



**GERDAU**  
**CORSA**  
El futuro se moldea



**DAMPO**

# USO DE DISIPADORES DE ENERGÍA EN EDIFICACIONES DE ACERO

Gerdau Corsa. El futuro se moldea.

# USO DE DISIPADORES DE ENERGÍA EN EDIFICACIONES DE ACERO



## RESUMEN

El uso de sistemas de protección sísmica ha sido una alternativa efectiva y eficiente en países altamente sísmicos para proteger la infraestructura. Contrario a lo que comúnmente se cree, los sistemas de protección sísmica son dispositivos económicos que permiten lograr ahorros significativos en la construcción de edificaciones, al tiempo que mejoran de manera notable su desempeño ante acciones sísmicas. En ese sentido, en el presente trabajo se presenta la evaluación de dos edificaciones que consideran el uso de sistemas de protección sísmica y se compara tanto su desempeño estructural como sus costos de construcción. Se observa que las estructuras que cuentan con los disipadores de energía presentan un costo menor de construcción y un mejor desempeño estructural que sus contrapartes convencionales.

Créditos.

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla

Ing. Fernando Cueto Jiménez - Dampo Systems

Ing. César Viramontes Heredia - Dampo Systems

Ing. Rigoberto Torres Villeda - Gerdau Corsa

# 1. 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. De los edificios identificados por el gobierno de la Ciudad de México como dañados, la gran mayoría se encuentran dentro de esta zona.

En la Figura 1 se muestra la ubicación de los edificios dañados (círculos rojos) durante el pasado sismo del 19 de septiembre de 2017, en la Ciudad de México. En la figura también se muestra la zonificación geotécnica de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTCDCC, 2017). Se puede observar que la mayoría de los edificios dañados se encuentran en las zonas IIIa y IIIb.

En la nueva versión de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS, 2020) se aumentaron los coeficientes sísmicos para el diseño de algunas edificaciones, por ello, algunos proyectos nuevos a construir requieren una mayor cantidad de materiales para lograr cumplir con las recomendaciones reglamentarias. Aunado a esto, las nuevas solicitudes arquitectónicas requieren soluciones estructurales cada vez más audaces, y difíciles de resolver. A fin de no alterar la geometría, el funcionamiento y de no tener la necesidad de incrementar la cantidad de materiales en las edificaciones, es recomendable recurrir a alternativas innovadoras que incluyen elementos estructurales que disipan energía.

En este artículo se presentan dos casos de éxito de estructuras que cuentan con dispositivos de protección sísmica: el primero de ellos es el edificio ubicado en la calle Sinaloa 95 que cuenta con una forma regular y que originalmente se concibió como un sistema mixto de marcos de acero con contraventeos convencionales. Al realizar una evaluación de factibilidad, se encontró que el uso de sistemas de protección sísmica mejoraba su desempeño estructural y presentaba ahorros en el costo de la superestructura, así como menores descargas a cimentación, lo cual se vería reflejado en una obra menos invasiva y más económica.

La segunda estructura mostrada es el proyecto ubicado en calle Ámsterdam 219, que cuenta con una forma muy irregular y que originalmente se concibió como un sistema mixto de marcos con muros de concreto. Al realizar una revisión se encontró que la estructura cumplía con los requisitos de las normas, pero económicamente la estructura presentaba costos de construcción elevados. Debido a ello, se propuso una alternativa con un sistema de protección sísmica que consta tanto de disipadores tipo BRB, como de disipadores viscosos. Dicha solución, innovadora, mostró un desempeño estructural mejorado, con un costo más bajo, en comparación con la estructura original.

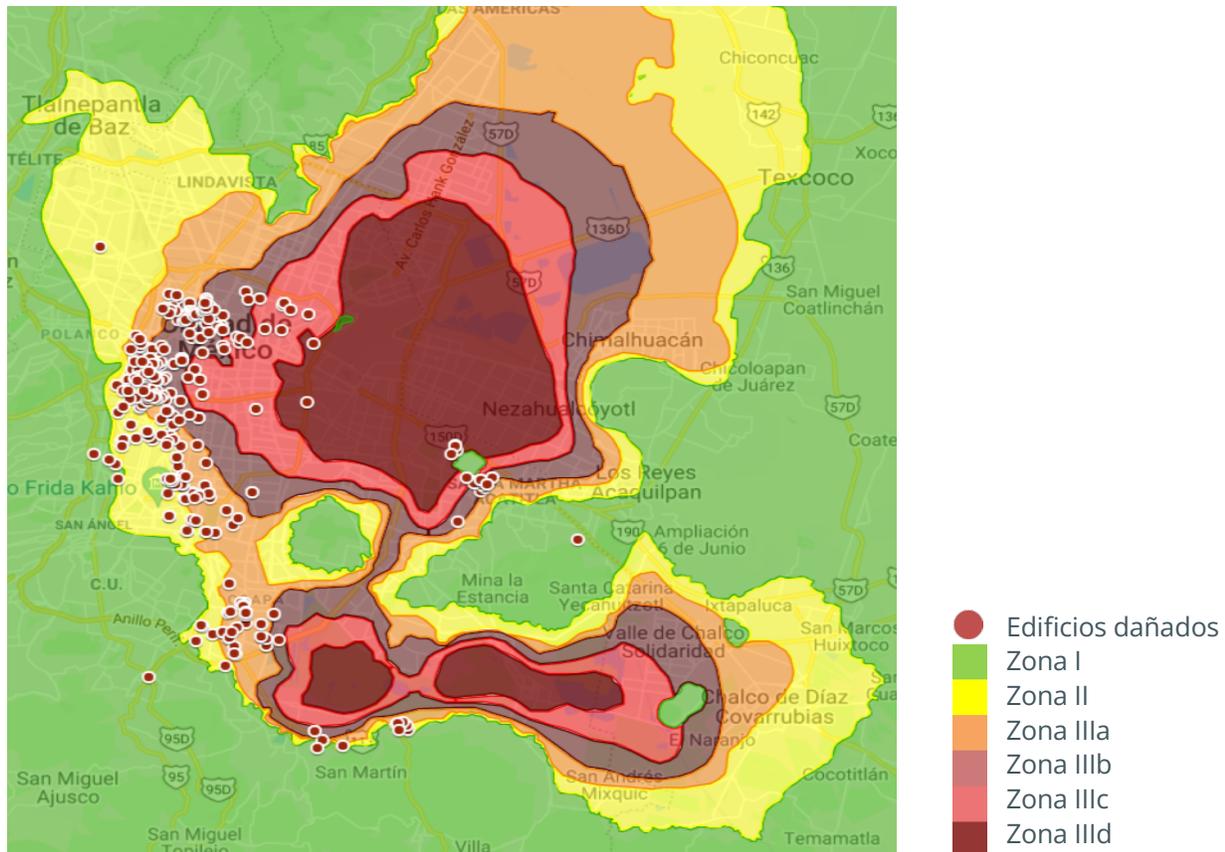


Figura 1. Edificios dañados en el sismo del 19/09/2017, adaptado de CICM, 2020)

## 2. DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

En las últimas décadas, se han desarrollado e implementado múltiples dispositivos que ayudan a mejorar el desempeño de las estructuras ante fuerzas externas y a reducir los costos en su construcción. En la Figura 2 se muestran los diferentes dispositivos de protección sísmica de acuerdo con la forma en que trabajan: sistemas de disipación pasiva, sistemas de disipación semiactiva/activa y aislamiento de base (Christopoulos, 2006).

Se han realizado varios estudios acerca de las ventajas que se tienen al usar dispositivos de protección sísmica tanto para construcciones nuevas como para rehabilitaciones estructurales. Se pueden observar beneficios económicos tanto en los costos iniciales de construcción, al requerir elementos estructurales de menor tamaño, como en los costos de reparación después de un sismo de gran magnitud. Así mismo, el comportamiento sísmico mejora con el uso de estos dispositivos comparándolo contra otros sistemas estructurales como lo son: contraventeos excéntricos, marcos de acero o contraventeos convencionales. Dichas ventajas se pueden apreciar también para edificios de gran altura. Incluso, estos dispositivos se pueden combinar con elementos prefabricados para aprovechar las ventajas de ambos sistemas. con un costo más bajo, en comparación con la estructura original.

Dispositivos de protección sísmica	Disipación pasiva	Histeréticos
		Fricción
		Viscoelástico
		Viscoso
		Masa sintonizada
	Disipación semiactiva/activa	Contraventeos
		Masa sintonizada
		De rigidez variable
		De amortiguamiento variable
		Piezoelectrónicos
	Aislamiento de base	Magnéticos
		Elastomérico
		Cucho de plomo
		Metálico
		Núcleo de plomo
	Pendulo de fricción	

Figura 2. Clasificación de dispositivos de protección sísmica, (adaptado de Christopoulos, 2006)

## 2.1 AMORTIGUADORES HISTERÉTICOS

Los amortiguadores histeréticos están basados en la deformación inelástica del material constitutivo del dispositivo, que generalmente es acero. Estos dispositivos son ampliamente conocidos, gracias a sus diferentes ventajas comerciales como lo son: bajo costo por dispositivo, bajo costo de instalación al no requerir mano de obra especializada, bajos costos de mantenimiento y baja probabilidad de reemplazo después de un sismo de gran magnitud.

En el año 2018, la JSSI consideró que en Japón existían 1,472 estructuras con algún tipo de dispositivo de disipación de energía. En la Figura 3 se muestra la forma en que se distribuyen de acuerdo con el tipo de dispositivo. Se puede observar que los amortiguadores histeréticos son los más empleados (37%), seguidos de los amortiguadores de aceite y viscosos (20% y 19% respectivamente).

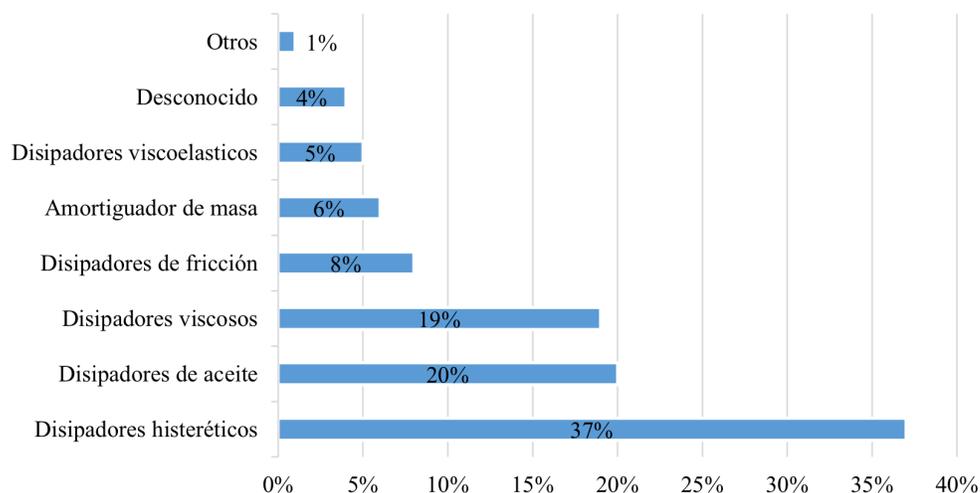


Figura 3. Estructuras con dispositivos de disipación de energía, (adaptado de JSSI, 2020)

## 2.1.1 DISIPADOR DAMPO BRB

Dentro de los amortiguadores histeréticos, los contraventeos restringidos al pandeo (CRP) son de los más usados actualmente. Esto debido principalmente a su bajo costo, a que han sido ampliamente estudiados y a que su diseño e instalación es muy similar a aquella de los contraventeos convencionales.

El dispositivo está conformado por un núcleo generalmente de acero, que disipa energía por medio de su comportamiento no lineal. Para evitar que se presente pandeo, el núcleo está confinado por un tubo de acero relleno de mortero. Entre el núcleo y el mortero se tiene un material desadherente, que evita su unión. En la Figura 4 se muestra un esquema de los CRP, mientras que en la parte de la izquierda se ejemplifica el núcleo de acero con el material desadherente, en la parte de la derecha se muestra el núcleo confinado por el tubo relleno de mortero.

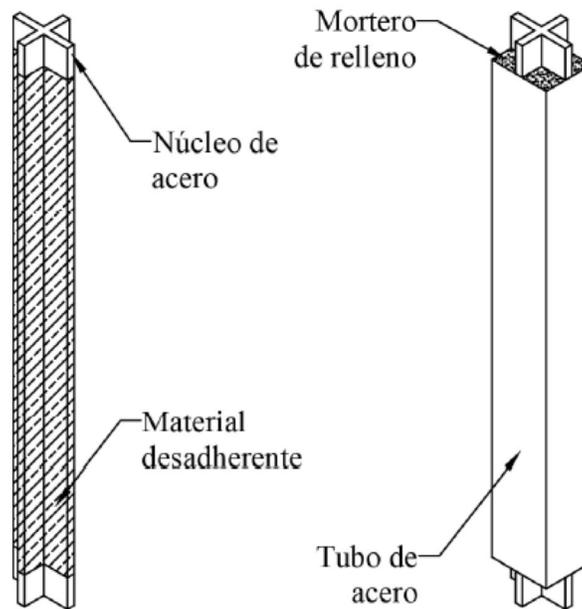


Figura 4. Esquema de un contraventeo restringido al pandeo (adaptada de García, 2019).

Se han realizado múltiples estudios sobre el comportamiento del dispositivo, evaluándolo experimentalmente y realizando una caracterización de su comportamiento, mostrando que tiene un comportamiento estable ante desplazamientos axiales y disipando una gran cantidad de energía. En los últimos años se han propuesto dispositivos de bajo costo, buscando que puedan ser implementarlos en un mayor número de estructuras. En México se ha comenzado a desarrollar este tipo de dispositivos, mostrando comportamientos histeréticos estables y una resistencia similar tanto en tensión como en compresión, tal como se muestra en la Figura 5.

El dispositivo puede ser usado tanto para rehabilitaciones estructurales como para estructuras nuevas, empleándose tanto de forma concéntrica como de forma excéntrica. En algunos casos se pueden emplear estos dispositivos de forma externa, mientras que, en la mayoría de los casos, su ubicación es al interior de la estructura, tal como se muestra en la Figura 6.

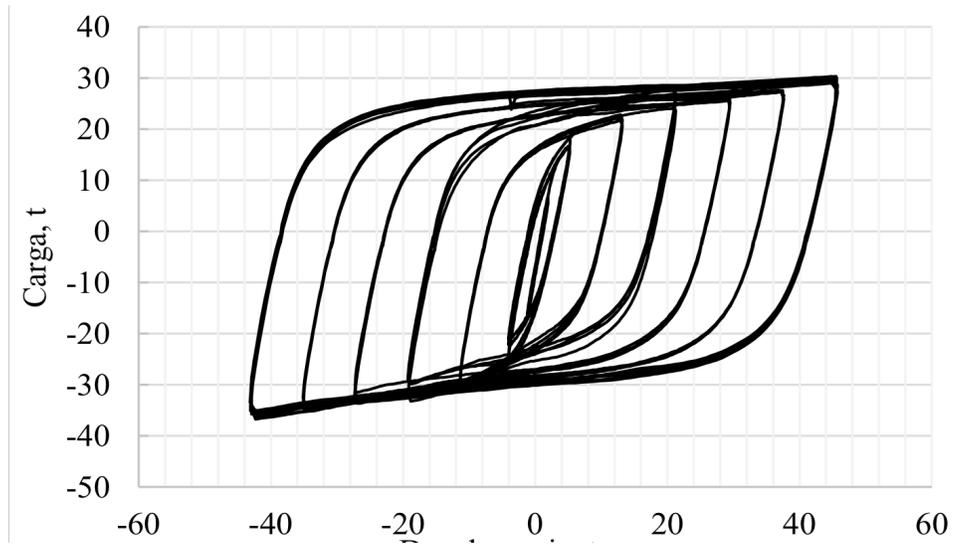


Figura 5. Curva esfuerzo-deformación para el CRP estudiado. (Dampo Systems, 2022)



Figura 6. Uso de disipadores tipo Dampo BRB.

## 2.1.2 DISIPADOR DAMPO 1505

El dispositivo propuesto consta de cinco partes fundamentales: una placa central y dos placas laterales paralelas entre sí y unidas por placas dentadas, tanto la placa central como las placas laterales son del mismo tamaño y tienen ranuras para recibir a la placa dentada. La placa central se conecta en su extremo a un contraventeo convencional, el cual a su vez es conectado a la conexión superior. Por su parte, las placas laterales se conectan en su extremo inferior a una placa de conexión. En la Figura 7 se muestra las características del dispositivo propuesto, en color verde se muestran las placas laterales, mientras que en color azul se muestra la placa central. Las placas dentadas se muestran en color rojo. Finalmente, la placa base y el contraventeo convencional se muestran en color café y gris, respectivamente.

El dispositivo propuesto disipa energía por un comportamiento en flexión de las placas dentadas. En la Figura 8 se muestra el comportamiento del dispositivo, del lado izquierdo (Figura 8a) se muestra el estado inicial del dispositivo, al centro (Figura 8b) se muestra la deformación del dispositivo ante una carga en tensión, presentando una deformación de las placas dentadas orientadas a la parte superior del dispositivo, mientras que las placas laterales presentan una rotación al centro desde su base hasta el inicio de la primera placa dentada. Finalmente, del lado derecho (Figura 8c) se presenta la deformación en compresión del dispositivo, teniendo una deformación de las placas dentadas orientadas a la parte inferior del dispositivo y mostrando la misma rotación de las placas laterales hacia el centro de este desde su base hasta el inicio de la primera placa dentada.

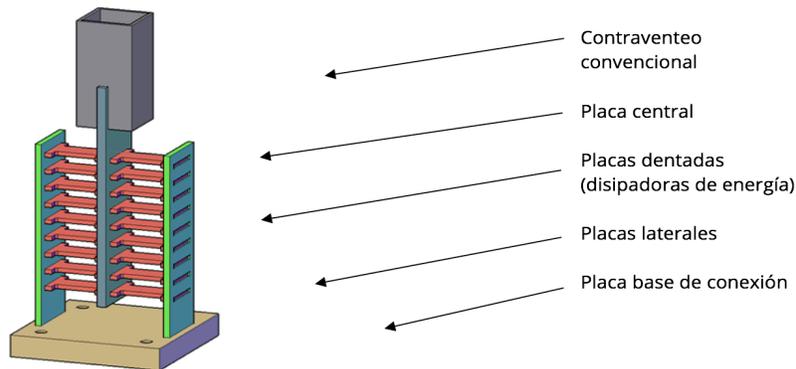


Figura 7. Geometría del dispositivo propuesto

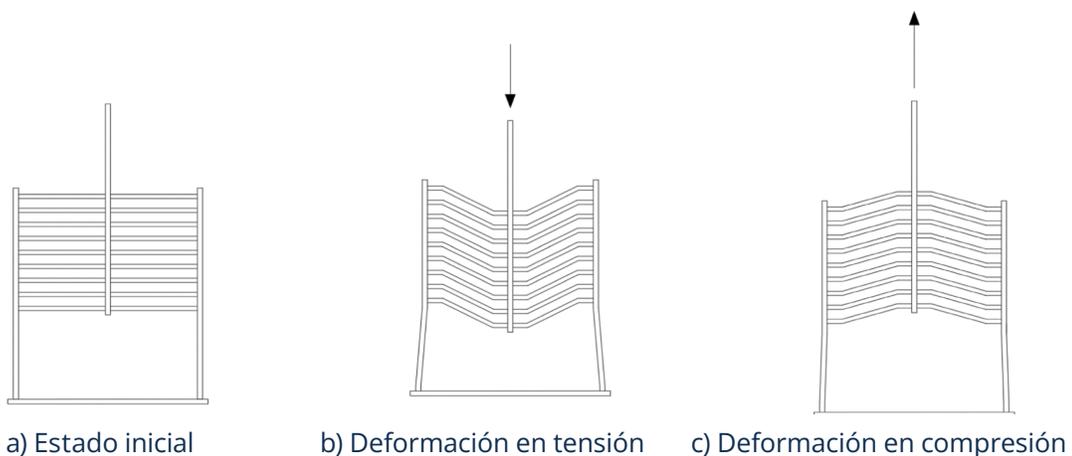


Figura 8. Comportamiento del dispositivo propuesto

El dispositivo puede ser usado tanto para rehabilitaciones estructurales como para estructuras nuevas, empleándose tanto de forma concéntrica como de forma excéntrica. En algunos casos se pueden emplear estos dispositivos de forma externa, conectándolo excéntricamente a las placas de conexión para evitar la intervención interna del inmueble, tal como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Uso de disipadores tipo Dampo 1505



### 3. PROYECTO Sinaloa 95

El edificio se ubica en la calle Sinaloa #95, colonia Roma Norte, en la alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México con código postal 06700. La estructura tiene como objetivo albergar 16 departamentos en 8 niveles. La estructura está clasificada como tipo B1. De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias (NTC, 2021) el edificio se encuentra en suelo tipo IIIa, tal como se muestra en la Figura 10.

