

---

## COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UNA TORRE DE DEPARTAMENTOS DISEÑADA CON CONTRAVENTEOS EXCÉNTRICOS (CE) Y CONTRAVENTEOS RESTRINGIDOS AL PANDEO (CRP)

*Rodolfo Álvarez Sánchez <sup>(1)</sup>, Fernando Cueto Jiménez <sup>(2)</sup>*

<sup>1</sup> MM-Engineers. Av. Empoli 1364, Mexicali, B.C. CP. 21376, *rodolfo.alvarez@mm-eng.*

<sup>2</sup> Dampo Systems SA de CV. Copilco 76, Ciudad de México, 04340, *fernando.cueto@dampo.com.mx*

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

#### RESUMEN

Este artículo muestra una comparación del desempeño sísmico y propuesta económica de dos soluciones estructurales para una torre de departamentos de diez niveles ubicada en Mexicali, Baja California. La primera solución consideró un sistema de marcos de acero con contraventeos excéntricos (CE), mientras que la segunda solución consistió en un sistema de marcos de acero con contraventeos restringidos al pandeo (CRP). La revisión económica se realizó por medio de la cuantificación de los materiales para ambas propuestas, considerando costos vigentes en el sector de la construcción. Por su parte, el desempeño sísmico se evaluó por medio de análisis no lineales, comparando diferentes parámetros de importancia, como: distorsiones máximas de entrepiso, aceleraciones de piso y descargas a cimentación. Los resultados muestran que la solución con CRP resultó muy similar en comparación de costo contra la alternativa con CE, pero mostró un desempeño superior ante las demandas sísmicas de diseño que el sistema utilizando CE.

## 1. INTRODUCCIÓN

Existen diferentes alternativas para mejorar el desempeño sísmico de una estructura ya sea para fines de optimización o reforzamiento estructural. Entre estas alternativas está colocar contraventeos a las estructuras para incrementar su rigidez lateral y mejorar su desempeño ante acciones sísmicas. Estos pueden ser contraventeos convencionales (CC), contraventeos excéntricos (CE) o contraventeos restringidos al pandeo (CRP). En este artículo se evalúan las dos últimas soluciones estructurales en un edificio de acero destinado a departamentos y ubicado en Mexicali, Baja California. Se hace una comparativa en el desempeño sísmico y en la propuesta económica de ambas soluciones.

## 2. SOLUCIÓN 1. ESTRUCTURA CON CONTRAVENTEOS CONVENCIONALES

La Figura 1 muestra la configuración del edificio con contraventeos excéntricos (CE). Éste cuenta con 10 niveles y se compone de un único cuerpo con forma rectangular en planta. La estructura se resolvió con marcos de acero de ductilidad alta y contraventeos excéntricos.

En total se usaron 160 contravientos con las características mostradas en la Tabla 1 para conformar el sistema de resistencia lateral que resulta en 20 eslabones dúctiles. El sistema de piso es a base de losacero y el acero considerado en los elementos estructurales es A-992 con esfuerzo de fluencia de  $3515 \text{ kg/cm}^2$ . En la Tabla 2 se muestran las alturas de los entrepisos.

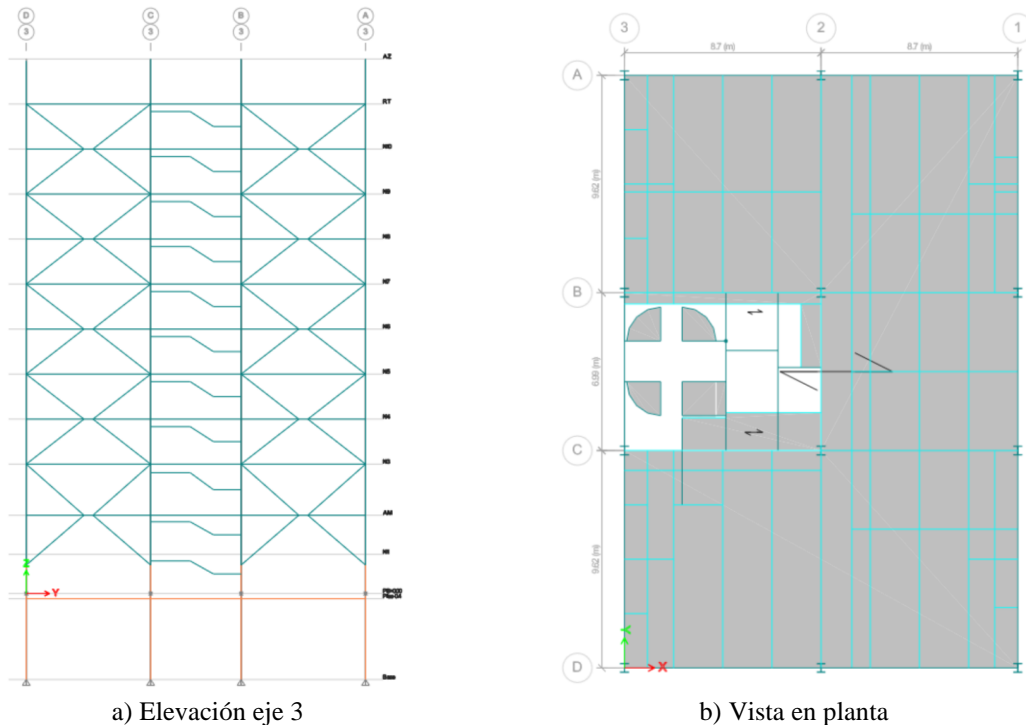


Figura 1. Vista generales de la estructura con contravientos convencionales (CC)

