

---

## REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DE UN HOSPITAL EN ZONA DE LAGO DE LA CIUDAD DE MÉXICO CON CONTRAVENTEOS RESTRINGIDOS AL PANDEO (CRP)

*Luis Pérez Ortiz<sup>(1)</sup>, Fernando Cueto Jiménez<sup>(2)</sup>*

<sup>1</sup> INESCO. San Borja 1509, Ciudad de México, 03600, [luis.pereznesco.mx](mailto:luis.pereznesco.mx).

<sup>2</sup> Dampo Systems SA de CV. Copilco 76, Ciudad de México, 04340, [fernando.cueto@dampo.com.mx](mailto:fernando.cueto@dampo.com.mx)

### V. Métodos y tecnologías sismoresistentes innovadoras en la práctica profesional.

#### RESUMEN

El artículo presenta la rehabilitación estructural de un hospital de cinco niveles con contraventeos restringidos al pandeo (CRP). La estructura original se diseñó con una versión anterior del reglamento de construcción y se resolvió con marcos de concreto de ductilidad baja y muros de mampostería confinada. En este artículo se presenta la metodología de diseño para su rehabilitación. Se destaca que se empleó un diseño basado en control de desplazamientos. La propuesta de refuerzo se verificó por medio de análisis dinámicos no lineales. Se presentan los detalles de la rehabilitación y al final se ofrecen conclusiones útiles para los ingenieros de la práctica profesional.

## 1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se muestran los resultados de una propuesta de rehabilitación de un edificio de cinco niveles, ubicado en la zona del lago de la Ciudad de México. El edificio fue diseñado con la versión del 2017 de las NTC y tomando en cuenta que su uso era de oficinas. Actualmente, se considera cambiar el objetivo, albergando un hospital. Por ello, fue necesario hacer una revisión con las nuevas solicitudes requeridas y proponer el refuerzo estructural requerido, el cual constó de 48 contravientos restringidos al pandeo (CRP). La revisión de la propuesta de refuerzo se realizó por medio de análisis dinámicos no lineales paso a paso de acuerdo con los requisitos de las NTC-DS (NTC-DS, 2020).

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La Figura 1 muestra la configuración del edificio estudiado. Cuenta con tres sótanos, planta baja y cinco niveles, teniendo forma rectangular en planta. La estructura original se resolvió con marcos de concreto de ductilidad baja y un núcleo formado por muros de concreto reforzado. El sistema de piso se resolvió con una losa nervada aligerada con casetones. El concreto empleado en los elementos estructurales tenía un valor de  $f'c$  de 300 kg/cm<sup>2</sup>.

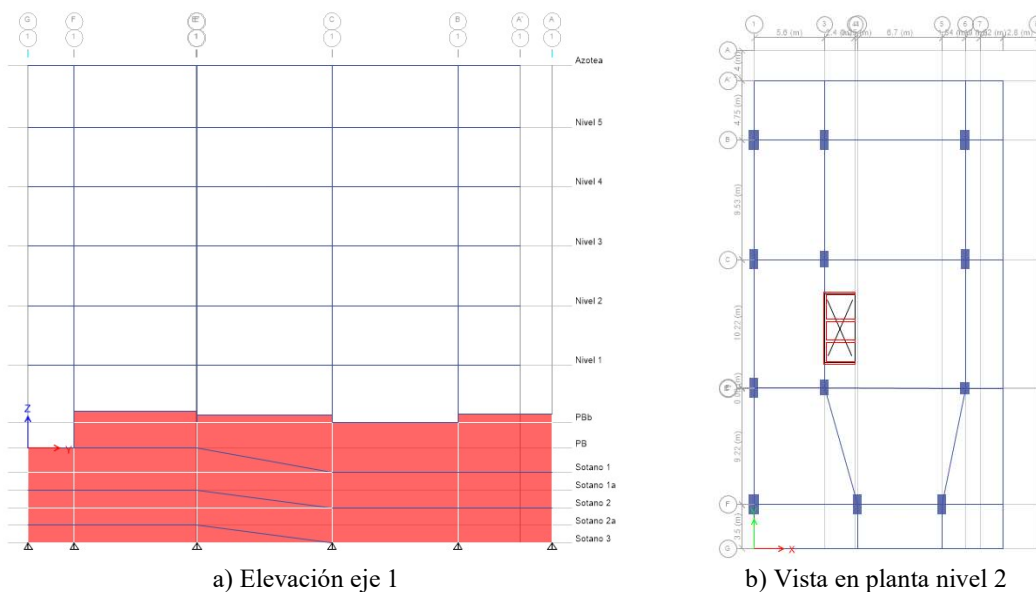


Figura 1. Vista generales del edificio estudiado

En la Tabla 1 se muestran los niveles de la estructura, la altura total es de 28.98 m. Por su parte, en la Tabla 2 se muestran los elementos que conforman la estructura, siendo elementos rectangulares que van desde los 80 cm x 100 cm para las columnas y 40 cm x 60 cm para las trabes. Por su parte, los muros de concreto van desde 20 cm de espesor hasta 50 cm.

Tabla 1 . Alturas de entrepiso

ID	Piso	Altura de entrepiso, m	Altura absoluta, m
10	Azotea	-	28.98
9	N5	4.68	24.30
8	N4	4.50	19.80
7	N3	4.50	15.30
6	N2	4.50	10.80
5	N1	4.50	6.30
4	PB	4.35	1.95
3	S1	3.75	-1.80
2	S2	2.70	-4.50
1	S3	2.70	-7.20

Tabla 2 . Elementos estructurales

Elemento	Sección, cm x cm	Niveles
Columna	80 x 160	S3 – N5
Columna	70 x 160	S3 – N5
Columna	70 x 130	PB – N5
Columna	80 x 100	PB – N5
Trabe	30 x 100	PB – N1
Trabe	35 x 80	N1 – Azotea
Trabe	50 x 100	PB – Azotea
Trabe	50 x 120	S2, PB – Azotea
Trabe	60 x 40	S2 – PB
Trabe	60 x 100	PB
Muro de concreto	Espesor de 20 cm	PB – N5
Muro de concreto	Espesor de 30 cm	S3- S1
Muro de concreto	Espesor de 50 cm	S3- S1

Las cargas consideradas para el análisis de la estructura fueron las siguientes: sobrecarga muerta (SCM) de 450 kg/m<sup>2</sup> para los niveles 1 al 5 y 360 kg/m<sup>2</sup> para azotea; carga viva instantánea (CVIns) de 100 kg/m<sup>2</sup> para los niveles 1 al 5 y 70 kg/m<sup>2</sup> para azotea; carga viva máxima (CVMax) de 190 kg/m<sup>2</sup> para los niveles 1 al 5 y 100 kg/m<sup>2</sup> para azotea.

### 3. PROPUESTA DE REFORZAMIENTO CON CONTRAVENTEOS RESTRINGIDOS AL PANDEO (CRP)

La propuesta de reforzamiento se muestra en la Figura 2. En la Figura 2a se muestra la ubicación de los CRP en planta, sombreados con línea roja. De la Figura 2b a la Figura 2e se muestran las elevaciones donde se proyectaron CRP, los cuales ascendieron a 48 CRP distribuidos en 4 ejes, 8 dispositivos por nivel. En la

Tabla 3 se muestran las características de los disipadores considerados y obtenidos de la metodología propuesta por Terán & Virto (Terán & Virto, 2009).

