

---

## REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO EXISTENTE EN SUELO BLANDO DE LA CDMX CONSIDERANDO EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA (ISE) Y UTILIZANDO CONTRAVIENTOS RESTRINGIDOS AL PANDEO (CRP)

*Carlos Tapia (1), Jonathán Rodea (2), Fernando Cueto Jiménez (3), Ernesto García Mora Pinto (4)*

<sup>1,2</sup> CTC Ingenieros Civiles S.A. de C.V. José María Izazaga #89, Piso 11, Centro, Ciudad de México, 06090, [c\\_tapiagarcia@ctcingenieros.com.mx](mailto:c_tapiagarcia@ctcingenieros.com.mx), [j\\_rodea@ctcingenieros.com.mx](mailto:j_rodea@ctcingenieros.com.mx).

<sup>3,4</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 sismo resistentes innovadoras en la práctica profesional.

#### RESUMEN

Este trabajo presenta el proceso de análisis y diseño para la rehabilitación estructural de un edificio de concreto de 11 niveles y un sótano con pilotes de control desplantado en los suelos blandos de la CDMX, considerando los efectos de interacción suelo-estructura (ISE) cinemáticos e inerciales. El edificio, fue construido a inicios de la década de 1970, estructurado a base de marcos de losas planas aligeradas y reforzado después de los sismos de 1985 mediante el incremento de la rigidez y resistencia ante fuerzas laterales con marcos perimetrales de concreto. El nuevo proyecto de rehabilitación considera el uso de contravientos restringidos al pandeo (CRP) y el refuerzo de algunos marcos adicionando elementos metálicos.

Para el análisis se desarrolló un modelo matemático detallado que considera el comportamiento no lineal de los elementos estructurales por medio de articulaciones plásticas de fibras. Se consideraron los efectos de la interacción suelo-estructura como se establece en la normatividad vigente en CDMX. Se concluye, que es relevante considerar los efectos de ISE para rehabilitar de manera óptima edificios existentes, incluso cuando se utilizan tecnologías de disipación de energía como los CRP.

Finalmente, se demuestra que el costo de la rehabilitación estructural de un edificio existente es financieramente viable para propietarios o desarrolladores inmobiliarios y será de interés para los ingenieros involucrados en la rehabilitación de estructuras con sistemas de protección sísmica.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Se presentan los resultados de la propuesta de rehabilitación estructural de un edificio existente con 45 años de antigüedad, con estructuración de marcos de concreto, 11 niveles y un sótano desplantado en los suelos blandos de la CDMX, donde es importante tomar en consideración los efectos de interacción suelo estructura (ISE) cinemáticos e inerciales. El edificio existente se rehabilita con el objetivo principal de incrementar su vida útil y estará destinado su uso a vivienda y locales comerciales en planta baja. Para mejorar su comportamiento sísmico futuro, se reforzará por medio de 175 contravientos restringidos al pandeo (CRP). Los análisis y diseño del refuerzo estructural contempló métodos de análisis dinámicos no lineales paso a paso de acuerdo con los requisitos de las NTC-DS (NTC-DS, 2020). Los efectos ISE se considerando de acuerdo con el método del “oscilador de remplazo” establecido en las NTC-DS, 2020.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La Figura 1 muestra la configuración general de la estructura del edificio. Éste es de forma sensiblemente rectangular y posee con un sótano, planta baja, 10 niveles y un apéndice con una altura total de 40.8 m. La estructuración principal del edificio existente es a base de marcos continuos monolíticos formado por losas planas aligeradas reticulares con nervaduras en dos direcciones ortogonales. Las losas planas se apoyan directamente en columnas de concreto estructural por medio de capiteles del mismo peralte de las losas. La edificación fue reforzada en años posteriores a los sismos de 1985 mediante la adición de columnas y una trabe nueva peraltada de concreto estructural en los 4 marcos perimetrales del edificio. En cimentación el edificio cuenta con un cajón de compensación parcial y pilotes de fricción con dispositivos de control en su conexión con la losa fondo. La edificación ha permanecido ocupada y sin daños mayores en su estructura principal durante los últimos 33 a 35 años. En la actualidad se ha decidió rehabilitar el edificio para incrementar su confiabilidad estructural para uso de viviendas de acuerdo con los requerimientos reglamentarios vigentes.

Las alturas de entrepiso se muestran en la Tabla 1. En la Tabla 2 se muestran los elementos principales que conforman la estructura, donde se observa una gran variabilidad de secciones transversales debidas a las prácticas de construcción de la época en la que se construyó. Se proyecta la adición de algunos muros de concreto estructural nuevos de espesores entre 20 cm y 35 cm en la zona central del edificio donde esta el núcleo de elevadores y escaleras.

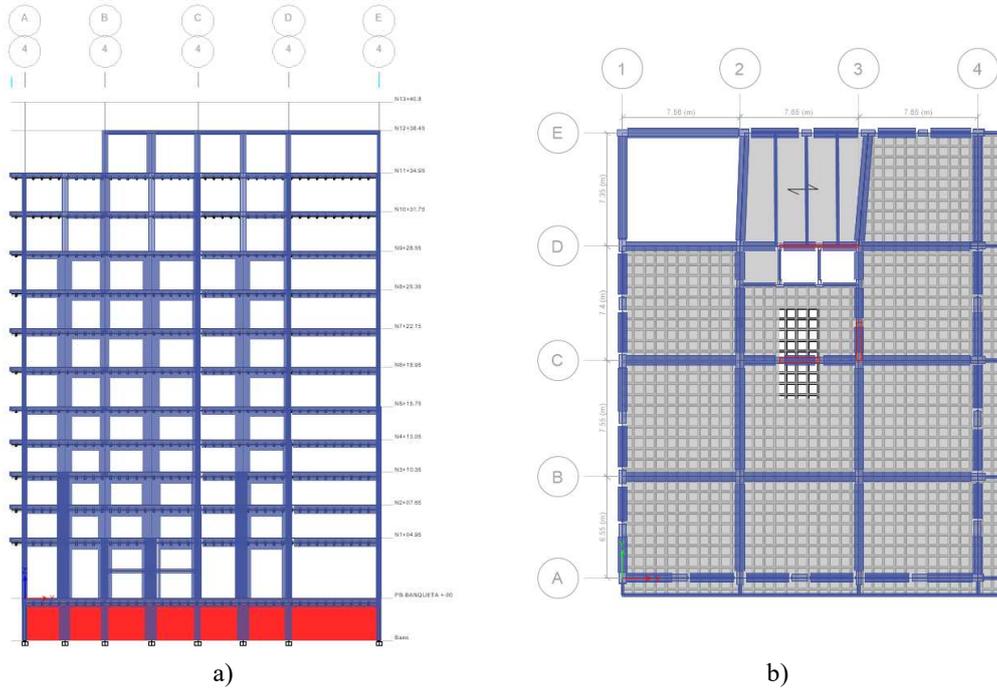


Figura 1. Vista generales del edificio estudiado: (a) Elevación Eje 5 y (b) Vista en planta N5

