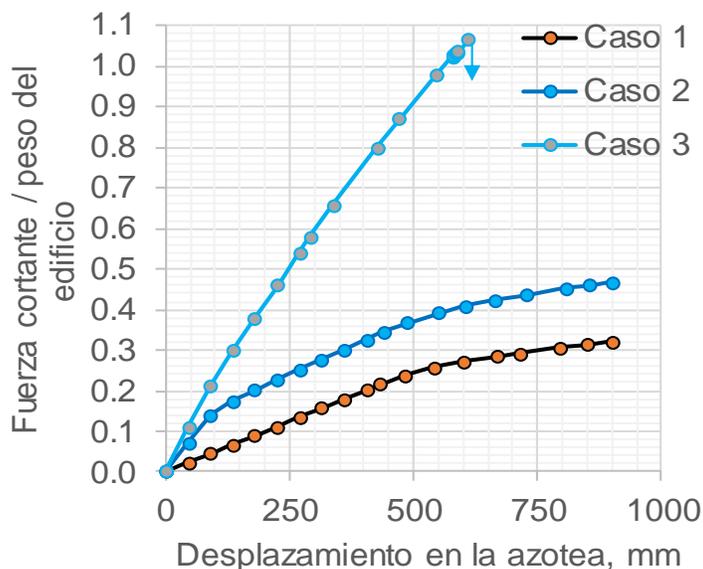


Figura 15. Curvas de capacidad (*pushover*) de la estructura.

4.3 Respuesta sísmica

Los tres casos estudiados, descritos en el capítulo 3 fueron sometidos a los movimientos sísmicos mencionados en la sección 3.5. Se consideró un amortiguamiento para los modos 1 y 2 del 5% en el caso 1 y del 8% en los casos 2 y 3 según las referencias [12 y 13]. Para modelar el amortiguamiento se hizo uso de una matriz de Rayleigh. En las siguientes secciones se muestran los parámetros de respuesta sísmica para cada caso estudiado.

4.3.1 Desplazamientos

Mientras la Figura 16 muestra los desplazamientos máximos demandados por cada movimiento sísmico, la Figura 17 compara los promedios de cada caso. Se puede observar que en promedio, los desplazamientos máximos de los casos 2 y 3 son 44 y 23% los del Caso 1. En otras palabras, las demandas máximas de desplazamientos se disminuyen a menos de la mitad gracias a los CRPs o a la combinación de ellos con contraventeos convencionales.

