
DESEMPEÑO SÍSMICO DE UNA TORRE MÉDICA EMPLEANDO CONTRAVENTEOS RESTRINGIDOS AL PANDEO

*Ricardo Sánchez Vergara (1), Fernando Cueto Jiménez (2) Manuel Antonio Barraza
Guerrero (3), Ernesto Lluhen Ortiz (4)*

¹ Universidad Autónoma de Baja California (UABC), km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, 22810 Ensenada, BC.,
ricardo.sanchez@uabc.edu.mx.

² Dampo Systems S.A. de C.V. Copilco 76, Ciudad de México, 04340, *fernando.cueto@dampo.com.mx*

³ Universidad Autónoma de Baja California (UABC), km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, 22810 Ensenada, BC.,
barraza.manuel@uabc.edu.mx.

⁴ Universidad Autónoma de Baja California (UABC), km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, 22810 Ensenada, BC.,
ricardo.sanchez@uabc.edu.mx ernesto.lluhen@uabc.edu.mx.

V. Métodos y tecnologías sismo resistente innovadoras en la práctica profesional.

RESUMEN

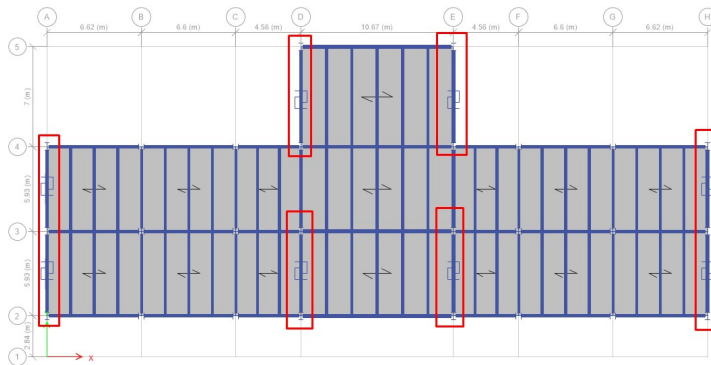
En el presente artículo se muestra el análisis del desempeño sísmico de una torre médica de 16 niveles localizada en Ensenada, Baja California. La edificación está basada por un sistema estructural de marcos de ductilidad baja en el sentido largo, mientras que en su sentido corto por un sistema dual de marcos de acero y contraventeos restringidos al pandeo (CRP). Para evaluar el desempeño sísmico de la estructura se utilizaron análisis dinámicos no lineales, variando la intensidad de diseño y calculando la curva de probabilidad de colapso. Se presentan los detalles y retos del diseño. Finalmente, se ofrecen recomendaciones y conclusiones de interés para los ingenieros de la práctica profesional involucrados en el diseño de estructuras nuevas equipadas con Contraventeos Restringidos al Pandeo.

1. INTRODUCCIÓN

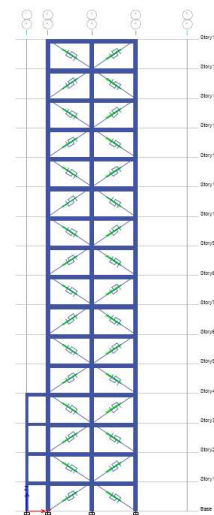
En este artículo se presentan los resultados del análisis de desempeño sísmico de un edificio de 16 niveles localizado en Ensenada, Baja California. El edificio está destinado a dar servicio hospitalario, estructurado mediante marcos de acero de ductilidad media en el sentido largo y en el sentido corto un sistema dual a base de marcos de acero y contravientos restringidos al pandeo (CRP). Por otro lado, se presenta una comparativa entre la estructura equipada con CRP y la estructura con contravientos convencionales (CC) tanto en su comportamiento estructural como en términos económicos. Finalmente, se presenta la curva de probabilidad de colapso de la estructura equipada con CRP.

2. PROPUESTA DE ESTRUCTURA CON CONTRAVIENTOS RESTRINGIDOS AL PANDEO (CRP)

La Figura 1 muestra la configuración del edificio con CRP. Éste cuenta con planta baja, 15 niveles y estructurada con marcos de acero de ductilidad media en el sentido largo y en el sentido corto por medio de un sistema dual a base de marcos de acero y contravientos restringidos al pandeo (CRP). El sistema de piso es a base de losacero. El acero usado en los elementos estructurales es de A-992 con esfuerzo de fluencia de $3,515 \text{ kg/cm}^2$.



a) Vista en planta



b) Vista eje A

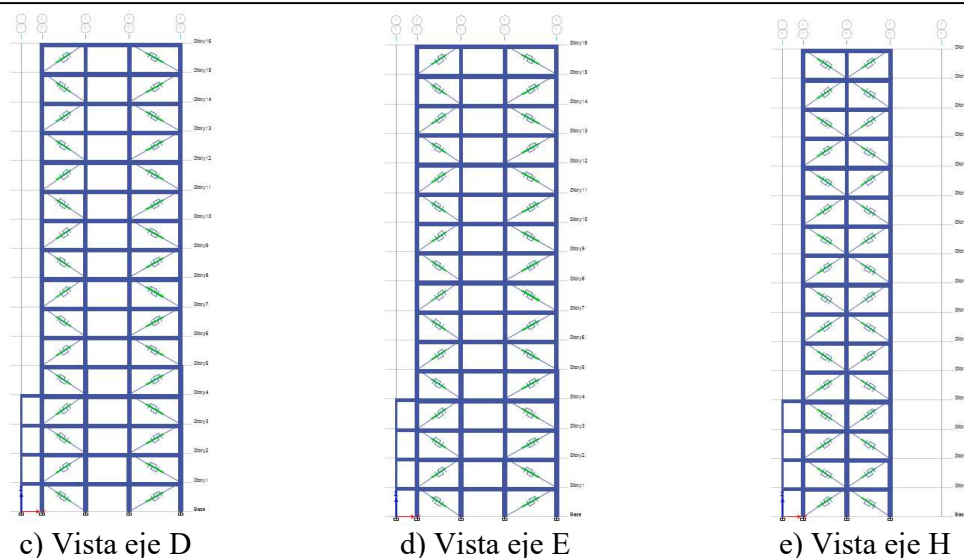


Figura 1. Vista generales del edificio con CRP

En la Tabla 1 se muestran los niveles de la estructura, la altura total es de 64.0 m. Por su parte, en la Tabla 2 se muestran los elementos de acero que conforman la estructura, siendo elementos IR para las columnas que van desde W10X54 hasta W18X258, y desde W12X26 hasta W21X68 para las traveses.