Tabla 1 . Alturas de entrepiso

ID	Piso	Altura de entrepiso, m	Altura absoluta, m
15	Azotea Apéndice	-	40.80
14	Azotea Apéndice	2.35	38.45
13	Azotea	3.50	34.95
12	N10	3.20	31.75
11	N9	3.20	28.55
10	N8	3.20	25.35
9	N7	3.20	22.15
8	N6	3.20	18.95
7	N5	3.20	15.75
6	N4	2.70	13.05
5	N3	2.70	10.35
4	N2	2.70	7.65
3	N1	2.70	4.95
2	PB	4.95	0.00
1	S1	3.50	-3.50

Tabla 2 . Elementos estructurales tipo columna de concreto

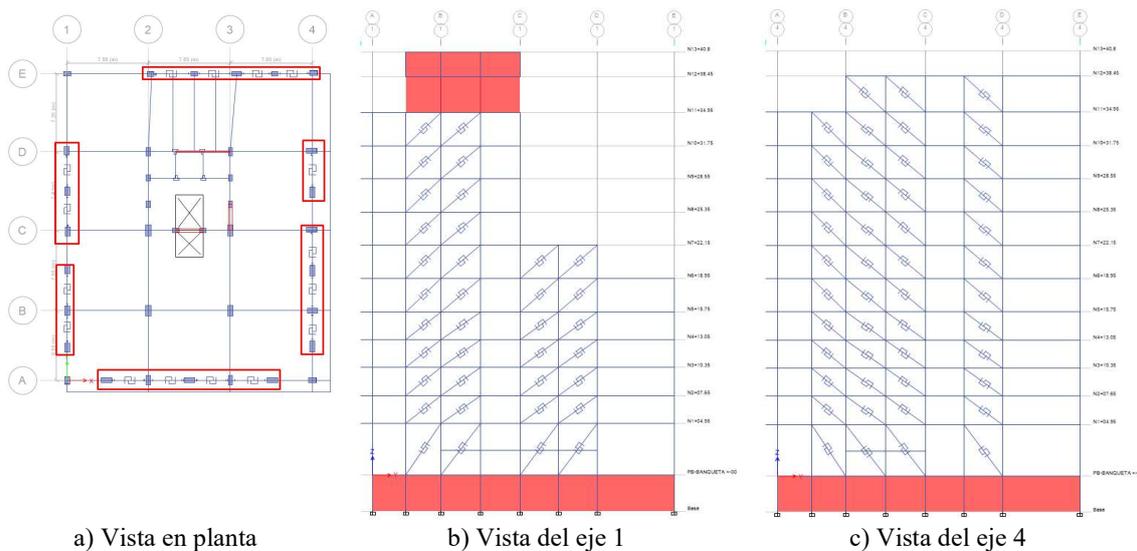
Elemento	Sección, cmxcm	Niveles
Columna	30X30	N11 - Apéndice
Columna	35X30	N11 - Apéndice
Columna	40X40	N10 - Apéndice

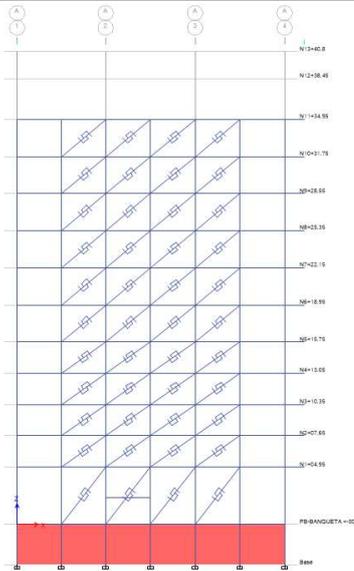
Elemento	Sección, cmxcm	Niveles
Columna	45X100	PB
Columna	50X30	N11 - Apéndice
Columna	50X40	N7 - N9
Columna	50X80	PB
Columna	60X35	PB - N1
Columna	60X40	PB - N5
Columna	60X40	PB - Apéndice
Columna	65X30	N10
Columna	65X40	N2 - N3, N6 - N7
Columna	65X45	PB - N7
Columna	70X30	N10
Columna	70X35	N9
Columna	75X40	PB - N1, N5 - N6
Columna	80X40	N4, N8
Columna	80X45	PB
Columna	85X40	N8
Columna	90X40	PB - N3
Columna	90X45	N7
Columna	95X45	PB, N6
Columna	100X50	PB, N4 - N5
Columna	110X50	PB - N1, N3 - N4
Columna	115X60	PB
Columna	120X55	N2 - N3
Columna	120X60	PB - N1
Nervadura	15X30	PB - Apéndice
Nervadura	20X35	N1, N6- Apéndice
Nervadura	20X40	PB a N5
Nervadura	30X35	N11
Nervadura	35X60	N5- Apéndice
Nervadura	40X60	N1 a N4
Nervadura	60X70	N1 a N4
Trabe	20X75	Apéndice
Trabe	40X75	PB a N1, N6
Trabe	40X80	PB
Muro	35	S1-Apéndice
Muro	20	S1

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

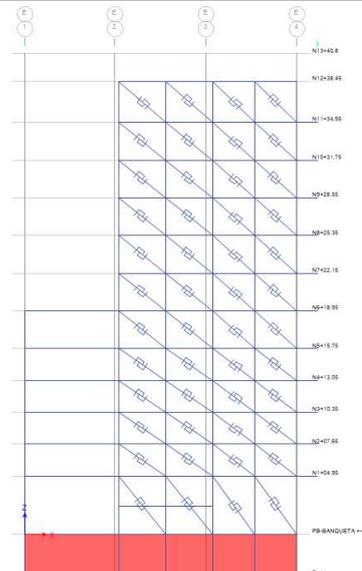
Debido a la limitada información disponible sobre la estructura original y el refuerzo realizado en 1987-1989, se realizaron levantamientos en sitio de las secciones geométricas de los elementos estructurales principales. La resistencia de los materiales de la estructura existente se obtuvo de algunos planos originales donde se establece que la resistencia del concreto es de 200 kg/cm<sup>2</sup> a la compresión y varilla grado 42 ( $f_y=4200$  kg/cm<sup>2</sup>). El módulo de elasticidad se consideró de 8000 raíz

cuadrada de  $f'c$ . Las características mecánicas del concreto utilizado en el refuerzo de 1987-1989 en las columnas y traveses nuevas fue de  $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$  con módulo de elasticidad de 8000 raíz cuadrada de  $f'c$ . Se realizaron mediciones de vibración ambiental en sitio para calibrar los modelos matemáticos de la estructura existente previos a estudiar las posibles alternativas de refuerzo. La propuesta de reforzamiento de la estructura con CRP se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. Se consideró el uso de 175 CRP distribuidos en los 4 ejes perimetrales, 16 dispositivos por nivel, donde el proyecto arquitectónico lo permite. En la Tabla 3 se muestran las características de los disipadores considerados y obtenidos de la metodología propuesta por Terán & Virto (Terán & Virto, 2009). El exponente post-fluencia es igual a 3.0, mientras que la pendiente post-fluencia es igual a 0.016. En las crujías donde se colocan los CRP se reforzaron los marcos originales de concreto estructural mediante la adición de un marco de acero circunscrito en el original utilizando perfiles tipo IPR (W18x46, W10X39, W8x24 y W8x18) valores en pulgadas y libras/pie, así como algunos elementos envueltos con placas de acero de hasta 1.27 cm de espesor, esto con la finalidad de darle mayor capacidad a cortante, flexión y confinamiento a las columnas concreto existentes, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra un esquema de dicho refuerzo.