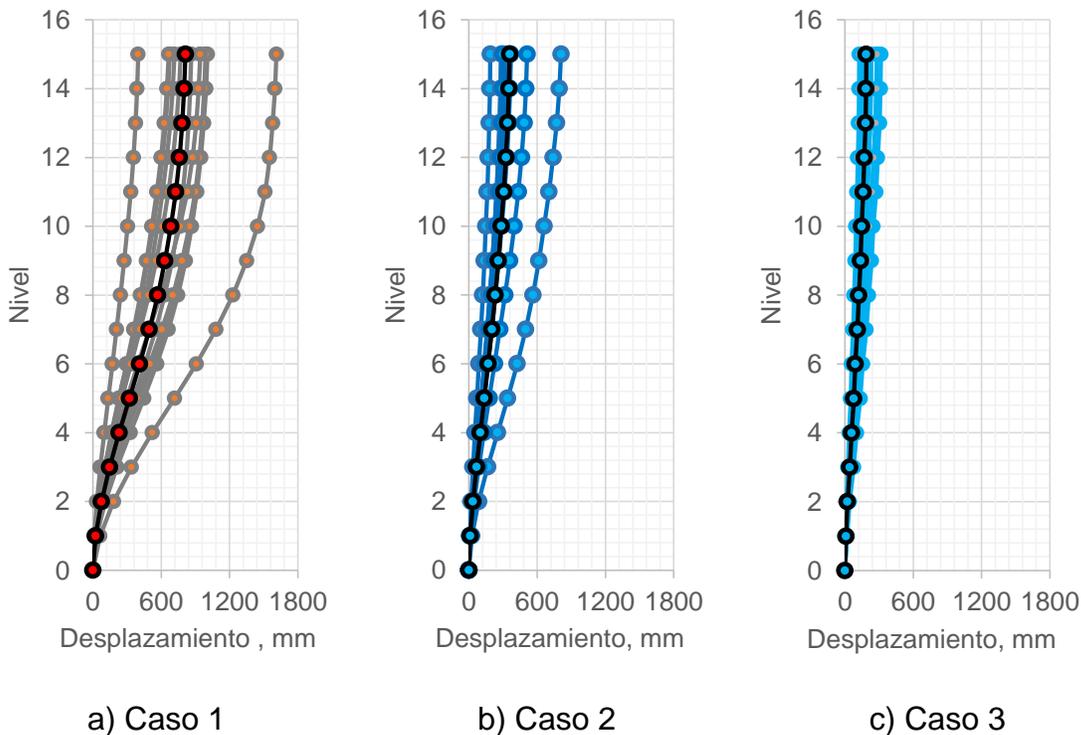


Figura 16. Desplazamientos máximos en la estructura para cada movimiento.

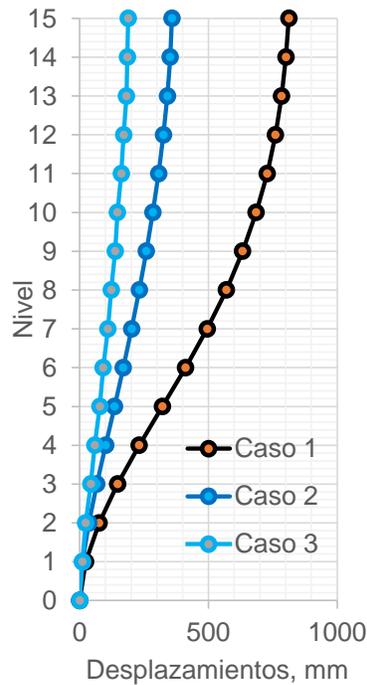
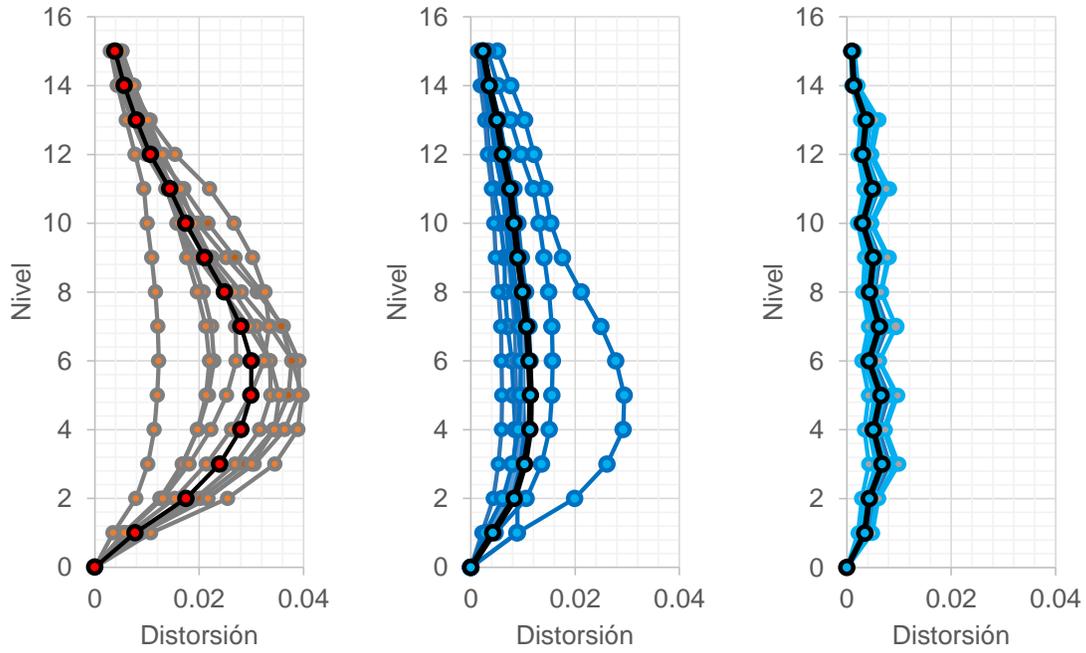


Figura 17. Comparación de los promedios de los desplazamientos máximos.