Tabla 1 . Alturas de entrepiso

ID	Piso	Altura de entrepiso, m	Altura absoluta, m	ID	Piso	Altura de entrepiso, m	Altura absoluta, m
17	Azotea	-	64	8	N7	4.0	28
16	N15	4.0	60	7	N6	4.0	24
15	N14	4.0	56	6	N5	4.0	20
14	N13	4.0	52	5	N4	4.0	16
13	N12	4.0	48	4	N3	4.0	12
12	N11	4.0	44	3	N2	4.0	8
11	N10	4.0	40	2	N1	4.0	4
10	N9	4.0	36	1	PB	4.0	0
9	N8	4.0	32				

Tabla 2 . Elementos de la estructura con CRP

Elemento	Sección	Niveles
Columna	W10X54	PB – N3
Columna	W14X145	N10 – N15
Columna	W14X159	N8 – N10

Elemento	Sección	Niveles
Columna	W14X193	PB – N4
Columna	W18X130	N11 – N15
Columna	W18X192	N5-N10
Columna	W18X234	N2-N4
Columna	W18X258	PB-N1
Trabe	W12X26	PB-N15
Trabe	W16X36	PB-N3
Trabe	W18X46	PB-N15
Trabe	W18X50	N5-N15
Trabe	W18X60	PB-N4
Trabe	W21X62	PB-N15
Trabe	W21X68	PB-N15

En la misma Figura 1 se observan la ubicación en planta y en elevación de los CRP, los cuales se encuentran en los ejes del sentido corto de la estructura y están marcadas en rectángulos color rojo. Se consideró el uso de 128 CRP distribuidos en 4 ejes, 8 dispositivos por nivel. En la Tabla 3 se muestran las características de los disipadores considerados.

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 ²)	Niveles
1	128	2,500	20	0.016	5.8	PB-N15

3. PROPUESTA DE ESTRUCTURA CON CONTRAVENTEOS CONVENCIONALES (CC)

Previo a la propuesta con CRP, se diseñó una solución considerando contraventeos convencionales, misma que se muestra en la Figura 2. Dicha solución se consideraron marcos de acero de ductilidad media en el sentido largo y en el sentido corto un sistema dual a base de marcos de acero y contravientos convencionales (CC). El sistema de piso fue el mismo que para la solución con CRP. El acero empleado fue A-992 con esfuerzo de fluencia de 3,515 kg/cm². En la Tabla 4 se muestran los elementos de acero que conforman la estructura para la propuesta con CC. En la Figura 2a se muestra la ubicación en planta de los CC, se aprecia que es la misma ubicación que para la propuesta con CRP.

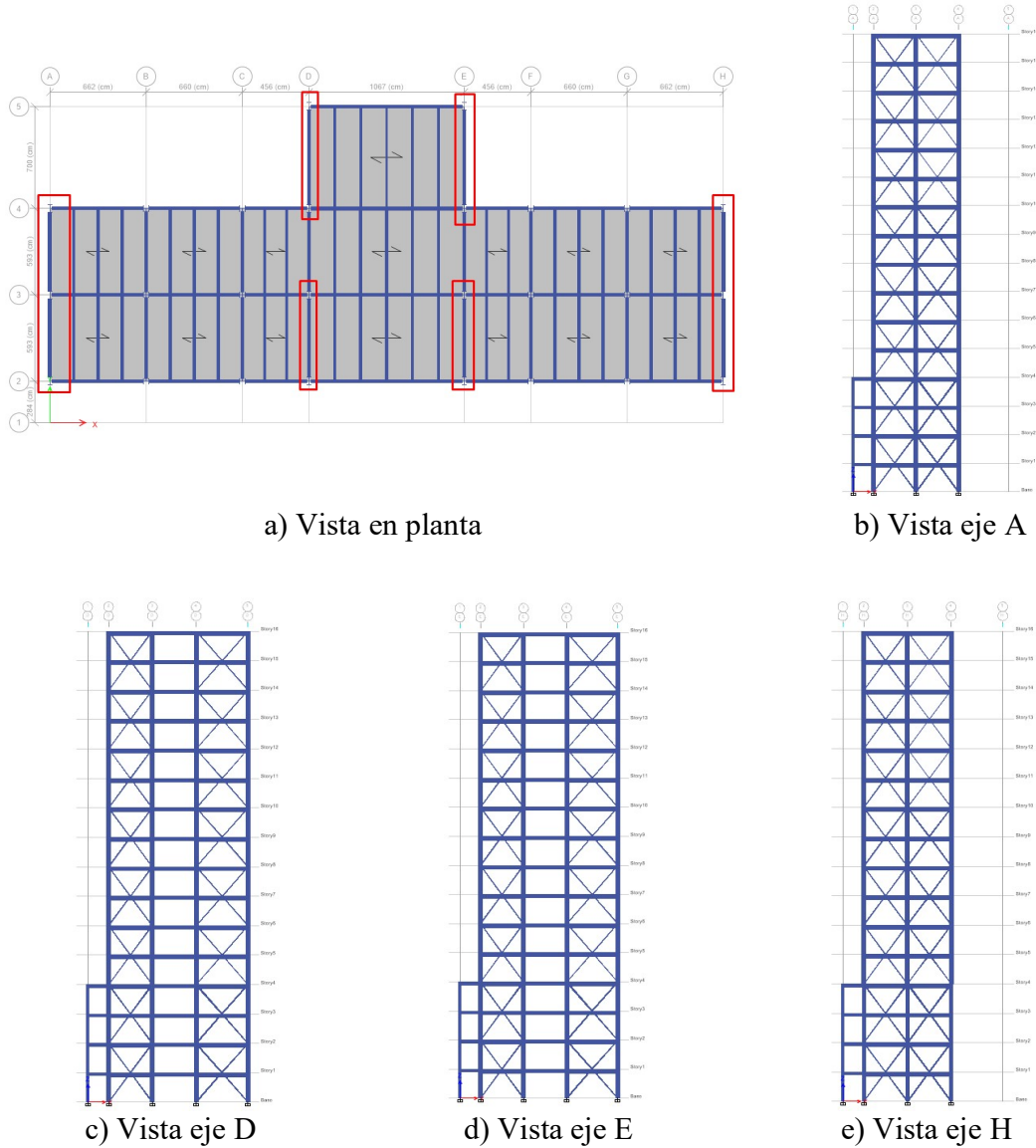


Figura 2. Vista generales del edificio con CC

Tabla 4 . Elementos de la estructura con CC

Elemento	Sección	Niveles
Columna	W10X54	PB – N3
Columna	W14X176	N10 – N15
Columna	W14X193	N3 – N9
Columna	W14X233	PB – N3
Columna	W14X311	PB – N3
Columna	W18X192	N0-N15