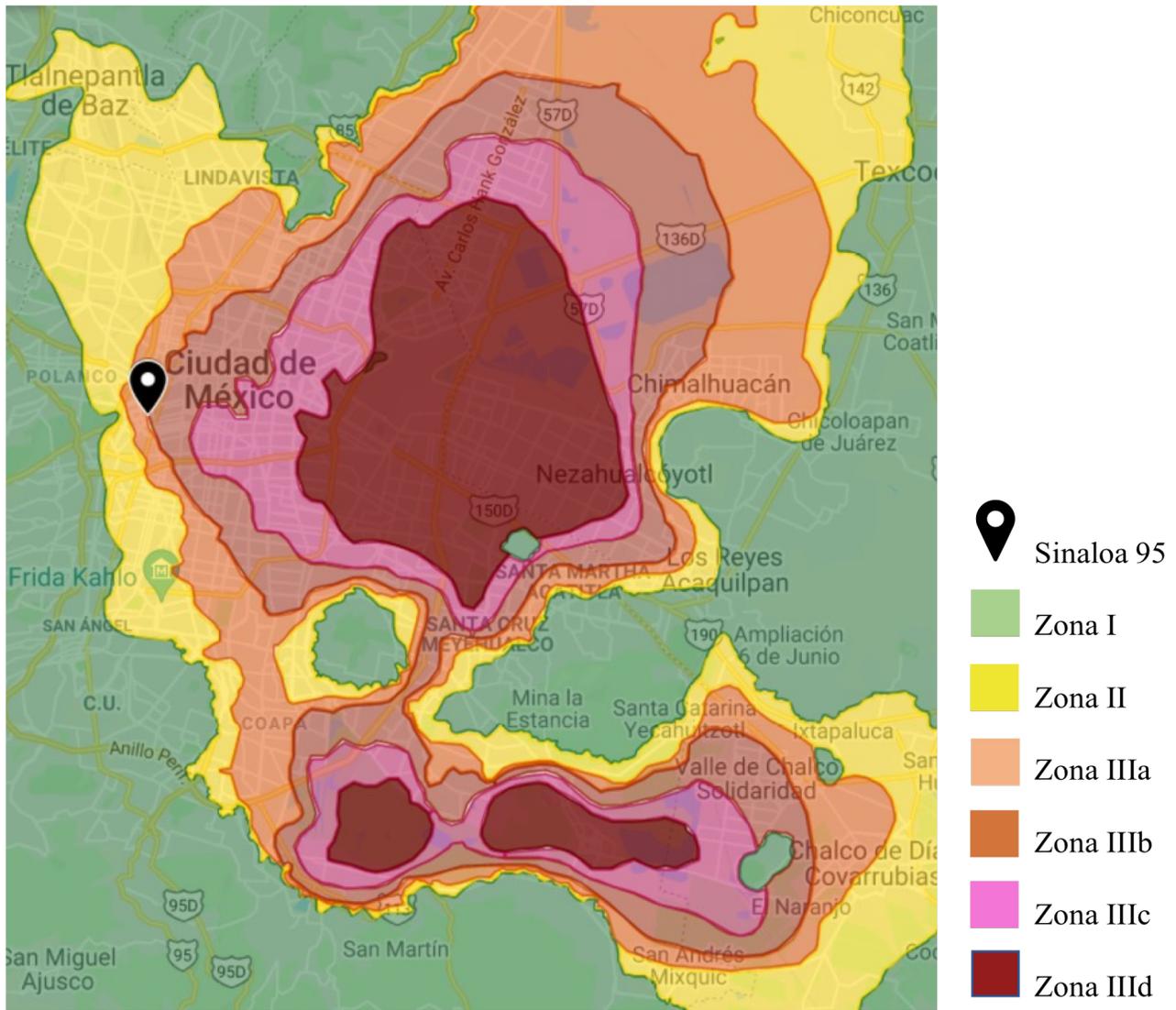
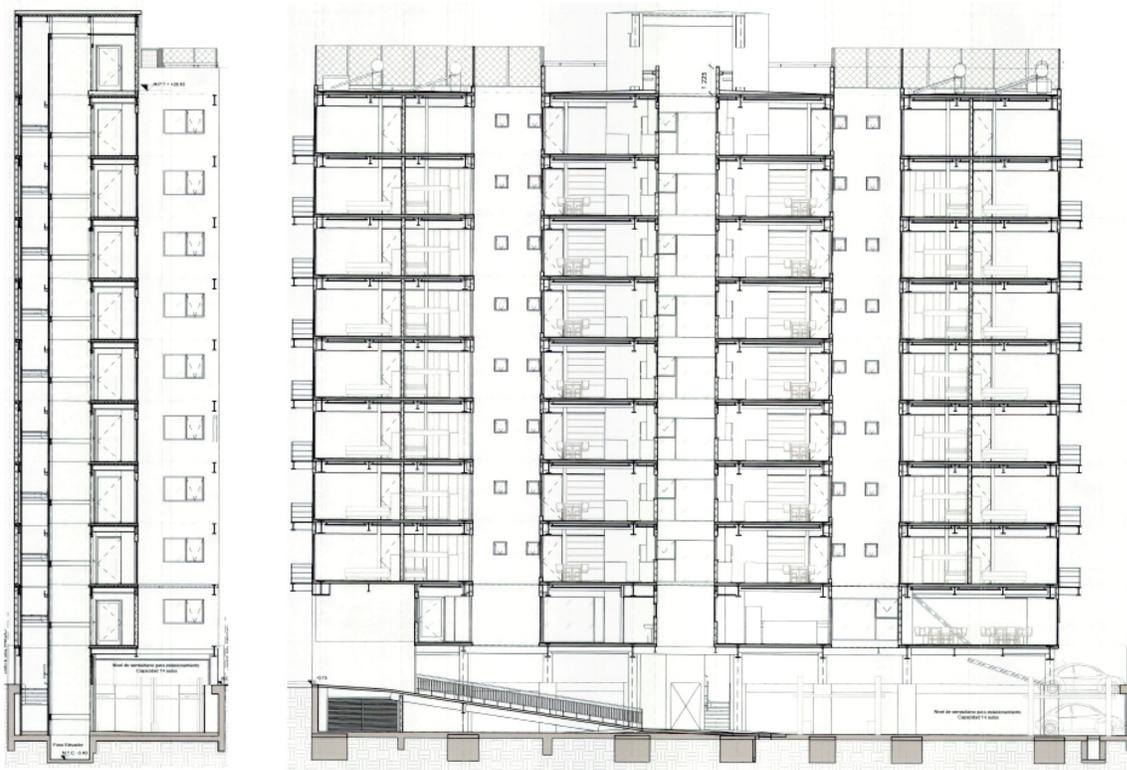


Figura 10. Ubicación de la estructura

### 3.1 Características de la estructura

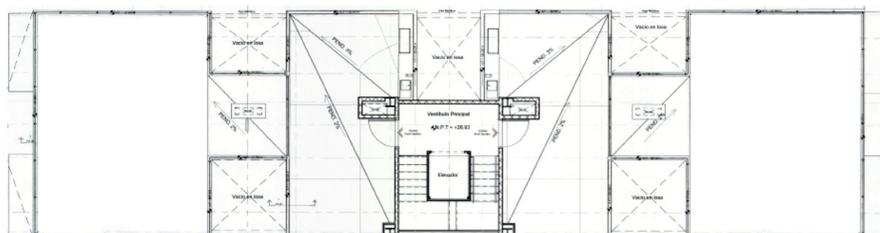
La estructura cuenta con 8 niveles y un semisótano, de los cuales el sótano se empleará para estacionamiento, la planta baja será para uso comercial, acceso principal y salón de amenidades, el resto de la estructura se dispondrá para la ubicación de los departamentos y en la azotea se considera un Roof Garden. El área aproximada del proyecto es de 2,300 m<sup>2</sup>.

La planta de la estructura es de forma rectangular de 9.35 m de ancho por 34.0 m de largo, la altura del semisótano es de 4.1 m, de planta baja y planta tipo es de 2.77 m. La altura total de la edificación es de 29.22 m. En la Figura 11 se muestran imágenes de la estructura en su parte frontal, lateral, vista superior del nivel de azotea y fachada.



a) Vista frontal

b) Vista lateral



c) Planta de azotea

Figura 11. Vistas de la estructura

## 3.2 Estructuración original

La propuesta estructural original consistía en marcos rígidos de acero con perfiles tipo IR con contravientos convencionales con perfiles tipo OR en ambas direcciones. La ubicación de los contravientos convencionales en el lado largo de la estructura se consideró en el nivel 4 con una configuración tipo Outrigger, que permite un mejor control de desplazamientos en los edificios, mientras que en el sentido corto se consideró la ubicación de los contravientos convencionales en los dos ejes centrales. El sistema de piso se resolvió con losacero, mientras que la cimentación se resolvió por medio de un cajón de muros perimetrales de 25 cm de espesor y pilas de fricción.

La estructura original se diseñó considerando un factor de comportamiento sísmico igual a 2.0, un factor de hiperestaticidad ( $k_1$ ) de 0.8 y un factor de irregularidad de 1.0.

Los elementos estructurales de concreto (cimentación y sótano), así como el sistema de piso y los muros de concreto perimetrales tienen un concreto  $f'_c$  de 250 kg/cm<sup>2</sup>. Por su parte, los elementos estructurales de acero tanto trabes y columnas (superestructura) se consideraron de acero  $f_y$  de 3,515 kg/cm<sup>2</sup>. Los espectros de diseño y de peligro uniforme tanto para la estructura original como para la innovadora se muestran en la Figura 12. En línea color continua color negro se muestra el espectro elástico, en línea continua color rojo se muestra el espectro de peligro uniforme (EPU). Por su parte, el espectro de diseño para la estructura original se muestra en línea continua color azul, mientras que en línea discontinua color azul se muestra el espectro de diseño para la estructura innovadora.

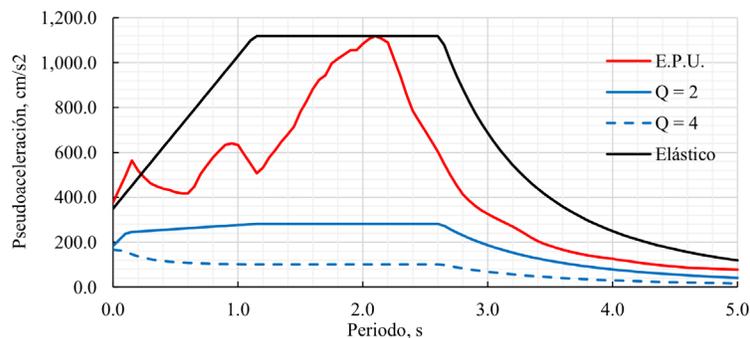


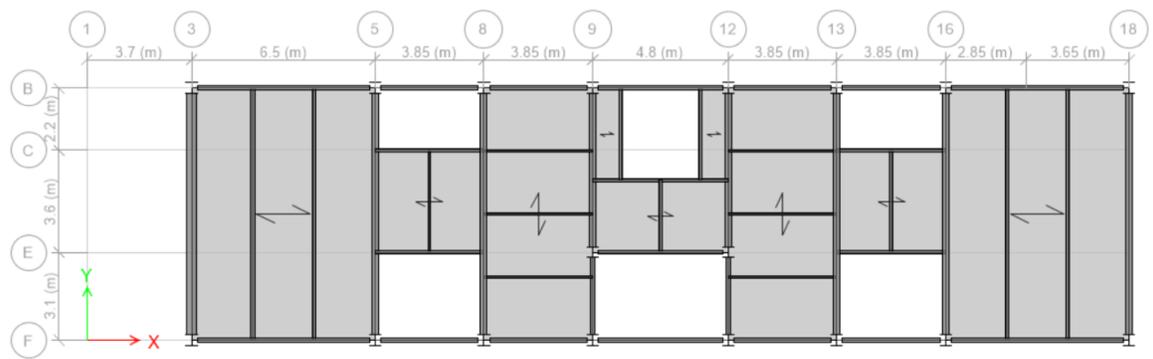
Figura 12. Espectros de diseño

Las cargas consideradas en el proyecto se muestran en la Tabla 1.

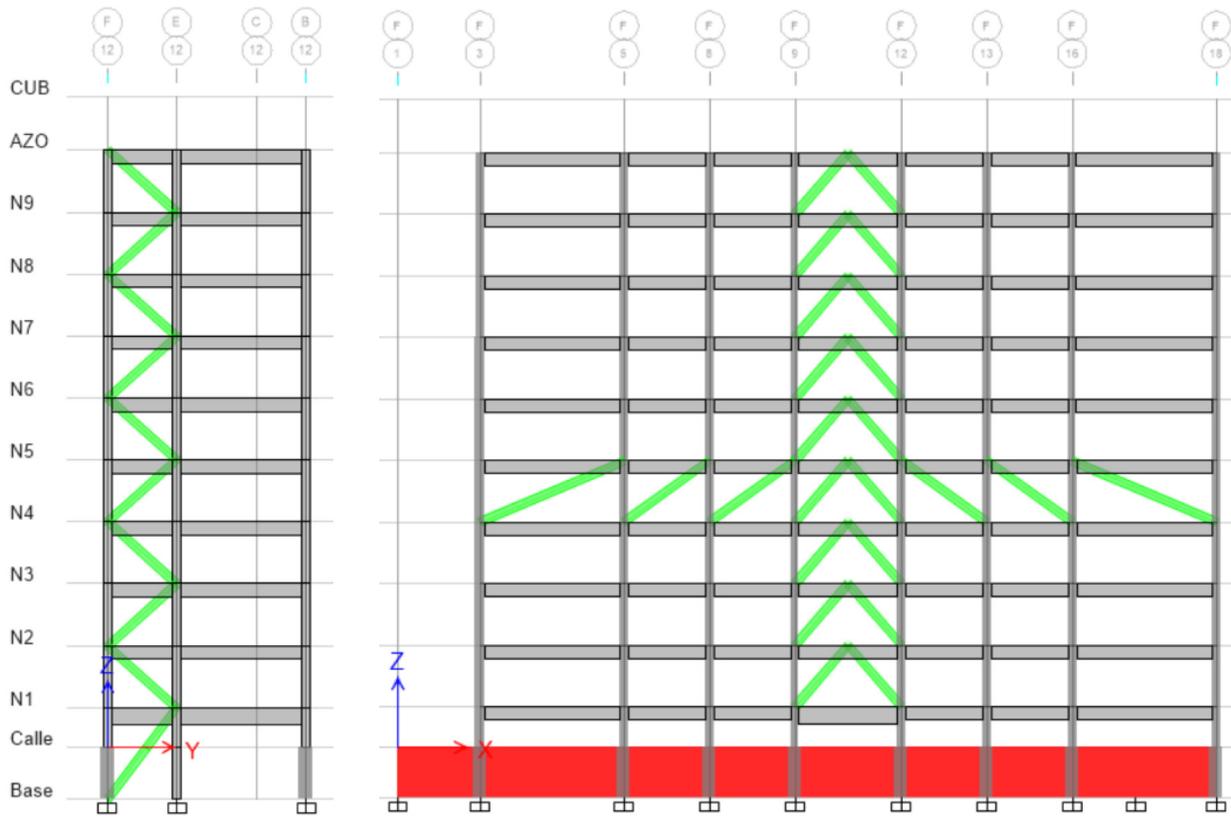
Tabla 1. Cargas consideradas en el proyecto

Caso	Carga, kg/m <sup>2</sup>		
	Carga muerta adicional	Carga Viva Máxima	Carga Viva Accidental
Masa sintonizada	140.0	100.0	70.0
Contravientos	140.0	350.0	315.0
Masa sintonizada	260.0	190.0	100.0
De rigidez variable	165.0	350.0	150.0

En la Figura 13 se muestra la estructuración original, mientras que en la Tabla 2 se muestran los elementos estructurales considerados. En color gris se muestran las columnas, trabes y sistema de piso. Los contraventeos convencionales se muestran en color verde y los muros de concreto se muestran en color rojo.



a) Planta tipo



b) Eje 9 y 12

c) Eje B y F

Figura 13. Propuesta estructural original

**Tabla 2. Elementos estructurales empleados en la propuesta original**

Elemento	Tipo de sección	Secciones	Material
Trabe	IR	10X12, 12X19, 14X22, 14X233, 24X55, 24X62, 24X68, 24X76, 24X84, 24X94, 24X104, 24X131, 24X146, 30X90, 30X99, 30X116, 30X173, 30X191, 24X176.	A992 Gr50
Columna	IR	14X74, 14X109, 14X120, 14X132, 14X145, 14X159, 14X193, 14X233	A992 Gr50
Contraventeo convencional	IR	14X74,14X90	A992 Gr50

### 3.3 Propuesta innovadora de estructuración

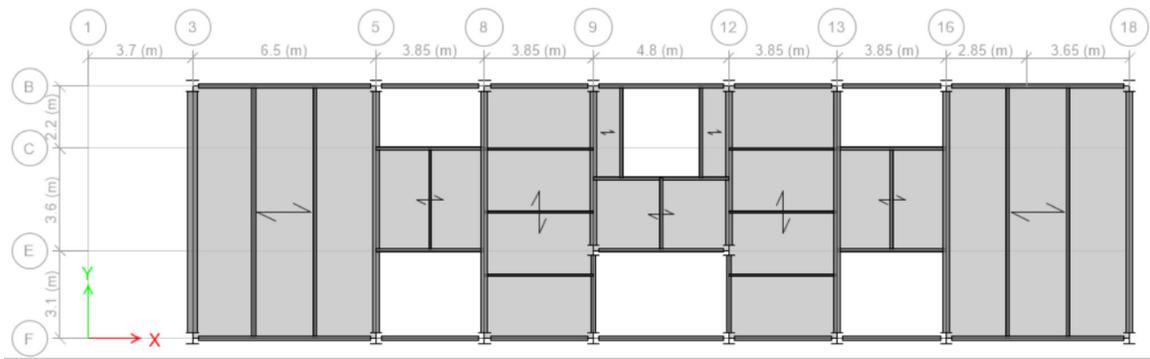
Derivado del costo tan alto por metro cuadrado se buscó una propuesta alterna para resolver el proyecto reduciendo costos en la superestructura y buscando mejorar su comportamiento dinámico. Por ello, se evaluó una solución con el uso de contraventeos restringidos al pandeo (CRP) para controlar los desplazamientos laterales y las descargas a la cimentación. Las diferencias principales entre ambas propuestas se enlistan a continuación:

1. Reducción de secciones transversales tanto para trabes como columnas de acero, disminuyendo la densidad de la estructura.
2. Sustitución de contraventeos convencionales por disipadores tipo Dampo BRB al pandeo hasta el nivel 7.
3. Reducción de secciones transversales en los contraventeos convencionales.
4. Reubicación de las crujeas diagonalizadas.