Tabla 1 . Características de los contraventeos

Tipo de CC	Cantidad	Sección	Niveles
1	128	OC 8.62x1/4”	PB-N1
2	32	OC 8.62x5/16”	N2-N9

Tabla 2. Alturas de entrepiso y niveles

ID	Piso	Altura de entrepiso, m	Altura absoluta, m
12	Azotea	-	41.32
11	RT	3.48	37.84
10	N9	3.48	34.36
9	N8	3.48	30.88
8	N7	3.48	27.40
7	N6	3.48	23.92
6	N5	3.48	20.44
5	N4	3.48	16.96
4	N3	3.48	13.48
3	N2	3.48	10.00
2	N1	3.95	6.05
1	PB	6.05	0

### 3. SOLUCIÓN 2. ESTRUCTURA CON CONTRAVENTEOS RESTRINGIDOS AL PANDEO (CRP)

La Figura 2 muestra la configuración del edificio con contraventeos restringidos al pandeo (CRP). Con esta solución también se considera marcos de acero de ductilidad alta y el uso de 160 CRP distribuidos en 4 ejes con 16 dispositivos por nivel.

En la Tabla 3 se muestran las características de los disipadores considerados con las cuales es posible modelarlos como elementos no lineales en programas de análisis estructural. Para todos los disipadores se toma un exponente de fluencia igual a 3.0 y una pendiente post-fluencia igual a 0.016. Cabe mencionar que dichos parámetros se determinaron haciendo uso de la metodología propuesta por Terán & Virto (2009).

El sistema de piso se considera con losacero igual que en el modelo anterior y de la misma forma el acero considerado en los elementos estructurales es de A-992 con esfuerzo de fluencia de 3515 kg/cm<sup>2</sup>.

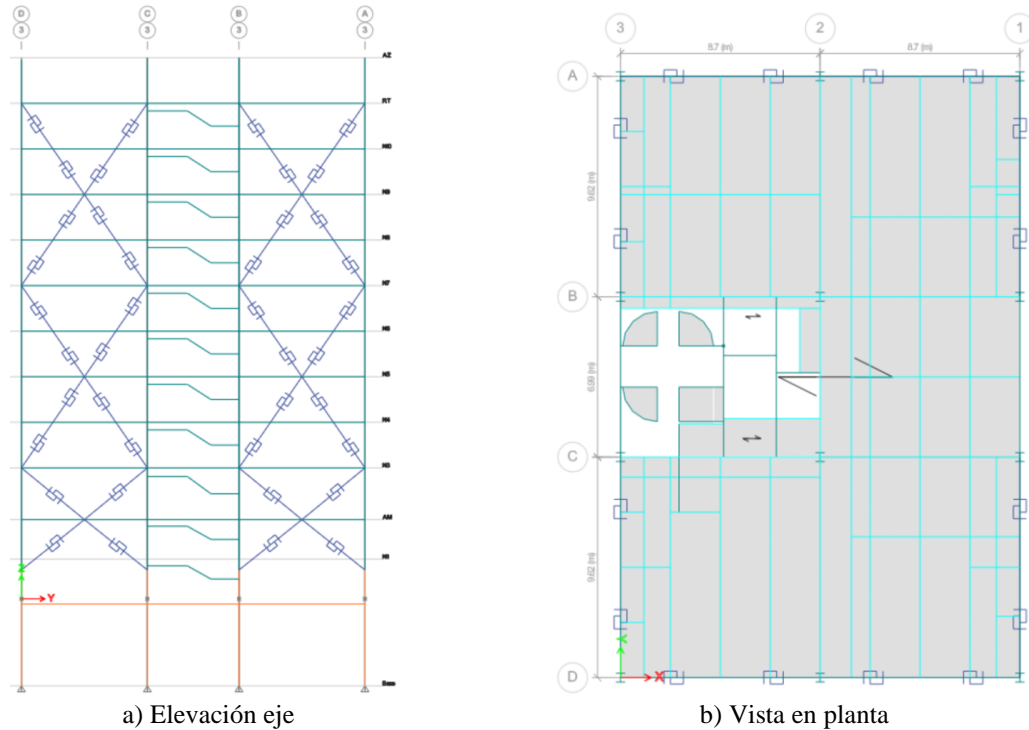


Figura 2. Vista generales de la estructura con contravientos restringidos al pandeo (CRP)

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	64	8676	30	0.016	10	N6-N9
2	64	15419	50	0.016	16	N2-N5
3	16	8789	50	0.016	16	N1
4	16	10571	60	0.016	19	PB