4.3.2 Distorsiones de entrepiso

La Figura 18 muestra las demandas de distorsiones de entrepiso para cada movimiento sísmico en cada caso estudiado. Por su parte, la Figura 19 muestra una comparación de los promedios de distorsiones de entrepiso máximas. Se puede observar que, de manera similar a lo que ocurre con la demanda de desplazamientos, los casos 2 y 3 presentan menores demandas que el caso 1; siendo las distorsiones del caso 2, en promedio, 38% de aquellas del caso 1 y las del caso 3, apenas 22%. Otra vez, menos de la mitad.



a) Caso 1

b) Caso 2

c) Caso 3

Figura 18. Distorsiones de entrepiso máximas en la estructura para cada movimiento.

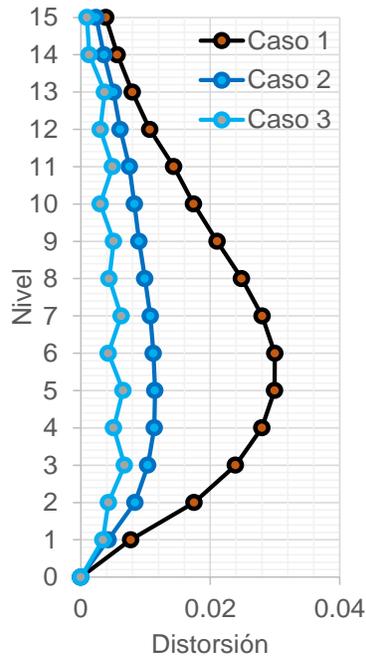


Figura 19. Comparación de los promedios de las distorsiones de entrepiso máximas.

4.3.3 Fuerza cortante

La Figura 20 muestra las demandas máximas de fuerza cortante en la estructura para cada movimiento sísmico, mientras que la Figura 21 compara los promedios de éstas. Se puede observar que los casos 1 y 2 presentan prácticamente las mismas demandas de cortante máximo. Sin embargo, el caso 3 presenta un incremento muy importante de las fuerzas cortantes, siendo 1.6 veces aquellas demandas promedio del caso 1. Esta observación tiene implicaciones importantes, ya que, aunque no se evaluó en esta tesis, seguramente habrá incrementos significativos en los costos de cimentación de la estructura y en la fabricación de sus conexiones.