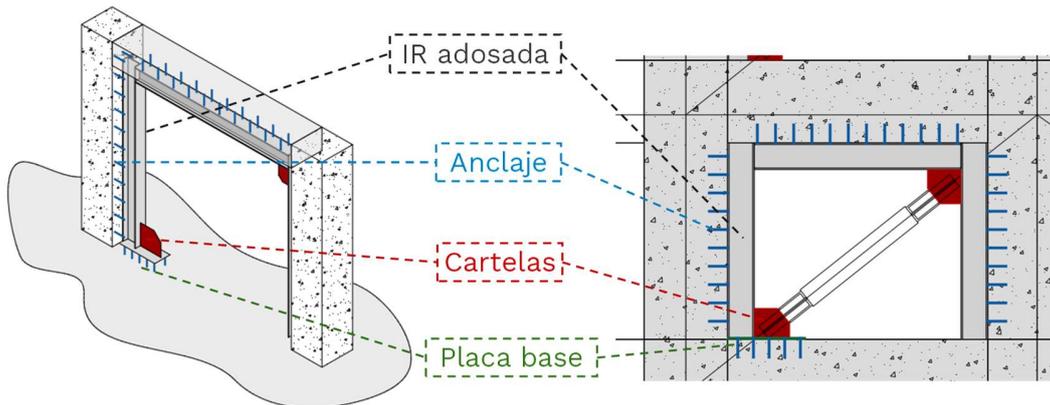




d) Vista del eje A



e) Vista del eje E



f) Representación esquemática de los marcos reforzados con perfiles IR  
 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	16	30,000	100	0.016	31.5	PB
2	32	40,000	80	0.016	24.6	N1-N2
3	64	20,500	60	0.016	17.6	N3-N6
4	56	12,500	40	0.016	11.8	N7-N10
5	7	4,500	20	0.016	5.6	Apéndice

Para el análisis y diseño del refuerzo propuesto se consideró una metodología basada en desplazamientos, la cual considera 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, en este caso se considera un valor de distorsión máxima de entrepiso de 0.01 como objetivo deseado.

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

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

Donde  $\delta_{Max}$  es el desplazamiento lateral máximo en la azotea asociado al nivel de desempeño y  $\alpha$  es un cociente de corrección que está asociado a la ductilidad máxima del sistema y el número de pisos, su valor se obtuvo de la Tabla 4.

Tabla 4. Valores sugeridos para  $\alpha$ , (Terán y Virtro, 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 en la azotea  $\delta_{Max}$  se obtiene con la siguiente expresión:

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

Donde  $CD$  es un coeficiente de distorsión máxima que relaciona la distorsión máxima y la distorsión promedio, su valor se puede obtener de la Tabla 5.  $H$  es la altura total de la estructura y  $\gamma_{OI}$  la distorsión asociada al nivel de desempeño deseado.

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

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

La ductilidad máxima  $\mu_{Max}$  del sistema 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  $\theta$  es el ángulo de inclinación del CRP,  $h$  es la altura del entrepiso,  $\varepsilon$  es la deformación unitaria del acero a la fluencia,  $L_{CRP}$  es la longitud del CRP y  $K_f$  es un factor de rigidez proporcionado por el fabricante de los 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

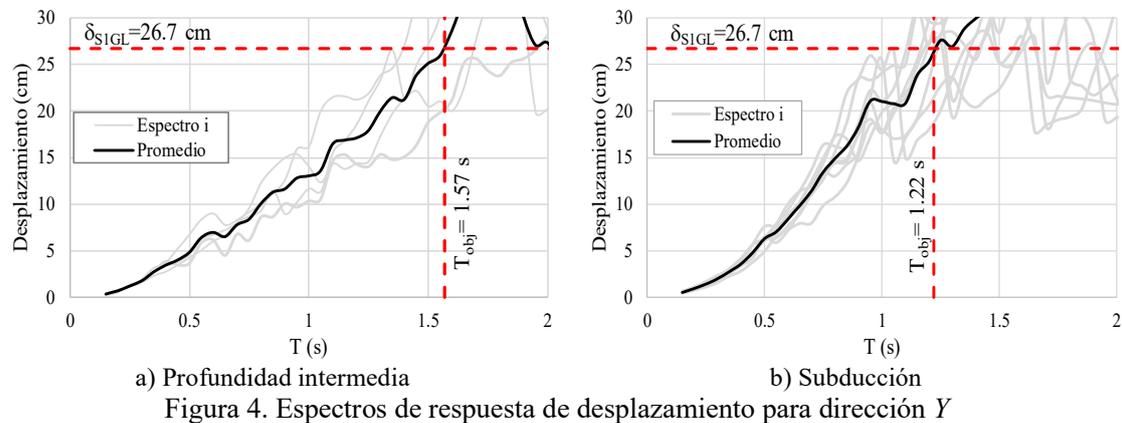
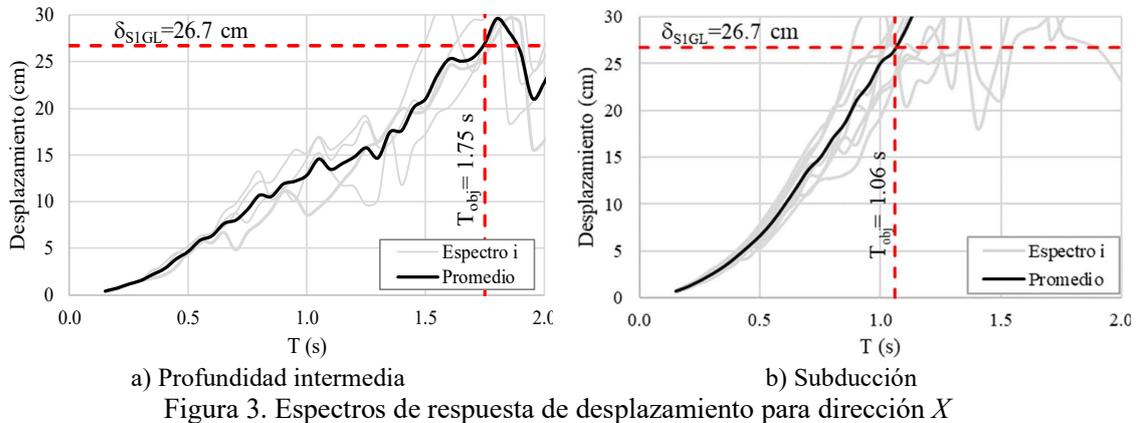
Al emplear la metodología anterior, el desplazamiento objetivo para un oscilador de un grado de libertad es de 26.7 cm, en la Tabla 7 se muestra los valores de los parámetros empleados.