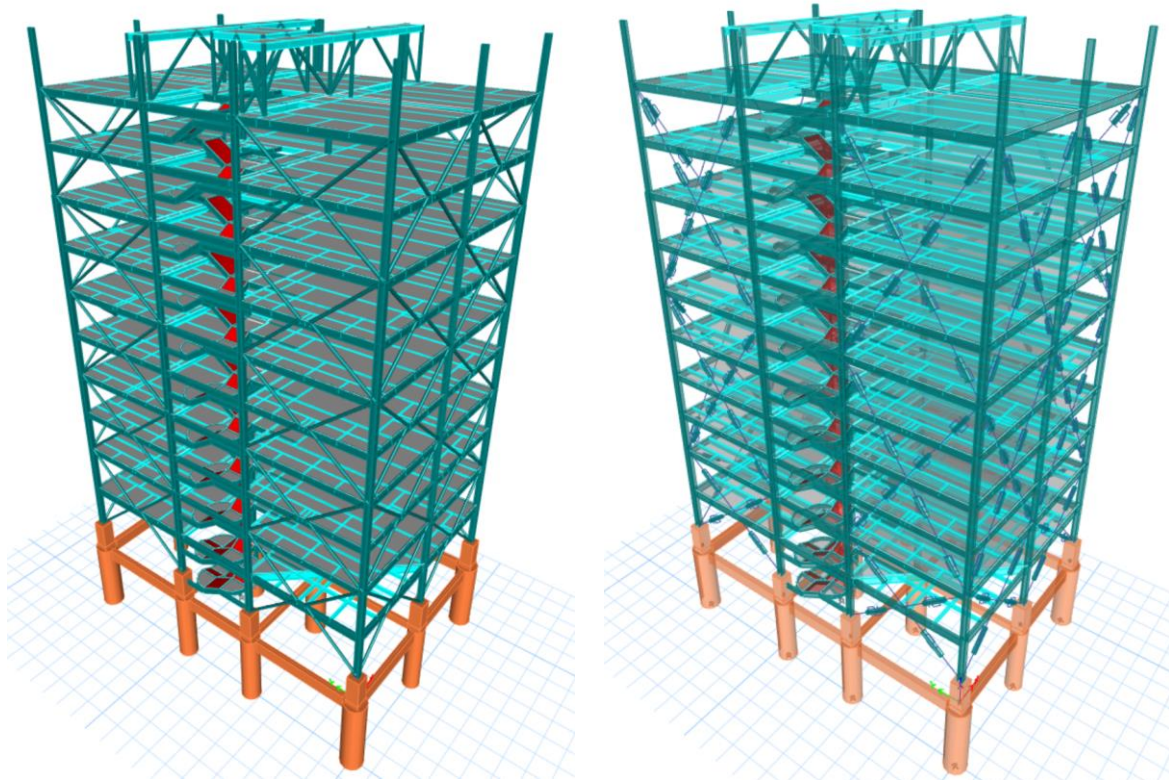
#### 4. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

Se realizaron modelos numéricos tridimensionales de las dos propuestas estructurales en el programa ETABS (ETABS, 2023). En esta sección se describen las características de los modelos y los movimientos sísmicos considerados.

##### 4.1. MODELOS

Los modelos para las dos soluciones de la estructura se desarrollaron con dimensiones arquitectónicas iguales y la misma cimentación. La Figura 3 muestra una representación de los modelos desarrollados en ETABS. Las columnas, trabes y CE se modelaron como elementos tipo

barras y las losas se modelaron como elementos tipo área. Los CRP se modelaron por medio de resortes tipo “link Plastic Wen” con las propiedades mostradas en la Tabla 4.



a) Vista en 3D del modelo numérico con CE

b) Vista en 3D del modelo numérico con CRP

Figura 3. Modelo de la estructura en ETABS [2]

En la Tabla 4 se resumen las cargas consideradas para el análisis, los valores corresponden con lo requerido en las Normas Técnicas complementarias de criterios y acciones de diseño estructural del Estado de Baja California (2017).

Tabla 4. Cargas distribuidas en losas

Área	Sobre carga muerta, kg/m <sup>2</sup>	Carga viva máxima, kg/m <sup>2</sup>	Carga viva accidental, kg/m <sup>2</sup>
Roof top	250	350	250
Azotea	250	100	70
Departamentos	200	170	90
Amenidades	250	350	250

## 4.2. ESPECTRO DE DISEÑO

Para el espectro de diseño se utilizaron las Normas Técnicas complementarias para Diseño por sismo del Estado de Baja California (NTC-DS EBC, 2017), con dicha reglamentación se determinó los espectros de diseño y elástico, siguiendo con la regionalización indicada en las mismas normas. Como se expuso antes, la estructura se consideró de alta ductilidad, por lo que el espectro de diseño reducido es compatible con esta característica.

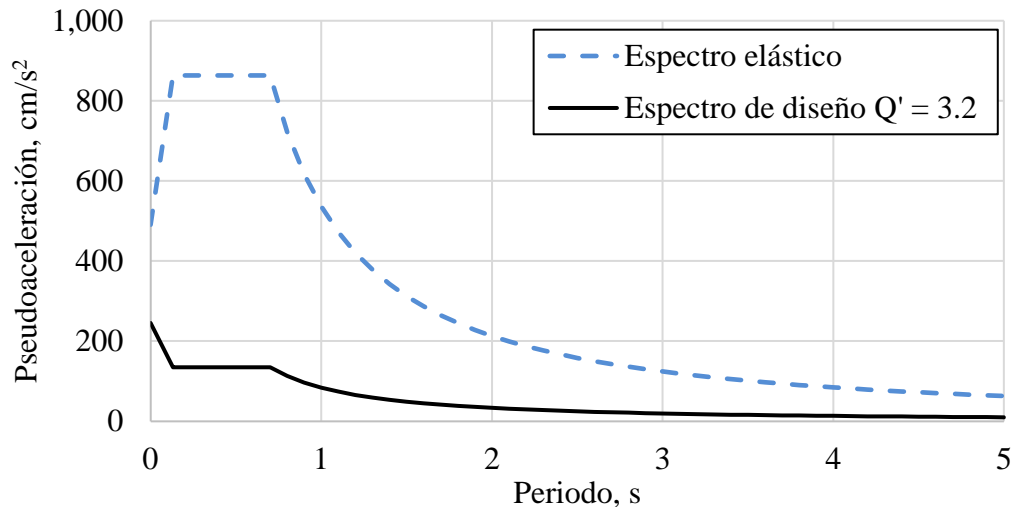


Figura 4. Espectros de diseño de sitio y de SASID (SASID,2020)