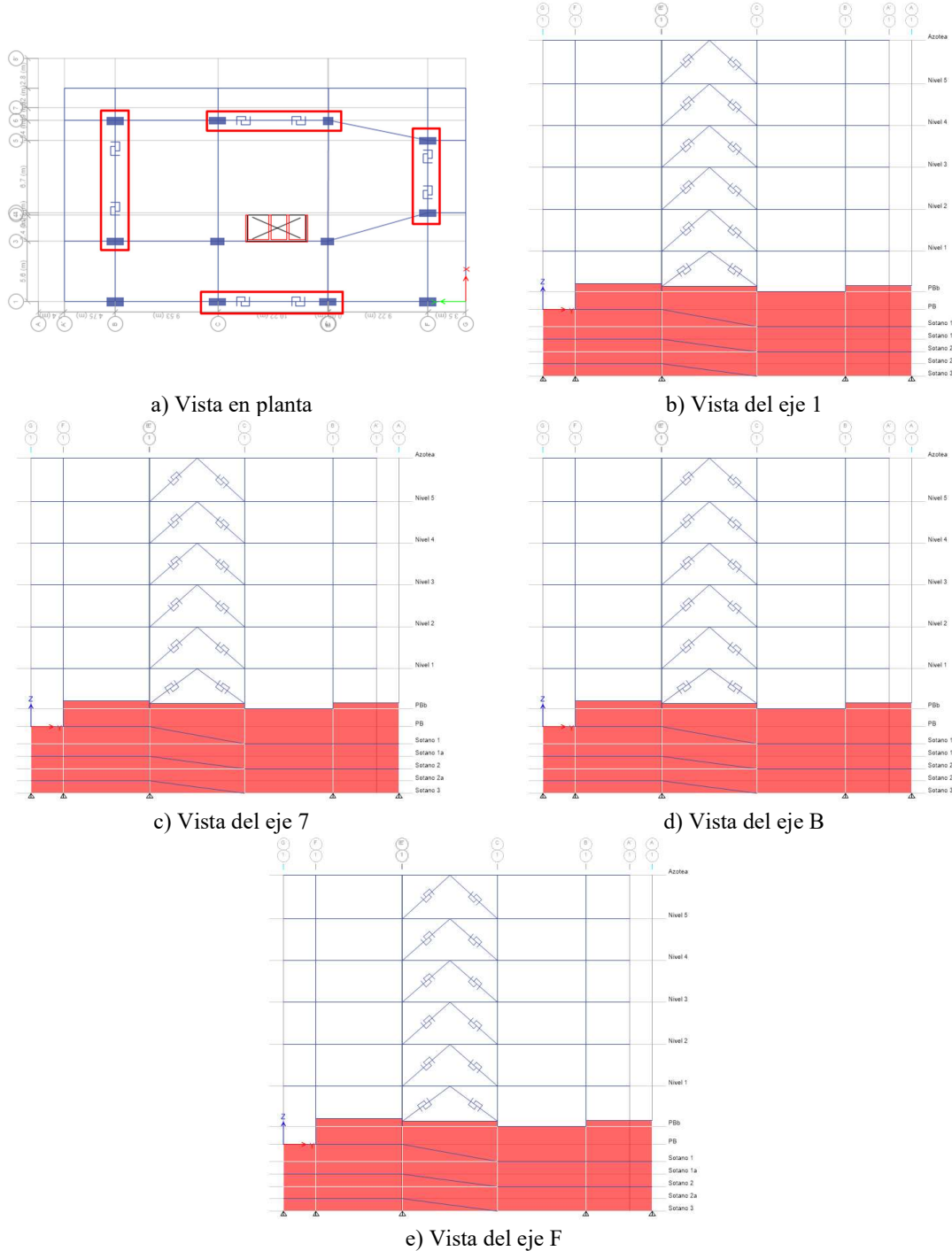


Figura 2. Propuesta de reforzamiento con CRP

Tabla 3 . Características de los disipadores tipo CRP

Tipo de disipador	Cantidad	Rigidez (t/m)	Carga fluencia (t)	Relación de rigidez post-fluencia	Área del núcleo del CRP (cm <sup>2</sup> )	Niveles
1	12	8,000	40	0.016	11.7	PB-N1
2	36	4,500	20	0.016	5.8	N2-N5

La metodología empleada realiza un diseño basado en el control de los desplazamientos laterales, considerando el uso de osciladores de un grado de libertad, estimando un periodo objetivo ( $T_{obj}$ ) por medio de factores de correlación entre un oscilador de un grado de libertad y una estructura de múltiples grados de libertad.

El primer paso es estimar el desempeño estructural deseado, de acuerdo con las NTC-DS (NTC-DS, 2023) publicadas el presente año, las estructuras del grupo A deberán tener una distorsión máxima  $\gamma_{OI}$  de 0.0075, siendo este valor el objetivo deseado para el proyecto de refuerzo.

Se calculó el desplazamiento equivalente de una estructura con un oscilador de un grado de libertad,  $\delta_{S1GL}$  con la siguiente ecuación:

$$\delta_{S1GL} = \frac{\delta_{Max}}{\alpha} \quad (1)$$

Donde  $\delta_{Max}$  es el desplazamiento lateral máximo asociado al nivel de desempeño y  $\alpha$  es el cociente de corrección, su valor se obtuvo de la Tabla 4.

Tabla 4. Valores sugeridos para  $\alpha$ , (Terán y Vitró, 2009)

Número de pisos	$\mu_{Max} = 1$	$\mu_{Max} = 2 +$
1	1.0	1.0
2	1.2	1.1
3	1.3	1.2
5+	1.4	1.2

El desplazamiento lateral máximo  $\delta_{Max}$  se obtiene con la siguiente expresión:

$$\delta_{Max} = \frac{\gamma_{OI} H}{CD} \quad (2)$$

Donde  $CD$  es un coeficiente de distorsión máxima entre el valor máximo y el valor promedio, su valor se puede obtener de la Tabla 5.  $H$  es la altura total de la estructura.

Tabla 5. Valores sugeridos para  $CD$ , (Terán y Vitró, 2009)

$\mu_{Max}$	CD	
	Estructura regular	Estructura irregular
1	1.2	1.5
2+	1.2	1.5

La ductilidad máxima  $\mu_{Max}$  se obtiene de acuerdo con lo siguiente:

$$\mu_{Max} = \frac{\mu_{CRP}}{F_{Du}} \quad (3)$$

Donde  $\mu_{CRP}$  es la ductilidad del contraventeo restringido al pandeo. Mientras que  $F_{Du}$  es el factor de ductilidad obtenido de la Tabla 6. Finalmente, para calcular la ductilidad del CRP se utiliza la siguiente ecuación:

$$\mu_{CRP} = \frac{K_f \gamma_{OI} h \cos(\theta)}{\varepsilon L_{CRP}} \quad (4)$$

Donde  $K_f$  es el factor modificación de rigidez de un CRP,  $\theta$  es el ángulo de inclinación del CRP,  $h$  es la altura del entrepiso,  $\varepsilon$  es la deformación unitaria del acero y  $L_{CRP}$  es la longitud del CRP

Tabla 6. Valores sugeridos para  $F_{Du}$ , (Terán y Virtro, 2009)

Número de pisos	$\mu_{CRP} = 2$	$\mu_{CRP} = 6$
5-	1.0	1.1
10	1.0	1.1
20	1.1	1.2
30	1.2	1.3
40+	1.3	1.4

Al emplear la metodología anterior, el desplazamiento objetivo para un oscilador de un grado de libertad es de 14.1 cm, en la Tabla 7 se muestra los valores de los parámetros empleados.