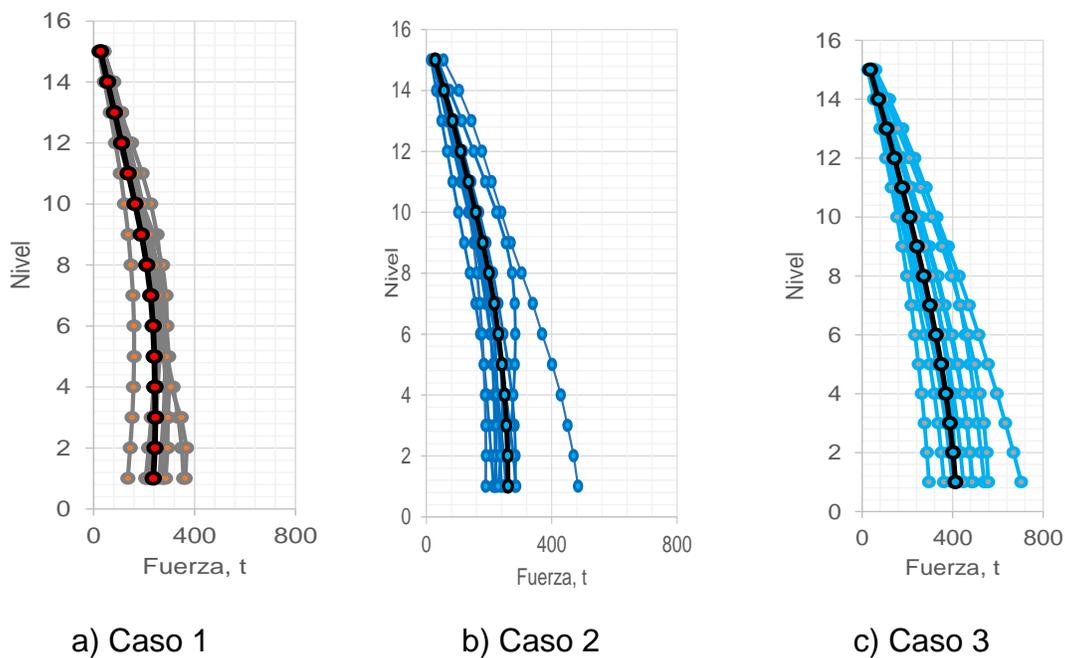


Figura 20. Fuerza cortante máxima en la estructura para cada movimiento.

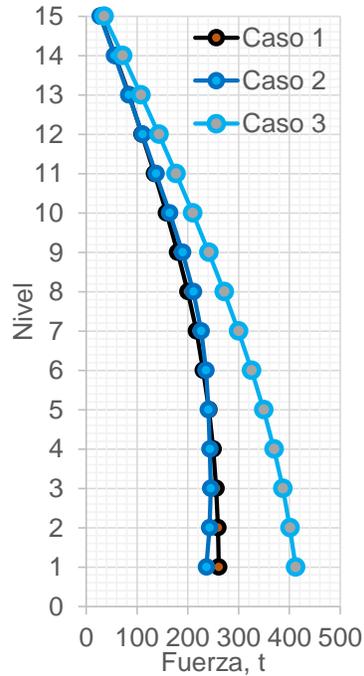
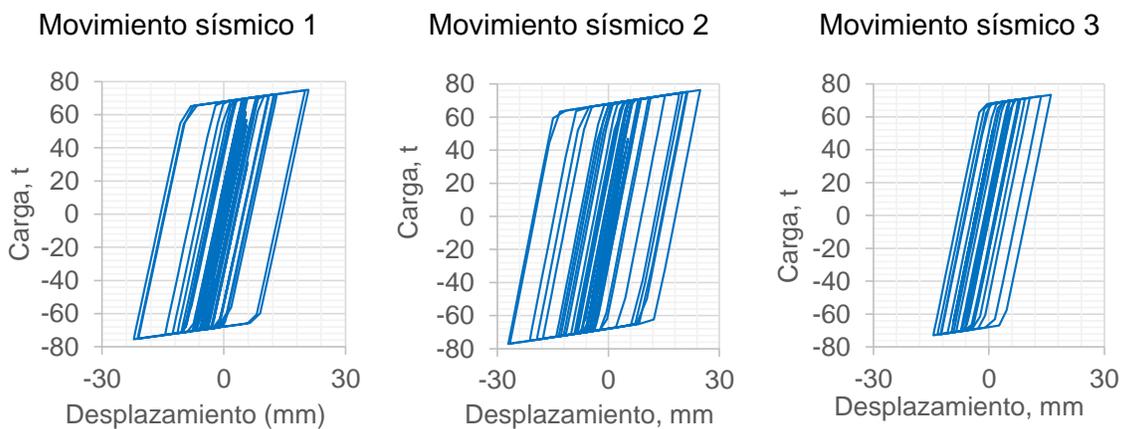


Figura 21. Comparación de los promedios de fuerza cortante máxima.

4.3.4 Comportamiento de CRPs

La Figura 22 muestra las curvas de histéresis en los CRPs del entrepiso 4 del edificio para cada uno de los movimientos sísmicos del caso 2 estudiado. Se puede ver que los CRPs alcanzan comportamiento inelástico y que disipan grandes cantidades de energía, como se puede deducir a partir del área dentro de las curvas.