## 4.3. MOVIMIENTOS SÍSMICOS

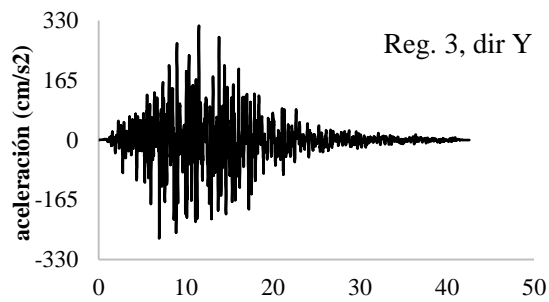
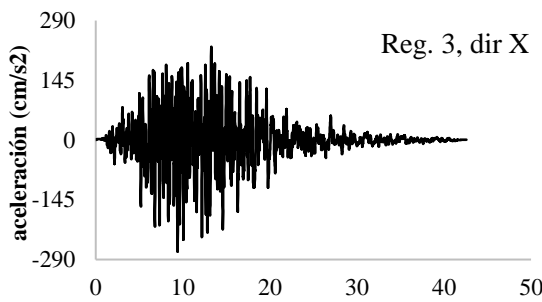
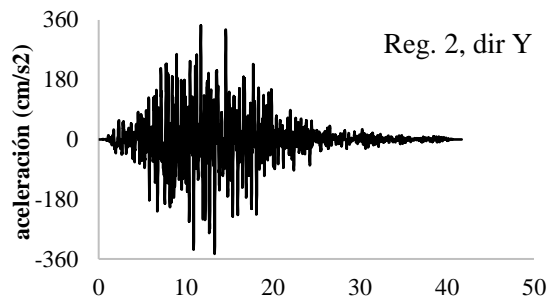
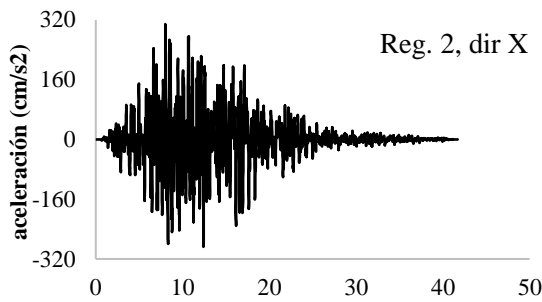
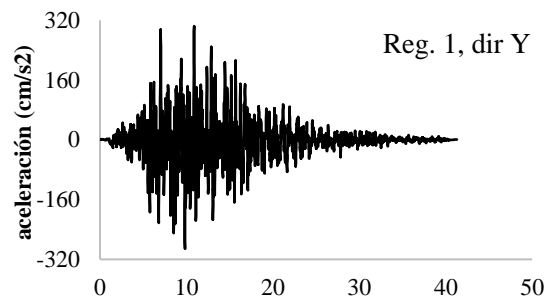
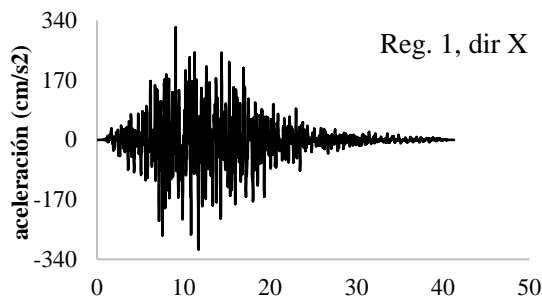
De acuerdo con las Normas Técnicas complementarias para Diseño por sismo del Estado de Baja California (NTC-DS EBC, 2017), para los análisis dinámicos paso a paso se establece que se pueden usar al menos cuatro pares de acelerogramas. Se consideraron 4 pares de acelerogramas sintéticos, mismos que se obtuvieron con el programa PRODISIS de acuerdo con la ubicación del edificio. De los cuatro acelerogramas obtenidos, dos se ajustaron al espectro de referencia en roca indicado por PRODISIS y que corresponde a un periodo de retorno de 280 años, los otros dos se ajustaron al espectro de diseño transparente para el sitio considerando suelo tipo I y estructuras del grupo B.

A acelerogramas sintéticos se les realizó los siguientes procesos: 1) corrección de 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) cosenoidal del 5% de la longitud total de la señal.

En la Tabla 5 se presentan las características principales de los acelerogramas y en la Figura 8 se muestran los acelerogramas graficados en función del tiempo y con valores de aceleración de  $\text{cm/s}^2$ .

Tabla 5. Características de los acelerogramas sintéticos de PRODISIS

Acelerograma	# de puntos	$\Delta t$ , s	Acel. Máx. absoluta (g)	
			Dir. X	Dir. Y
Acc1	4131	0.01	0.33	0.31
Acc2	4171	0.01	0.32	0.35
Acc3	4261	0.01	0.23	0.32
Acc4	4169	0.01	0.33	0.36