Tabla 7. Cálculo de  $\delta_{S1GL}$

Dirección	$\theta$	$L_{CRP}$ [ cm ]	$\mu_{CRP}$	$F_{Du}$	$\mu_{Max}$	CD	$\alpha$	$\delta_{Max}$ [ cm ]	$\delta_{S1GL}$ [ cm ]
X	53	450	3.88	1.05	3.7	1.2	1.2	16.9	14.1
Y	42	538	4.82	1.07	4.5	1.2	1.2	16.9	14.1

Empleando la información que brinda el Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID, 2023), se calcularon los espectros de desplazamiento para cada dirección y fuente sísmica, considerando el valor de ductilidad mostrado en la Tabla 7 (3.7 y 4.5), el amortiguamiento crítico de 2.5% y comportamiento elastoplástico perfecto. La componente 1 de los acelerogramas se orientó a la dirección X, mientras que la componente 2 se orientó a la dirección Y.

En la Figura 3 y Figura 4 se muestran los espectros de respuesta de desplazamiento para ambas direcciones. Se observa que un periodo de 0.75 s cumpliría con los objetivos estipulados, por lo que fue el valor de periodo seleccionado.

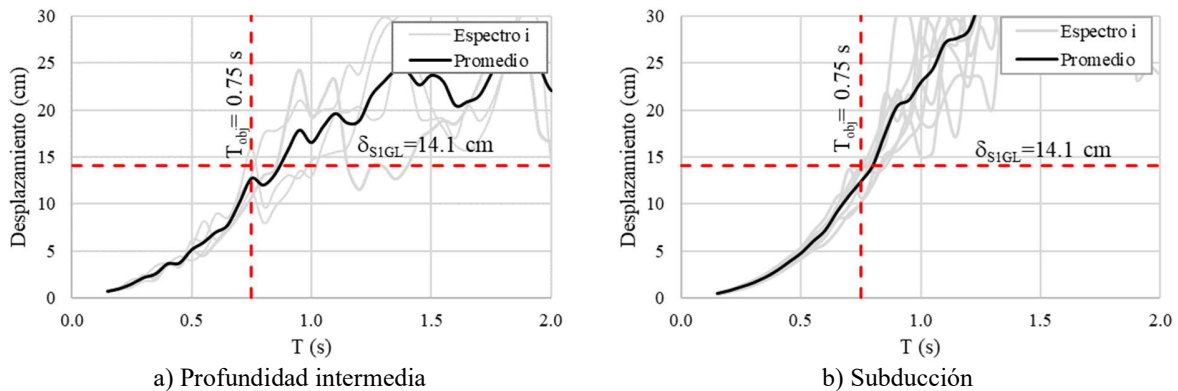


Figura 3. Espectros de respuesta de desplazamiento para dirección X

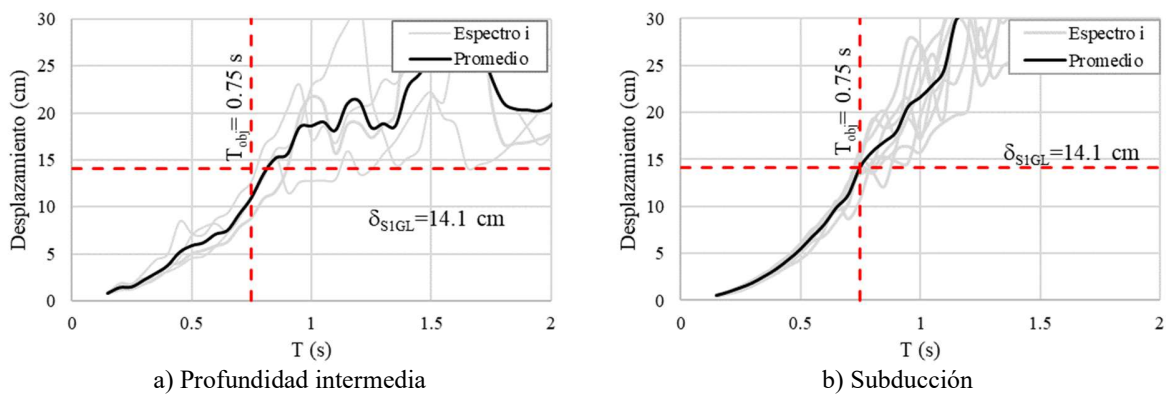


Figura 4. Espectros de respuesta de desplazamiento para dirección Y

## 4. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

Se realizó un modelo numérico tridimensional de la estructura en el programa ETABS (ETABS, 2023) con la finalidad de estudiar el comportamiento de la estructura rehabilitada. Las características de dicho modelo, así como los resultados se muestran a continuación:

### 4.1. Modelación numérica

La Figura 5 muestra el modelo desarrollado en ETABS (ETABS, 2023). Las columnas y trabes se modelaron como elementos tipo barras, mientras que los muros y losas se modelaron como elementos tipo área. Los CRP se modelaron por medio de resortes tipo “link Plastic Wen” en ETABS con las propiedades mostradas en la Tabla 3. Se pueden apreciar los elementos tipo columna y trabe en color azul, los elementos tipo muro en color rojo, el sistema de piso se observa en color gris y finalmente, los CRP se muestran en resortes color verde.

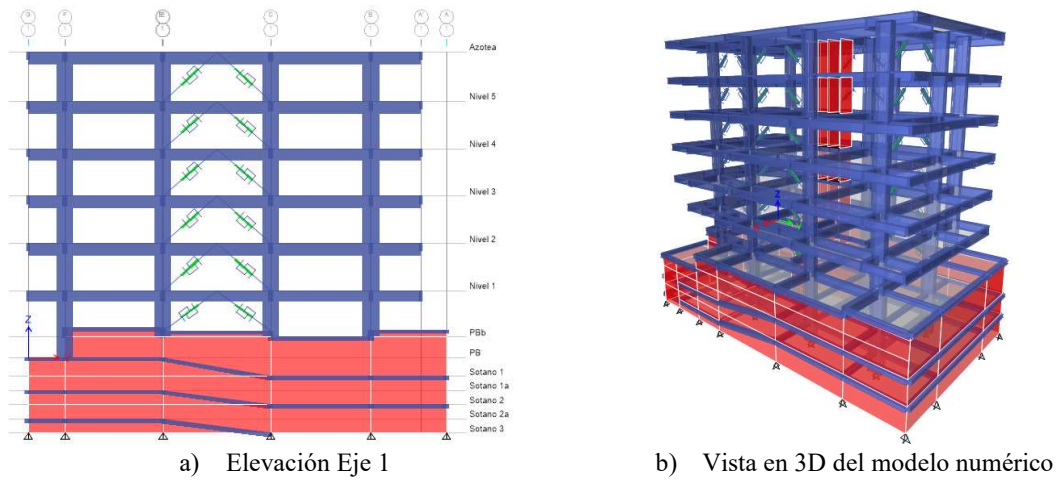


Figura 5. Modelo de la estructura en ETABS

## 4.2. MOVIMIENTOS SÍSMICOS

La sección 6.2.1 de las NTC-DS en su versión 2020 define los criterios para la selección y escalamiento de movimientos sísmicos. Para el análisis dinámico no lineal se consideraron doce pares de acelerogramas sintéticos, 4 pares correspondientes a sismos de profundidad intermedia y 8 pares de sismos de subducción, mismos que fueron proporcionados por la herramienta SASID (SASID, 2020).