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	38	495	5.3	1.11	4.8	1.2	1.2	32	26.7
Y	42	490	5.3	1.09	4.8	1.2	1.2	32	26.7

Empleando la información descrita en la sección 4.4, se calcularon los espectros de desplazamiento para cada dirección y fuente sísmica, considerando el valor de ductilidad mostrado en la Tabla 7 (4.8), un 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 y fuentes sísmicas. Se observa que para la dirección X los periodos objetivos son 1.7 s y 1.0 s, mientras que para dirección Y son 1.5 s y 1.2 s. Dado que el periodo más corto es de 1.0 s este fue el que se seleccionó para ambas direcciones.



#### 4. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

Se realizó un modelo numérico tridimensional de la estructura en 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. MODELO

La Figura 5 muestra imágenes del modelo desarrollado en ETABS (ETABS, 2023). Las columnas y trabes peraltadas se modelaron como elementos tipo barras o línea, mientras que los muros y losas se modelaron como elementos finitos tipo área (*Shell*) con la discretización suficiente para capturar adecuadamente su comportamiento. Los CRP se modelaron por medio de resortes tipo “*link Plastic Wen*” con las propiedades mostradas en la Tabla 3. Todos los elementos de concreto estructural se consideraron con inercias reducidas por agrietamiento de acuerdo con los establecido en las NTC-DS 2020.

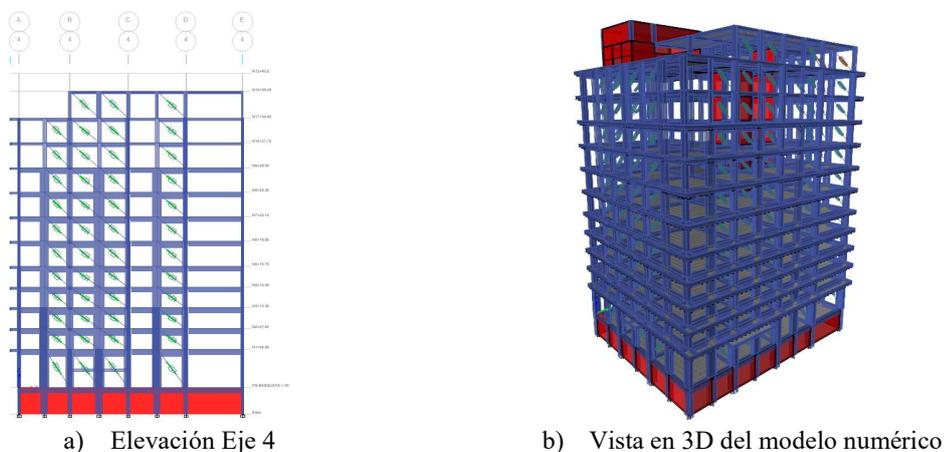


Figura 5. Modelo de la estructura en ETABS

Las cargas consideradas para el análisis de la estructura fueron las siguientes: Peso propio de losas  $450 \text{ kg/cm}^2$ , sobrecarga muerta (SCM) de  $300 \text{ kg/m}^2$  para los niveles PB al 11 y  $40 \text{ kg/m}^2$  para azotea; Carga viva instantánea (CVIns) de  $100 \text{ kg/m}^2$  para los niveles PB al 11 y  $20 \text{ kg/m}^2$  para azotea; Carga viva máxima (CVMax) de  $190 \text{ kg/m}^2$  para los niveles PB al 11 y  $100 \text{ kg/m}^2$  para azotea. El peso propio de columnas y muros se consideró directamente en el análisis

#### 4.2. NO LINEALIDAD EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Para el análisis se desarrolló un modelo matemático detallado que considera el comportamiento no lineal de los elementos estructurales por medio de articulaciones plásticas de fibras. En la Figura 6 se muestra la modelación por medio de fibras de una columna compuesta, es decir, considerando el concreto y el perfil de acero adosado. En la Figura 6a se muestran los elementos de la columna, sus barras de refuerzo longitudinal y transversal, así como su refuerzo con placas de acero y un perfil IPR de acero. La Figura 6b muestra la curva de momento-rotación de esta misma columna.

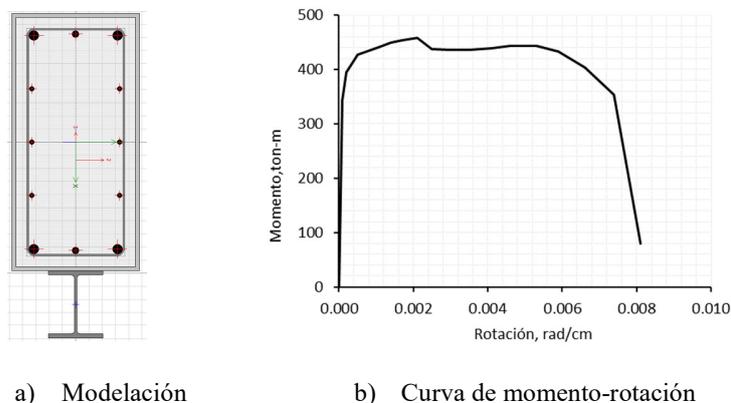
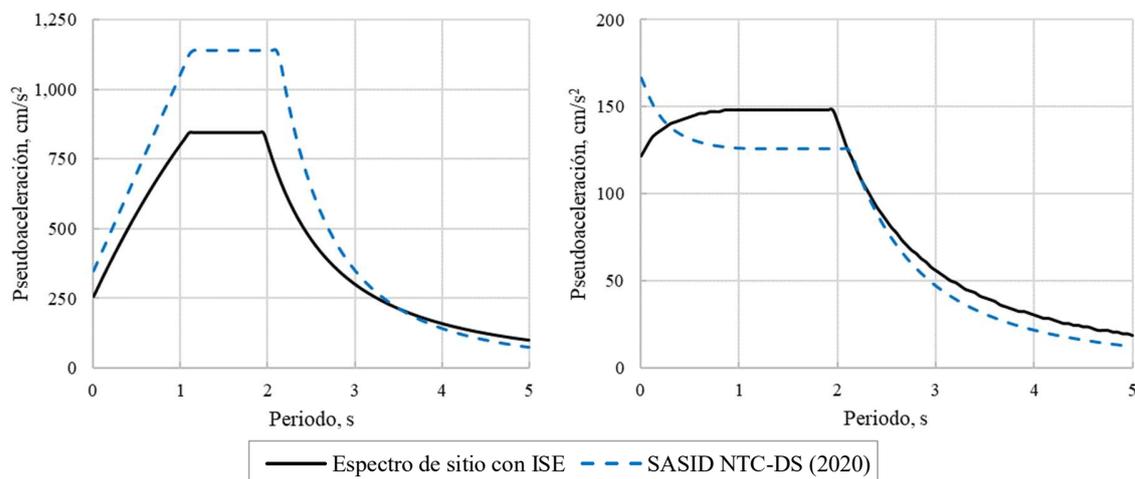