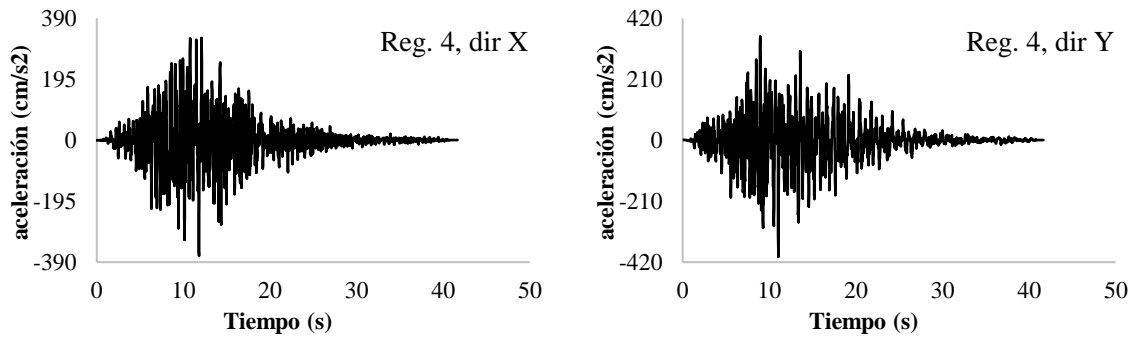


Figura 9. Graficas de acelerogramas sintéticos

De los acelerogramas sintéticos se obtuvieron los espectros de respuesta de pseudo-aceleración con el objetivo de compararlos con el espectro de referencia proporcionado por PRODISIS, para el cálculo de consideró un amortiguamiento crítico del 5%. En la Figura 9 se presentan los espectros calculados, presentando en color gris la respuesta de los acelerogramas individuales, y en color negro el promedio de éstos, también se incluyen en línea discontinua color azul el espectro de referencia en roca. De las gráficas se puede observar que valor promedio máximo de pseudo-aceleración es de  $852 \text{ cm/s}^2$  y su forma general es compatible con el espectro de referencia.

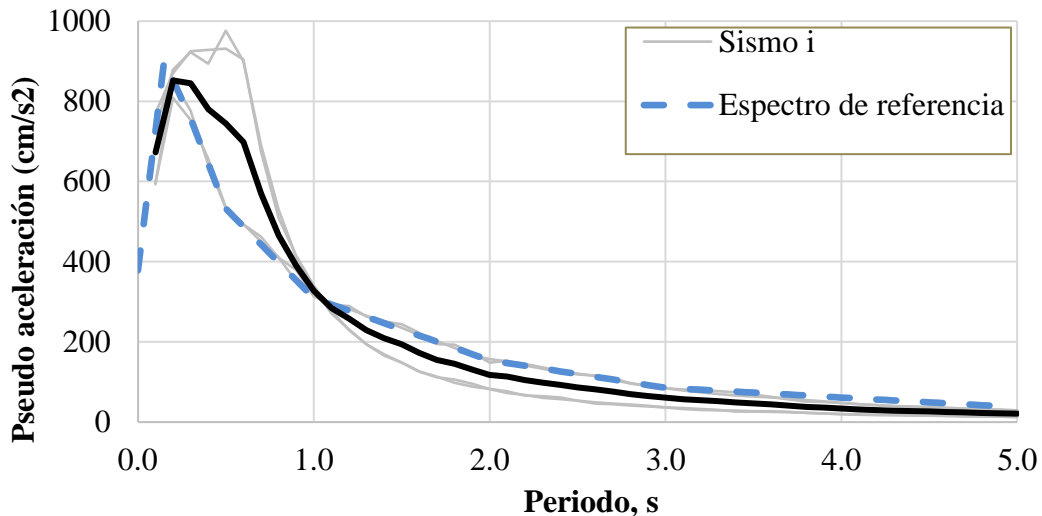


Figura 9. Espectros de respuesta de pseudo-aceleración



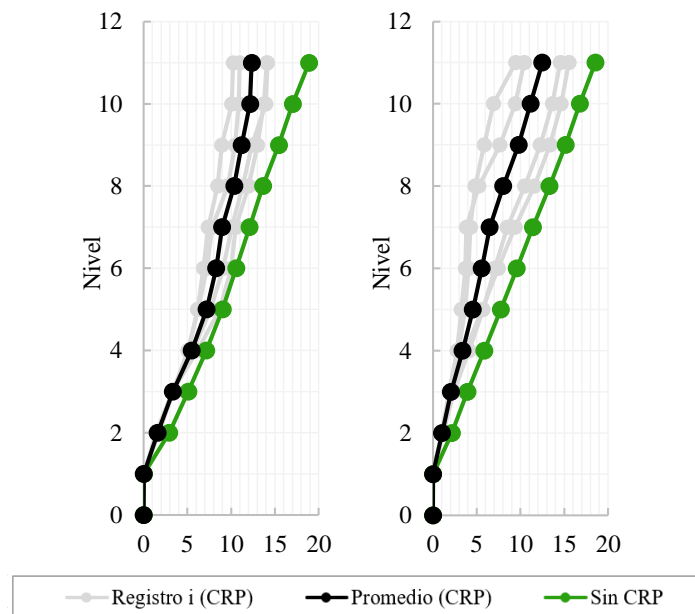
## 5. RESULTADOS

Después de realizar los análisis del modelo de la estructura con contraventeos excéntricos (CE) y con contraventeos restringidos al pandeo (CRP), con las 4 parejas de registros sísmicos, en las dos direcciones ortogonales, se graficaron los desplazamientos, distorsiones de entrepiso, aceleraciones y velocidades absolutas en las dos direcciones horizontales,  $X$  y  $Y$ . Estas gráficas se muestran a continuación.

### 5.1. DESPLAZAMIENTOS Y DISTORSIONES DE ENTREPISO

En las Figura 10 y Figura 11 se muestran los desplazamientos laterales y distorsiones de entrepiso obtenidas de los análisis, en línea gris se observan los resultados de los registros individuales para la estructura con CRP, en color negro se muestra el promedio de estos registros y en color verde se muestra el promedio de la respuesta con CE.

Ambas opciones de estructuración se realizaron mediante análisis dinámico paso a paso y de los resultados se observa que los desplazamientos máximos de la estructura con CE son de 18.9 cm y 18.65 cm en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente, mientras que la estructura equipada con CRP los desplazamientos son de 12.3 cm y 12.5 cm en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente.



a) Desp. en  $X$ ,  $cm$       b) Desp. en  $Y$ ,  $cm$ 
  
 Figura 10. Perfiles de desplazamiento máximo

En el caso de distorsiones máximas de entrepiso se observa en la Figura 11 que la estructura con CE tiene valores máximos de 0.62% y 0.55% en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente y para la estructura con CRP son de 0.49% y 0.36% en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente.