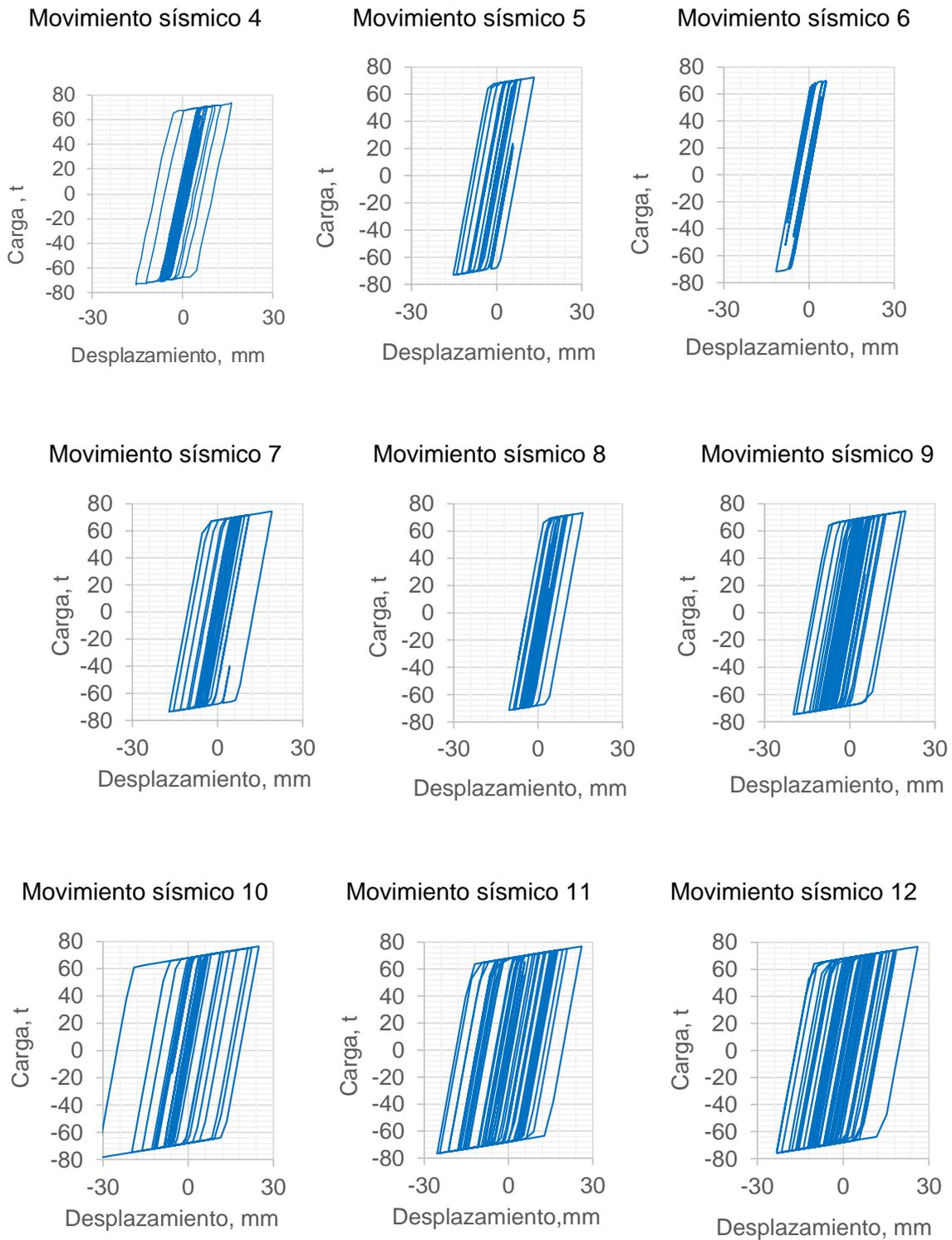


Figura 22. Curvas de histéresis en los CRPs del nivel 4 para cada movimiento sísmico estudiado en el Caso 2.