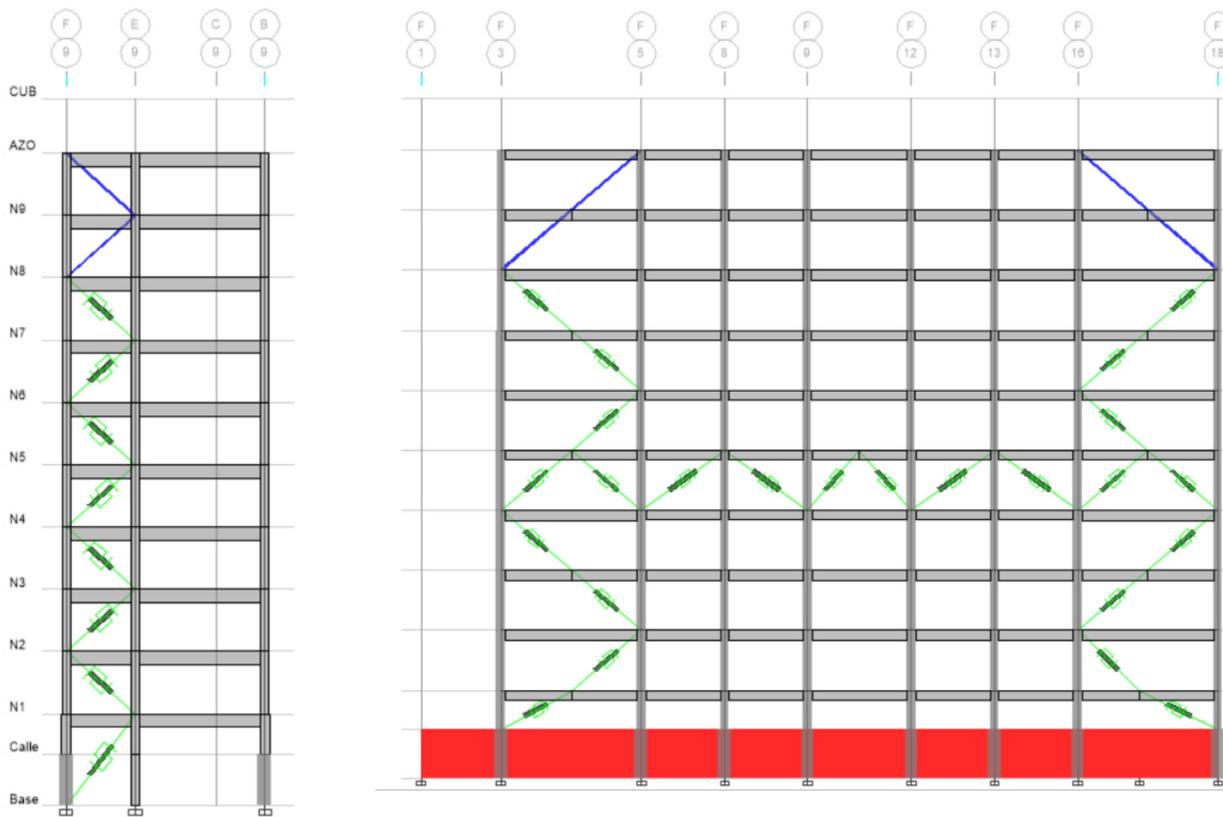
Mientras que en la Figura 14 se muestra la estructuración innovadora, en la Tabla 3 se muestran los elementos estructurales considerados. En color gris se muestran las columnas, trabes y sistema de piso. Los disipadores tipo Dampo BRB se muestran en color verde, mientras que los contraventeos convencionales se muestran en color azul y los muros de concreto se muestran en color rojo.

**Tabla 3. Elementos estructurales empleados en la propuesta innovadora**

Elemento	Tipo de sección	Secciones	Material
Trabe	IR	10X12, 12X19, 14X22, 18X35, 18X46, 18X65, 18X71, 24X55, 24X62, 24X76, 24X84, 24X94, 24X131, 24X176	A992 Gr50
Columna	IR	14X74, 14X109, 14X120, 14X132, 14X145, 14X159, 14X193, 14X233	A992 Gr50
Contraventeo convencional	HSS	4X4X1/4, 5X5X3/8, 6X6X1/2	A992 Gr50



a) Planta tipo



b) Eje 9 y 12

c) Eje B y F

Figura 14. Propuesta estructural innovadora

La propuesta estructural innovadora contempla el uso de 64 disipadores de energía sísmica del tipo Dampo BRB. En la Tabla 4 se muestran sus propiedades generales, dentro de la información mostrada destaca el desplazamiento de fluencia ( $D_y$ ), la carga de fluencia ( $F_d$ ), la rigidez y el peso por dispositivo.

**Tabla 4. Características de los disipadores Dampo BRB**

Tipo	Cantidad	Dy, cm	Fd, ton	Rigidez, ton/m	Peso, kg
BRB-1	4	0.39	11.0	2,813	59.0
BRB-2	2	0.33	11.0	3,368	65.0
BRB-3	8	0.46	11.0	2,374	70.0
BRB-4	2	0.31	22.0	7,205	125.0
BRB-5	4	0.44	22.0	5,041	135.0
BRB-6	2	0.29	33.0	11,257	158.0
BRB-7	4	0.49	33.0	6,790	192.0
BRB-8	2	0.38	33.0	8,623	204.0
BRB-9	8	0.42	44.0	10,567	178.0
BRB-10	4	0.46	44.0	9,545	196.0
BRB-11	8	0.26	66.0	25,513	242.0
BRB-12	4	0.38	66.0	17,202	262.0
BRB-13	2	0.25	88.0	35,274	240.0
BRB-14	2	0.29	88.0	29,932	278.0
BRB-15	2	0.31	88.0	28,328	290.0
BRB-16	6	0.34	88.0	25,996	315.0

## 3.4 Desempeño estructural

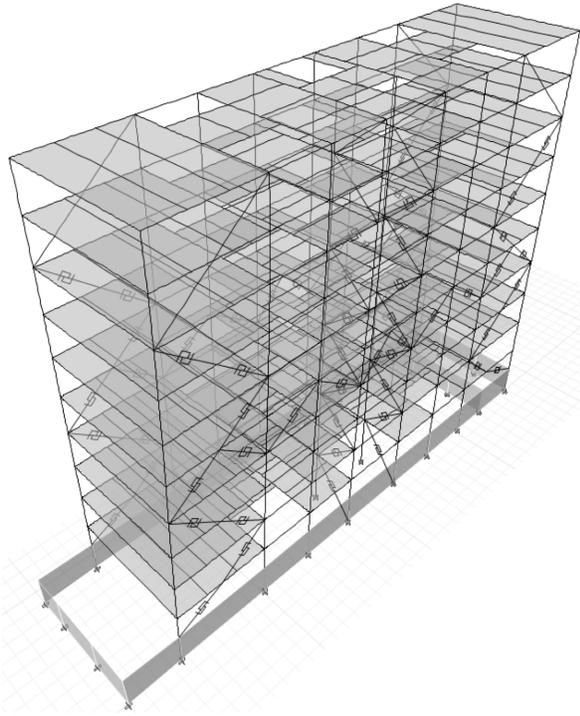
A continuación, se describen los parámetros más relevantes para la estructura innovadora.

### 3.4.1 Modos de vibrar

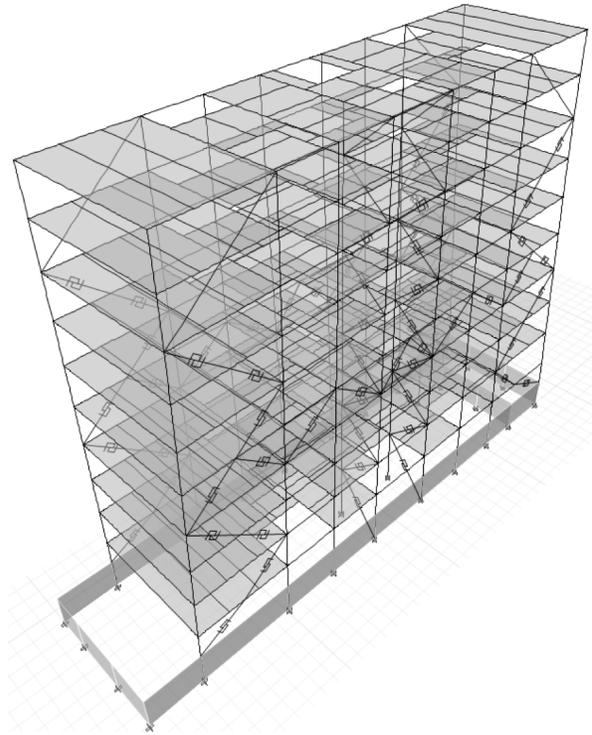
Del modelo numérico desarrollado se obtuvieron los periodos de vibrar para la estructura. Los valores de los modos fundamentales de vibrar tanto para la estructura original como para la estructura innovadora se muestran en la Tabla 5. Es importante mencionar que el primer modo del edificio innovador es en dirección Y con un valor de 0.90 s, mientras que el segundo modo es forma torsional con un valor de 0.88 s. Finalmente, el tercer modo de vibrar cuenta con un valor de 0.77 s y es en dirección X. En la Figura 15 se muestra la vista deformada de la estructura innovadora para los primeros tres modos de vibrar.

**Tabla 5. Modos de vibrar de la estructura innovadora**

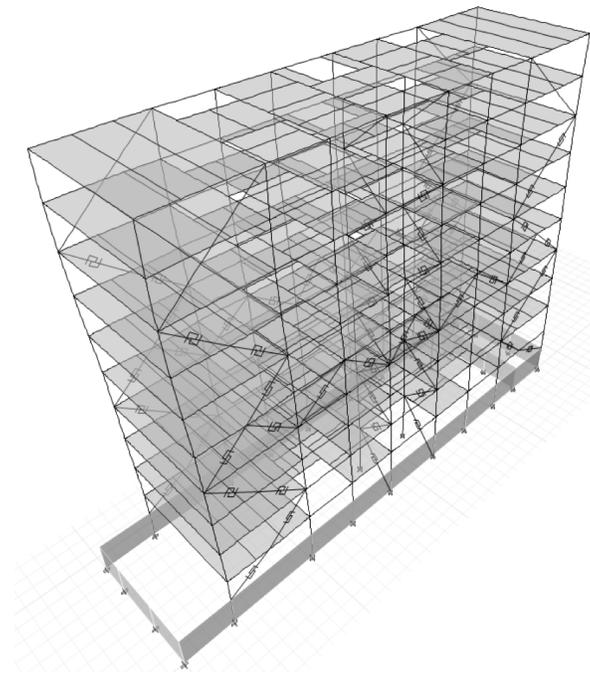
Modo	Estructura original		Estructura innovadora	
	Dirección	Periodo de estructura, s	Dirección	Periodo de estructura, s
1	Traslación Y	0.80	Traslación Y	0.90
2	Torsión	0.75	Torsión	0.88
3	Traslación X	0.59	Traslación X	0.77



a) Primer modo "Y",  $T_e=0.90$  s



b) Segundo modo "Z",  $T_e=0.88$  s



c) Tercer modo "X",  $T_e=0.77$  s

Figura 15. Modos de vibrar de la estructura innovadora

## 3.4.2 Desplazamientos laterales y distorsiones de entrepiso

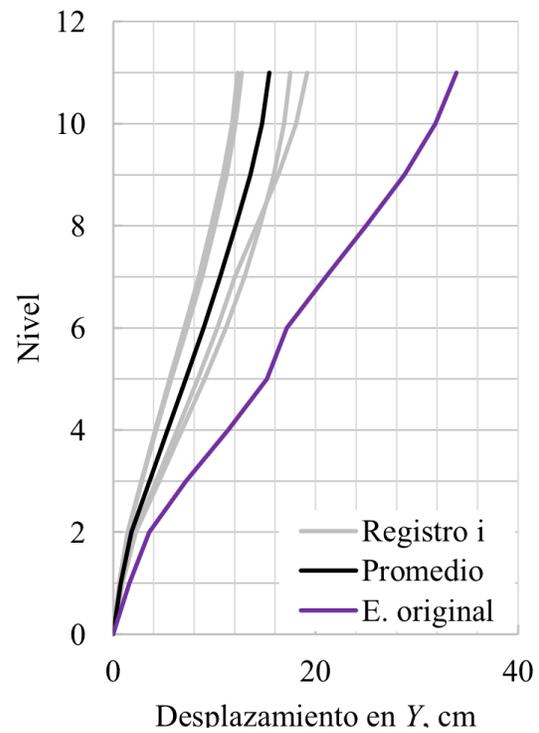
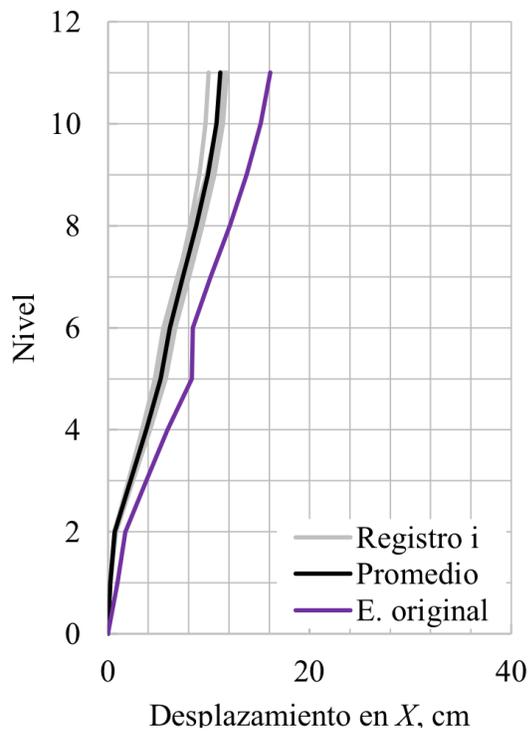
Ya que México es un país altamente sísmico, es recomendable realizar análisis que contemplen las acciones sísmicas posibles a las que estará sometida la estructura en su vida útil. Metodologías como el Análisis Dinámico No Lineal Paso a Paso o el Análisis Dinámico Incremental (IDA) apoyan al ingeniero para conocer el rendimiento estructural bajo cargas sísmicas.

Se realizó un Análisis Dinámico No Lineal Paso a Paso, para determinar tanto los desplazamientos laterales como las distorsiones de entrepiso, para realizarlo tal como lo describen las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS, 2020), fue necesario obtener tanto los espectros de peligro sísmico como los acelerogramas sintéticos para ambas fuentes sísmicas (subducción y profundidad intermedia). Dicha información se obtuvo de la herramienta SASID ([www.sasid.unam.mx](http://www.sasid.unam.mx)).

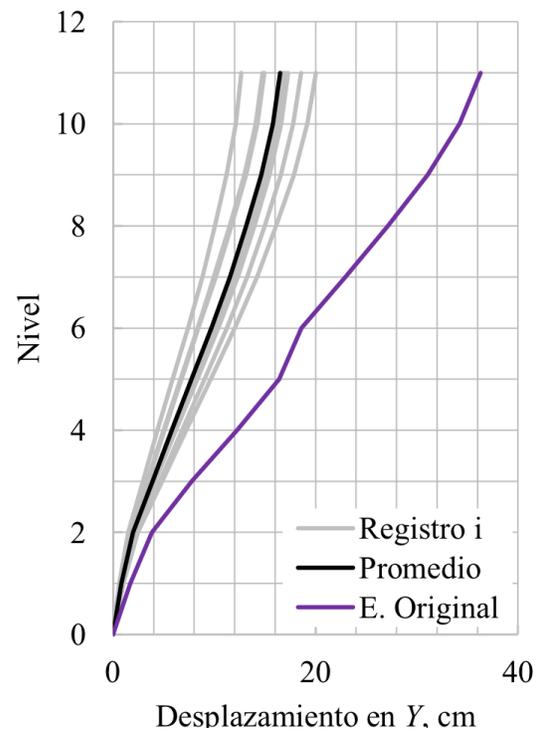
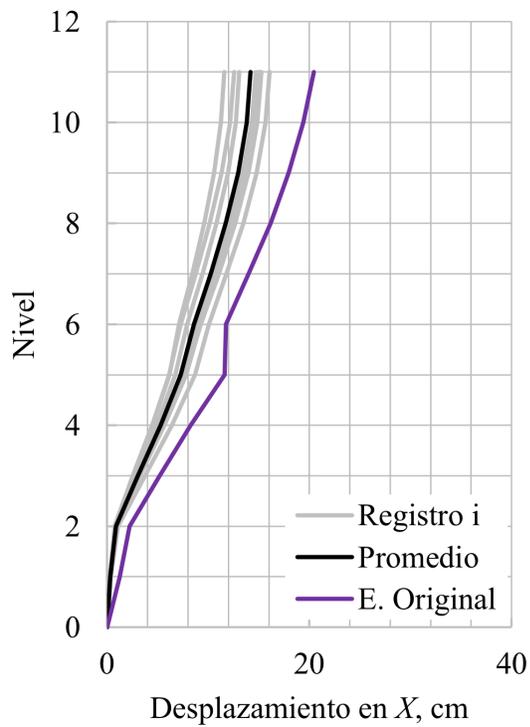
La Figura 16 muestra las demandas máximas absolutas de desplazamientos laterales en la altura del edificio, obtenidas del Análisis Dinámico No Lineal Paso a Paso para cada fuente sísmica considerada. Para sismos de profundidad intermedia, se logra apreciar que el promedio de los desplazamientos máximos tiene un valor de 11.1 cm y de 15.4 cm en la azotea, en los sentidos X y Y, respectivamente. Por su parte, para los sismos de subducción, se tienen desplazamientos promedio máximos de 14.7 cm y de 16.5 cm en la azotea, en los sentidos X y Y, respectivamente. De forma similar se muestra el perfil de desplazamiento para la estructura original, la cual presenta desplazamientos máximos para sismos de profundidad intermedia de 16.0 cm y de 33.0 cm, mientras que para los movimientos de subducción son de 16.0 cm y de 33.0 cm en sentido X y Y, respectivamente.

La Figura 17 muestra los perfiles de demandas de distorsión máxima de entrepiso, obtenidas de los análisis. Se puede apreciar que el promedio de las demandas de distorsión de entrepiso es bajo, con valores inferiores a 1.0% en dirección Y e incluso menores en dirección X. Adicionalmente, se muestra el límite de distorsión máxima permitida, el cual no es superado en ningún momento. Al compararlo con el resultado de la estructura original se observa que las distorsiones son en promedio mayores en 1.5 veces.



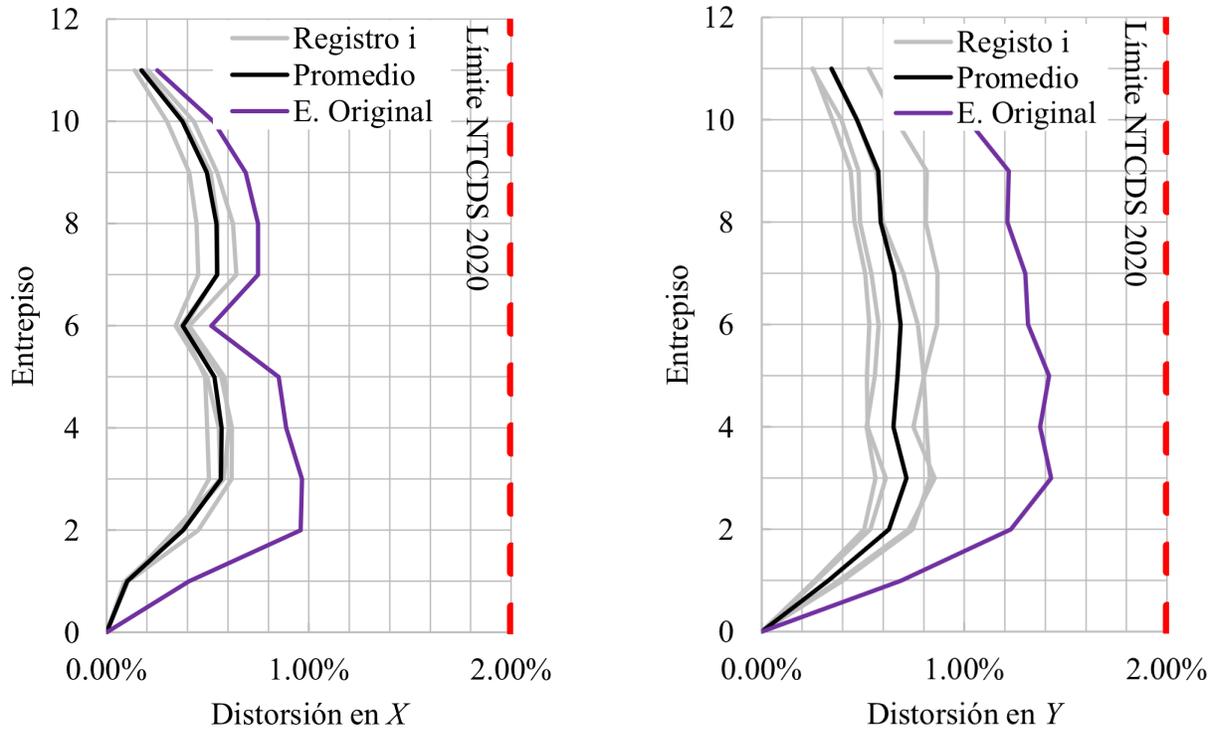


a) Profundidad intermedia

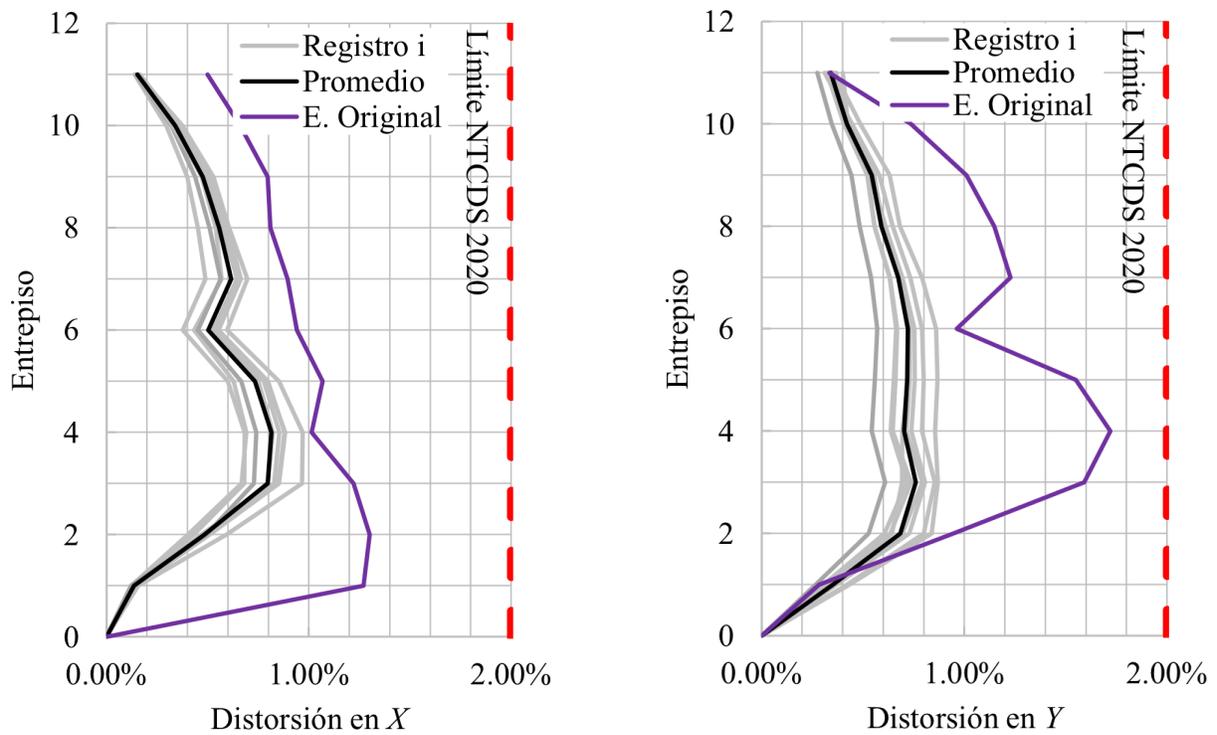


b) Subducción

Figura 16. Perfil de desplazamientos



a) Profundidad intermedia



b) Subducción

Figura 17. Perfil de distorsiones de entrepiso

### 3.4.3 Curvas de capacidad

En la Figura 18 se muestra la curva de capacidad de la estructura. En color negro se muestra la dirección X, mientras que en color gris se muestra la dirección Y. En el eje vertical se muestra el cortante normalizado con respecto al peso total de la estructura. Se puede observar que la estructura presenta un comportamiento lineal, para posteriormente entrar en el intervalo inelástico. En dirección X presenta una deformación última de 46 cm a un cortante normalizado de 51.3%; mientras que en dirección Y la deformación última es de 47 cm a un cortante normalizado de 55.0%. Por lo anterior se puede decir que la estructura tanto en sentido X como en sentido Y tienen una gran capacidad de deformación (aproximadamente 2.0% de su altura) y una capacidad de carga lateral alta (aproximadamente 50% del peso de su estructura).