Elemento	Sección	Niveles
Columna	W18X234	N4-N9
Columna	W18X311	PB-N3
Trabe	W12X26	PB-N15
Trabe	W14X26	N14-N15
Trabe	W16X36	PB-N3
Trabe	W18X46	PB-N3, N10, N12, N15
Trabe	W18X50	N4-N15
Trabe	W18X60	PB-N3, N11
Trabe	W21X68	PB-N15
Contraventeo	HSS5X5X5/16	PB-N3
Contraventeo	HSS6X6X3/8	N4-N8
Contraventeo	HSS8X8X1/2	N9-N15

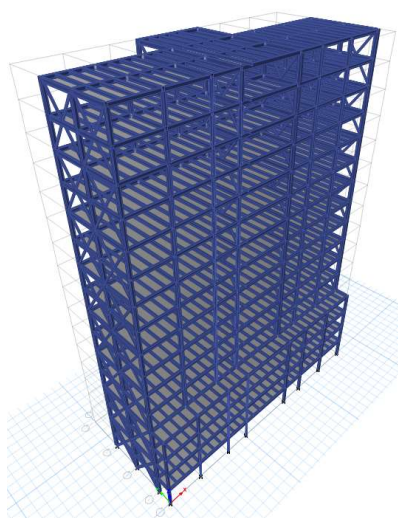
4. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

Se realizaron los modelos numéricos tridimensionales de ambas propuestas en el programa ETABS (ETABS, 2023) con la finalidad de estudiar su comportamiento. Las características de dichos modelos, así como los resultados se muestran a continuación.

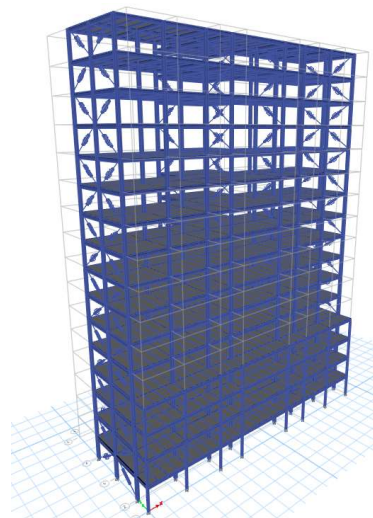
4.1. Modelación numérica

La Figura 3 muestra los modelos de la estructura con CC y CRP. Las columnas, trabes y CC se modelaron como elementos tipo barras mientras que las losas 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.

Las cargas consideradas para ambas estructuras fueron las siguientes en todos los niveles: sobrecarga muerta (SCM) de 390 kg/m², carga viva instantánea (CVIns) de 100 kg/m² y carga viva máxima (CVMax) de 170 kg/m².



b) Estructura con CC



b) Estructura equipada con CRP

Figura 3. Modelo de la estructura en ETABS

4.2. Movimientos sísmicos

De acuerdo con las Normas Técnicas complementarias para Diseño por sismo del Estado de Baja California (NTCDS-BC,2017) para los análisis dinámicos paso a paso establece que se pueden usar al menos cuatro pares de acelerogramas. Para este estudio se consideraron 12 pares de acelerogramas: seis pares corresponden a sismos reales de la fuente de peligro sísmico de importancia para la zona; los otros seis pares de acelerogramas se obtuvieron con el programa PRODISIS (PRODISIS, 2015).

A los registros se les realizó lo siguiente: 1) corrección por línea base; 2) aplicación de un filtro tipo pasa banda para un intervalo de frecuencias entre 0.1 y 20 Hz (considerando 4 polos); 3) reducción de la longitud de la señal utilizando el parámetro de intensidad de Arias desde 0.01% hasta 99.95%; y 4) aplicación de suavizado de extremos (taper) coseinodal del 5% de la longitud total de la señal. En la Tabla 5 se presentan las características de los acelerogramas y éstos se muestran en las Figura 4 y Figura 5.

Tabla 5. Características de los acelerogramas

Acelerograma	Fuente	# de puntos	$\Delta t, s$	Acel. Máx. absoluta (gales)	
				Dir. X	Dir. Y
Registro 1	22/11/2022, M 6.2, Las Brisas, B.C	5209	0.01	99	99
Registro 2	17/08/2020 M 5.1, Maneadero, B.C.	3238	0.01	97	98
Registro 3	09/02/2015 M 4.9, Maneadero, B.C.	5562	0.01	99	90
Registro 4	15/04/2022 M 4.5, El Sauzal, B.C.	1506	0.01	91	85
Registro 5	22/11/2022 M 4.5, Las Brisas, B.C.	5411	0.01	98	98

Acelerograma	Fuente	# de puntos	Δt , s	Acel. Máx. absoluta (gales)	
				Dir. X	Dir. Y
Registro 6	17/08/2020 M 4.5, San Vicente, B.C.	3843	0.01	97	98
Registro 7	PRODISIS	1079	0.01	203	228
Registro 8	PRODISIS	981	0.01	249	275
Registro 9	PRODISIS	1059	0.01	280	277
Registro 10	PRODISIS	1000	0.01	213	225
Registro 11	PRODISIS	1012	0.01	199	226
Registro 12	PRODISIS	1012	0.01	253	227