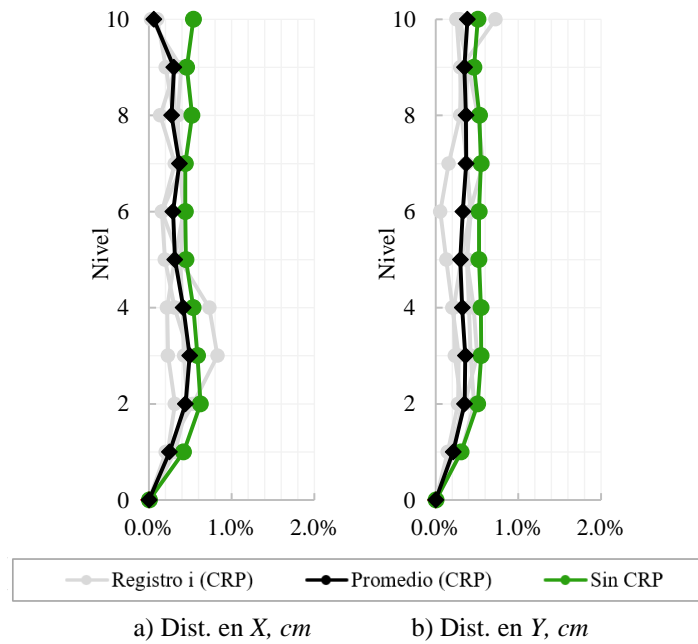


Figura 11. Perfiles de distorsión de entrepiso máxima

## 5.2. ACELERACIONES Y VELOCIDADES DE ENTREPISO

En la Figura 12 se muestran las velocidades de piso obtenidas de los análisis utilizando la misma simbología expuesta anteriormente. De los resultados se observa que las velocidades máximas de la estructura con CE son de 0.56 m/s y 0.51 m/s y en la estructura con CRP son de 0.31 m/s y 0.29 m/s, en ambos casos en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente.

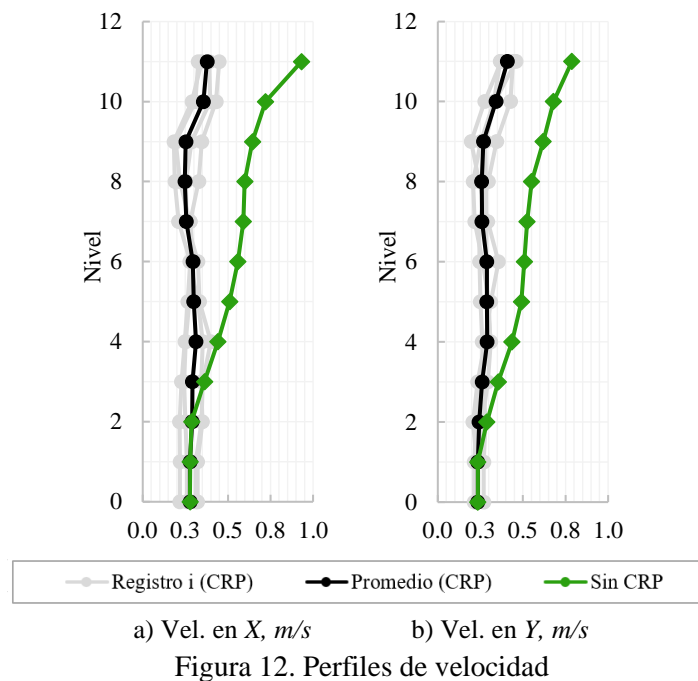
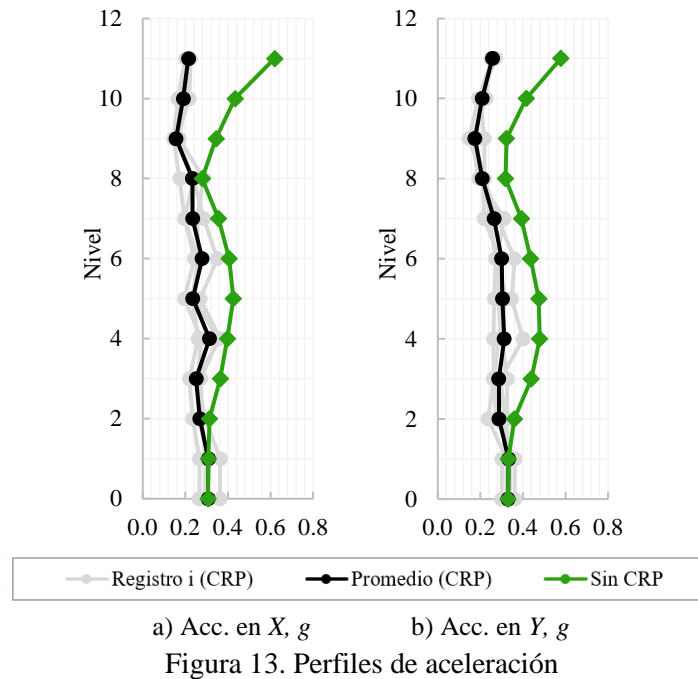


Figura 12. Perfiles de velocidad

En el caso de aceleraciones máximas de piso se observa en la Figura 13 que la estructura con CE tiene valores máximos de 0.42 g y 0.48 g y para la estructura con CRP son de 0.31 g y 0.33 g en ambos casos en dirección X y Y, respectivamente.