Por su parte, la estructura original presenta una capacidad mucho menor tanto en cortante normalizado como en el desplazamiento lateral, teniendo un desplazamiento último de 33.8 cm y 34.9 cm en dirección X y Y, con un cortante normalizado de 29.4% y 36.5%, respectivamente.

Al emplear sistemas de protección sísmica la capacidad lateral de la estructura incrementó hasta un 36%, mientras que la capacidad de deformación incrementó un 74%.

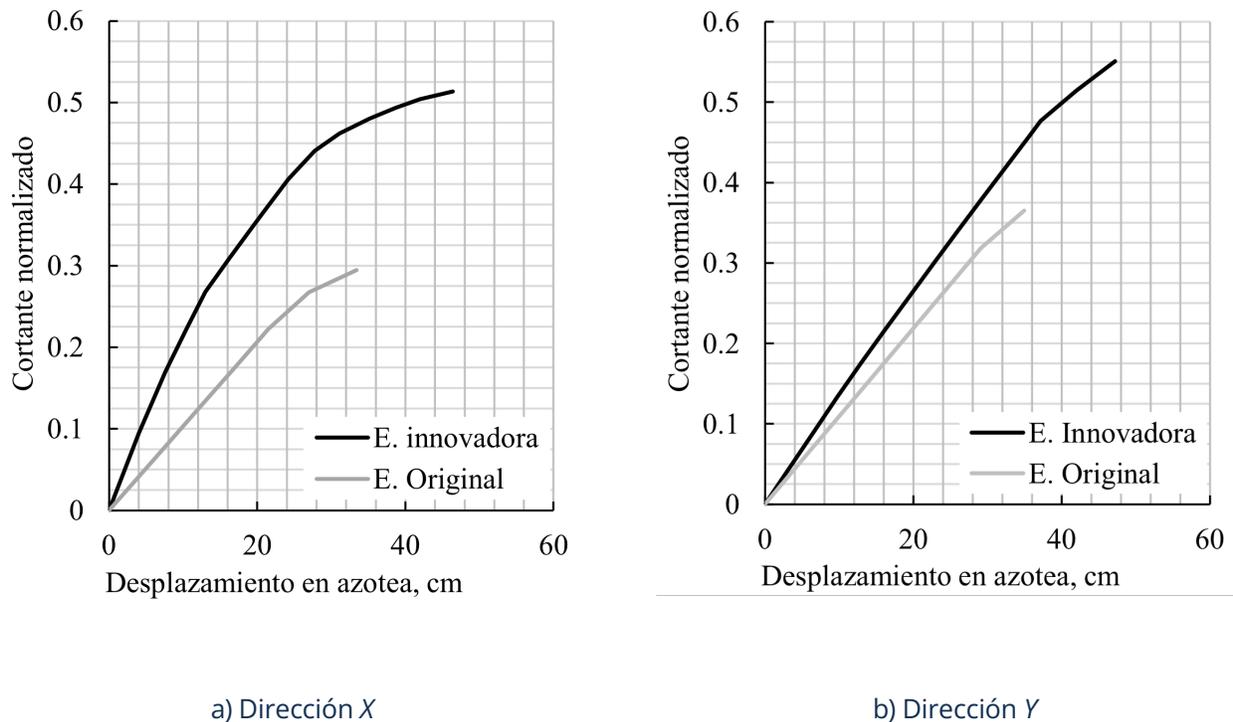
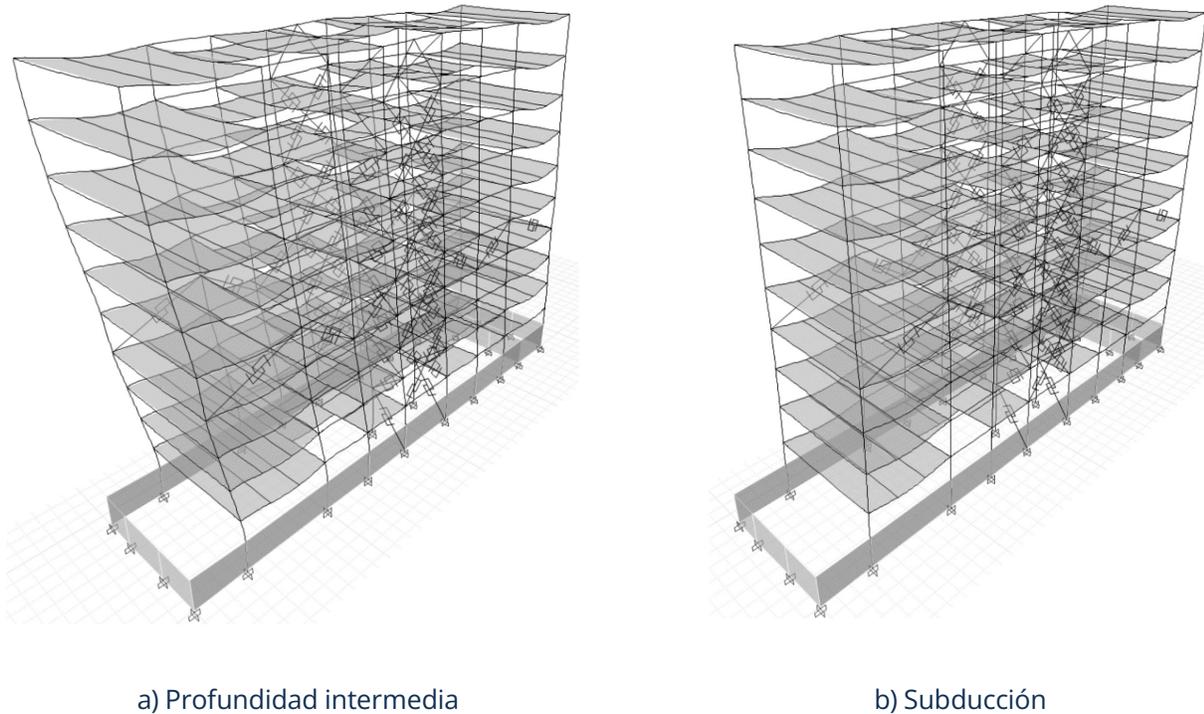


Figura 18. Curva de capacidad

### 3.4.4 Estados finales del análisis

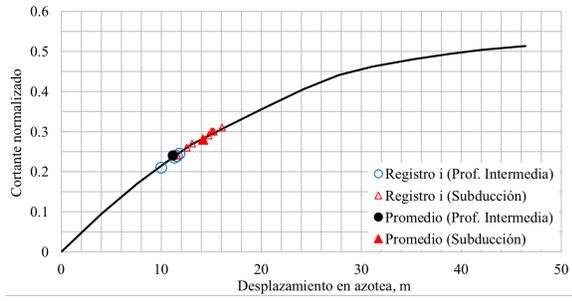
A manera de ejemplo en la Figura 19 se muestran los estados finales del Análisis Dinámico No Lineal Paso a Paso para los registros que presentaron mayor distorsión de entrepiso (registro 1 y registro 5) en ambas fuentes sísmicas (profundidad intermedia y subducción). Se puede apreciar que no se presentaron daños en elementos estructurales.



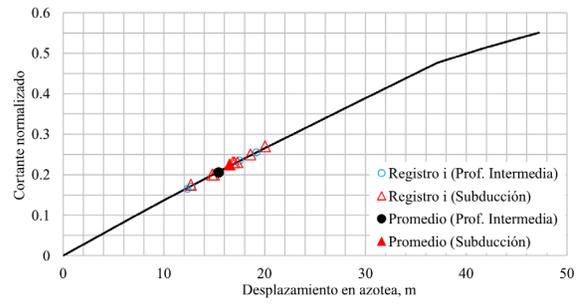
**Figura 19. Estado final del análisis**

### 3.4.5 Desempeño de la estructura

Para conocer el desempeño de la estructura, las demandas máximas de desplazamiento en la azotea, y su promedio, se superponen en las curvas de capacidad de la estructura en cada dirección de análisis, tal como se muestra en la Figura 20. Se puede ver que el promedio de las demandas laterales se encuentra por debajo del 35% de la capacidad de deformación; por lo que se espera un comportamiento adecuado de la estructura. En la Figura 21 se muestra una vista de la deformación lateral similar al promedio de las demandas. Se puede ver que no se presentan daños en elementos estructurales ante las demandas promedio.

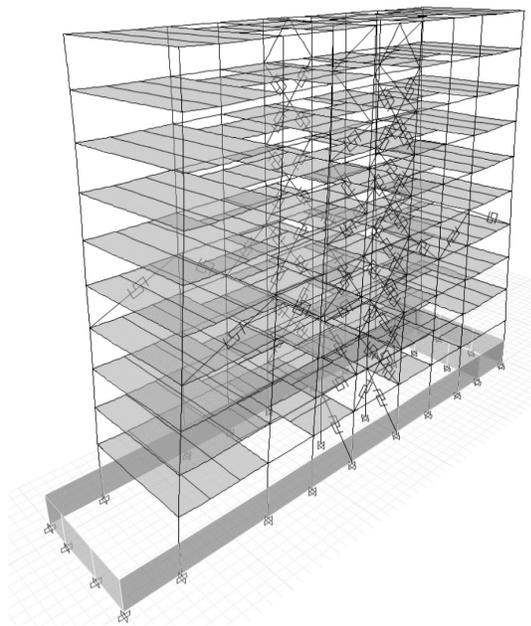


a) Dirección X

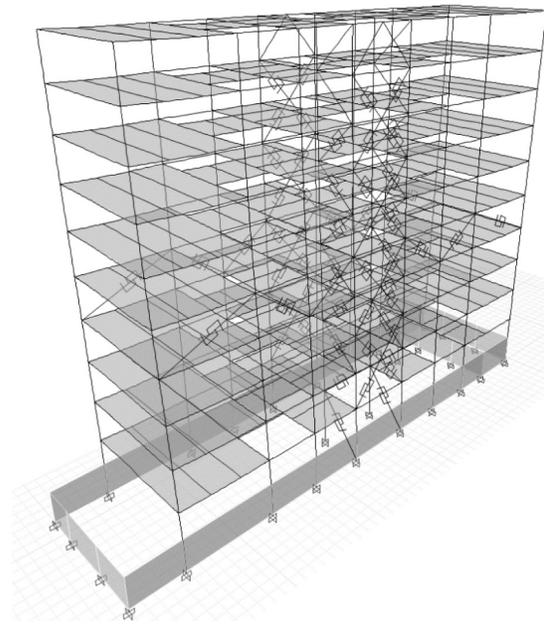


b) Dirección Y

Figura 20. Desempeño de la estructura



a) Dirección X

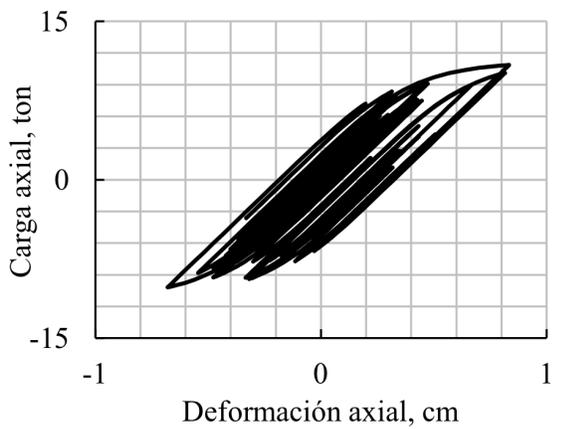


b) Dirección Y

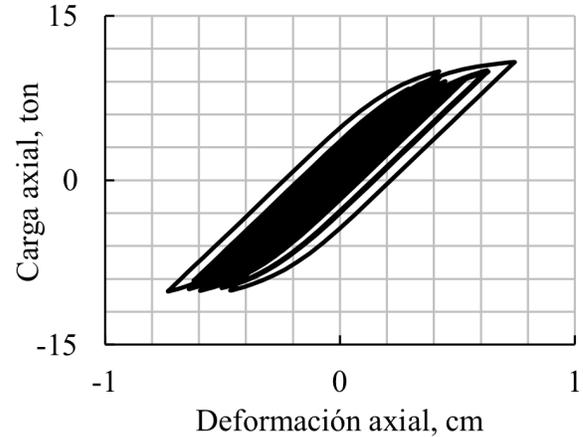
Figura 21. Articulaciones plásticas esperadas ante demandas promedio

### 3.4.6 Curvas de histéresis

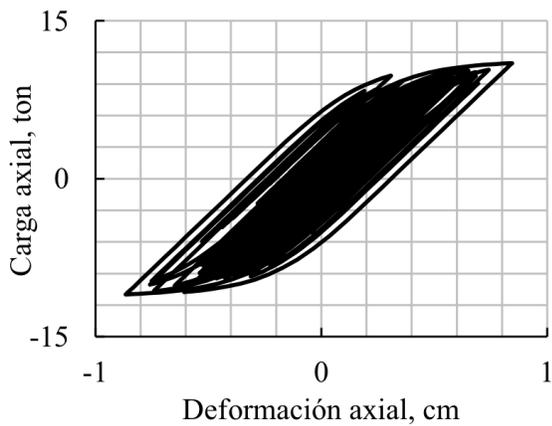
A manera de ejemplo, en la Figura 22 se muestran algunas curvas de histéresis obtenidas del análisis numérico para los disipadores de energía que cuentan con una carga de fluencia nominal de 10 toneladas. Se puede apreciar que los dispositivos incurren en el intervalo inelástico, disipando energía y controlando la respuesta de la estructura ante los eventos sísmicos.



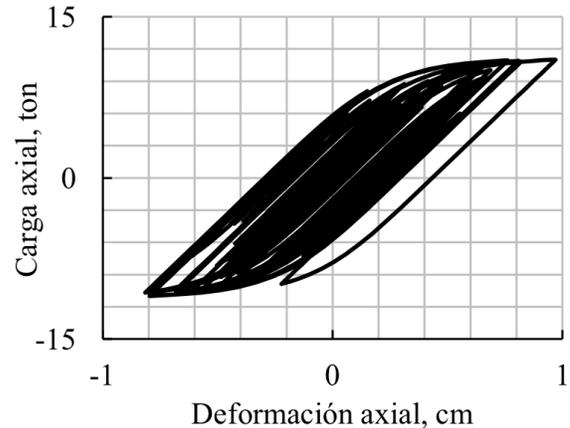
a) Disipador en dirección X (Prof. intermedia)



b) Disipador en dirección Y (Prof. intermedia)



c) Disipador en dirección X (Subducción)

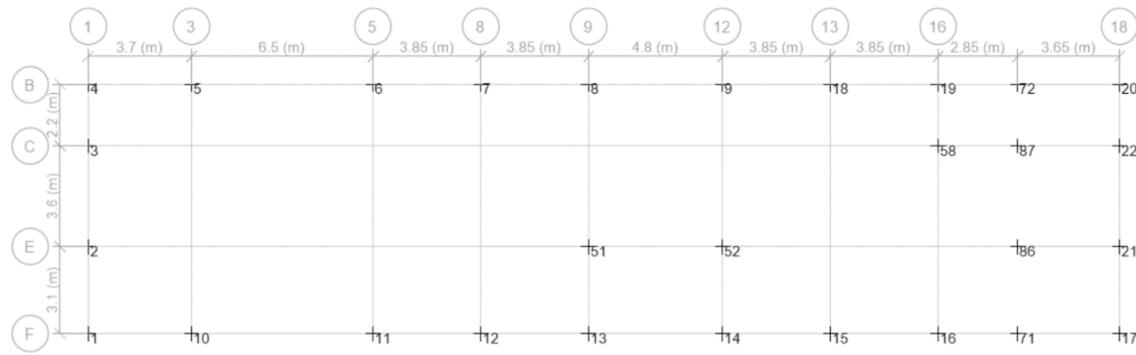


d) Disipador en dirección Y (Subducción)

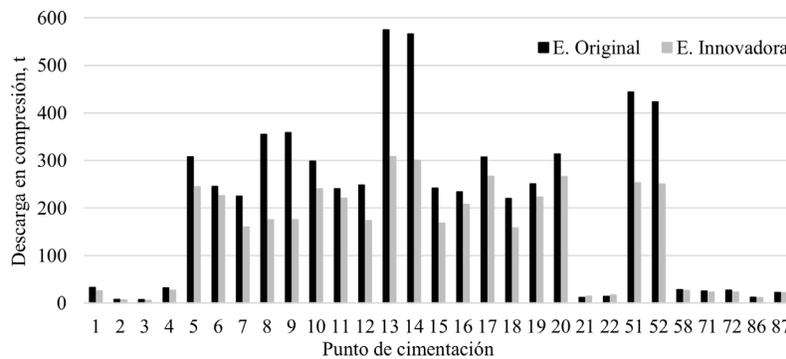
Figura 22. Curvas de histéresis de los Dampo BRB

### 3.4.7 Descargas a cimentación

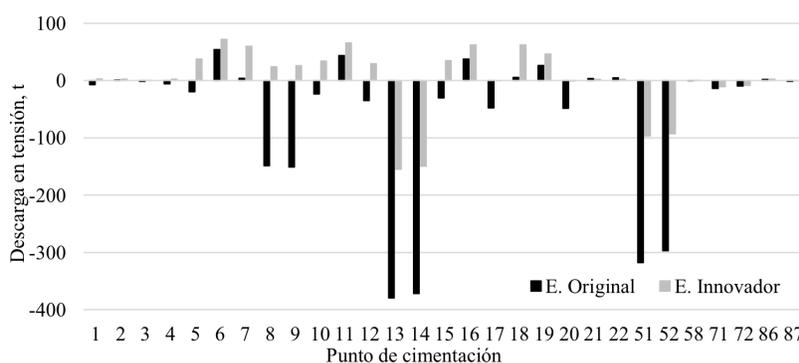
A manera de ejemplo se muestran las descargas a cimentación de forma axial tanto para la estructura original como para la estructura innovadora. En la Figura 23a se aprecian los puntos de apoyo del modelo numérico. Por su parte, en la Figura 23b se aprecia las descargas en compresión para ambas estructuraciones, se aprecia que la original presenta descargas mayores a la innovadora en un 120%. Finalmente, en la Figura 23c se aprecia las descargas a cimentación en tensión, se logra observar que para la estructura innovadora no se presentan cargas mayores a 150 t, mientras que para la estructura original se presentan cargas en tensión de hasta 379 t.



a) Puntos de apoyo



b) Descarga en compresión



c) Descarga en tensión

Figura 23. Descargas a cimentación

## 3.5 Viabilidad económica

En la Tabla 6 se muestra la volumetría que se obtuvo del modelo de la estructura original, se puede observar que la densidad del acero por metro cuadrado es igual a 138.3 kg/m<sup>2</sup> considerando un área de 2,300 m<sup>2</sup> del proyecto.