Los espectros de peligro uniforme (EPU) para cada fuente sísmica se muestran en la Figura 6. Se observa que para cada fuente sísmica hay cuatro espectros de peligro uniforme, asociados a una época diferente, debido a la rigidización del suelo de la Ciudad de México, dichas curvas se muestran en color naranja. Por su parte, en línea discontinua color negro se muestra la envolvente.

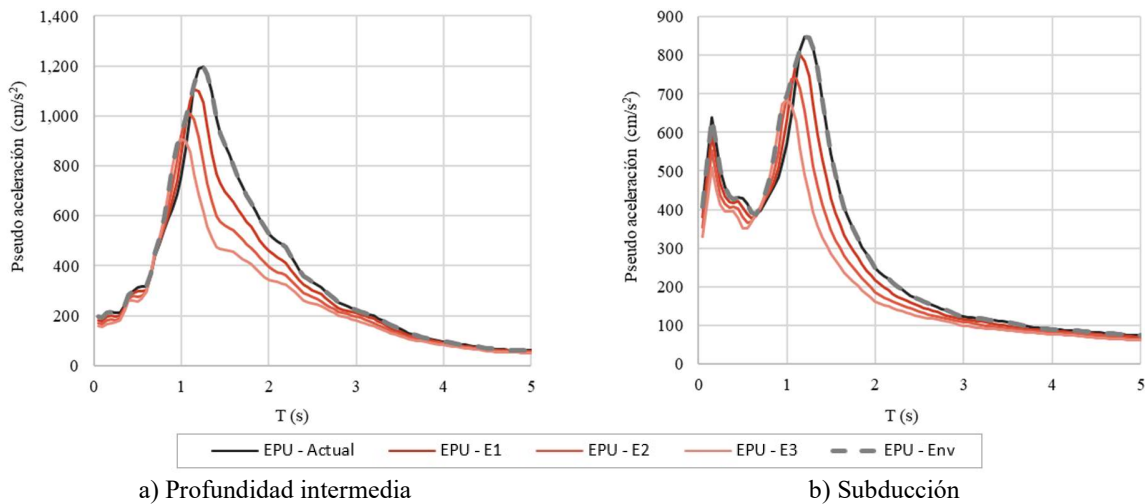


Figura 6. Espectros de peligro uniforme para ambas fuentes



A los registros sísmicos se les realizó un procesamiento, que consistió en: corrección por línea base; aplicación de filtro tipo pasa banda para un intervalo de frecuencias entre 0.1 y 20 Hz (considerando 4 polos); reducción de la longitud de la señal utilizando el parámetro de intensidad de Arias desde 0.05% hasta 99.95%; y un suavizado de extremos (taper) cosenoidal del 5% de la longitud total de la señal. En las Figura 7 y Figura 8 se presentan los acelerogramas procesados con las características mostradas en la Tabla 8.

Tabla 8. Características de los acelerogramas sintéticos (SASID, 2020)

Acelerograma	Fuente	# de puntos	$\Delta t$ , s	Acel. Máx. absoluta (gal)	
				Dir. X	Dir. Y
1	Profundidad intermedia	6,295	0.01	144	166
2	Profundidad intermedia	6,183	0.01	159	168
3	Profundidad intermedia	5,639	0.01	130	145
4	Profundidad intermedia	5,491	0.01	119	137
5	Subducción	14,617	0.01	162	151
6	Subducción	14,508	0.01	141	158
7	Subducción	14,276	0.01	153	139
8	Subducción	9,704	0.01	139	144
9	Subducción	10,274	0.01	142	159
10	Subducción	14,288	0.01	147	136
11	Subducción	9,959	0.01	125	117
12	Subducción	14,838	0.01	119	122