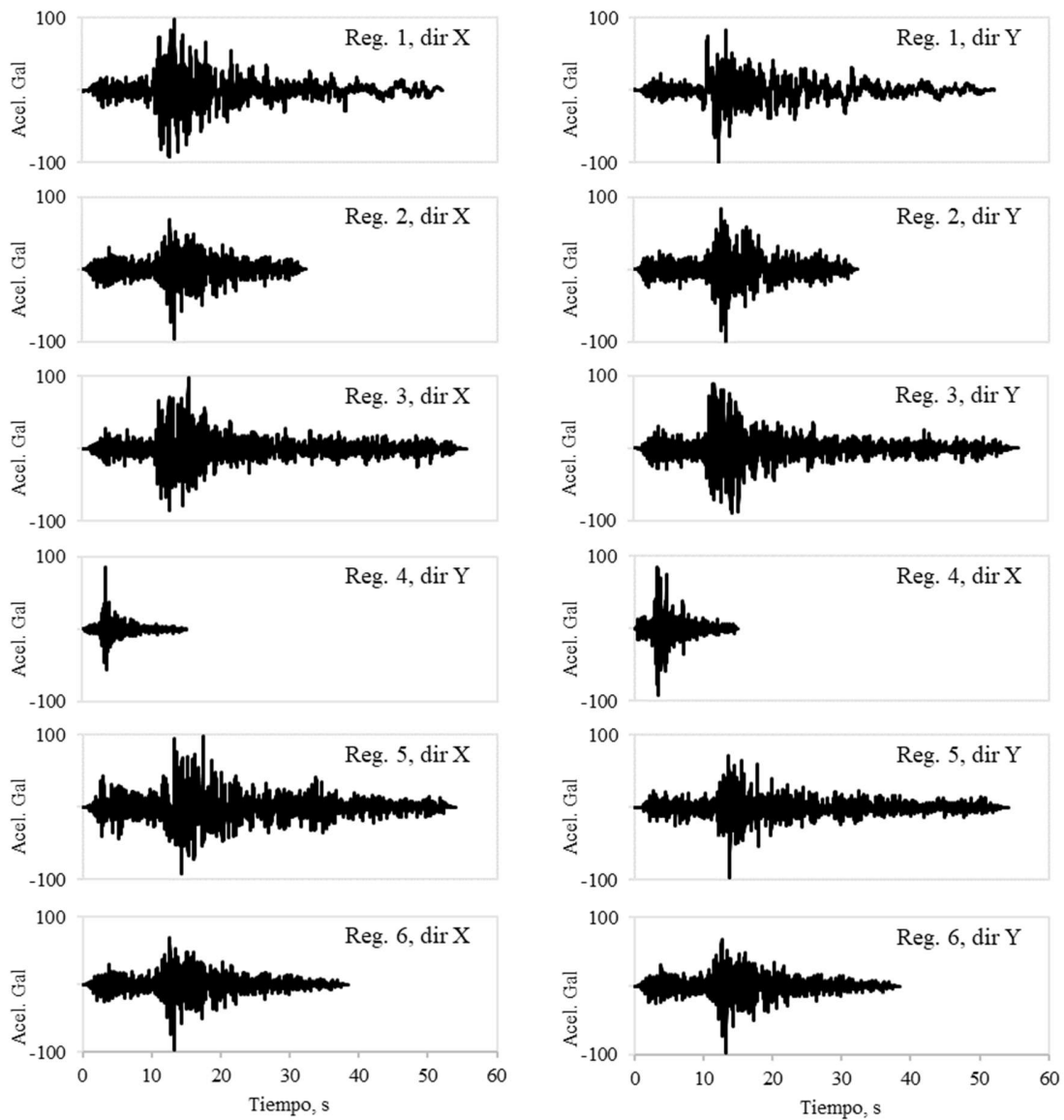


Figura 4. Registros sísmicos reales

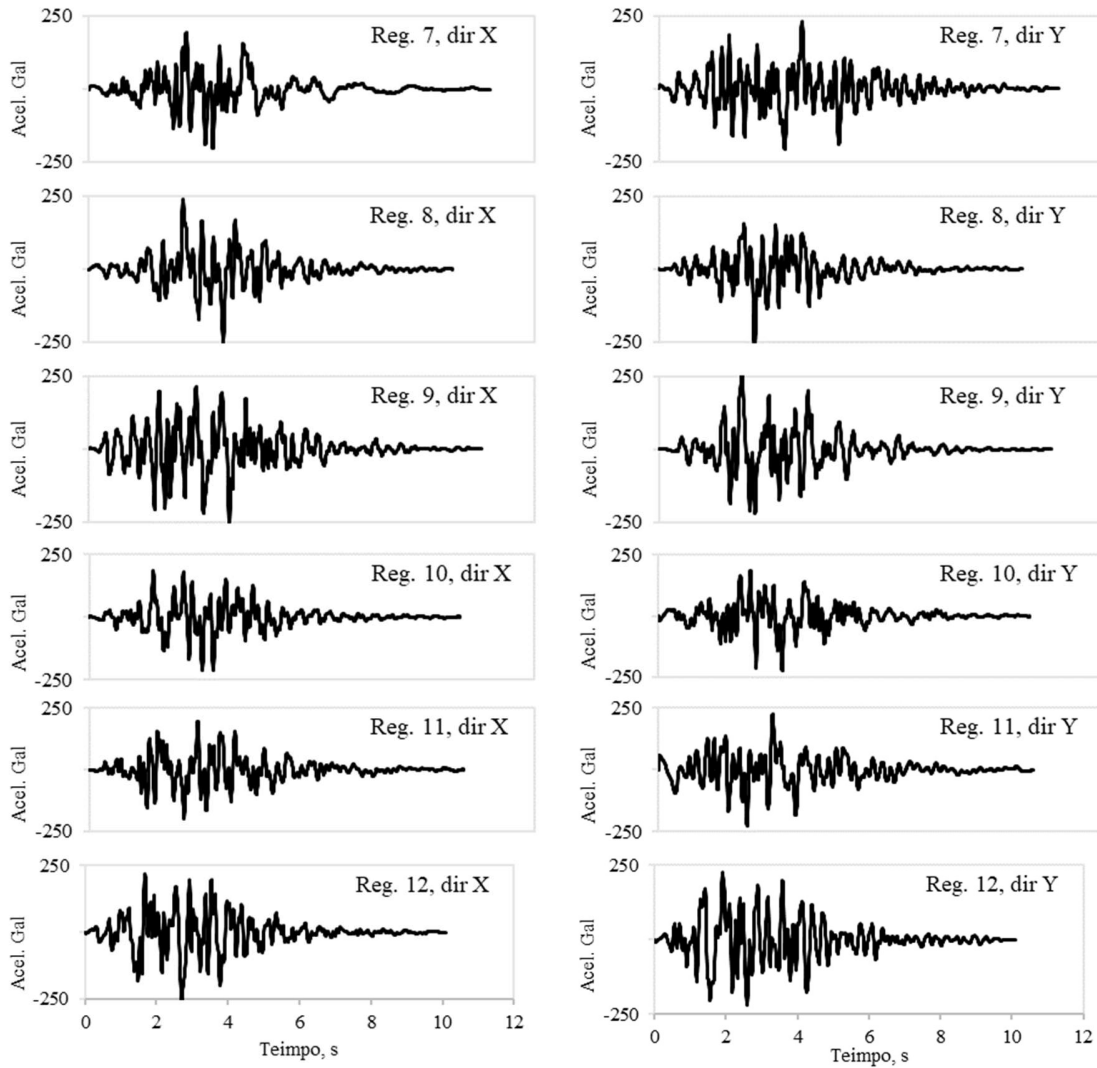


Figura 5. Registros sísmicos obtenidos de PRODISIS

5. RESULTADOS

5.1. Modos de vibrar

En la Figura 6 se muestran los primeros tres periodos de vibrar de la estructura con CRP, se observa que el modo fundamental de vibrar es en dirección X con un valor de $T_e = 3.27$ s, el segundo modo en dirección Y con un valor de $T_e = 2.33$ s. Finalmente, el tercer modo de vibrar en dirección Z tiene un valor $T_e = 1.99$ s.