Tomando el costo por metro cúbico de concreto a \$8,500.00 y la tonelada de acero a \$50,000.00 se obtiene un costo del proyecto de \$17,993,930.00, lo que se puede traducir en un costo de construcción por metro cuadrado con un valor de \$7,823.44.

**Tabla 6. Cuantificación de materiales para la propuesta original**

Elemento	Material	Cantidad	Costo unitario	Importe
Columna	Concreto	13.25 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$112,625.00
	Acero	112.6 ton	\$50,000.00	\$5,630,000.00
Trabe	Acero	172 ton	\$50,000.00	\$8,600,000.00
Contraventeo convencional	Acero	33.7 ton	\$50,000.00	\$1,685,000.00
Muros de concreto	Concreto	57.83 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$491,555.00
Sistema de piso	Concreto	173.5 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$1,474,750.00
<b>Total</b>				<b>\$17,993,930.00</b>

De forma similar, en la Tabla 7 se muestra la volumetría para la estructura innovadora, la cual presenta una densidad del acero por metro cuadrado es igual a 115.2 kg/m<sup>2</sup>. Considerando los mismos costos que en la Tabla 6 se obtiene un costo para el proyecto equivalente a \$16,498,930.00, con un costo de construcción por metro cuadrado igual a \$7,173.44, presentando un ahorro del 8.31% en comparación con la propuesta original lo que representa un ahorro de \$1,495,000.00.

**Tabla 7. Cuantificación de materiales para la propuesta innovadora**

Elemento	Material	Cantidad	Costo unitario	Importe
Columna	Concreto	13.25 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$112,625.00
	Acero	113.5 ton	\$50,000.00	\$5,675,000.00
Trabe	Acero	149.9 ton	\$50,000.00	\$7,495,000.00
Contraventeo convencional	Acero	1.6 ton	\$50,000.00	\$80,000.00
Muros de concreto	Concreto	57.83 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$491,555.00
Sistema de piso	Concreto	173.5 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$1,474,750.00
Disipador Dampo BRB	Acero	64 piezas	-	\$1,170,000.00
<b>Total</b>				<b>\$16,498,930.00</b>

En la Tabla 8 se muestra las principales diferencias en costos entre ambas propuestas, se identifica que el cambio más importante radica en una disminución de las toneladas de acero necesarias tanto para las trabes como para los contraventeos convencionales.

Tabla 8. Comparación de costos entre estructuras

	Estructura original	Estructura innovadora	Variación
Columnas	\$5,742,625.00	\$5,787,625.00	+\$45,000.00
Trabes	\$8,600,000.00	\$7,495,000.00	-\$1,105,000.00
Contraventeos convencionales	\$1,685,000.00	\$80,000.00	-\$1,605,000.00
Disipadores Dampo BRB	0	\$1,170,000.00	+\$1,170,000.00
Muros de concreto	\$491,555.00	\$491,555.00	\$0.00
Sistema de piso	\$1,474,750.00	\$1,474,750.00	\$0.00
<b>Total</b>	<b>\$17,993,930.00</b>	<b>\$16,498,930.00</b>	<b>-\$1,495,000.00</b>
<b>Costo por m<sup>2</sup></b>	<b>\$7,823.44</b>	<b>\$7,173.44</b>	<b>-\$650.00</b>

Es importante mencionar que la cuantificación no considera los elementos de cimentación ni la cuantificación de las conexiones de los elementos estructurales. Por lo anterior, se esperaría que el ahorro real del proyecto gracias a la implementación de los disipadores Dampo BRB podría llegar a un monto de \$3,500,000.00.



## 4. PROYECTO Amsterdam 219

El edificio se ubica en la calle Ámsterdam #219, colonia Hipódromo, en la alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México con código postal 06100. La estructura tiene como objetivo albergar 33 departamentos en 11 niveles. La estructura está clasificada como tipo B1. De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias (NTC, 2021) el edificio se encuentra en suelo tipo IIIa, tal como se muestra en la Figura 24.

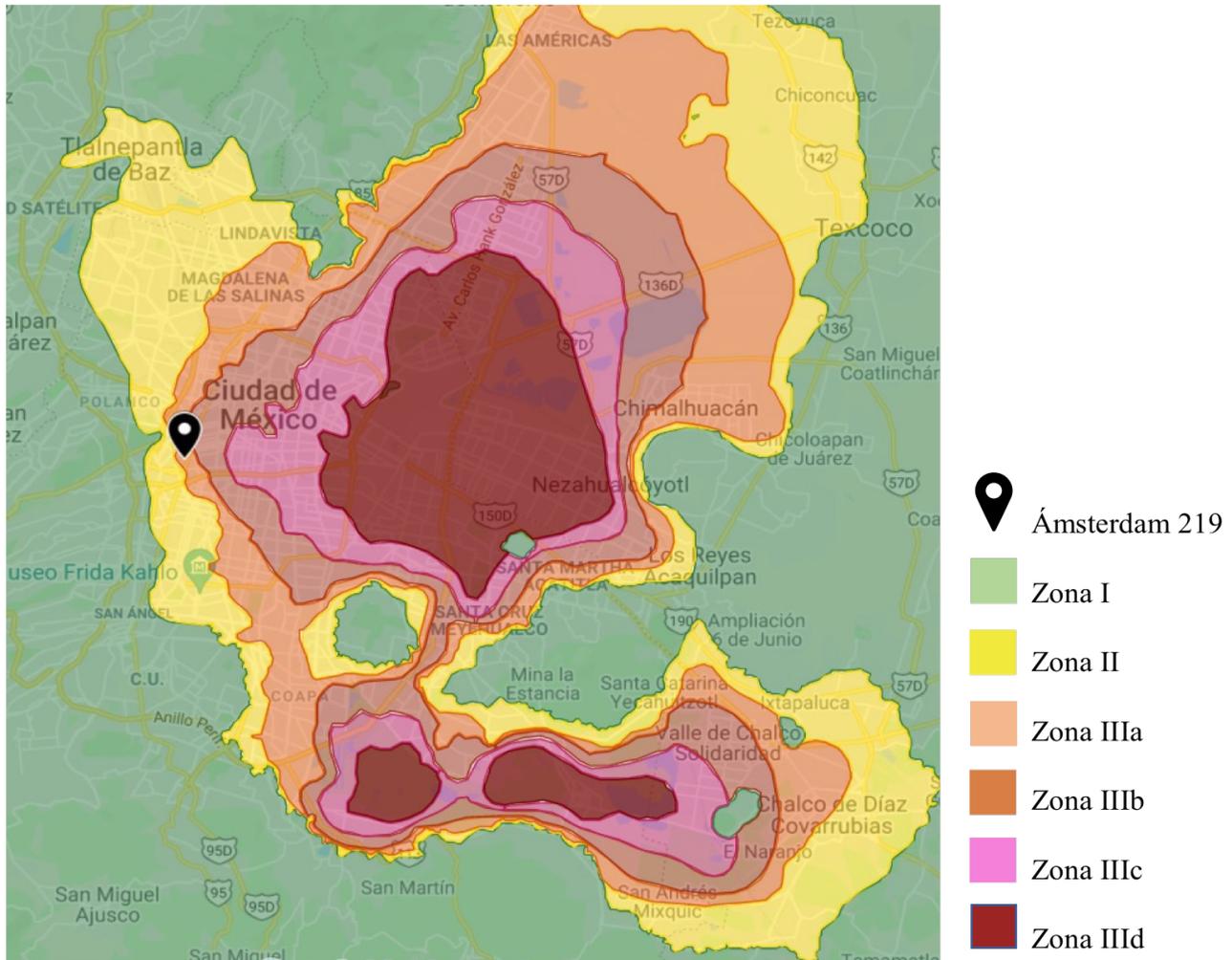
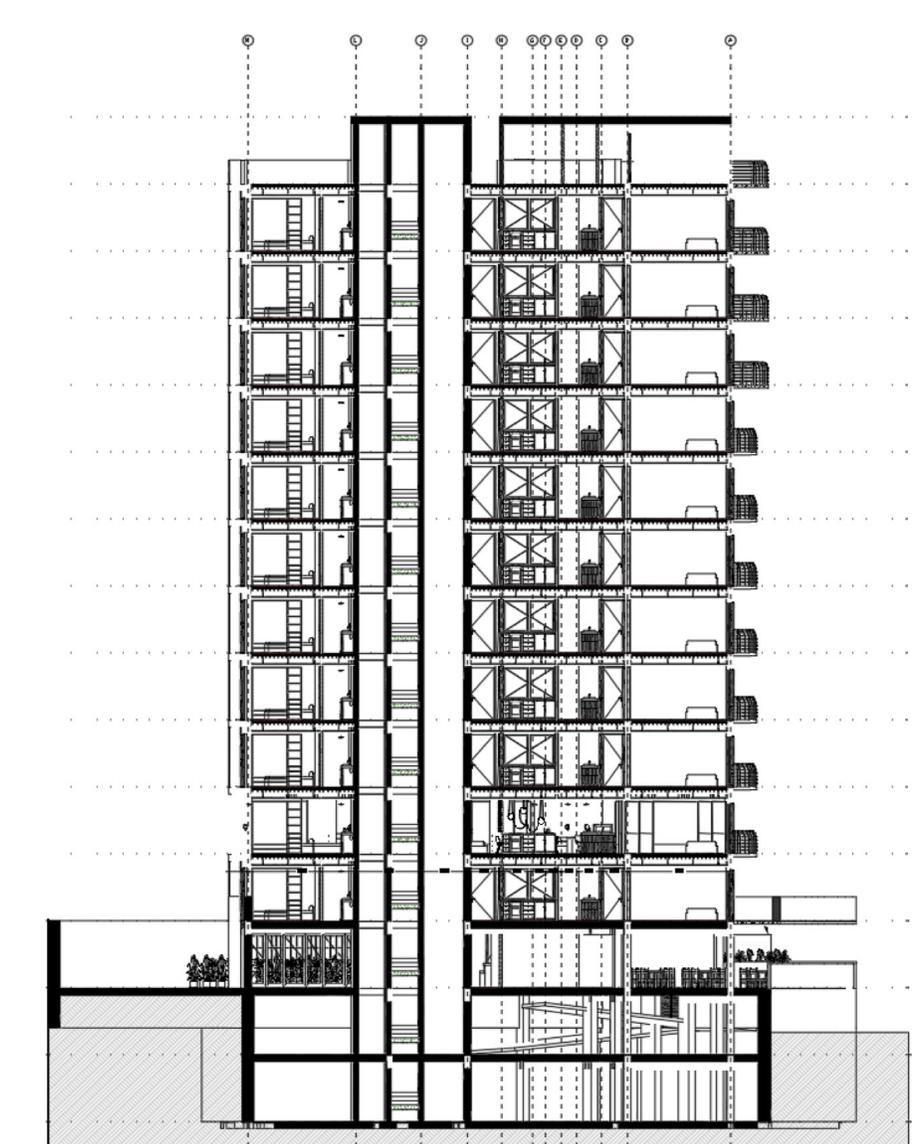


Figura 24. Ubicación de la estructura

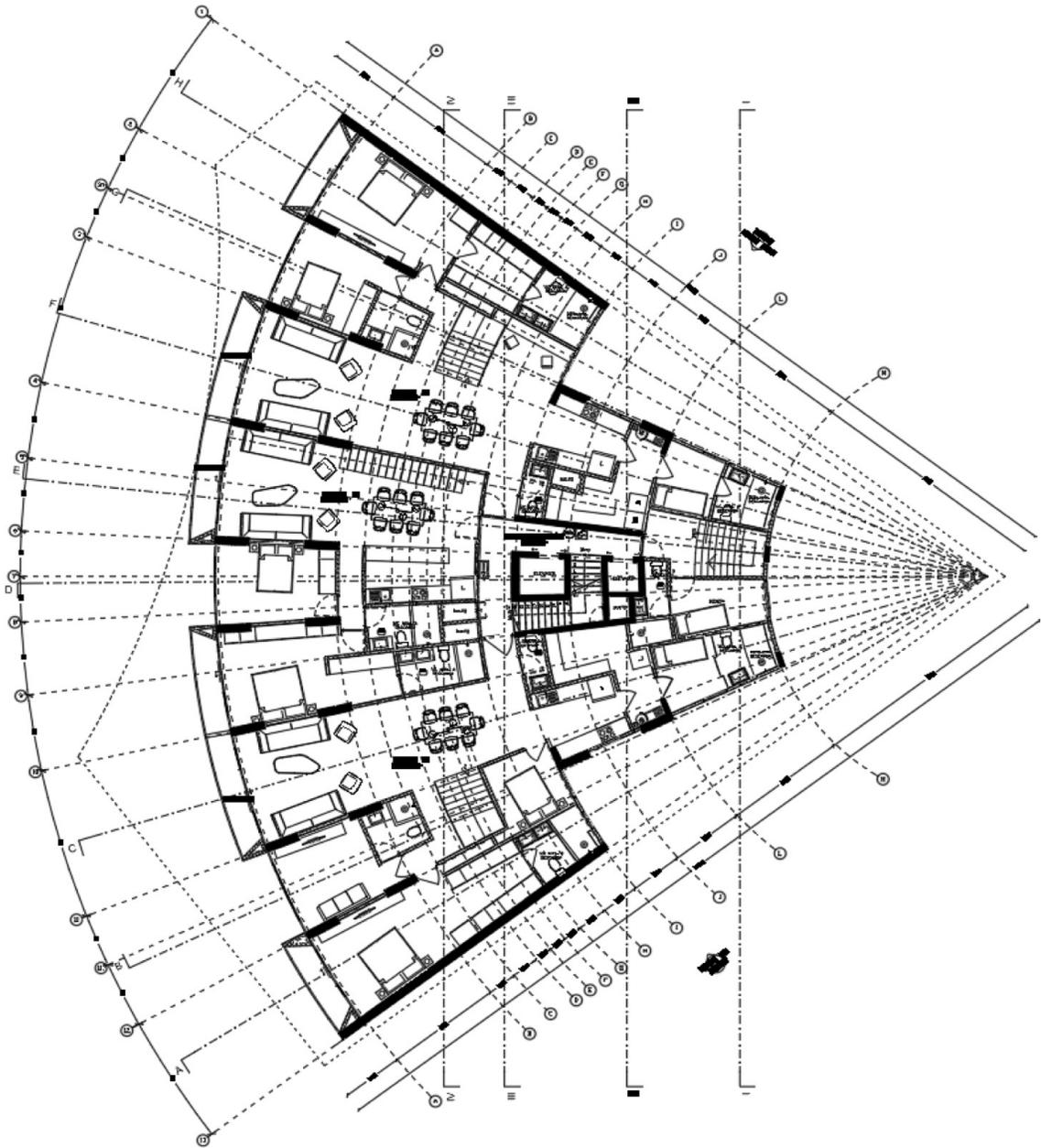
## 4.1 Características de la estructura

La estructura cuenta con dos sótanos, planta baja, 11 niveles de departamentos y un nivel de azotea, de los cuales los sótanos se emplean como estacionamiento, la planta baja será para uso comercial, acceso principal y salón de amenidades, el resto de la estructura se dispondrá para la ubicación de los departamentos y en la azotea se considera un Roof Garden. El área aproximada de construcción es de 7,497.5 m<sup>2</sup>, mientras que el área del predio es de 719.15 m<sup>2</sup>.

La planta de la estructura es de forma semicircular en forma de abanico, en su sección más larga tiene un ángulo de 70°, mientras que en la parte corta cuenta con un ángulo de 44° y una longitud de 20.9 m. Tanto los sótanos, como planta baja y los niveles de entrepiso cuentan con una altura de 3.0 m. La estructura tiene una altura total de 37.80 m sobre el nivel de calle. En la Figura 25 se muestran imágenes de la estructura en su parte frontal, lateral, vista superior del nivel de azotea y fachada.



a) Vista lateral norte



c) Planta tipo

Figura 25. Vistas de la estructura

## 4.2 Estructuración original

La propuesta estructural original consistía en marcos rígidos de concreto con muros de concreto perimetrales en la dirección radial del edificio, en la dirección larga se estructuró por medio de marcos de concreto reforzado. El sistema de piso se resolvió con losas reticulares con una capa de compresión de 6 cm de espesor y con un armado de malla electrosoldada 6x6-8/8, mientras que la cimentación se resolvió por medio de un cajón de muros perimetrales de 30 cm de espesor, losa de concreto de 30 cm de espesor y pilas de 60 cm, 120 cm y 140 cm de diámetro, desplantadas a un nivel de -24 m.

La estructura original se diseñó considerando un factor de comportamiento sísmico igual a 2.0, un factor de hiperestaticidad ( $k_1$ ) de 0.8 y un factor de irregularidad de 0.7.

Los elementos estructurales de concreto, así como los muros de concreto cuentan con un concreto  $f'c$  de 350 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que el sistema de piso es con un concreto  $f'c$  de 250 kg/cm<sup>2</sup>. Los espectros de diseño y de peligro uniforme tanto para la estructura original como para la innovadora se muestran en la Figura 26. En línea color continua color negro se muestra el espectro elástico, en línea continua color rojo se muestra el espectro de peligro uniforme (EPU). Por su parte, el espectro de diseño para la estructura original se muestra en línea continua color azul, mientras que en línea discontinua color azul se muestra el espectro de diseño para la estructura innovadora.

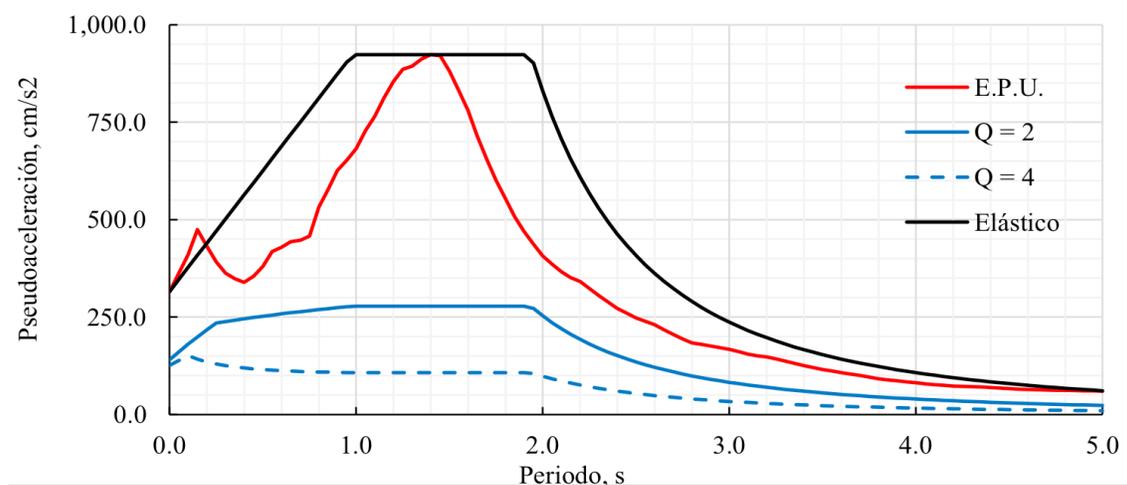


Figura 26. Espectros de diseño

Tabla 9. Cargas consideradas en el proyecto

Caso	Carga, kg/m <sup>2</sup>		
	Carga muerta adicional	Carga Viva Máxima	Carga Viva Accidental
Azotea	643.0	190.0	100.0
Entrepiso	513.0	190.0	100.0
Estacionamiento	306.0	250.0	100.0

En la Figura 27 se muestra la estructuración original, mientras que en la Tabla 10 se muestran los elementos estructurales considerados. En color gris se muestran las columnas, traveses y sistema de piso y los muros de concreto se muestran en color rojo. Se puede apreciar que la estructura está resuelta con marcos de concreto y con muros perimetrales de concreto reforzado, así como un núcleo de muros al centro del edificio.