4.3.5 Comportamiento de CCs

Con la finalidad de garantizar que los contraventeos convencionales (CCs) permanecerán elásticos durante la ocurrencia del terremoto de diseño, se revisa que el promedio de las demandas de carga axial en ellos sea menor a la carga de fluencia y a la carga crítica de pandeo.

La Figura 23 muestra, en cada punto, la demanda máxima de carga axial en el CC más demandado; así como su promedio (línea discontinua). Se puede observar que el promedio de las demandas de carga axial está por debajo de la carga de fluencia y la carga crítica de pandeo del perfil HSS 254x9.5 mm, lo que demuestra que podría esperarse un buen desempeño durante la ocurrencia del sismo de diseño. Nótese que cuatro puntos de la Figura 23 están por arriba de la carga de fluencia y uno por arriba de la carga crítica de pandeo. Sin embargo, eso no representa un problema mayor ya que el reglamento solicita que sea el promedio de las demandas el que esté por debajo de las cargas de fluencia y pandeo.

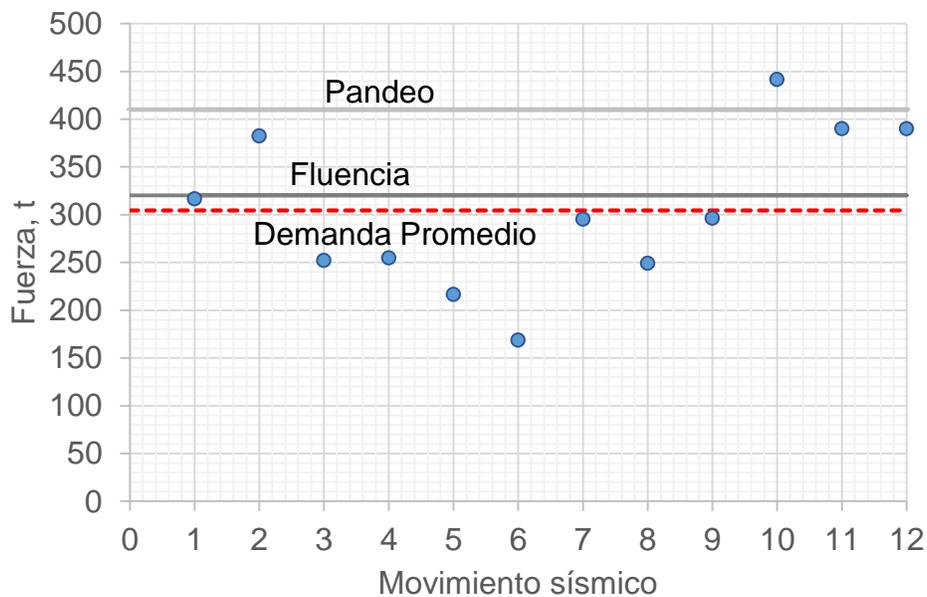


Figura 23. Comparación demandas de carga axial máxima en CCs contra carga de fluencia y carga crítica de pandeo para el Caso 3 estudiado.

5 Conclusiones y recomendaciones

Se realizó un estudio sobre un edificio de 15 niveles en 2D. Se analizaron tres casos: 1) edificio sin disipadores; 2) edificio equipado con contraventeos restringidos al pandeo (CRPs); y 3) edificio equipado con CRPs y contraventeos convencionales (CCs) colocados de manera alternada. A continuación se presentan las conclusiones de esta tesis así como algunas recomendaciones para futuros estudios.