### 5.3. DESCARGAS A CIMENTACIÓN

Para esta estructura la cimentación se resolvió por medio de pilas de cimentación en función de las características del suelo y las descargas calculadas con la propuesta de CE. Durante el proceso de optimización de la estructura con CRP se decidió no realizar ajustes a la cimentación, sin embargo, en la revisión de los resultados de descargas se observa cambios importantes que podrían sustentar una revisión posterior.

En las Figuras 14 y 15 se presentan los resultados de descargas a cimentación, en la graficas se coloca en color verde las descargas en toneladas de la estructura con CE y en color negro los valores correspondientes a la estructura con CRP, en el eje horizontal se colocan los nodos donde se apoya la estructura y que corresponde a la ubicación de las pilas.

Como se observa en la Figura 14 donde se reportan las descargas máximas registradas se tienen reducciones de hasta 46% en las descargas de la estructura con CRP comparado contra la estructura con CE. En el caso de descargas mínimas que se reportan en la Figura 15, la reducción de tensiones llega hasta un 84% en el caso más crítico.

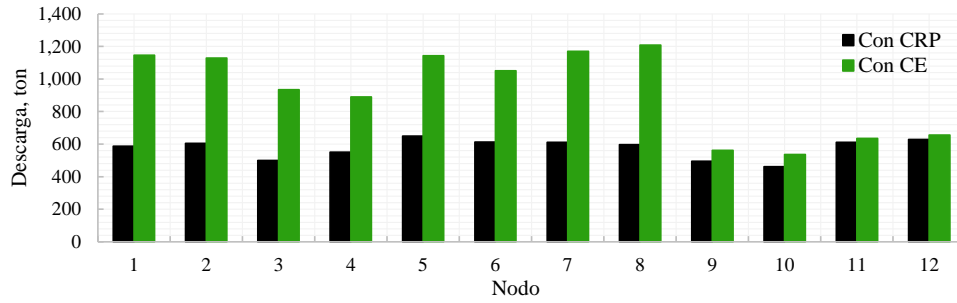


Figura 14. Descargas máximas a cimentación

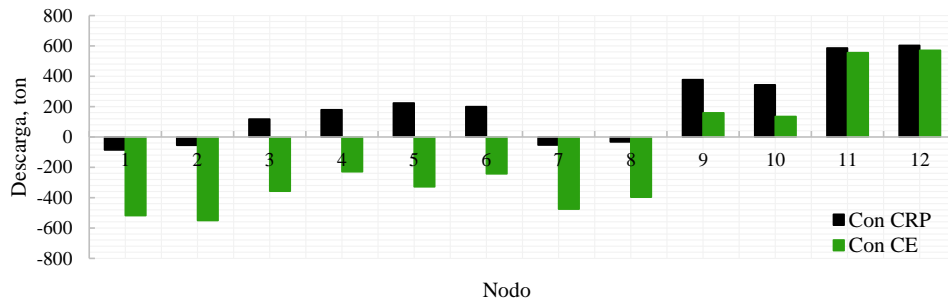


Figura 15. Descargas mínimas a cimentación

Al inspeccionar las gráficas presentadas previamente se puede suponer que es viable realizar una revisión a la solución de cimentación, es probable que se encuentre un beneficio constructivo y económico con las descargas ajustadas, principalmente en el tema de tensiones.

#### 5.4. CURVAS DE HISTÉRESIS DE CRP

Para conocer el nivel de disipación de energía de los disipadores tipo CRP en la Figura 16 se muestran las curvas de histéresis obtenidas de los análisis. Se puede concluir que los CRP desarrollaron ductilidades por arriba de 1.5 y menores de 6.0, por lo que durante los sismos disiparon energía sin sobrepasar el límite de ductilidad recomendado.

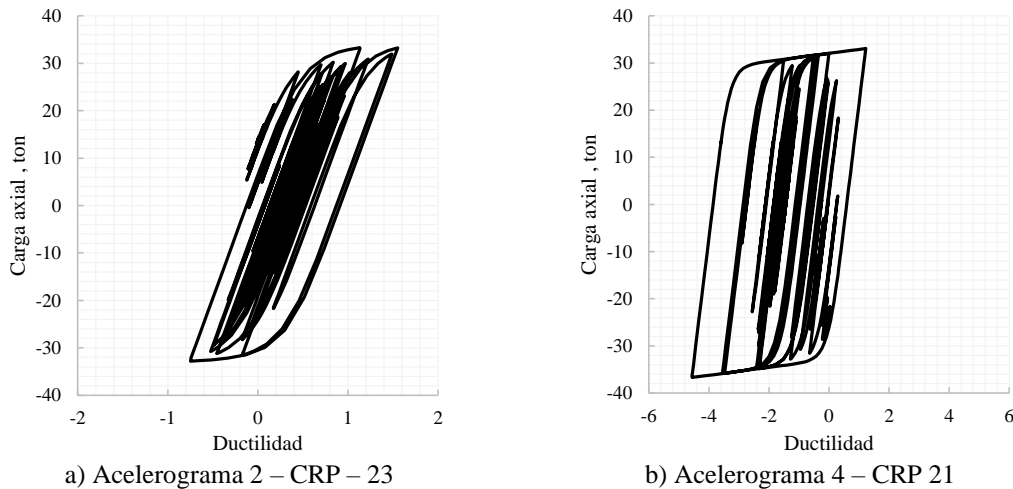


Figura 16. Curvas de histéresis de los CRP

## 6. COMPARATIVA ECONÓMICA

En la Tabla 6 se muestra la volumetría que se obtuvo del modelo de la estructura con CE. Considerando el costo por metro cúbico de concreto de \$15,000.00 y la tonelada de acero a \$65,000.00 se obtiene un costo del proyecto de \$29,130,000.00, por lo que el metro cuadrado de construcción es de \$6,901.00 considerando un área de proyecto de 4,221 m<sup>2</sup>.