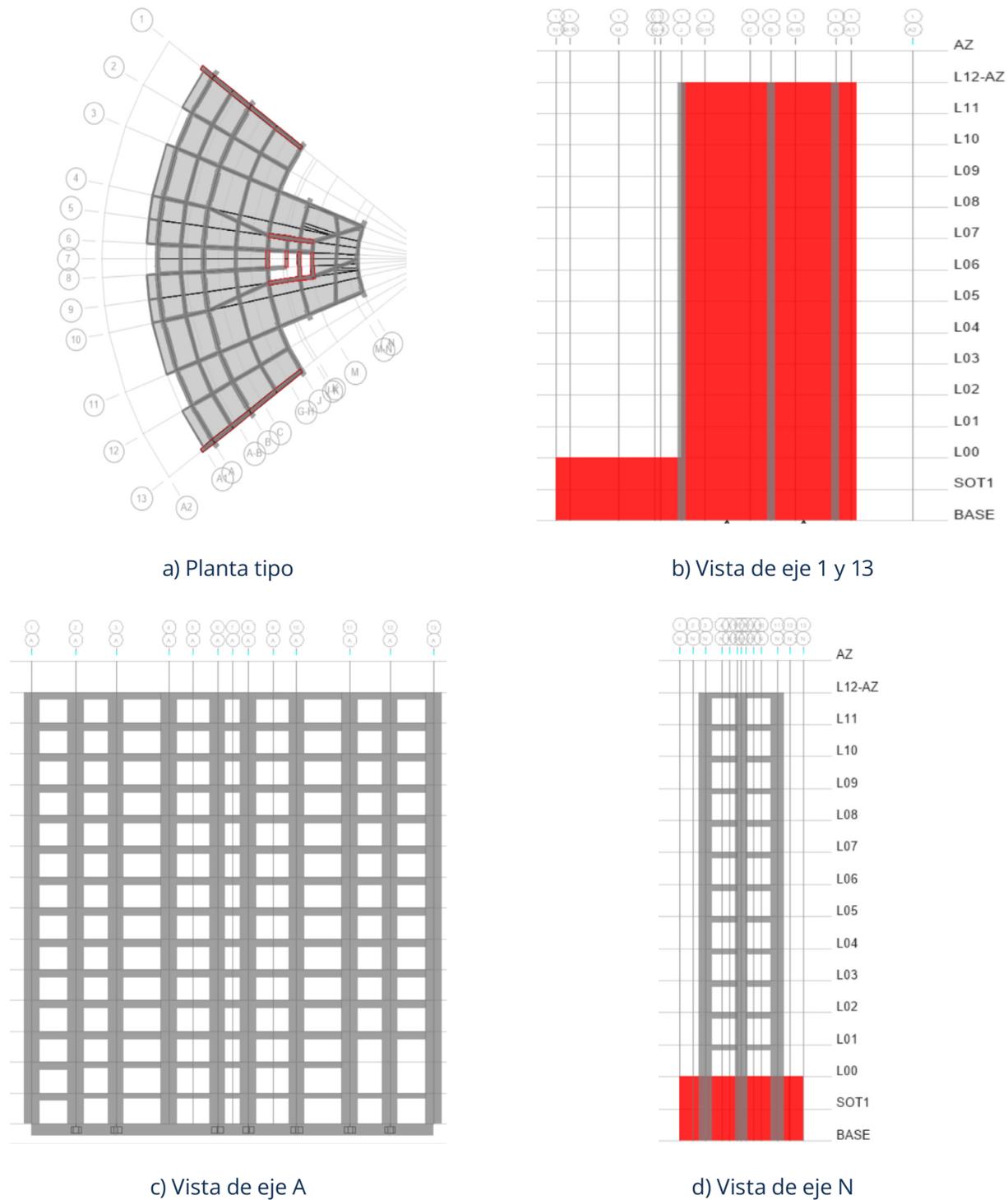


Figura 27. Propuesta estructural original

Tabla 10. Elementos estructurales empleados en la propuesta original

Elemento	Tipo de sección	Secciones	Material
Trabe	Rectangular	120.0 cm x 30.0 cm, 80.0 cm x 50.0 cm, 70.0 cm x 40.0 cm, 60.0 cm x 60.0 cm, 60.0 cm x 50.0 cm 60.0 cm x 35 cm, 30.0 cm x 30.0 cm	Concreto 350
Columna	Rectangular	155 cm x 60.0 cm, 140 cm x 60 cm, 120.0 cm x 60.0 cm	Concreto 350
Muro de concreto	Rectangular	45.0 cm, 40.0 cm	Concreto 350

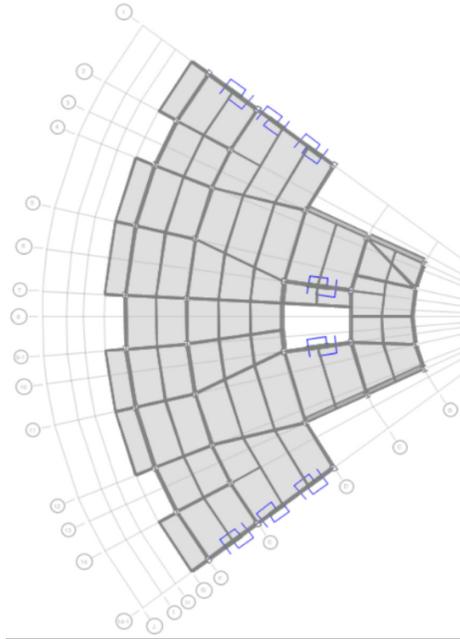
## 4.3 Propuesta innovadora de estructuración

Al realizar un Análisis Dinámico No Lineal Paso a Paso se encontró que la estructura original no presentaba un buen desempeño estructural, por lo que se buscó una propuesta alterna para resolver el proyecto reduciendo costos en la superestructura y buscando mejorar su comportamiento dinámico.

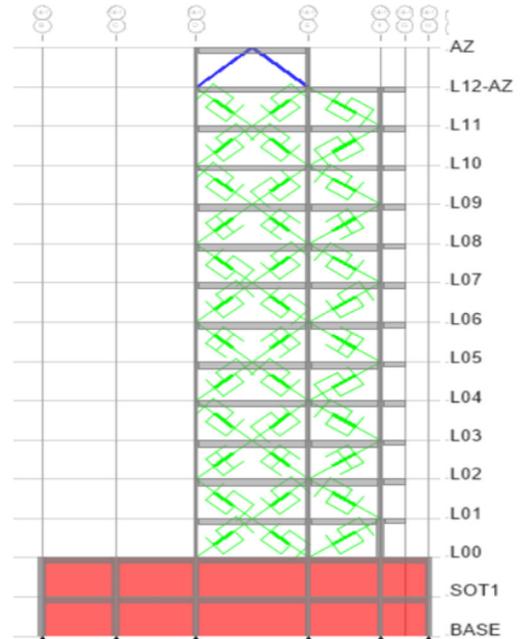
Por ello, se evaluó una solución con el uso de contraventeos restringidos al pandeo (CRP) para controlar los desplazamientos laterales y las descargas a la cimentación. Las diferencias principales entre ambas propuestas estructurales se enlistan a continuación:

1. Cambio de estructuración, sustituyendo los marcos de concreto reforzado por marcos de acero a base de perfiles tipo IR.
2. Sustitución de muros de concreto reforzado por disipadores tipo Dampo BRB y disipadores viscosos.
3. Sustitución de muros de concreto en el apéndice de la azotea por contraventeos convencionales
4. Cambio del sistema de piso de losas reticulares a losa cero.

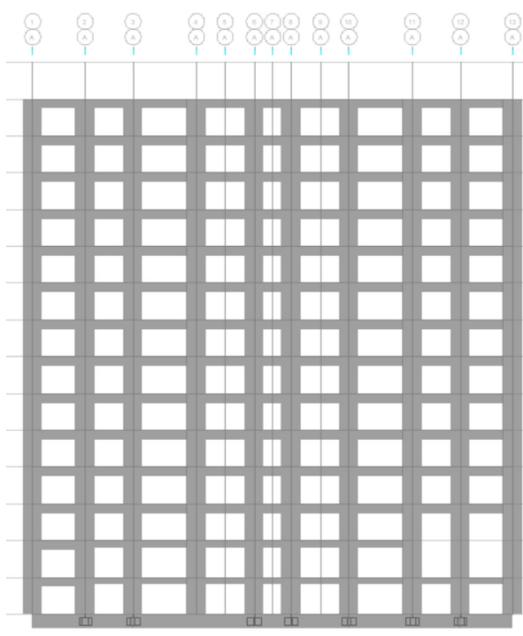
Mientras que en la Figura 28 se muestra la estructuración innovadora, en color gris se muestran las columnas, trabes y sistema de piso. Los disipadores tipo Dampo BRB y viscosos se muestran en color verde, mientras que los contraventeos convencionales se muestran en color azul y los muros de concreto se muestran en color rojo.



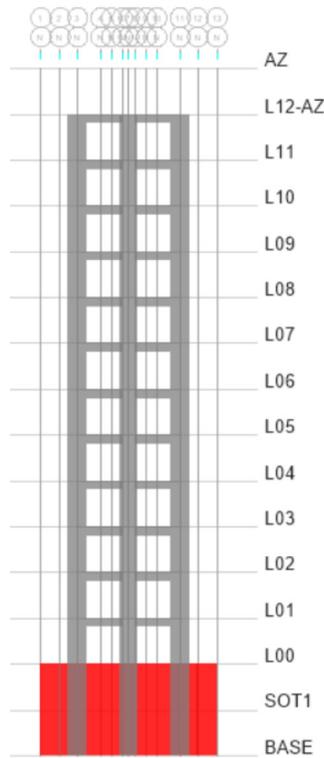
a) Planta tipo



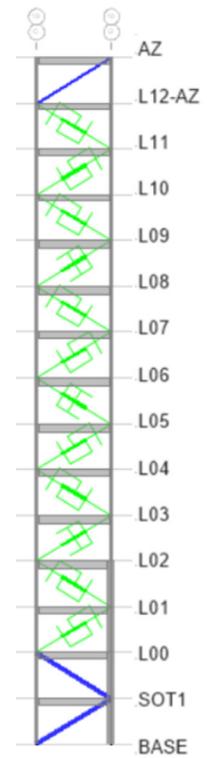
b) Vista de eje 1 y 14-1



c) Vista de eje A



d) Vista de eje N



e) Vista de eje 6 y 10

Figura 28. Propuesta estructural innovadora

En la Tabla 11 se muestran los elementos estructurales considerados, se puede observar que para las columnas se consideraron dos tipos de secciones: IR y HSS, última formada de cuatro placas.

**Tabla 11. Elementos estructurales empleados en la propuesta innovadora**

Elemento	Tipo de sección	Secciones	Material
Trabe	IR	12X14, 12X22, 16X26, 16X49, 18X40, 18X50, 18X65, 18X71, 18X76, 18X86, 18X97, 21X93, 16X57	A992 Fy50
Columna	IR	10X90, 14X120, 14X132, 14X145, 14X159, 14X176, 14X211, 14X233	A992 Fy50
Columna	4PL	16X16X1/2, 16X16X1, 21X21X2	A992 Fy50
Contraventeo convencional	HSS	12X12X5/16, 8X8X1/4	A992 Fy50

La propuesta innovadora contempla el uso de 72 disipadores Dampo BRB y 24 disipadores viscosos. En la Tabla 12 se muestran las propiedades generales de los disipadores Dampo BRB, mientras que en la Tabla 13 se muestran para los disipadores viscosos. En la Figura 29 se muestra la vista en elevación de los ejes con dispositivos.

**Tabla 12. Características de los disipadores Dampo BRB**

Tipo	Cantidad	Dy, cm	Fd, ton	Rigidez, ton/m	Peso, kg
<b>BRB-1</b>	36	0.54	33.0	6,129	214.0
<b>BRB-2</b>	18	0.54	44.0	8,174.0	261.0
<b>BRB-3</b>	12	0.67	33.0	4,904.0	310.0
<b>BRB-4</b>	6	0.67	44.0	6,541.0	372.0

**Tabla 13. Características de los disipadores viscosos**

Tipo	Cantidad	Carrera, cm	Alfa	Fd, ton	V, mm/s	C, kNs/mm
<b>Vis-01</b>	24	± 5.00	0.4	200.0	320	200.0

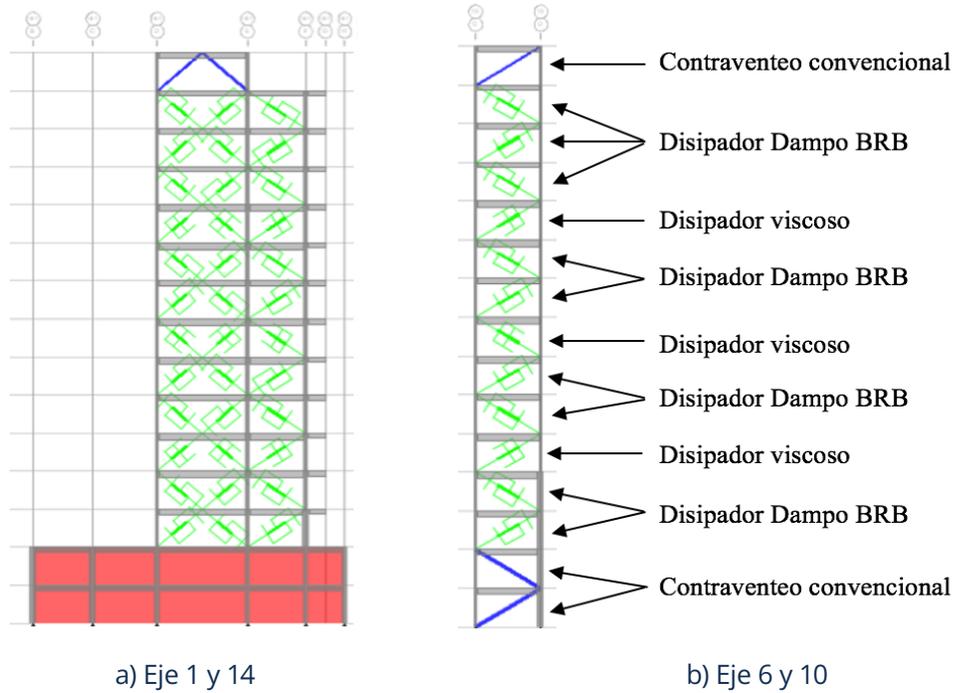


Figura 29. Ubicación en elevación de cada tipo de disipador

## 4.4 Desempeño estructural

A continuación, se describen los parámetros más relevantes para la estructura innovadora.

### 4.4.1 Modos de vibrar

Del modelo numérico desarrollado se obtuvieron los periodos de vibrar para la estructura. Los valores de los modos fundamentales de vibrar tanto para la estructura original como para la estructura innovadora se muestran en la Tabla 14. Se puede observar que para la estructura original el primer modo es en torsión, siendo este comportamiento solucionado en la estructura innovadora. Es importante mencionar que el primer modo del edificio innovador es en dirección Y con un valor de 1.68 s, mientras que el segundo modo es dirección X con un valor de 1.38 s. Finalmente, el tercer modo de vibrar cuenta con un valor de 1.15 s y es en torsión. En la Figura 30 se muestra la vista deformada de la estructura innovadora para los primeros tres modos de vibrar.

Tabla 14. Modos de vibrar de la estructura innovadora

Modo	Estructura original		Estructura innovadora	
	Dirección	Periodo de estructura, s	Dirección	Periodo de estructura, s
1	Torsión	0.77	Translación Y	1.68
2	Translación X	0.69	Translación X	1.38
3	Translación Y	0.23	Torsión	1.15

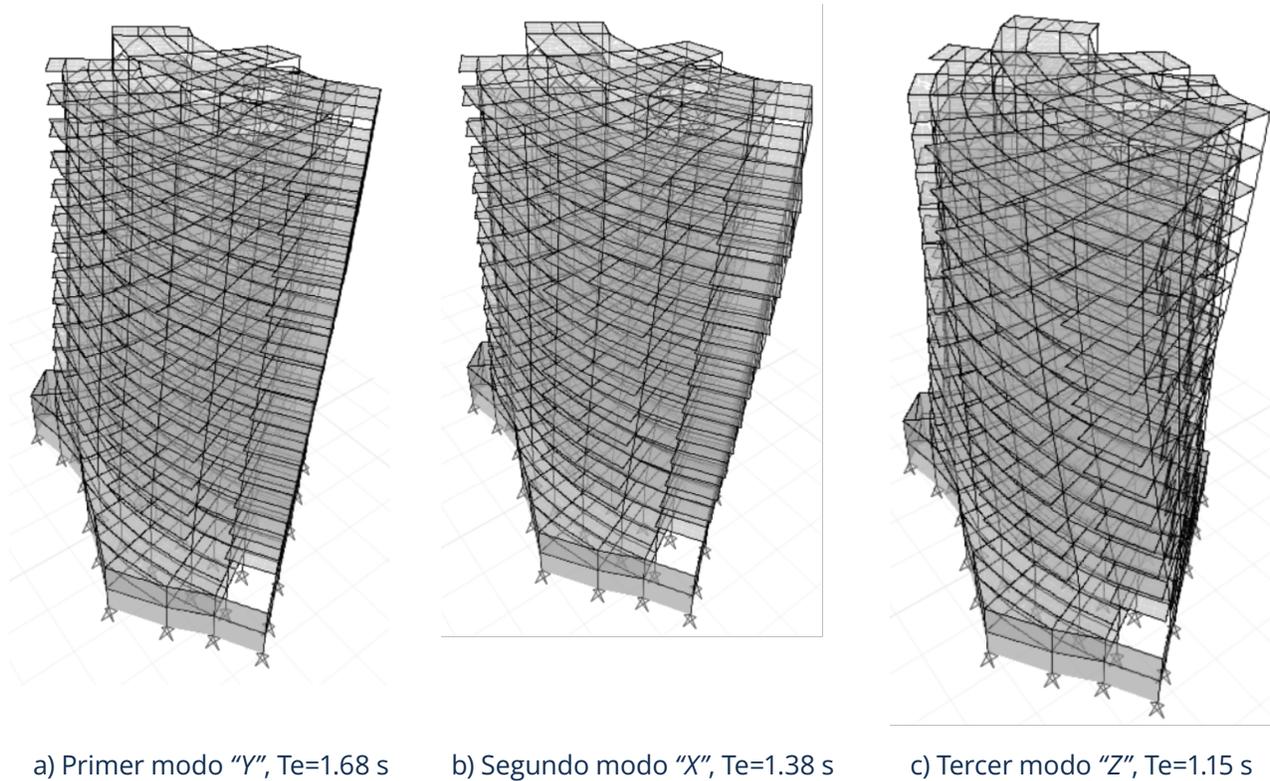
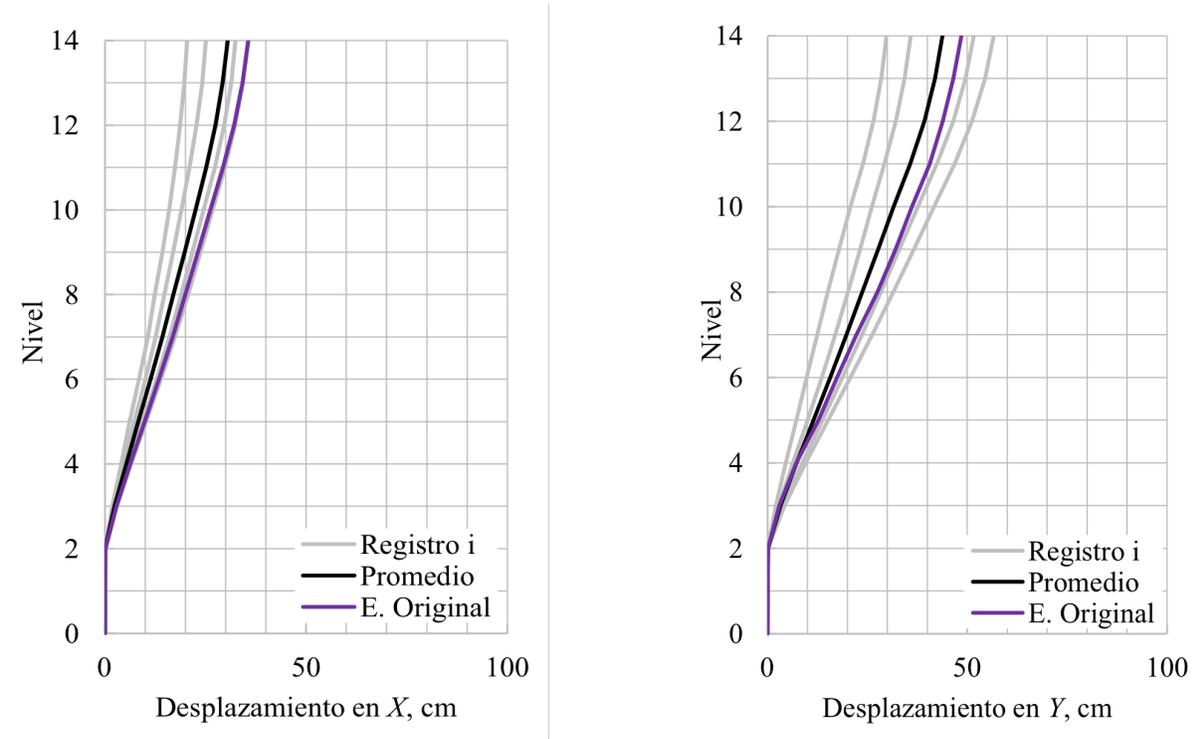