Figura 6. Modelación de elemento columna en ETABS

### 4.3. ESPECTRO DE DISEÑO

En la Figura 7 se presentan con línea azul discontinua el espectro elástico y espectro de diseño proporcionado por SASID web (SASID,2020). Por su parte, con línea continua color negro se muestran los espectros considerando la interacción suelo estructura (ISE) cinemática e inercial, dicha información fue obtenida de un estudio específico para el predio y la cimentación existente “Espectro de diseño sísmico de sitio con efectos de interacción suelo-estructura y generación de pares de acelerogramas” (Sismica de suelos, 2022). Los espectros de diseño corresponden a estructuras del Grupo B, con un factor de irregularidad del 0.7, un factor de comportamiento sísmico de  $Q=3$  e hiperestaticidad igual 1.25. El espectro que toma en cuenta la ISE considera un amortiguamiento del 7%, obtenido de la parte inercial de los efectos ISE, mientras que el espectro de SASID web un 5% sin efectos ISE.



a) Espectros transparentes, elásticos sin reducciones con efectos ISE.

b) Espectros de diseño reducidos  $Q=3$  con efectos ISE.

Figura 7. Espectros transparentes y de diseño de sitio con efectos ISE y de SASID (SASID,2020)

### 4.4. MOVIMIENTOS DEL SUELO POR SISMO

Los acelerogramas sintéticos utilizados, en los análisis no lineales paso a paso, se obtuvieron del estudio específico del sitio, tomando en cuenta la influencia del cajón de cimentación y pilotes por (Sismica de Suelos, 2022). En dicho estudio se proporcionaron espectros de respuesta y de diseño considerando efectos de interacción suelo estructura cinemática e inercial (ISE CIN-INE) y 12 pares de acelerogramas sintéticos asociados a dichos espectros para ser utilizados en el análisis dinámico no lineal como lo establece las NTC-DS (NTC-DS, 2020). De los doce pares de acelerogramas sintéticos, 4 pares corresponden a sismos de profundidad intermedia y 8 pares a sismos de subducción.

En la Figura 8 se presentan los espectros de peligro uniforme (EPU) proporcionados por la herramienta SASID para cada fuente sísmica. Se puede observar que para cada fuente sísmica hay cuatro espectros de peligro uniforme (curva de color negro y naranja) correspondientes a diferentes épocas, debido a la rigidización del suelo de la Ciudad de México como consecuencia de la extracción del agua del subsuelo. En la misma figura se presenta el EPU envolvente con línea discontinua de color gris.

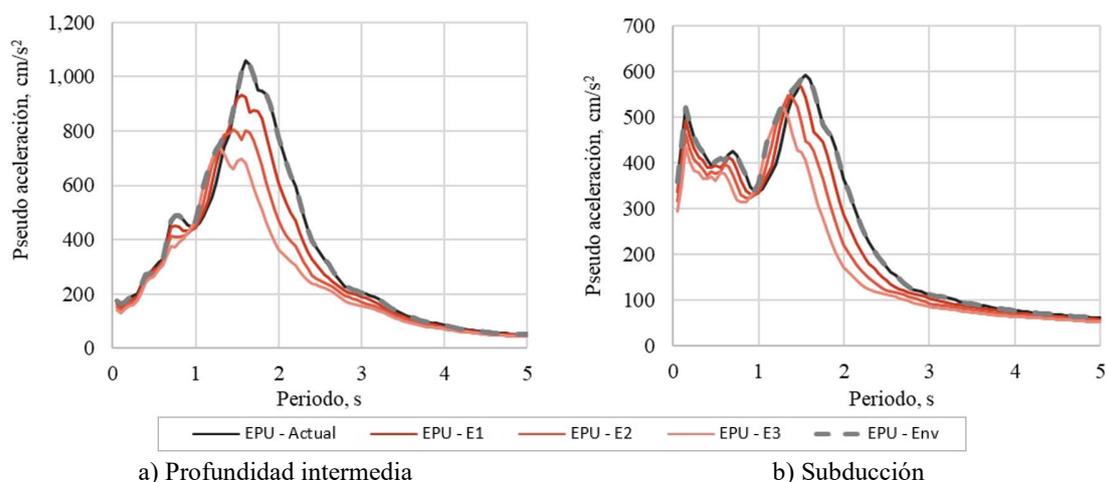


Figura 8. Espectros de peligro uniforme para ambas fuentes

A los registros de 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) coseinodal del 5% de la longitud total de la señal. En la Tabla 2 se presentan las características de los acelerogramas.

Tabla 8. Características de los acelerogramas sintéticos de estudio de sitio

Acelerograma	Fuente	# de puntos	$\Delta t$ , s	Acel. Máx. absoluta (gal)	
				Dir. X	Dir. Y
1	Profundidad intermedia	19,320	0.01	190	166
2	Profundidad intermedia	18,668	0.01	179	138
3	Profundidad intermedia	17,620	0.01	121	122
4	Profundidad intermedia	17,301	0.01	168	162
5	Subducción	11,792	0.01	303	213
6	Subducción	13,147	0.01	217	235
7	Subducción	10,827	0.01	243	231
8	Subducción	23,345	0.01	214	178
9	Subducción	12,133	0.01	290	223
10	Subducción	15,377	0.01	262	224

Acelerograma	Fuente	# de puntos	$\Delta t$ , s	Acel. Máx. absoluta (gal)	
				Dir. X	Dir. Y
11	Subducción	14,550	0.01	259	228
12	Subducción	11,957	0.01	218	222