Tabla 6. Cuantificación de materiales para la propuesta con CE

Tipo de Elemento	Material	Cantidad	Costo unitario	Importe
Columna	Acero	88 t	\$65,000	\$5,720,000.00
Trabe	Acero	217 t	\$65,000	\$14,105,000.00
Contraviento	Acero	37 t	\$65,000	\$2,405,000.00
Sistema de piso	Concreto	460 m <sup>3</sup>	\$15,000	\$6,900,000.00
<b>Total</b>				\$29,130,000.00

De forma similar, en la Tabla 7 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 \$29,078,500.00, por lo que el metro cuadrado de construcción es de \$6,889.00, presentando un ahorro marginal en términos de la super estructura de \$51,500.00 en comparación con la propuesta original.

Tabla 7. Cuantificación de materiales para la propuesta con C

Tipo de Elemento	Material	Cantidad	Costo unitario	Importe
Columna	Acero	73.5 t	\$65,000	\$4,777,500.00
Trabe	Acero	167.5 t	\$65,000	\$10,881,000.00
Contraviento	Acero	8 t	\$65,000	\$520,000.00
CRP	Acero	160 pza	-	\$6,000,000.00
Sistema de piso	Concreto	460 m <sup>3</sup>	\$15,000	\$6,900,000.00
<b>Total</b>				\$29,078,500.00

Es importante resaltar que la cuantificación no considera los elementos de cimentación ni la cuantificación de las conexiones de los elementos estructurales, como se observó en el inciso 5.3 la reducción de las descargas generará ahorros en la cimentación. Por lo anterior, en el análisis final de los montos de la obra, el ahorro real del proyecto gracias a la implementación de los CRP fue más atractivo que mantener el sistema de CE planteado inicialmente, esto apoyado por los resultados en el desempeño y el costo similar y el potencial de ahorro en otros rubros.

---

## 7. CONCLUSIONES

Se realizó la comparación de desempeño sísmico y propuesta económica de dos soluciones estructurales para una torre de departamentos de diez niveles ubicada en Mexicali, Baja California mediante análisis dinámicos no lineales. Ambas soluciones consideraban el uso de marcos de acero de alta ductilidad, en la primera propuesta se utilizan contravientos excéntricos y en la segunda se evalúa el uso de contravientos restringidos a pandeo. De los resultados obtenidos se desprenden las siguientes conclusiones:

- Se observa una mejora en el desempeño en términos de desplazamientos máximos, utilizando CE los resultados son 18.9 cm y 18.65 cm mientras que para la estructura con CRP los valores son 12.3 cm y 12.5 cm en dirección *X* y *Y*, respectivamente.
- Las distorsiones máximas de la estructura con CE tienen valores de 0.62 % en *X* y 0.55 % en *Y*, por su parte para la estructura con CRP se obtuvieron valores de 0.49% en *X* y 0.36% en *Y*. Estos valores representan una reducción del 20 % y 35% en dirección *X* y *Y*, respectivamente en comparación con la estructura con CE.
- Las velocidades absolutas de la estructura también se reducen dado que con CE se obtienen valores de 0.56 m/s y 0.51 m/s y por su parte para la estructura con CRP se obtuvieron valores de 0.31 m/s y 0.29 m/s en dirección *X* y *Y*, respectivamente.
- Las aceleraciones absolutas se reducen con el uso de CRP ya que la estructura con CE tiene resultados de 0.42 g y 0.48 g en dirección *X* y *Y*, respectivamente, mientras que la estructura con CRP los valores son de 0.31 g y 0.33 g en dirección *X* y *Y*, respectivamente. Esto implica reducción en los posibles daños a contenidos y percepción de la intensidad del movimiento.
- Para los CRP se ha observado en pruebas experimentales que la disipación se conserva de manera estable para ductilidades altas y durante muchos ciclos continuos. Además, con una demanda de ductilidad por debajo de la recomendada, como es el caso de la estructura en estudio, se puede prever 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 CE. Las descargas máximas de la estructura con CRP se redujeron en un 46% y 84% en compresión y tensión, respectivamente en comparación con la estructura con CE.
- El costo para la estructura con CE y con CRP son comparables si se analiza la superestructura teniendo un ahorro marginal de \$51,500.00 para la opción con CRP.

En todos los parámetros de desempeño analizados se encuentran mejoras al utilizar CRP a un costo similar para la superestructura con la posibilidad de incrementar los ahorros considerando la cimentación. De la misma forma sería esperable que igualando el desempeño entre las opciones de estructuración, es decir optimizando aún más la opción con CRP, se pueden obtener resultados económicos aun más atractivos en proyectos similares.

---

Se concluye que el proyecto considerando disipadores de energía tipo contraventeo restringido al pandeo mejora el desempeño y es más atractivo económicamente en comparación con los contravientos excéntricos.

## 8. REFERENCIAS

1. 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.
2. ETABS (2020). **Integred Building Design Software, Version 19.0.1**. Computers and Structures Inc., California, Estados Unidos.
3. NTC-DS EBC (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.
4. NTCDS (2020), Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Gobierno de la Ciudad de México. Ciudad de México.
5. NTCDS (2023), Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Gobierno de la Ciudad de México. Ciudad de México.
6. PRODISIS (2015), Programa de diseño sísmico, Versión 4.1, Comisión Federal de Electricidad.