Figura 30. Modos de vibrar de la estructura innovadora

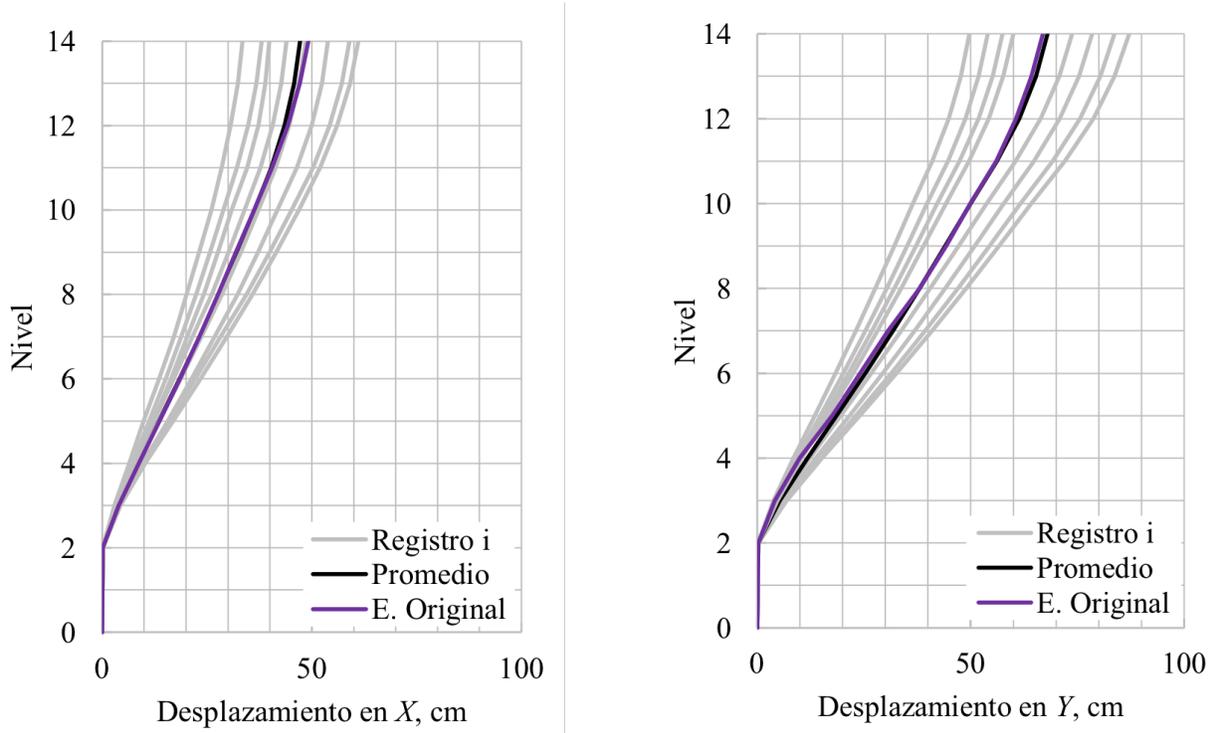
## 4.4.2 Desplazamientos laterales y distorsiones de entrepiso

Al igual que para la estructura ubicada en Sinaloa 95, se realizó un Análisis Dinámico No Lineal Paso a Paso, esto con la finalidad de determinar tanto los desplazamientos laterales como las distorsiones de entrepiso tal como lo describen las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS, 2020). Para ello, fue necesario obtener tanto los espectros de peligro sísmico como los acelerogramas sintéticos para ambas fuentes sísmicas (subducción y profundidad intermedia). Dicha información se obtuvo de la herramienta SASID ([www.sasid.unam.mx](http://www.sasid.unam.mx)).

La Figura 31 muestra las demandas máximas absolutas de desplazamientos laterales en la altura del edificio, obtenidas del Análisis Dinámico No Lineal Paso a Paso para cada fuente sísmica considerada. Para sismos de profundidad intermedia, se logra apreciar que el promedio de los desplazamientos máximos tiene un valor de 30.5 cm y de 43.8 cm en la azotea, en los sentidos X y Y, respectivamente. Por su parte, para los sismos de subducción, se tienen desplazamientos promedio máximos de 50.0 cm y de 68.3 cm en la azotea, en los sentidos X y Y, respectivamente. De forma similar se muestra el perfil de desplazamiento para la estructura original, la cual presenta desplazamientos máximos para sismos de profundidad intermedia de 32.9 cm y de 48.9 cm, mientras que para los movimientos de subducción son de 45.5 cm y de 67.4 cm en sentido X y Y, respectivamente.



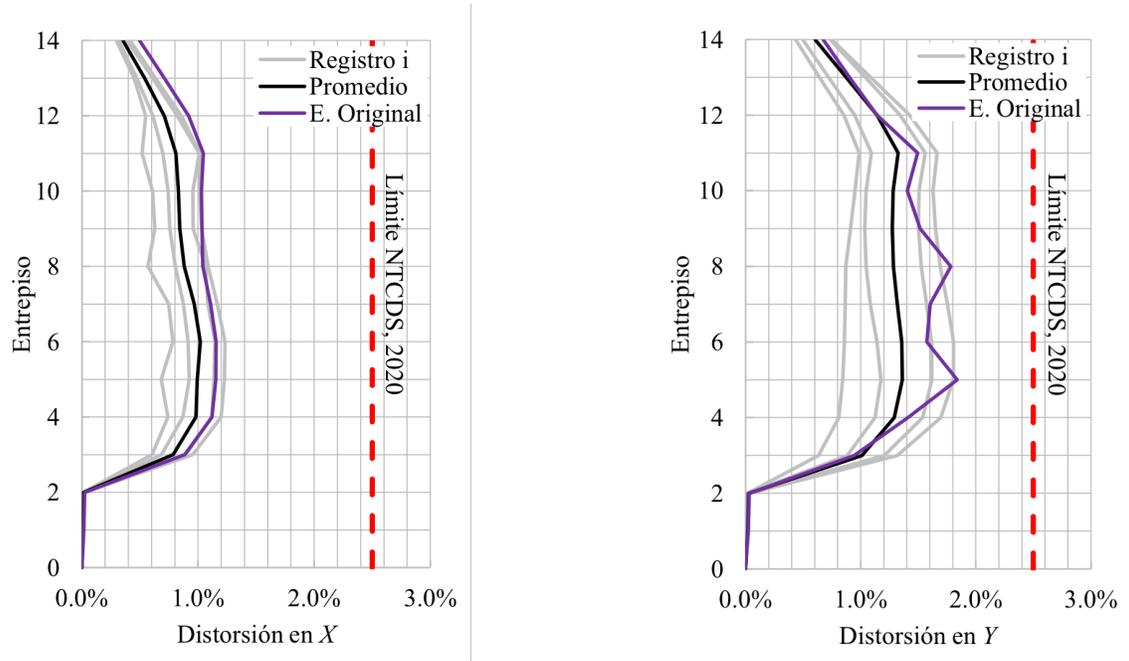
a) Profundidad intermedia



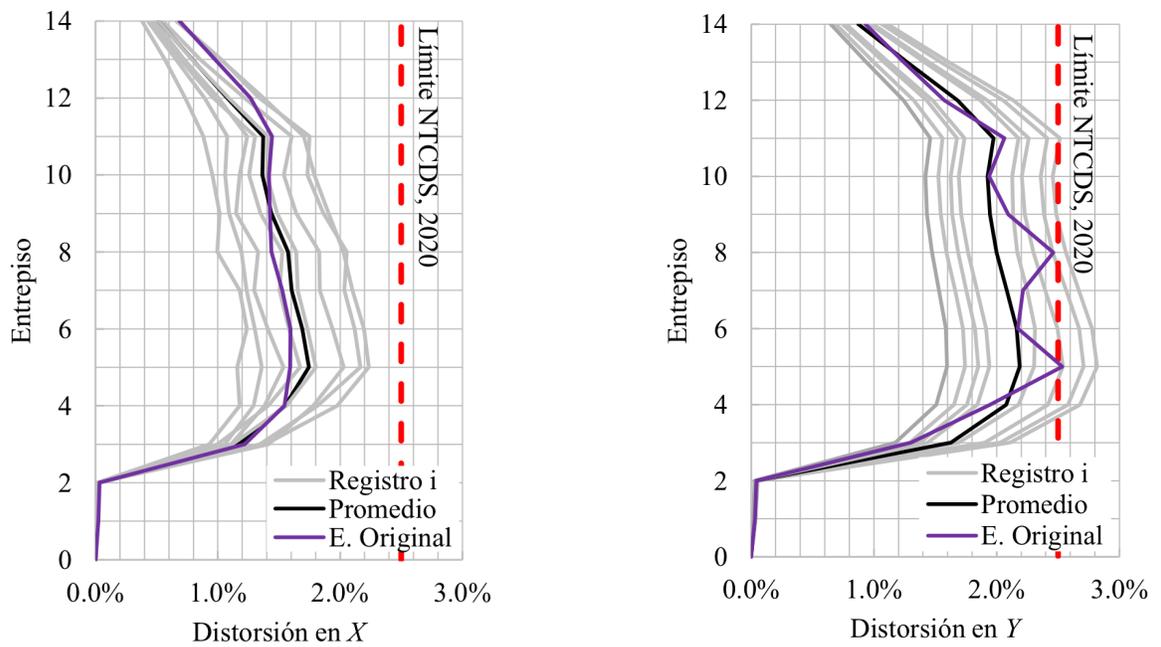
b) Subducción

Figura 31. Perfil de desplazamientos

La Figura 32 muestra los perfiles de demandas de distorsión máxima de entrepiso, obtenidas de los análisis. Se puede apreciar que el promedio de las demandas de distorsión de entrepiso en ningún momento es mayor a lo máximo permitido por la norma, con valores inferiores a 2.2% en dirección Y e incluso menores en dirección X. Adicionalmente, se muestra el límite de distorsión máxima permitida, el cual no es superado en ningún momento. Al compararlo con el resultado de la estructura original se observa que las distorsiones son en promedio mayores en 1.38 veces.



a) Profundidad intermedia



b) Subducción

Figura 32. Perfil de distorsiones de entrepiso

### 4.4.3 Curvas de capacidad

En la Figura 33 se muestra la curva de capacidad de la estructura. En color negro se muestra la dirección X, mientras que en color gris se muestra la dirección Y. En el eje vertical se muestra el cortante normalizado con respecto al peso total de la estructura. Se puede observar que la estructura presenta un comportamiento lineal, para posteriormente entrar en el intervalo inelástico. En dirección X presenta una deformación última de 89 cm a un cortante normalizado de 35.8%; mientras que en dirección Y la deformación última es de 92.5 cm a un cortante normalizado de 57.8%. Por lo anterior se puede decir que la estructura tanto en sentido X como en sentido Y tienen una gran capacidad de deformación (aproximadamente 2.0% de su altura) y una capacidad de carga lateral alta (aproximadamente 35% y 57% del peso de su estructura).

Por su parte, la estructura original presenta una capacidad mucho menor tanto en cortante normalizado como en el desplazamiento lateral, teniendo un desplazamiento último de 42.5 cm y 72.1 cm en dirección X y Y, con un cortante normalizado de 18.5% y 27.0%, respectivamente.

Al emplear sistemas de protección sísmica la capacidad lateral de la estructura incrementó hasta un 114%, mientras que la capacidad de deformación incrementó un 109%.

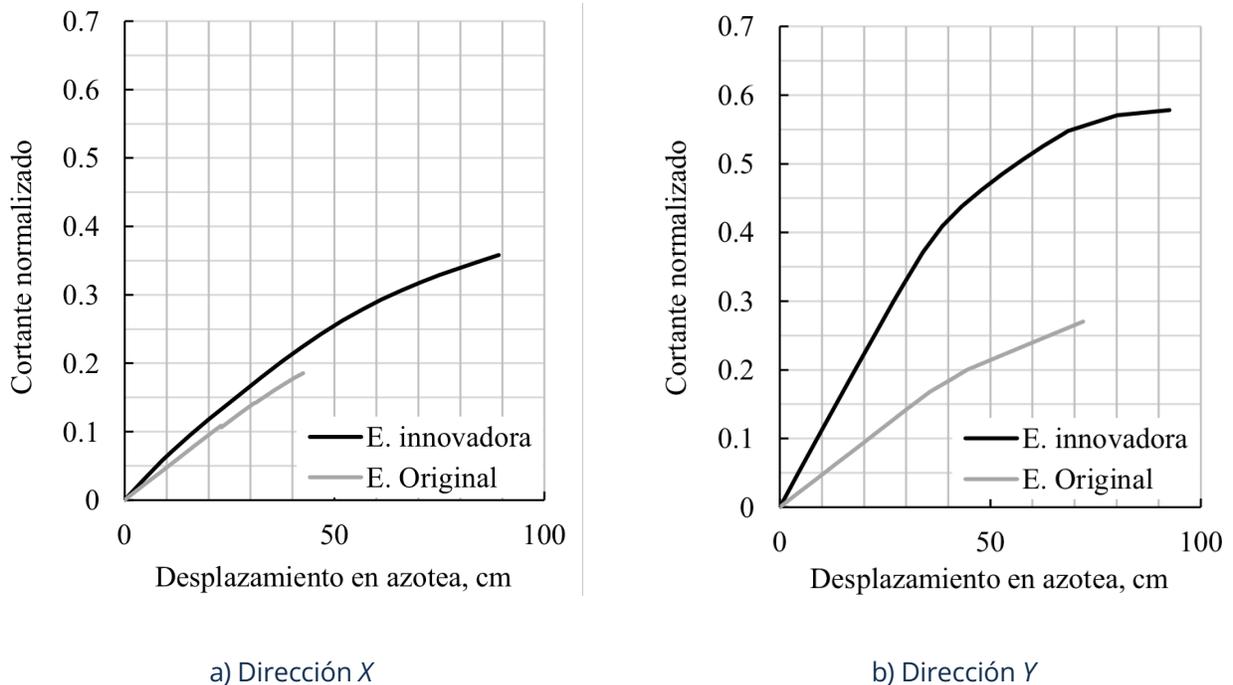


Figura 33. Curva de capacidad

## 4.4.4 Estados finales del análisis

A manera de ejemplo en la Figura 34 se muestran los estados finales del Análisis Dinámico No Lineal Paso a Paso para los registros que presentaron mayor distorsión de entrepiso (registro 2 y registro 6) en ambas fuentes sísmicas (profundidad intermedia y subducción). Se puede apreciar que se presentan daños menores en elementos estructurales lo cual no compromete el comportamiento estructural.

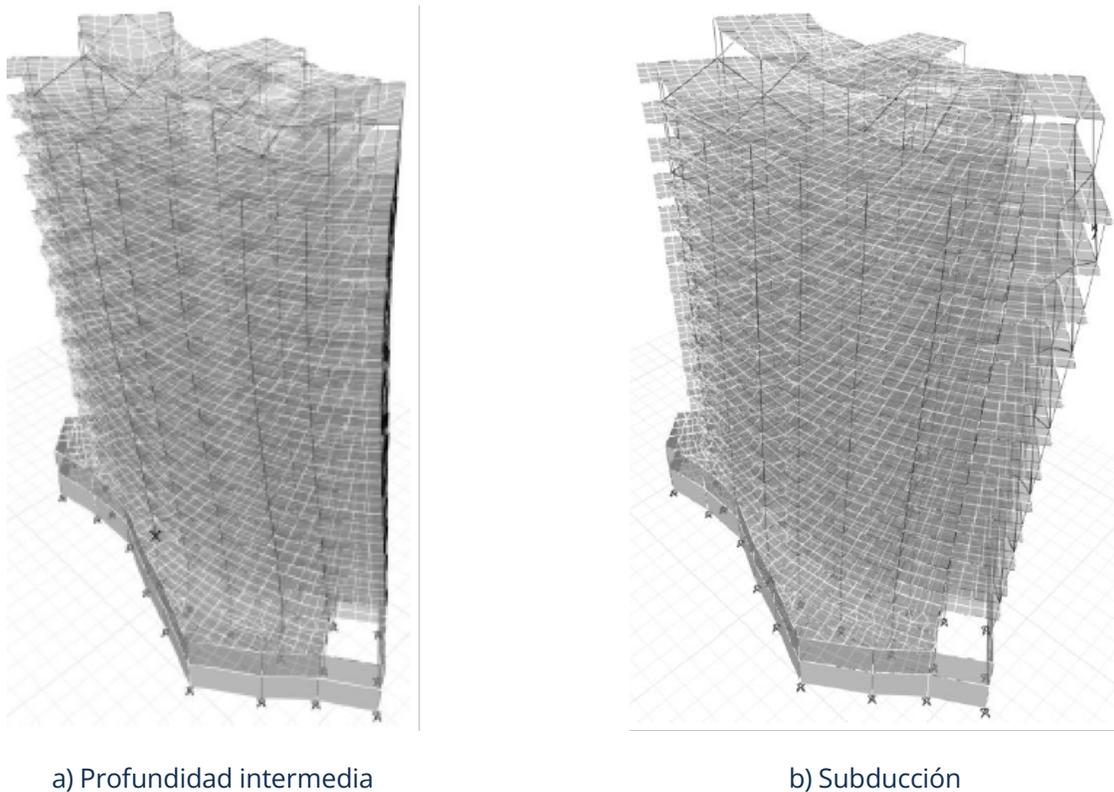
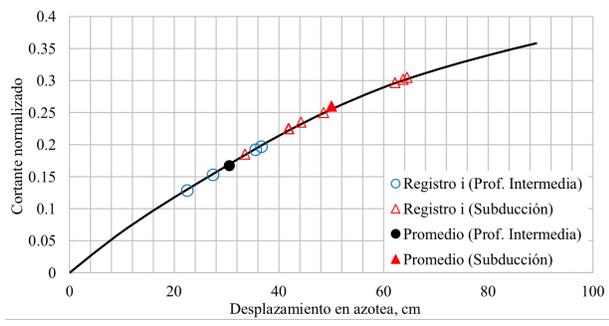


Figura 34. Estado final del análisis

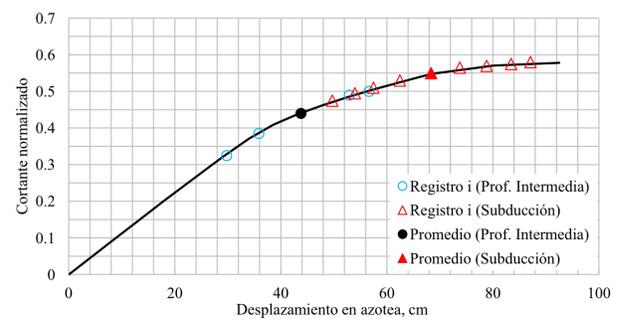
## 4.4.5 Desempeño de la estructura

Para conocer el desempeño de la estructura, las demandas máximas de desplazamiento en la azotea, y su promedio, se superponen en las curvas de capacidad de la estructura en cada dirección de análisis, tal como se muestra en la Figura 35. Se puede ver que el promedio de las demandas laterales se encuentra por debajo del 80% de la capacidad de deformación; por lo que se espera un comportamiento adecuado de la estructura.

En la Figura 36 se muestra una vista de la deformación lateral similar al promedio de las demandas. Se puede ver que no se presentan daños en elementos estructurales ante las demandas promedio.