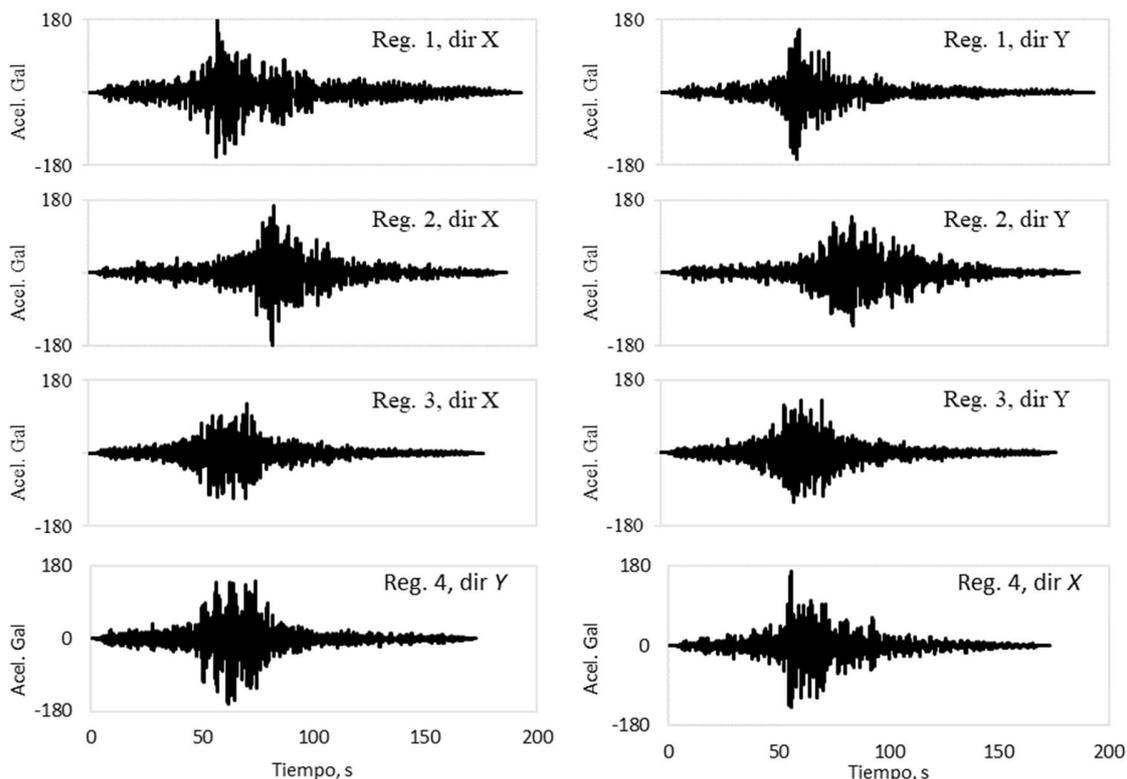
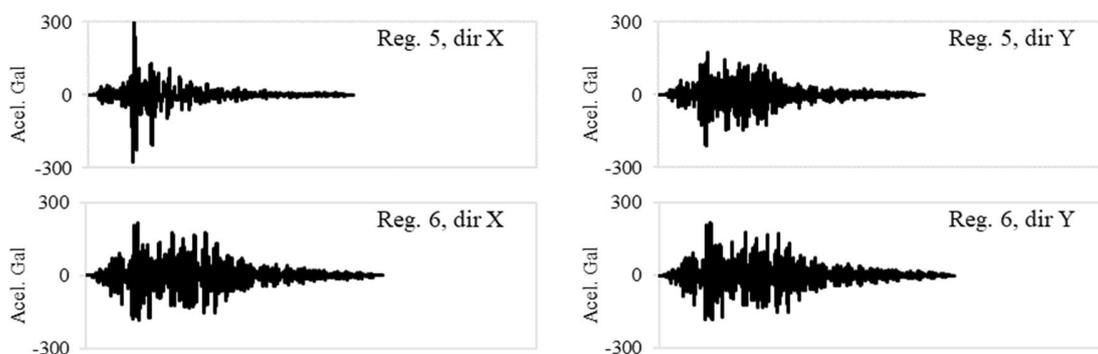


Figura 9. Registros sísmicos de profundidad intermedia



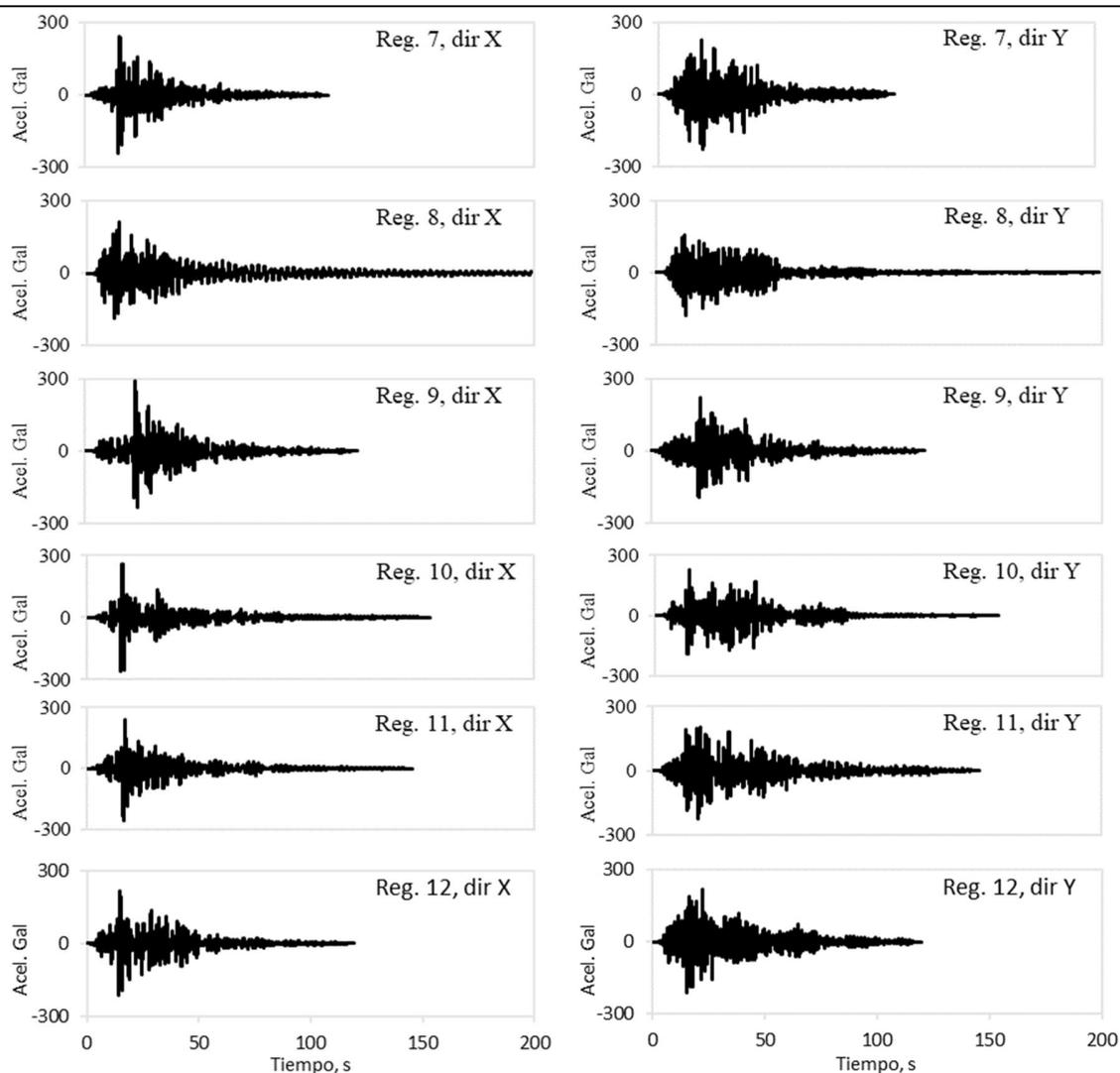


Figura 10. Registros sísmicos de subducción

De acuerdo con los requerimientos de las NTC-DS (NTC-DS, 2020), el promedio de los espectros de pseudo-aceleración, deben ser similares a la envolvente de los cuatro espectros de peligro uniforme (EPU), esto en un intervalo 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 0.95 s, el intervalo de interés es de 0.095 s hasta 1.43 s. Por lo anterior, los acelerogramas se afectaron por factores de escala de 1.27 y 0.87 para sismos de profundidad intermedia y de subducción, respectivamente. En la Figura 11 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. La Figura 11a y Figura 11b, se

muestran los espectros sin escalar, mientras que la Figura 11c y Figura 11d se muestran los espectros escalados. Se aprecia que el promedio de los acelerogramas es similar que la envolvente de los EPU.