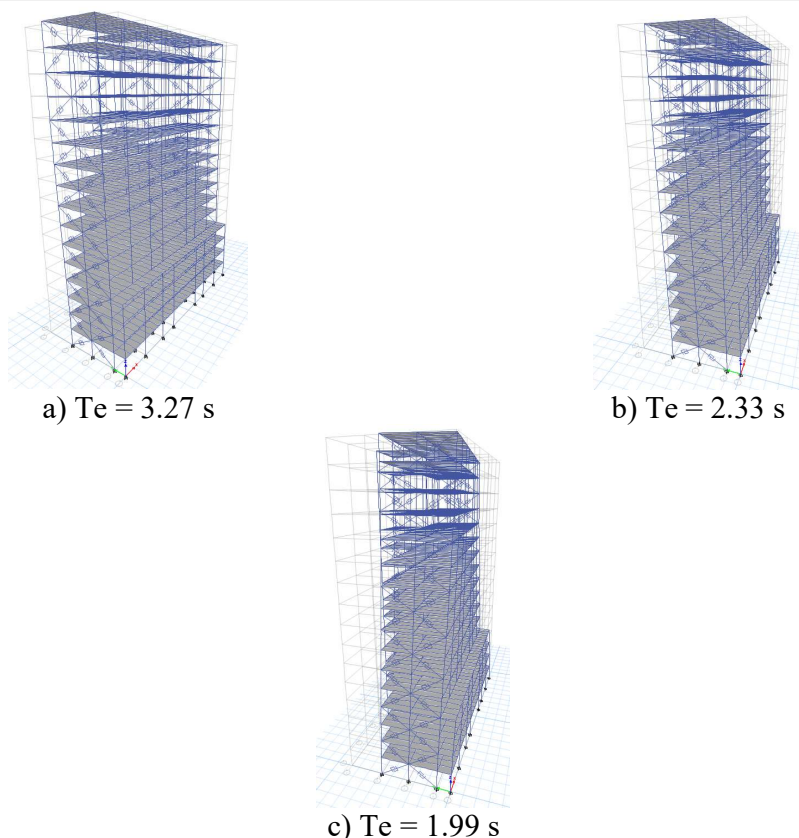


Figura 6. Modos de vibrar de la estructura con CRP

En la Tabla 6 se muestra la comparación de periodos de vibrar entre la estructura con CC y la estructura con los disipadores CRP. Se aprecia (observa que) los periodos fundamentales de vibrar entre la estructura con CC y la estructura con CRP son similares. Sin embargo, con el uso de CRP el modo fundamental de vibrar es mayor (3.27 s) que con el uso de CC (3.19 s).

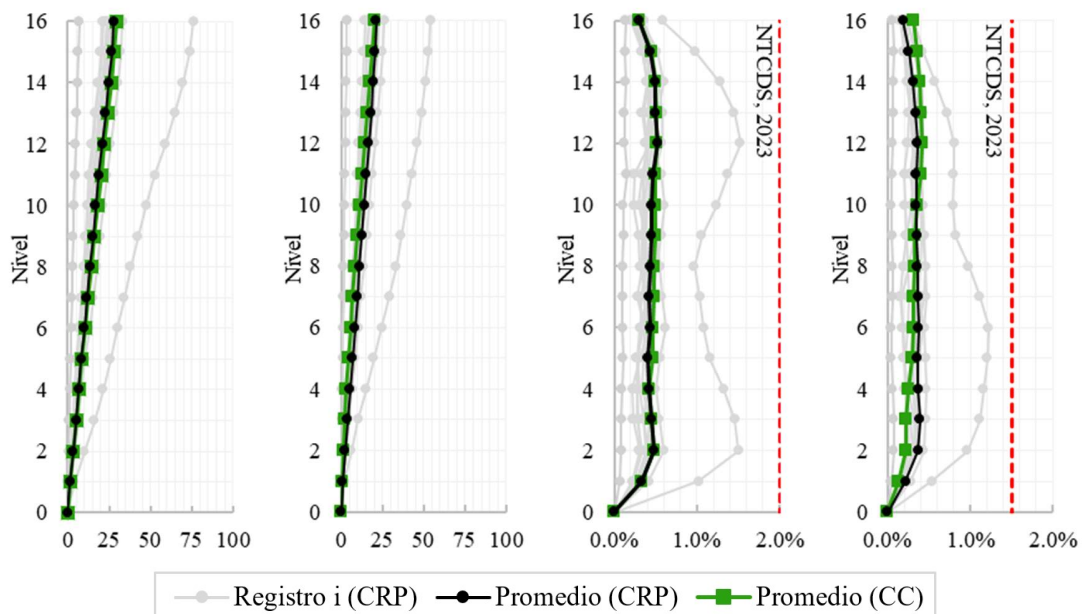
Tabla 6. Periodos de vibrar de la estructura CC y con CRP

Modo	Estructura con CC			Estructura con CRP		
	Valor	Dirección	Participación modal acumulada	Valor	Dirección	Participación modal acumulada
1	3.19	<i>X</i>	75.4%	3.27	<i>X</i>	75.6%
2	1.56	<i>Y</i>	65.3%	2.33	<i>Y</i>	74.2%
3	1.27	<i>Z</i>	64.7%	1.99	<i>Z</i>	73.5%
4	1.09	<i>X</i>	87.5%	1.13	<i>X</i>	88.0%
5	0.66	<i>Z</i>	78.9%	0.79	<i>Y</i>	88.2%
6	0.46	<i>Y</i>	84.3%	0.69	<i>Z</i>	76.94%

5.2. Desplazamientos laterales y distorsiones de entrepiso

En la Figura 7 se muestran los desplazamientos laterales y distorsiones de entrepiso, en línea gris se observan los resultados de los registros individuales para la estructura con CRP y en color negro se muestra su promedio. Finalmente, el promedio de los resultados de la estructura con CC se muestra en color verde. Los desplazamientos promedio de la estructura con CC son 29.2 cm y 20.1 cm en dirección X y Y , respectivamente. La estructura con CRP presentó desplazamientos promedio de 27.9 cm y 21.2 cm en dirección X y Y , respectivamente. En términos generales, los desplazamientos son muy similares entre ambas propuestas, con diferencias menores al 5%.