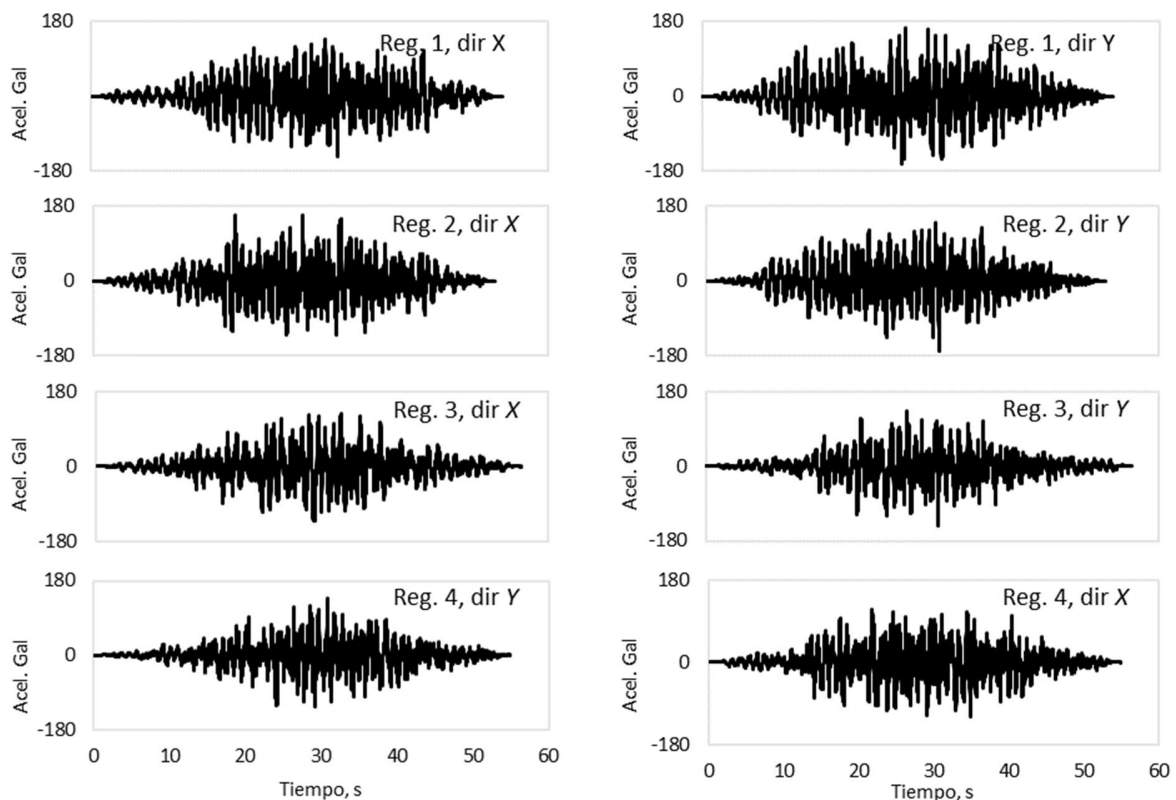


Figura 7. Registros sísmicos de profundidad intermedia

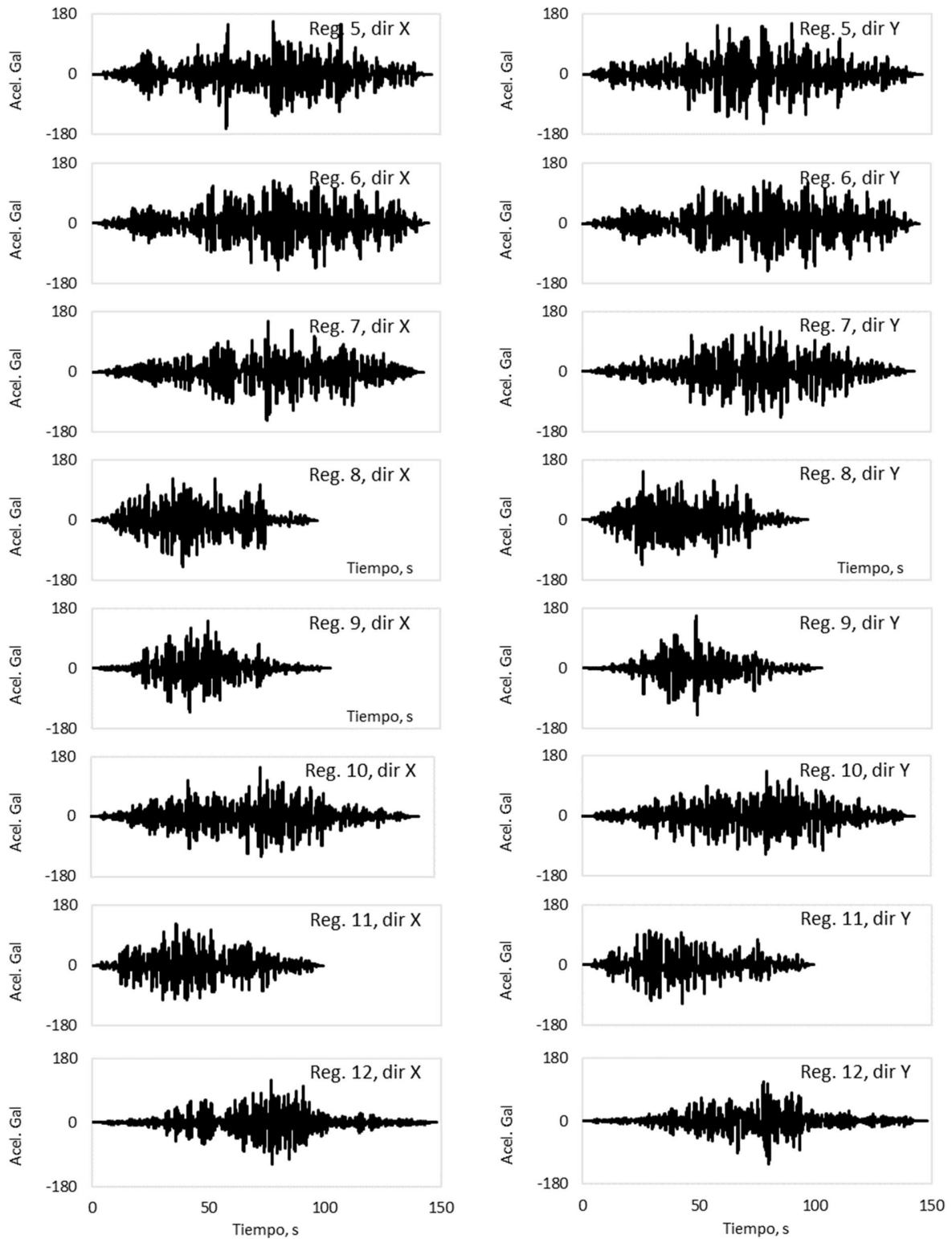


Figura 8. Registros sísmicos de subducción

De acuerdo con los requerimientos de las NTC-DS (NTC-DS, 2020), el promedio de los espectros de pseudo-aceleración deben ser semejantes a la envolvente de los espectros de peligro uniforme (EPU), el intervalo de interés es de 0.1 y 1.5 veces el periodo de vibrar de la estructura. Dado que el periodo fundamental de vibrar de la estructura es de 0.71 s, el intervalo de interés es de 0.071 s hasta 1.06 s. Por lo anterior, los acelerogramas se afectaron por factores de escala de 1.12 y 1.06 para sismos de profundidad intermedia y de subducción, respectivamente. Además, se consideró el factor de importancia de 1.5 por lo que los factores empleados fueron de 1.68 y 1.59. En la Figura 9 se presentan en color gris los espectros de respuesta de pseudo-aceleración de cada pareja de acelerogramas y en línea de color negro el promedio. Por su parte, en línea discontinua color azul se muestra la envolvente del espectro de peligro uniforme. Para identificar la zona de interés del análisis (0.1Te a 1.5Te) se sombreó en color verde dicho rango de periodos. Se aprecia que el promedio de los acelerogramas es similar que la envolvente de los EPU.

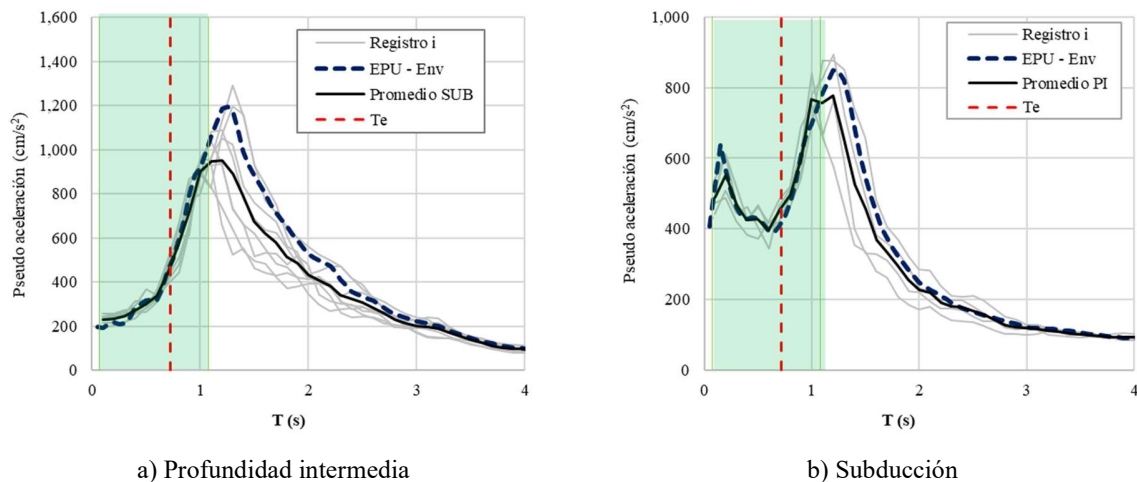


Figura 9. Espectros SRSS escalados y envolvente del espectro EPU

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Modos de vibrar

En la Figura 10 se muestran los primeros tres periodos de vibrar, se observa que el modo fundamental de vibrar es en dirección  $X$  con un valor de  $T_e = 0.71$  s, el segundo modo en dirección  $Z$  con un valor de  $T_e = 0.68$  s. Finalmente, el tercer modo de vibrar en dirección  $Y$  tiene un valor  $T_e = 0.45$  s.