5.1 Conclusiones

- Los resultados obtenidos para nuestro Caso 2 y Caso 3 muestran que el uso de los CRPs y CCs permite tener un mayor control de la respuesta sísmica de la estructura en cuanto a los desplazamientos.
- Para el Caso 1 no cumple el límite de seguridad contra colapso. Las distorsiones de entrepiso producidas por las fuerzas cortantes sísmicas de exceden la distorsión máxima permisible de 0.030 establecidas en el Reglamento [2].
- Las distorsiones de entrepiso mostradas para el caso 3 disminuye de manera importante en comparación al Caso 2. Esta podría permitir disminuir el tamaño de los CRPs en la estructura sin comprometer su seguridad.
- La fuerza cortante para el Caso 3, en comparación con los otros dos casos, se incrementa de manera importante. Este incremento de fuerzas podría afectar la estructura o la cimentación.
- El comportamiento observado de los CRP muestra que tienen un desempeño adecuado ante eventos sísmico, también se puede observar que los desplazamientos para los 12 movimientos sísmicos se comporta de manera controlada.
- El Caso 2 y Caso 3 son una buena solución frente los riesgos que puede sufrir una estructura ante un sismo.

5.2 Recomendaciones

- El uso de sistemas de protección sísmica, como lo muestra esta tesis permiten reducir de manera importante el riesgo a algún daño estructural o colapso ante un sismo.
- Se debe considerar que este caso de estudio se llevó a cabo para un marco en 2D, no se consideró la interacción suelo estructura, pero esta deberá ser considerada en estudios futuros.
- Es importante hacer revisiones rigurozas para evitar problemas de pandeo en contraventeos convencionales.
- Se recomienda realizar estudio de estructuras con diferentes configuraciones de los CRPs y CCs con la finalidad de disminuir las fuerzas cortantes en la base.
- Se recomienda realizar estudios económicos, sobre todo analizar el caso 3 con mayor detalle ya que los costos de la cimentación podrían incrementarse sustancialmente. Se debe buscar el caso que sea más conveniente.

Referencias

- [1] Los ocho sismos más catastróficos en la historia de México. Página de internet: <https://www.forbes.com.mx/los-8-sismos-mas-catastroficos-en-la-historia-de-mexico/>, consultada el 05/Nov/2018.
- [2] Normas técnicas complementarias para diseño por sismo. Gobierno de la Ciudad de México. Diciembre 2017.
- [3] Ricardo Abarca Alfredo Bolomey. (2012). Protección Sísmica de Estructuras., de Cámara Chilena de la Construcción. Página de internet: http://descargas.coreduc.cl/Proteccion_Sismica_de_Estructuras_Febrero_2012_CLR_v4.1.pdf, consultada 2/Nov/2018.
- [4] Guerrero H. Seismic Design and Performance of Hospital Structures Equipped with Buckling-Restrained Braces in the Lakebed Zone of Mexico City. Tesis doctoral, Universidad de Mánchester, Reino Unido, 2016.
- [5] Liliana Minelly Romo, Sistemas de disipación de energía. Diagnóstico de daño en disipadores de energía históricos tipo WDP para el control pasivo en estructuras sismorresistentes mediante análisis de vibraciones en el dominio de la frecuencia. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 2012; 30
- [6] Guerrero H, Terán-Gilmore A, Ji T, Escobar JA. Evaluation of the economic benefits of using Buckling-Restrained Braces in hospital structures located in very soft soils. *Engineering Structures*. 2017; 136:406-19.
- [7] Normas técnicas complementarias para diseño por sismo. Gobierno de la Ciudad de México. Diciembre 2014
- [8] ETABS v16.2.1, Computers and Structures Inc, EU, 2016
- [9] Guerrero H, Ji T, Teran-Gilmore A, Escobar JA. A Method for Preliminary Seismic Design and Assessment of Low-Rise Structures Protected with Buckling-Restrained Braces. *Engineering Structures*. 2016; 123:141-54.
- [10] Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C., Ciudad de México, 2000.
- [11] Programa de procesamiento de acelerogramas Degtra v5.1.0. Instituto de Ingeniería, UNAM. 2005.

[12] Guerrero H, Escobar JA, Teran-Gilmore A. Experimental damping on frame structures equipped with buckling-restrained braces (BRBs) working within their linear-elastic response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018; 106:196-203.

[13] Guerrero H, Ji T, Escobar JA, Teran-Gilmore A. Effects of Buckling-Restrained Braces on reinforced concrete precast models subjected to shaking table excitation. *Engineering Structures*. 2018; 163:294-310.