Las distorsiones máximas de entrepiso se observan en la Figura 7c y Figura 7d. Para la estructura con CC se tiene un valor máximo de 0.51% y 0.42% en dirección X y Y , mientras que la estructura con CRP cuenta con valores de 0.52% y 0.39% en dirección X y Y , respectivamente. El uso de CRP redujo un 7.1% las distorsiones máximas de entrepiso en comparación con la estructura equipada con CC.



a) Desp. en X , cm b) Desp. en Y , cm c) Dist. en X d) Dist. en Y

Figura 7. Perfiles de desplazamiento máximos y distorsiones

5.3. Aceleraciones y velocidades absolutas

Las aceleraciones absolutas máximas se observan en la Figura 8a y Figura 8b. Para la estructura con CC se tiene un valor máximo de 0.37 g y 0.59 g en dirección X y Y , respectivamente, mientras que la estructura con CRP cuenta con valores de 0.44 g y 0.41 g en dirección X y Y , respectivamente. Por lo anterior, se puede concluir que el uso de disipadores de energía reduce en un 30.5% las aceleraciones máximas absolutas.

Por su parte, las velocidades máximas se observan en la Figura 8c y Figura 8d, para la estructura con CC se tiene un valor máximo de 0.49 m/s y 0.70 m/s en dirección X y Y , respectivamente, mientras que la estructura con CRP cuenta con valores de 0.49 m/s y 0.51 m/s en dirección X y Y , respectivamente. La implementación de CRP redujo en un 27.1% las velocidades máximas absolutas.

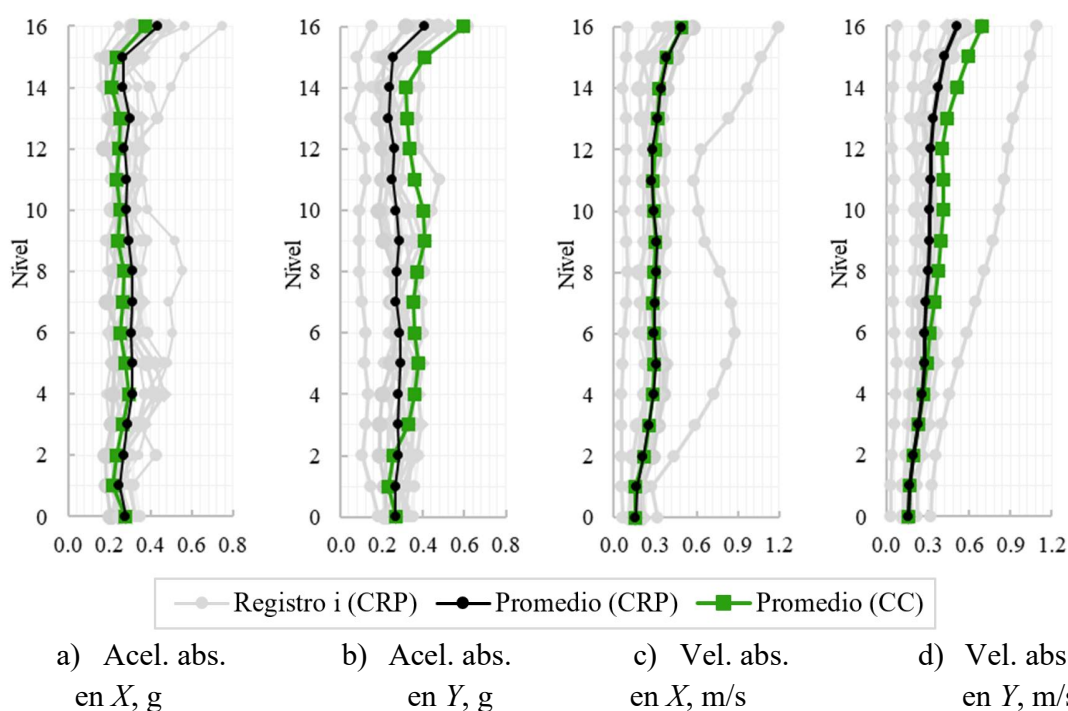


Figura 8. Perfiles de aceleraciones y velocidades absolutas

5.4. Curva de probabilidad de colapso

Se construyó la curva de probabilidad de colapso para evaluar el desempeño sísmico de la estructura con CRP a partir de una serie de análisis dinámicos no lineales. La intensidad que se usa en este estudio es a la aceleración máxima del terreno (PGA). Con el fin de observar la respuesta de la estructura ante diferentes intensidades, los registros sísmicos se multiplican por diferentes factores de escala. Estos factores de escala van desde 0.1 a 3.5 con incrementos

de 0.1. En la Figura 9 se muestra la curva de probabilidad de colapso del edificio con CRP. La probabilidad de colapso para la intensidad de diseño (100%) corresponde a 0% de probabilidad. Lo anterior se observa en los niveles de distorsión mostrados en la sección 6.2. La intensidad sísmica a un 50% de probabilidad de colapso corresponde a un 290%, mientras que la intensidad sísmica para una probabilidad de colapso de 100% se alcanza a una intensidad de diseño del 340%.

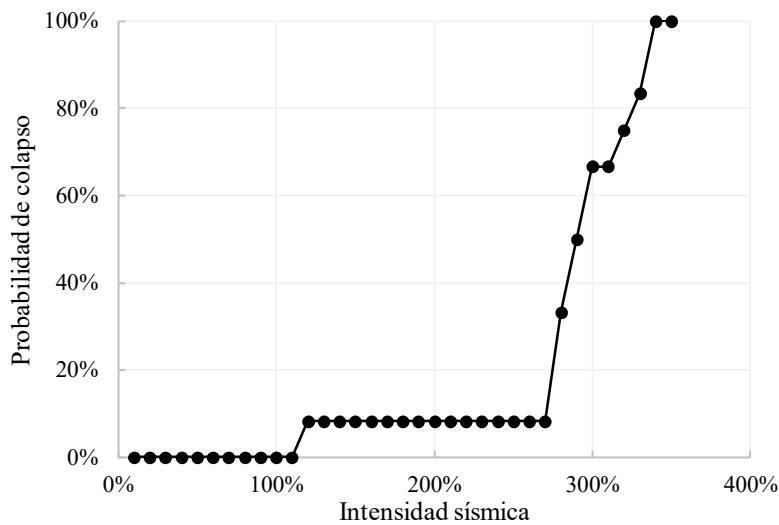
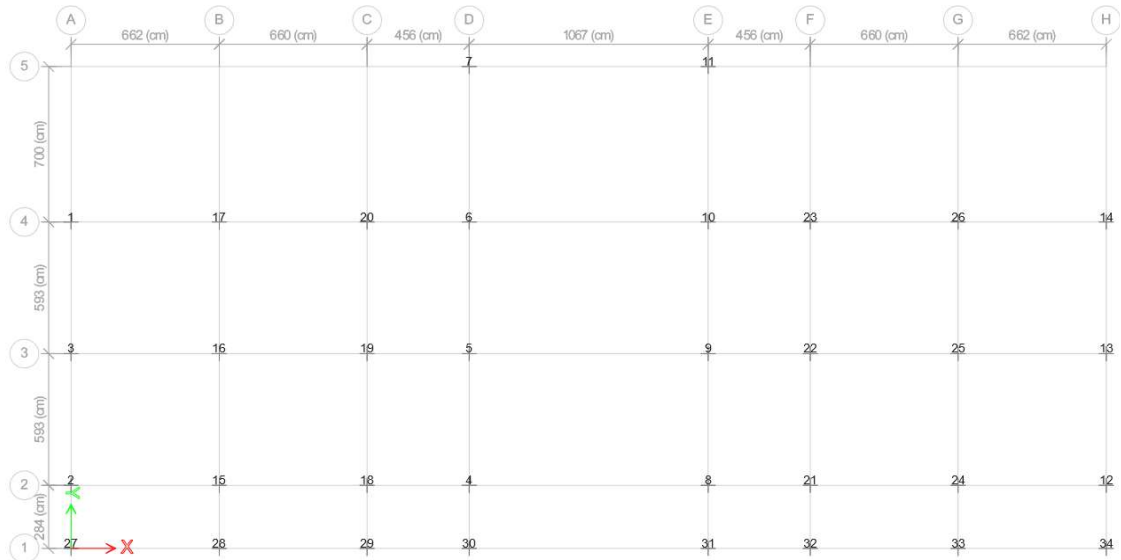