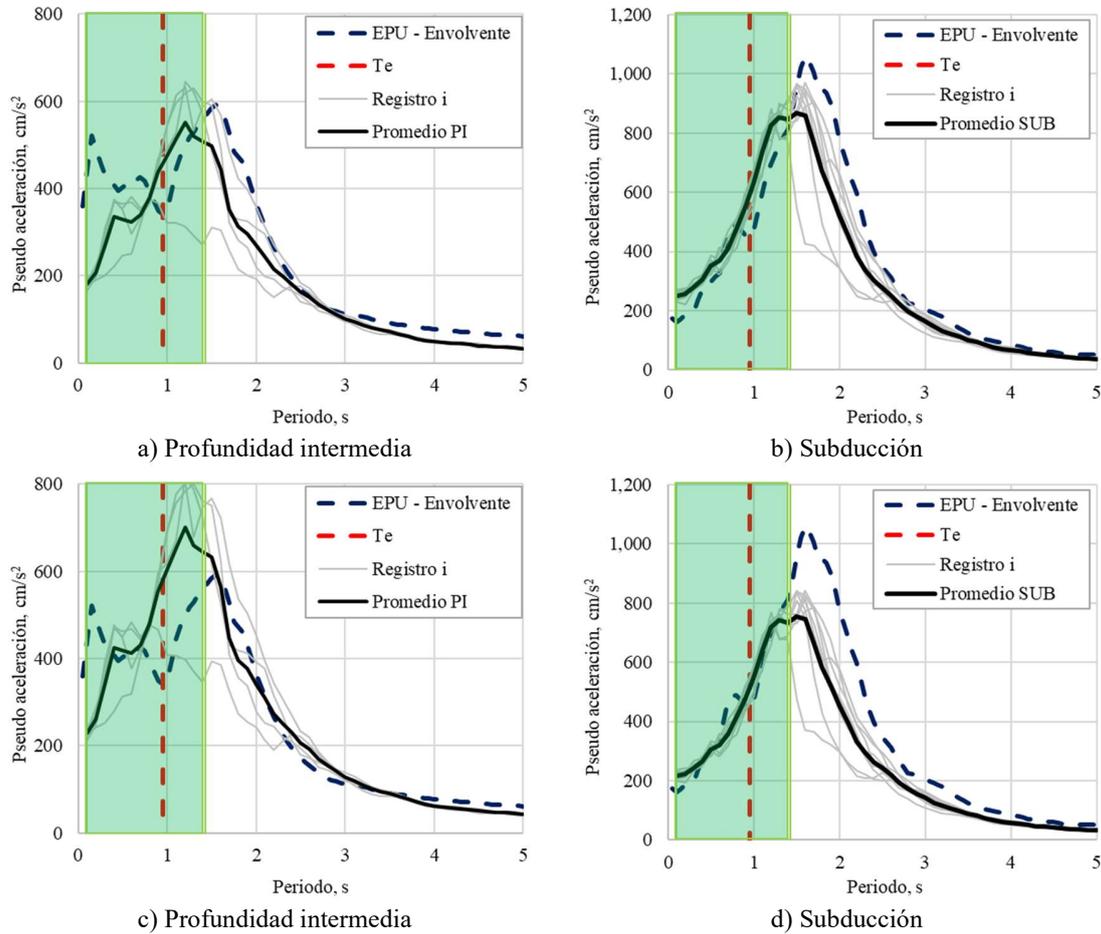


Figura 11. Espectros de acelerogramas sin escalar, escalados y envolvente de los EPU

## 5. RESULTADOS

### 5.1. MODOS DE VIBRAR

En la Figura 12 se muestran los primeros tres periodos de vibrar de la estructura reforzada, con base rígida, es decir, sin efectos ISE, y se observa que el modo fundamental de vibrar es en dirección  $X$  con un valor de  $T_e = 0.95$  s, el segundo modo en dirección  $Y$  con un valor de  $T_e = 0.90$  s. Finalmente, el tercer modo de vibrar en dirección  $Z$  tiene un valor  $T_e = 0.61$  s.

De acuerdo con los resultados de la metodología empleada, el periodo objetivo asociado a una distorsión de entrepiso de 0.01 sería  $T_{obj} = 1.06$  s. Al modelar el refuerzo propuesto (CRP, encamisado

de columnas y marcos metálicos) el periodo fundamental de vibrar fue de 0.95 s, con lo anterior se espera un mejor comportamiento estructural, ya que es un periodo un poco menor que el periodo objetivo, viéndose reflejado en menores desplazamientos y distorsiones de entrepiso.