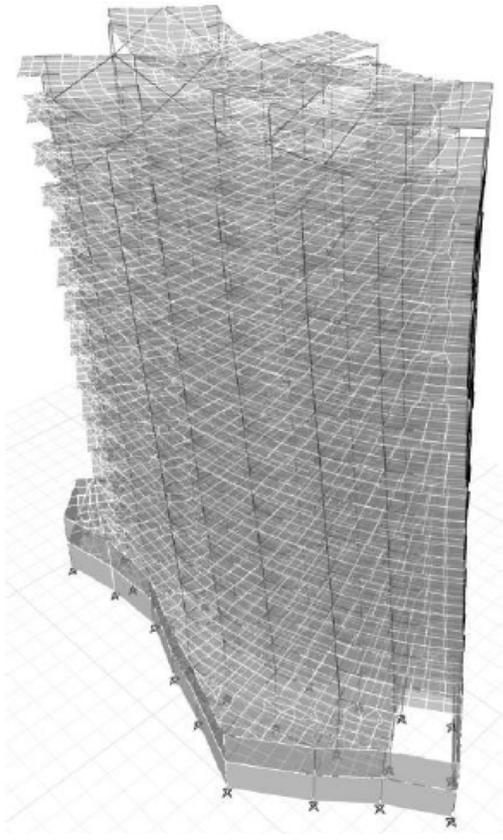


a) Dirección X

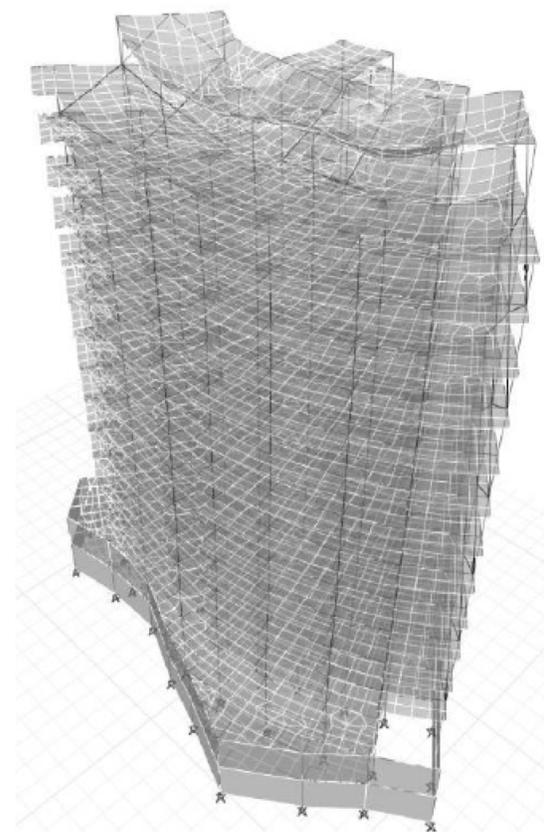


b) Dirección Y

Figura 35. Desempeño de la estructura



a) Dirección X



b) Dirección Y

Figura 36. Articulaciones plásticas esperadas ante demandas promedio

## 4.4.6 Curvas de histéresis

A manera de ejemplo, en la Figura 37 se muestran algunas curvas de histéresis obtenidas del análisis numérico para los disipadores de energía para el registro que presenta mayores distorsiones de entrepiso (registro 6). Se puede apreciar que los dispositivos incurren en el intervalo inelástico, disipando energía y controlando la respuesta de la estructura ante los eventos sísmicos.

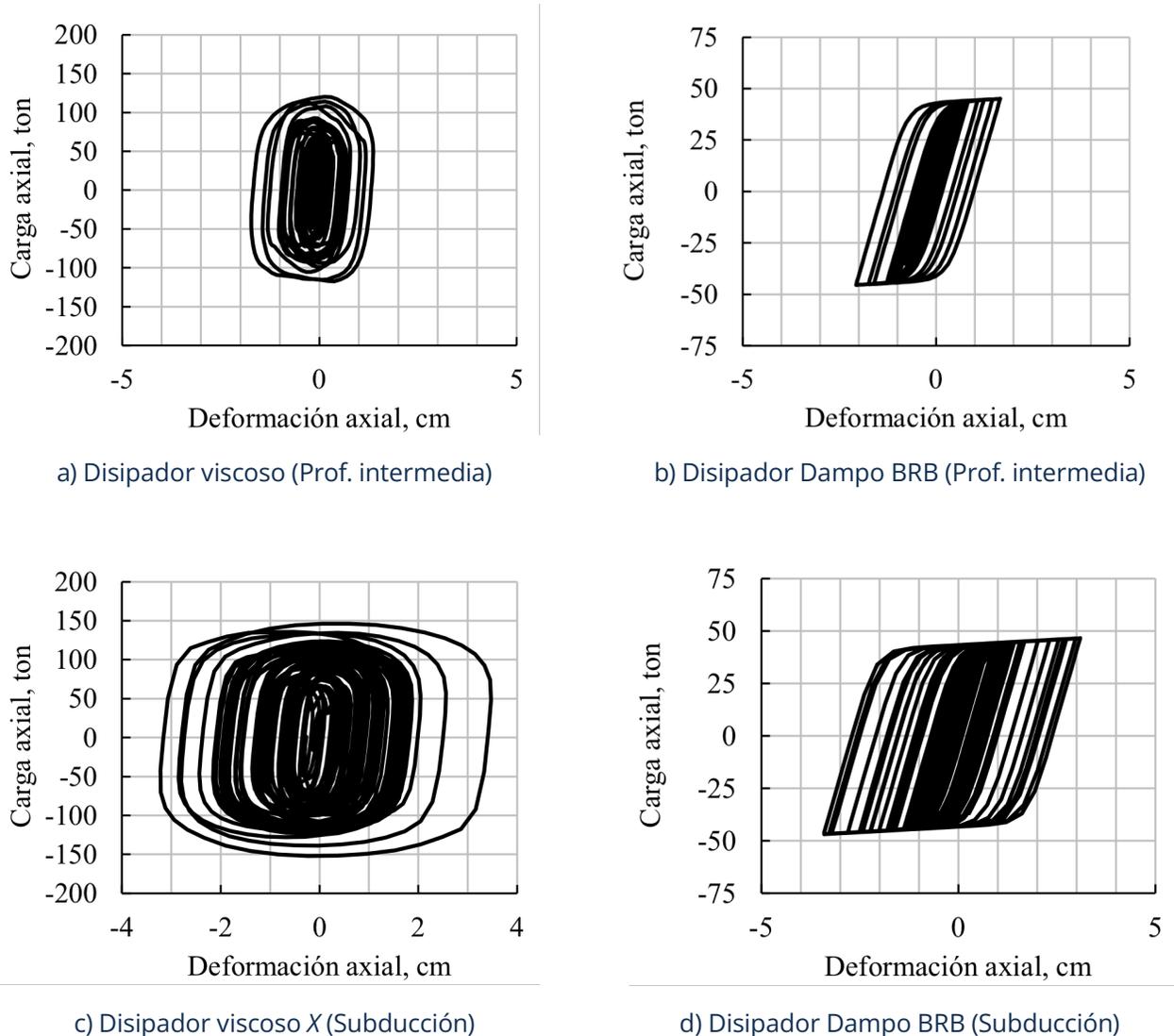
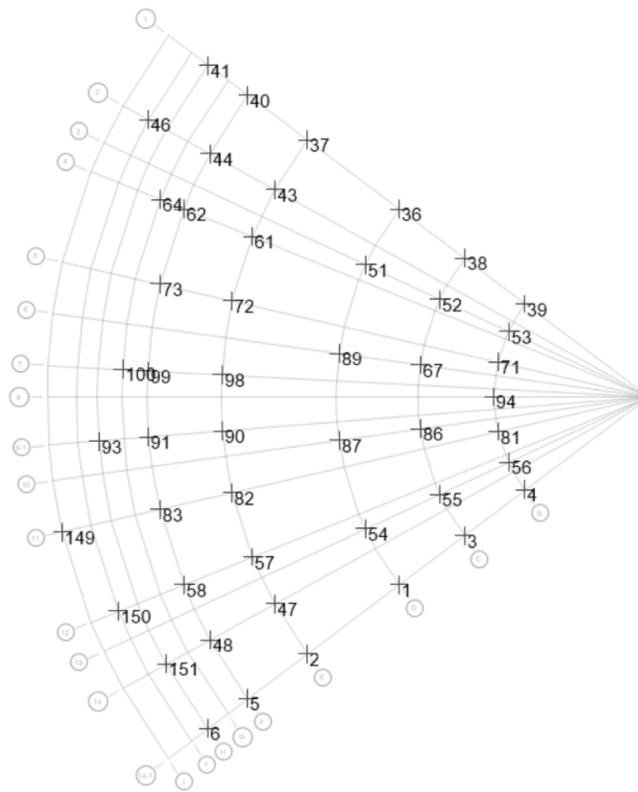


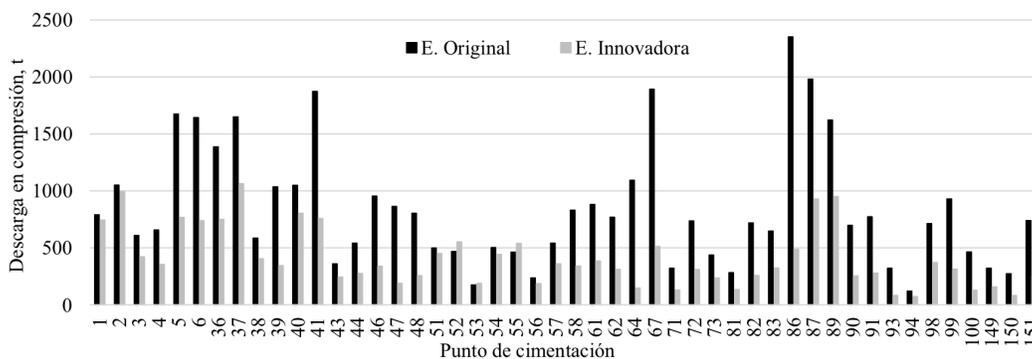
Figura 37. Curvas de histéresis de los disipadores de energía

## 4.4.7 Descargas a cimentación

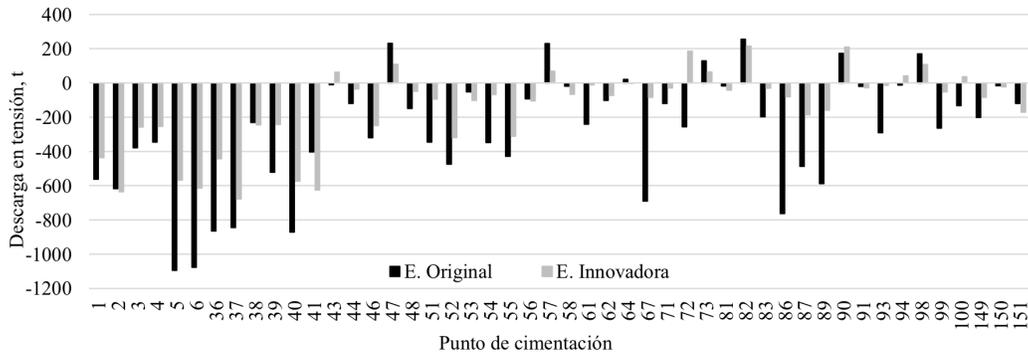
A manera de ejemplo se muestran las descargas a cimentación de forma axial tanto para la estructura original como para la estructura innovadora. En la Figura 38a se aprecian los puntos de apoyo del modelo numérico. Por su parte, en la Figura 38b se aprecia las descargas en compresión para ambas estructuraciones, se aprecia que la original presenta descargas mayores a la innovadora en un 200%, concentrando cargas en puntos específicos. Finalmente, en la Figura 38c se aprecia las descargas a cimentación en tensión, se logra observar que para la estructura innovadora no se presentan cargas mayores a 670 t, mientras que para la estructura original se presentan cargas en tensión de hasta 1,095 t.



a) Puntos de apoyo



b) Descarga en compresión



c) Descarga en tensión

Figura 38. Descargas a cimentación

## 4.5 Viabilidad económica

En la Tabla 15 se muestra la volumetría que se obtuvo del modelo de la estructura original. Tomando el costo por metro cúbico de concreto a \$8,500.00 y la tonelada de acero a \$50,000.00 se obtiene un costo del proyecto de \$51,890,800.00, por lo que el metro cuadrado de construcción es de \$6,921.0 considerando un área de 7,497.5 m<sup>2</sup>.

Tabla 15. Cuantificación de materiales para la propuesta original

Elemento	Material	Cantidad	Costo unitario	Importe
Columna	Concreto	1,587.9 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$ 13,494,600.00
Trabe	Concreto	1,478.2 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$ 12,564,700.00
Muros de concreto	Concreto	1,871.9 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$ 15,911,150.00
Sistema de piso	Concreto	1,167.1 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$ 9,920,350.00
			<b>Total</b>	<b>\$51,890,800.00</b>

De forma similar, en la Tabla 16 se muestra la volumetría para la estructura innovadora, la cual presenta una densidad del acero por metro cuadrado es igual a 87.44 kg/m<sup>2</sup>. Considerando los mismos costos que en la Tabla 15 se obtiene un costo para el proyecto equivalente a \$48,543,100.00, con un costo de construcción por metro cuadrado igual a \$6,474.57, presentando un ahorro del 6.90% en comparación con la propuesta original lo que representa un ahorro de \$3,347,700.00.

Tabla 16. Cuantificación de materiales para la propuesta innovadora

Elemento	Material	Cantidad	Costo unitario	Importe
Columna	Concreto	24 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$ 204,000.00
	Acero	336.6 ton	\$50,000.00	\$ 16,830,000.00
Trabe	Concreto	19.6 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$ 166,600.00
Contraventeo convencional	Acero	316.4 ton	\$50,000.00	\$ 15,820,000.00
	Acero	2.6 ton	\$50,000.00	\$ 130,000.00
Muros de concreto	Concreto	158.4 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$ 1,346,400.00
Sistema de piso	Concreto	746.6 m <sup>3</sup>	\$8,500.00	\$ 6,346,100.00
Disipador Dampo BRB	Acero	72 piezas	-	\$ 3,500,000.00
Disipador viscoso	-	24 piezas	-	\$ 4,200,000.00
			<b>Total</b>	<b>\$ 48,543,100.00</b>

En la Tabla 17 se muestra las principales diferencias en costos entre ambas propuestas, se identifica que el cambio más importante radica en una disminución de las toneladas de acero necesarias tanto para las trabes como para los contraventeos convencionales.

Tabla 17. Comparación de costos entre estructuras

	Estructura original	Estructura innovadora	Variación
Columnas	\$ 13,494,600.00	\$ 17,034,000.00	+\$ 3,539,400.00
Trabes	\$ 12,564,700.00	\$ 15,986,600.00	+\$ 3,421,900.00
Contraventeos convencionales	-	\$ 130,000.00	+\$ 130,000.00
Disipadores Dampo BRB	-	\$ 3,500,000.00	+\$ 3,500,000.00
Disipadores viscosos	-	\$ 4,200,000.00	+\$ 4,200,000.00
Muros de concreto	\$ 15,911,150.00	\$ 6,346,100.00	-\$ 3,574,250.00
Sistema de piso	\$ 9,920,350.00	\$ 6,346,100.00	-\$ 3,574,250.00
<b>Total</b>	<b>\$ 51,890,800.00</b>	<b>\$ 48,543,100.00</b>	<b>-\$ 3,347,700.00</b>
<b>Costo por m2</b>	<b>\$7,823.44</b>	<b>\$7,173.44</b>	<b>-\$ 446.51</b>

Es importante mencionar que la cuantificación no considera los elementos de cimentación ni la cuantificación de las conexiones de los elementos estructurales. Por lo anterior, se esperaría que el ahorro real del proyecto gracias a la implementación de los disipadores Dampo BRB podría llegar a un monto de \$5,000,000.00.

## 5. CONCLUSIONES

Se presentaron los resultados de la evaluación de dos estructuras ubicadas en la zona de lago de la Ciudad de México, mismas que fueron diseñadas con un sistema tradicional y con un sistema innovador sismorresistente. Se estudiaron aspectos tanto de comportamiento estructural como económicos, comparando desplazamientos laterales, distorsiones de entrepiso, curvas de capacidad, desempeño estructural, descargas a cimentación y costo por metro cuadrado de construcción. De dichas comparaciones se concluye lo siguiente:

1. Ambas propuestas estructurales (original e innovadora) logran cumplir con los requisitos especificados en la reglamentación vigente, cumpliendo en términos de distorsión máxima de entrepiso y de resistencia.
2. Las propuestas que consideran el uso de sistemas de protección sísmica (innovadoras) presentaron desplazamientos laterales y distorsiones máximas de entrepiso menores a las de la estructura convencional (original), con reducciones hasta del 66%.
3. Para las estructuras equipadas con sistemas de protección sísmica, la curva de capacidad mostró que la estructura incrementa tanto su resistencia lateral como su capacidad de deformación, con un incremento de resistencia de hasta el 114% y 109% para la capacidad de deformación.
4. En las estructuras innovadoras, los estados finales de análisis mostraron que la estructura principal no presentó articulaciones plásticas en sus elementos estructurales, lo que no se esperaría en las estructuras convencionales diseñadas con forme a reglamento.
5. Al superponer las demandas de desplazamientos promedio en las curvas de capacidad de la estructura innovadora, se observó que la estructura es capaz de acomodarlas sin ningún problema.
6. Al comparar las descargas a cimentación tanto de las estructuras originales como las innovadoras, se observa que, con el uso de sistemas de protección sísmica, las descargas en compresión se reducen hasta un 50%, mientras que en tensión las descargas se reducen en un 65%.
7. Al comparar los costos entre las diferentes estructuras (original e innovadora) se observaron ahorros de hasta el 8.3% en estructuras que cuentan con sistemas de protección sísmica. Esto ya incluye el costo de los dispositivos. Es importante mencionar que dicho porcentaje no incluye el costo de la cimentación ni de las conexiones de los elementos, por lo que se puede incrementar aún más el ahorro al evaluar el proyecto con una ingeniería de detalle.

Por lo anterior, se recomienda ampliamente evaluar el uso de sistemas de protección sísmica en edificaciones que estarán sometidas a movimientos sísmicos, ya que como se observó, sus ventajas tanto económicas como de desempeño estructural hacen a estas tecnologías un gran candidato a usarse en diversas edificaciones.

Es importante mencionar que en el presente artículo sólo se mostraron estructuras a base de marcos de acero; sin embargo, los sistemas de protección también pueden emplearse en estructuras de concreto. De manera similar, los sistemas de protección sísmica no sólo son adecuados para estructuras nuevas, sino también para rehabilitaciones estructurales.

## 6. REFERENCIAS

Administración pública de la Ciudad de México (2021), *"Normas Técnicas Complementarias"* Gaceta oficial de la Ciudad de México, Ciudad de México, México.

Christopoulos, C., Filiatrault, A. & Bertero, V. V., (2006). *"Principles of passive supplemental damping and seismic isolation"*, Italia, Pavia.

CICM (2017), *"Mapa técnico de daños en sismo de 19 de septiembre de 2017"*, recuperado de [www.sismosmexico.org](http://www.sismosmexico.org), fecha de consulta: 20 de mayo de 2021.

CSI (2020), *"ETABS v.20"*, Computers and Structures Inc., Estados Unidos, California.

García J. (2019), *"Caracterización experimental de disipadores de energía sísmica de bajo costo"*, Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Guerrero H. (2019), *"Ensayo experimental de contraventeos restringidos al pandeo"*, Reporte final para Dampo Systems, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Japan Society of Seismic Isolation (2020), *"Technical information"* recuperado de [www.jssi.or.jp/english/aboutus/techinfo.html](http://www.jssi.or.jp/english/aboutus/techinfo.html), fecha de consulta: 29 de diciembre de 2020.

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, No. 27, pp.333-343.

SASID (2020). *Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño*. Versión 4.0.2.0. Gobierno de la Ciudad de México.



# DIRECTORIO

## OFICINAS COMERCIALES

T. +52 55 5262 7300 / Av. Ejército Nacional 216 P.2, Anzures, Miguel Hidalgo, CDMX, 11590.

## ÁREA DE DESARROLLO DE MERCADO

desarrollodemercado@gerdau.com

## PLANTAS

### CD. SAHAGÚN

T. +52 791 913 8105 / Km. 3 Ctra. Mex - Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

### TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

### LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. De México, 54187

## DISTRIBUCIÓN

### CDMX

T. +52 55 5089 8930 / Año 1857 8, Ticomán, Gustavo A. Madero, CDMX, 07330

### MONTERREY

T. +52 81 8748 7610 / Blvd. Carlos Salinas de Gortari 404, Centro Apodaca, Nuevo León, 66600

## PATIOS DE CHATARRA Y CENTROS DE RECOLECCIÓN

### CD. SAHAGÚN

T. +52 791 9138 105 / Km. 3 Ctra. Mex - Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

### LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. de México, 54187

### LOS REYES

T. +52 55 5856 1651 / Tepozanes Los Reyes, Acaquilpan, México, 56428

### GUADALAJARA

T. +52 33 3668 0285 / 36702769 / Av. 18 de Marzo 531, La Nogalera, Guadalajara, Jalisco, 44470

### SAN JUAN

T. +52 55 2603 3275 / 5262 7359 / San Juan 669, Granjas Modernas, CDMX, 07460

### TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

### VERACRUZ

T. +52 229 923 1359 / Ctra. Fed. Aluminio L. 7 o Camino Puente Roto Km. 1.5, Nuevo Veracruz, Veracruz, 91726



**GERDAU CORSA**

El futuro se moldea

[gerdaucorsa.com.mx](http://gerdaucorsa.com.mx)



**Gerdau Corsa. El futuro se moldea.**