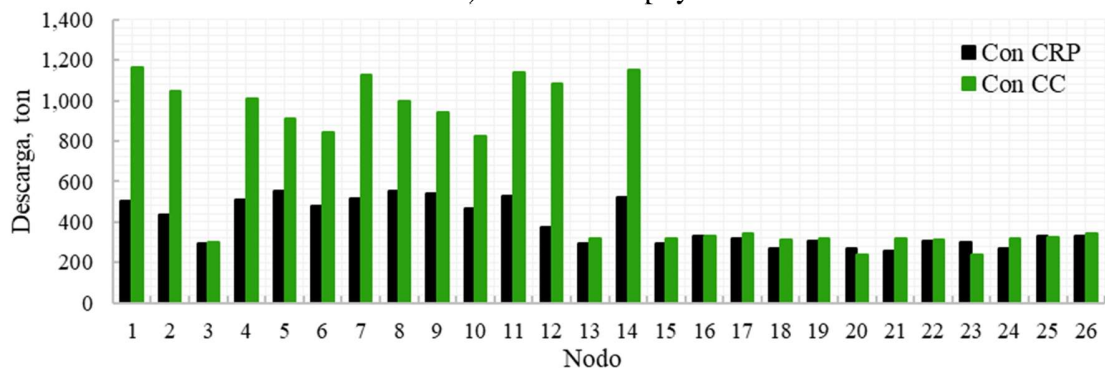
Figura 9. Curva de probabilidad de colapso para la estructura con CRP

5.5. Descarga a cimentaciones

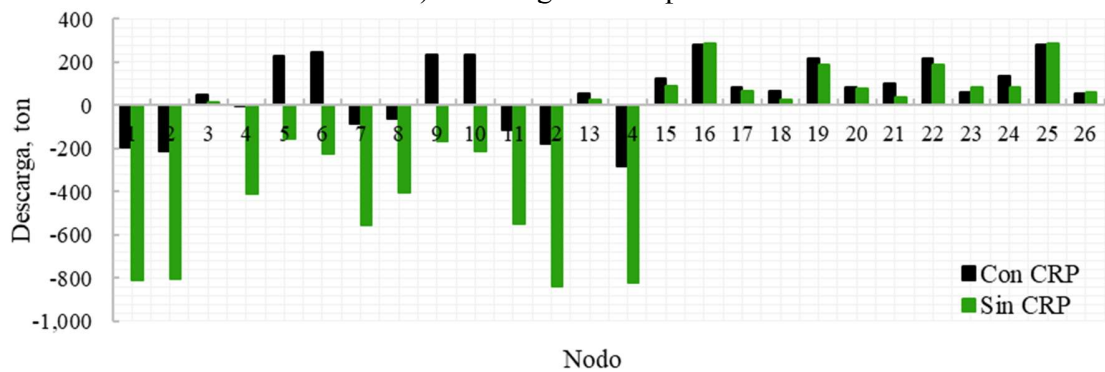
Se muestra una comparación de las descargas a cimentación de forma axial tanto para la estructura con CC como para la estructura con CRP. En la Figura 10a se aprecian los puntos de apoyo del modelo numérico. Por su parte, en la Figura 10b se aprecian las descargas máximas para ambas estructuras, para el caso con CC se tienen las descargas mayores que con CRP. Con el uso de los disipadores se disminuyen las descargas máximas a un 48%. Finalmente, en la Figura 10 se aprecia las descargas a cimentación en mínimas, se logra observar que para la estructura innovadora no se presentan cargas mayores a 280 t, mientras que para la estructura original se presentan cargas en tensión de hasta 835 t. Lo anterior representa una reducción de hasta un 34% de las descargas máximas de la estructura con CC.



a) Puntos de apoyo



b) Descarga en compresión



c) Descarga en tensión

Figura 10. Comparación de descargas a cimentación entre estructura con CC y CRP

5.6. Curvas de histéresis de los CRP

Para conocer el nivel de disipación de energía de los disipadores tipo CRP se muestran las curvas de histéresis obtenidas de los análisis en la Figura 11, obtenidas de los análisis. Se puede concluir que los CRP desarrolla una ductilidad mayor a 3.0, disipando una gran cantidad de energía en cada dispositivo.