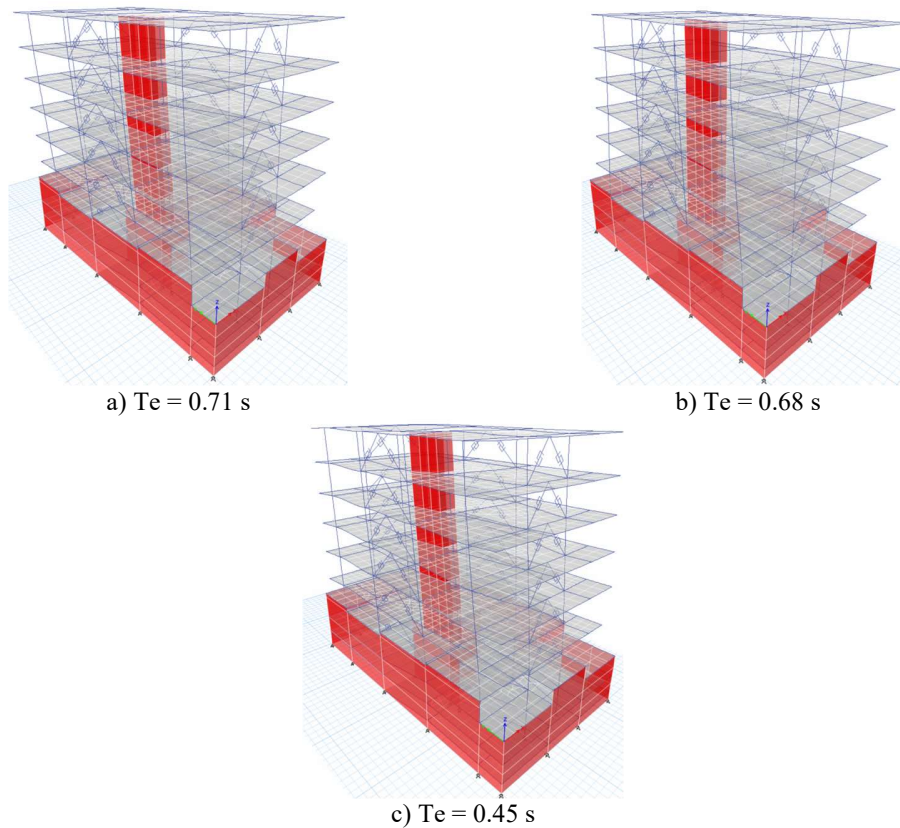


Figura 10. Modos de vibrar de la estructura con CRP

En la Tabla 9 se muestra la comparación de periodos de vibrar entre la estructura previo a la rehabilitación estructural y posterior a la implementación de los disipadores CRP, se aprecia que el uso de CRP reduce el efecto de torsión para el modo fundamental de vibrar y reduce su valor, pasando de 0.81 s a 0.71 s.

Tabla 9. Periodos de vibrar de la estructura con y sin refuerzo

Modo	Estructura sin rehabilitación (sin CRP)			Estructura rehabilitada (con CRP)		
	Valor	Dirección	Participación modal acumulada	Valor	Dirección	Participación modal acumulada
1	0.81	Z	31.2%	0.71	X	44.4%
2	0.77	X	44.2%	0.68	Z	31.6%
3	0.46	Y	44.0%	0.45	Y	44.3%
4	0.24	Z	61.1%	0.22	Z	73.1%
5	0.22	X	83.3%	0.21	X	90.3%
6	0.13	Y	77.4%	0.12	Y	87.5%

## 5.2. Desplazamientos y distorsiones de entrepiso

En la Figura 11; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 12 se muestran los desplazamientos laterales y distorsiones de entrepiso, en línea gris se observan los resultados de los registros para la estructura rehabilitada (con CRP) y en color negro se muestra su promedio. Para la estructura en su condición original se muestran los resultados promedio (sin CRP) en color verde. En la Figura 11 se observa

que los desplazamientos promedio de la estructura original son iguales a 22.3 cm y 8.2 cm en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente. La estructura rehabilitada con CRP presentó desplazamientos promedio de 12.8 cm y 4.7 cm en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente. De acuerdo con la metodología empleada se estimó que el desplazamiento sería en dirección  $X$  13.04 cm y en dirección  $Y$  6.3 cm, lo cual representa una diferencia respecto a lo obtenido en los análisis numéricos del 1.9% y 34% en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente.

Las distorsiones máximas de entrepiso se observan en la Figura 12, para la estructura original se tiene un valor máximo de 1.06% y 0.38% en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente, mientras que la estructura rehabilitada cuenta con valores de 0.61% y 0.22% en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente. El uso de CRP redujo en un 57% las distorsiones de entrepiso en ambas direcciones.