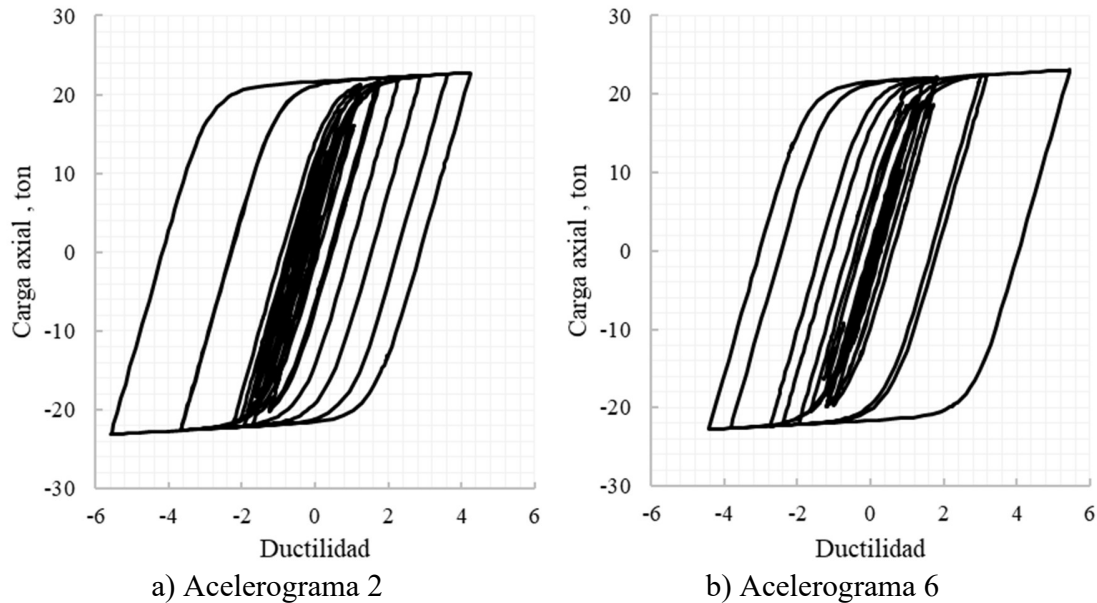


Figura 11. Curvas de histéresis de los CRP

5.7. Comparativa económica

En la Tabla 7 se muestra el tipo de acero empleado para la estructura equipada con CC. Considerando la tonelada de acero a \$65,000.00 se obtiene un costo del proyecto de \$74,180,460.25, por lo que el metro cuadrado de construcción es de \$7,070.00 considerando un área de proyecto de 1,0493 m².

Tabla 7 . Cuantificación de acero para la propuesta con CC

Elemento	Tipo	Cantidad	Costo unitario	Importe
Vigas	Perfiles IR	536 ton	\$65,000.00	\$34,859,371.30
Columna	Perfiles IR	551 ton	\$65,000.00	\$35,826,982.10
CC	Perfiles HSS	54 ton	\$65,000.00	\$3,494,106.85
Total				\$74,180,460.25

De forma similar, en la Tabla 8 se muestra la volumetría que se obtuvo del modelo de la estructura con CRP. Considerando los mismos costos de los materiales, se obtiene un costo del proyecto de \$71,024,031.80, por lo que el metro cuadrado de construcción es de \$6,768.83, presentando un ahorro de \$3,156,428.45 en comparación con la propuesta con

CC, lo cual representa un ahorro del 4.2% respecto a la propuesta con contraventeos convencionales.

Tabla 8 . Cuantificación de materiales para la propuesta con CRP

Elemento	Tipo	Cantidad	Costo unitario	Importe
Vigas	Perfiles IR	451 ton	\$65,000.00	\$29,293,295.85
Columna	Perfiles IR	528 ton	\$65,000.00	\$34,300,735.95
CRP	Disipadores	128 piezas		\$7,430,000.00
Total				\$71,024,031.80

6. CONCLUSIONES

Se evaluó el desempeño sísmico de la torre médica de 16 niveles con contraventeos restringidos al pandeo (CRP) mediante análisis dinámicos no lineales. Se hizo la comparación con la propuesta de la estructura con contraventeos convencionales. La estructura fue sometida a un grupo de movimientos sísmicos. 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:

- El empleo de los CRP en comparación contra los CC, incrementó el periodo fundamental de la estructura en dirección *X*, pasando de 3.19 s a 3.27 s.
- Los desplazamientos máximos para la estructura con CC resultaron en 29.2 cm y 20.1 cm en dirección *X* y *Y*, respectivamente. Mientras que para la estructura con CRP se obtuvo valores de 27.9 cm y 21.2 cm en dirección *X* y *Y*, respectivamente.
- Las distorsiones máximas de la estructura con CC resultaron en valores de 0.51 % y 0.42 % en dirección *X* y *Y*, respectivamente. Por su parte para la estructura con CRP se obtuvieron valores de 0.52% y 0.39% en dirección *X* y *Y*, respectivamente. Estos valores representan el 102% y 93% en dirección *X* y *Y*, respectivamente en comparación con la estructura con CC.
- Las aceleraciones absolutas de la estructura con CC resultaron en valores de 0.37 g y 0.59 g en dirección *X* y *Y*, respectivamente. Por su parte para la estructura con CRP se obtuvieron valores de 0.44 g y 0.41 g en dirección *X* y *Y*, respectivamente. Estos valores representan el 118% y 69% en dirección *X* y *Y*, respectivamente en comparación con la estructura con CC.
- Las velocidades absolutas de la estructura con CC resultaron en valores de 0.49 m/s y 0.70 m/s en dirección *X* y *Y*, respectivamente. Por su parte para la estructura con CRP se obtuvieron valores de 0.49 m/s y 0.51 m/s en dirección *X* y *Y*, respectivamente.

Estos valores representan el 101% y 73% en dirección X y Y, respectivamente en comparación con la estructura con CC.

- La evaluación del desempeño de la estructura ante diferentes intensidades de aceleración permitió construir la curva de probabilidad de colapso. Para la intensidad de diseño se tiene una probabilidad de colapso del 0%. Por su parte para alcanzar una probabilidad de colapso de 50% la intensidad sísmica representa el 290%, mientras que para el 100% de probabilidad de colapso se alcanza ante una intensidad sísmica de 340%.
- El uso de CRP permite la disipación de energía por medio de la plastificación del acero, de pruebas experimentales se concluye que dicha disipación se conserva de manera estable para ductilidades superiores a 6. De los resultados se puede concluir que los CRP tendrán un comportamiento adecuado durante la vida útil del edificio.
- Se observó una disminución en las descargas a cimentación con el uso de CRP tanto en compresión como en tensión en comparación con la estructura con CC. Las descargas máximas de la estructura con CRP representan un 48% y 34% en compresión y tensión, respectivamente en comparación con la estructura con CC.
- El costo para la estructura con CC por metro cuadrado es de \$7,070.00 mientras que para la estructura con CRP es de \$6,768.83. Esto representen un ahorro del 4.2% del costo total de la estructura en comparación con los CC.

Se concluye que el proyecto considerando disipadores de energía tipo contraventeo restringido al pandeo (CRP) es una mejor opción en términos de economía y desempeño sísmico para esta estructura.

7. REFERENCIAS

- ETABS (2023), Integrated Building Design Software, Versión 21.1.0, Computers and Structures Inc., California, Estados Unidos.
- NTCDS-BC (2017), Normas Técnicas Complementarias para de la Ley de Edificaciones del Estado de Baja California, de Seguridad Estructural en Materia de Diseño por Sismo, Gobierno de Baja California. Baja California.
- 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.
- PRODISIS (2015), Programa de diseño sísmico, Versión 4.1, Comisión Federal de Electricidad.