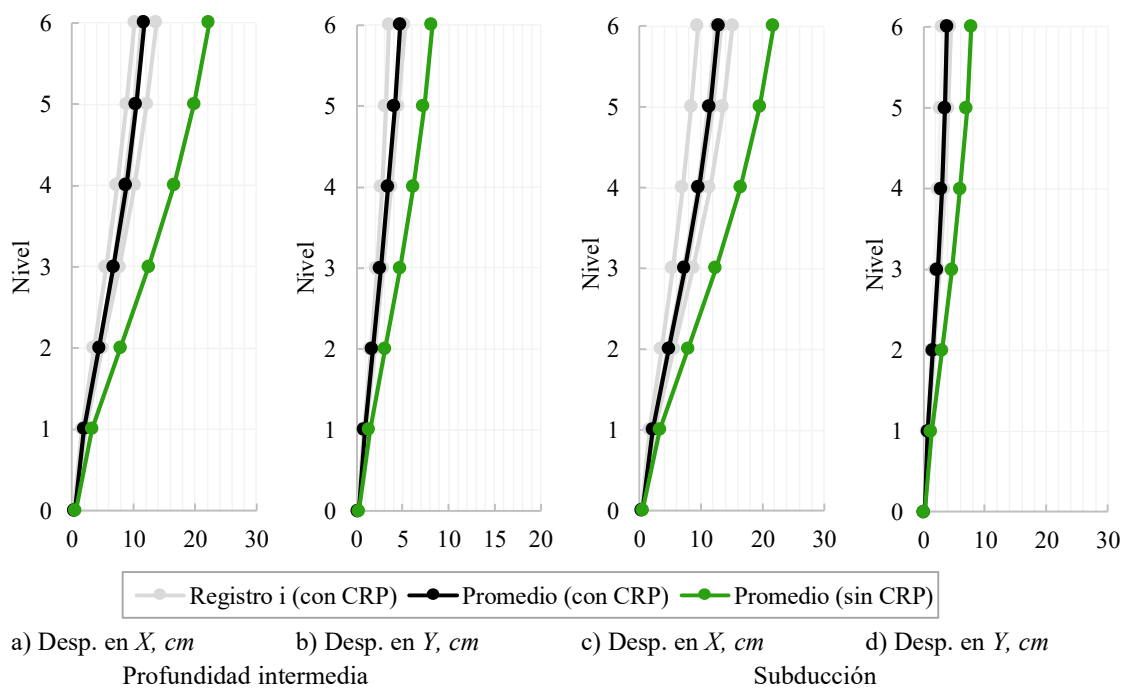


Figura 11. Perfiles de desplazamiento máximos

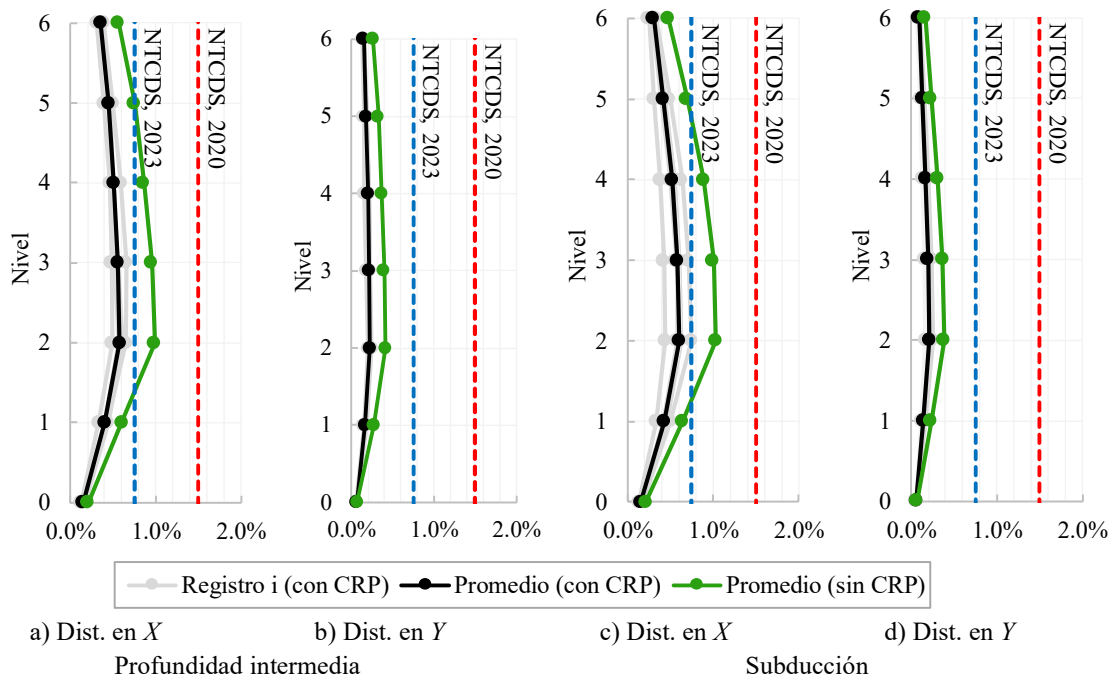
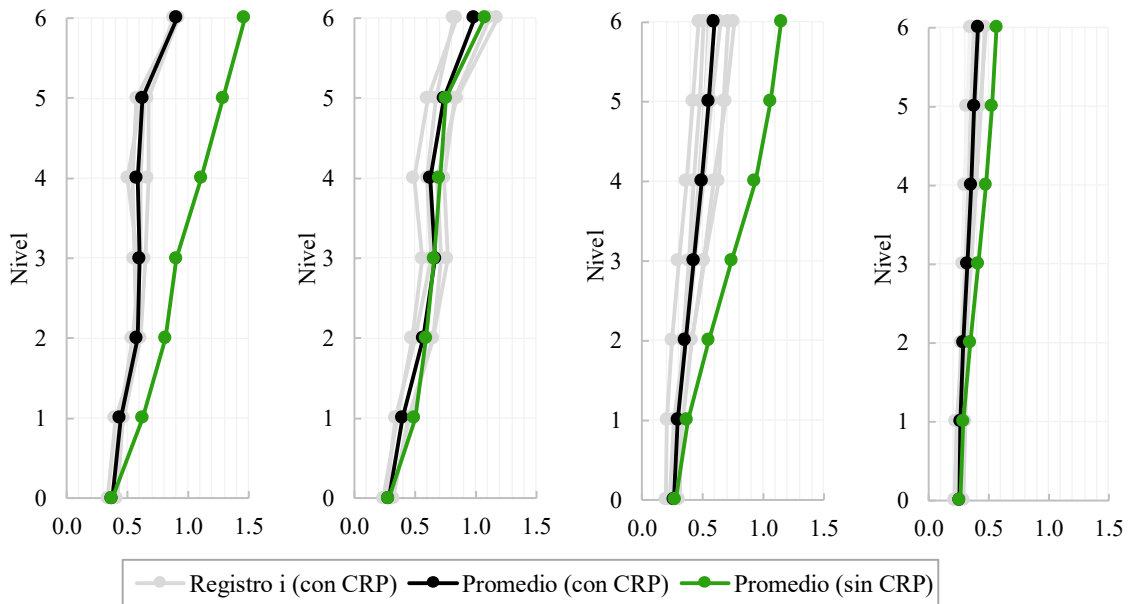


Figura 12. Perfiles de distorsión de entrepiso máximos

### 5.3. Aceleraciones y velocidades absolutas

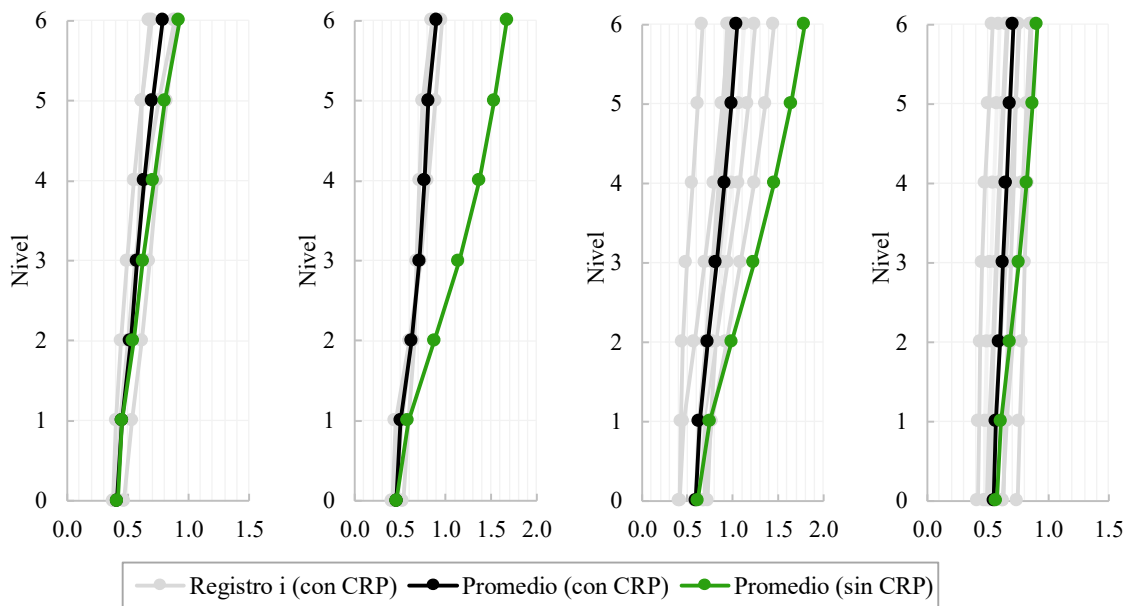
Las aceleraciones absolutas máximas se observan en la Figura 13, para la estructura original se tiene un valor máximo de 1.46 g y 1.07 g en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente, mientras que la estructura rehabilitada cuenta con valores de 0.91 g y 0.99 g en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente.

Por su parte, las velocidades máximas se observan en la Figura 14, para la estructura original se tiene un valor máximo de 1.79 m/s y 0.92 m/s en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente, mientras que la estructura rehabilitada cuenta con valores de 1.04 m/s y 0.79 m/s en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente.



a) Acel. abs. en X, g      b) Acel. abs. en Y, g      c) Acel. abs. en X, g      d) Acel. abs. en Y, g  
 Profundidad intermedia      Subducción

Figura 13. Perfiles de aceleración máxima absoluta de entpiso



a) Vel. abs. en X, m/s      b) Vel. abs. en Y, m/s      c) Vel. abs. en X, m/s      d) Vel. abs. en Y, m/s  
 Profundidad intermedia      Subducción

Figura 14. Perfiles de velocidad máxima absoluta de entpiso



#### 5.4. Curvas de histéresis de los CRP

Para conocer el nivel de disipación de energía de los disipadores tipo CRP se muestran sus curvas de histéresis en la Figura 15, obtenidas de los análisis. Se puede concluir que los CRP tienen un comportamiento estable a ductilidades por arriba de 3.0, disipando una gran cantidad de energía en cada dispositivo.

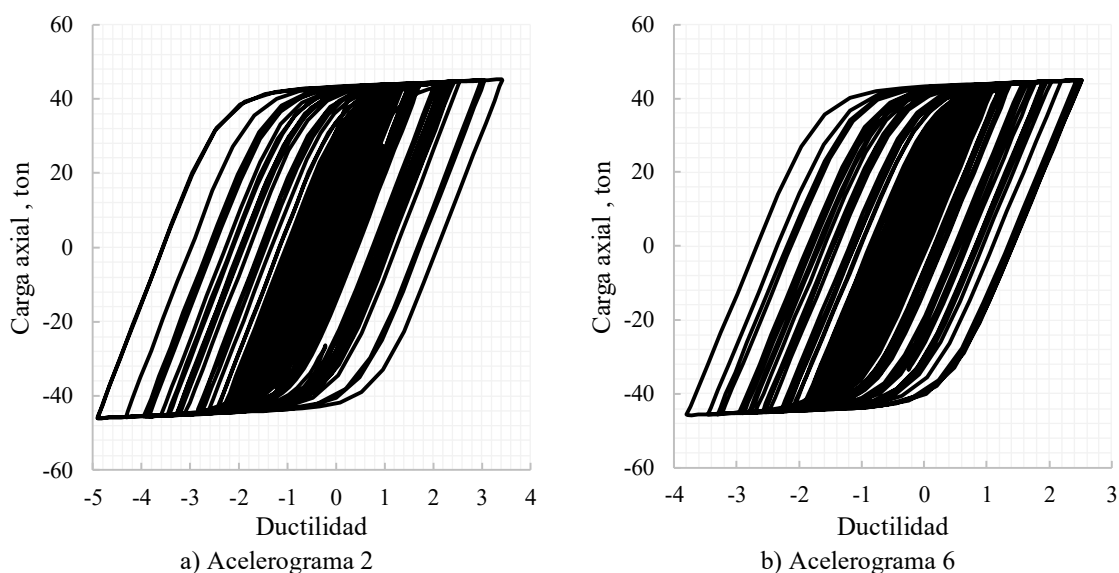


Figura 15. Curvas de histéresis de los CRP

## 6. CONCLUSIONES

Se realizó la evaluación de la propuesta de reforzamiento con contraventeos restringidos al pandeo de un hospital de cinco niveles mediante análisis dinámicos no lineales. La estructura fue sometida a un grupo de movimientos sísmicos escalados según los indicado en las NTC-DS (NTC-DS, 2020). Se revisó el comportamiento de la estructura en términos de desplazamiento lateral, distorsión de entrepiso, aceleración y velocidad absolutas. Del análisis se concluyó lo siguiente:

- La estructura en estudio en su condición actual no es capaz de cumplir con los requerimientos por desplazamientos que solicitan las NTC-DS (NTC-DS, 2023) por lo que fue necesario proponer una solución para cumplir con los requisitos establecidos.
- El empleo de los CRP como rehabilitación estructural ayudó a que la estructura redujera su efecto de torsión en el primer modo de vibrar, logrando que fuera en dirección  $X$ , pasando de 0.81 s a 0.71 s.
- La revisión de desplazamientos y distorsiones de entrepiso mostró que dichos parámetros fueron reducidos a un 57% en comparación con las condiciones originales de la estructura. Lo anterior reafirma la idea que el uso de CRP mejora el comportamiento estructural, lo cual se logra por medio de la reducción de desplazamientos laterales los cuales son los causantes de daños en elementos estructurales.



- El empleo de la metodología simplificada de Terán y Gilmore (Terán & Gilmore, 2009) presentó un error del 1.9% para el periodo fundamental de la estructura lo cual indica una buena y rápida aproximación de desplazamientos de la estructura equipada con CRP.
- El uso de CRP permite la disipación de energía por medio del comportamiento no lineal del material, el cual tiene un comportamiento estable a ductilidades mayores a 3.0.
- En términos de aceleración absoluta de piso el uso de CRP redujo hasta un 37%, mientras que la velocidad absoluta se disminuyó hasta en un 41%. Al reducir los valores máximos de aceleración y velocidad absoluta es posible disminuir los efectos de los sismos en los elementos no estructurales y contenidos.

Se concluye que el proyecto de rehabilitación considerando disipadores de energía tipo contraventeo restringido al pandeo (CRP) es beneficioso para la estructura.

## 7. REFERENCIAS

- ETABS (2023), Integrated Building Design Software, Versión 21.1.0, Computers and Structures Inc., California, Estados Unidos.
- NTCDS (2020), Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Gobierno de la Ciudad de México. Ciudad de México.
- NTCDS (2023), Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Gobierno de la Ciudad de México. Ciudad de México.
- RCCDMX (2017), Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México, Gobierno de la Ciudad de México.
- SASID (2020), Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño, <https://saside.unam.mx/webNormasCDMX/>
- Terán Gilmore A. y Virtro Cambray N. (2009), "Diseño basado en desplazamientos de edificaciones bajas rigidizadas con contravientos desadheridos", *Revista de ingeniería Sísmica No. 80 1-29*.