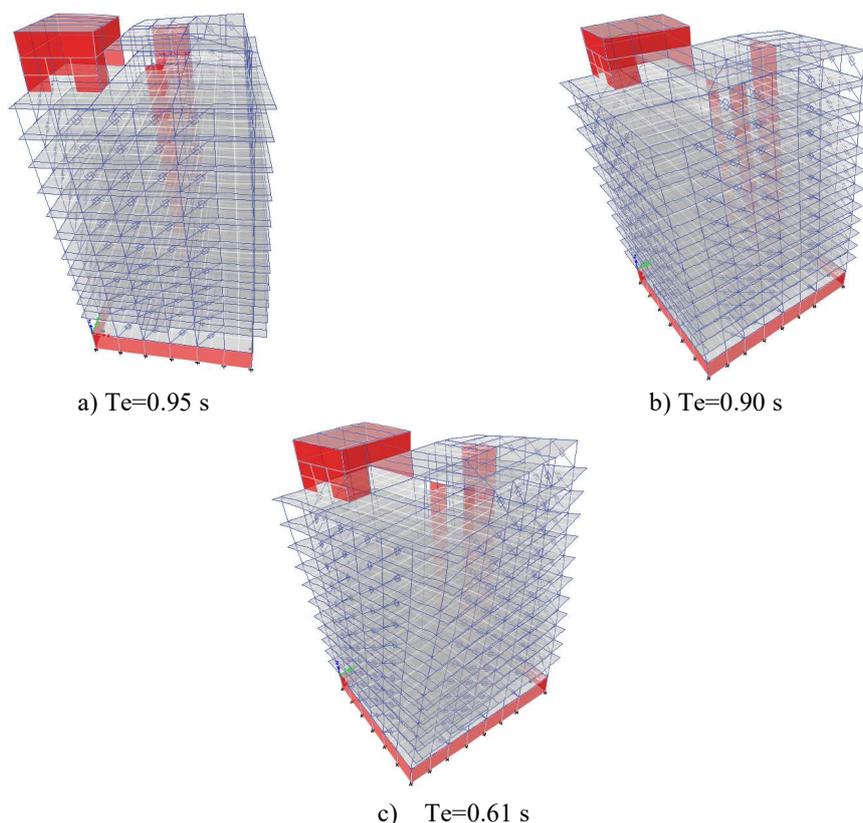


Figura 12. Modos de vibrar de la estructura con CRP

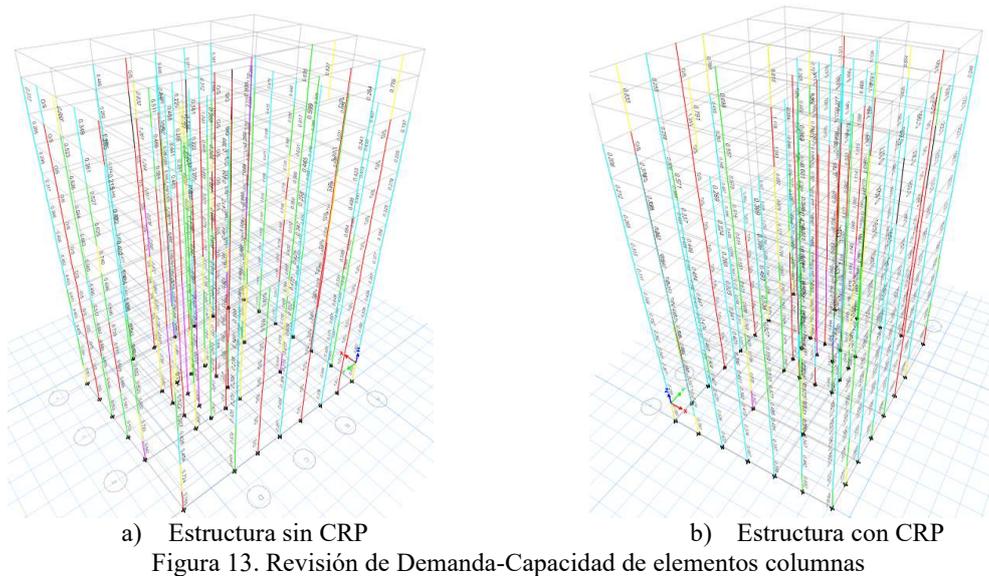
En la Tabla 9 se muestra la comparación de periodos de vibrar entre la estructura previo a la rehabilitación y posterior a la implementación de los disipadores CRP, se aprecia que el modo fundamental de vibrar reduce su valor, pasando de 1.61 s a 0.95 s. Los valores anteriores son considerando base rígida.

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	1.61	X	58.1%	0.95	X	65.9%
2	1.45	Y	64.4%	0.90	Y	66.5%
3	1.3	Z	64.8%	0.61	Z	69.9%
4	0.68	X	80.7%	0.35	Y	83.3%
5	0.64	Y	81.3%	0.34	X	87.6%
6	0.49	Z	78.2%	0.24	Z	86.5%

## 5.2. REVISIÓN DEL REFUERZO PROPUESTO

En la Figura 13 se presentan la revisión de la demanda-capacidad de los elementos columna para la estructura sin refuerzo (a) y la estructura con CRP (b) evaluada mediante las combinaciones gravitacional y sísmica con el espectro de diseño considerando los efectos de ISE. Se observa que con el uso de los CRP las interacciones disminuyen en los elementos estructurales. Es importante mencionar que dicha revisión se realizó con un análisis modal espectral, el cual es un análisis simplificado para efectos de diseño inicial, cual que no necesariamente toma en consideración el aporte de la disipación de energía de los CRP, por lo cual se realizaron los análisis de revisión por medio de análisis dinámicos No lineales paso a paso con los pares de acelerogramas sintéticos en la base de la cimentación que incluyen los efectos ISE. A continuación, se muestran comparativas de la relación demanda-capacidad de los elementos estructurales y los perfiles de desplazamiento y distorsión de entrepiso.



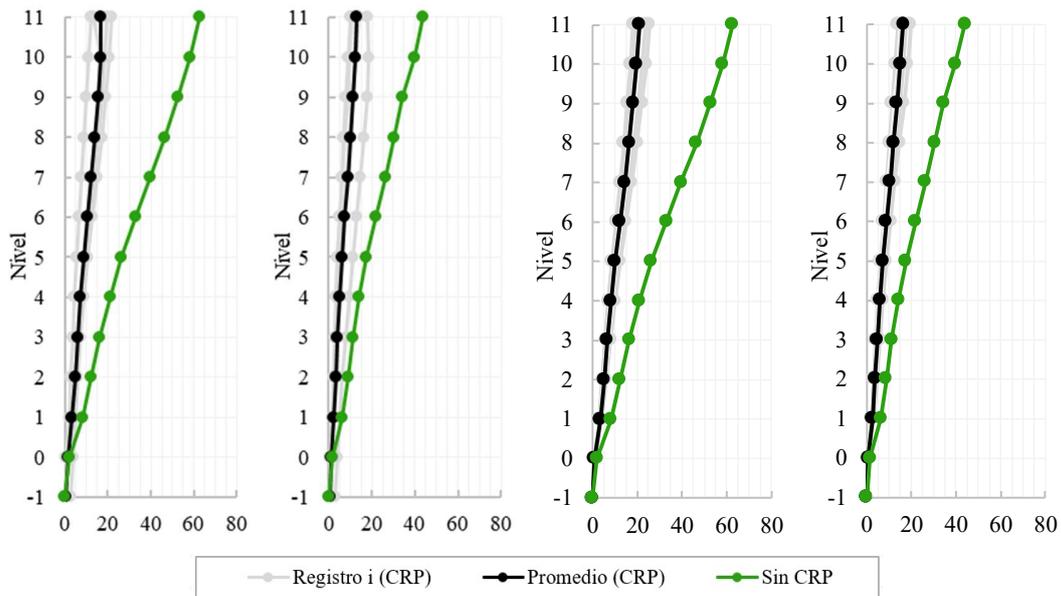
## 5.3. DESPLAZAMIENTOS LATERALES Y DISTORSIONES DE ENTREPISO

En la Figura 14 y Figura 15 se muestran los desplazamientos laterales y distorsiones de entrepiso, en línea gris se observan los resultados de los registros individuales para la estructura rehabilitada con CRP y en color negro se muestra su promedio. Finalmente, los resultados de la estructura sin CRP se muestra en color verde.

Con un análisis modal espectral se calcularon los desplazamientos totales a nivel de azotea de la estructura sin CRP, mismos que tuvieron un valor de 62.6 cm y 44 cm en dirección *X* e *Y*,

respectivamente. La estructura con CRP evaluada mediante el análisis dinámico paso a paso presentó desplazamientos promedio de 21.0 cm y 16.5 cm en dirección  $X$  e  $Y$ , respectivamente.

Las distorsiones máximas de entrepiso se observan en la Figura 15, para la estructura sin CRP se tiene un valor máximo de 2.14% y 1.73% en dirección  $X$  e  $Y$ , respectivamente. Los valores para la estructura con CRP son de 0.69% y 0.59% en dirección  $X$  e  $Y$ , respectivamente.



a) Desp. en  $X$ , cm

b) Desp. en  $Y$ , cm

c) Desp. en  $X$ , cm

d) Desp. en  $Y$ , cm

Profundidad intermedia

Subducción

Figura 14. Perfiles de desplazamiento máximos

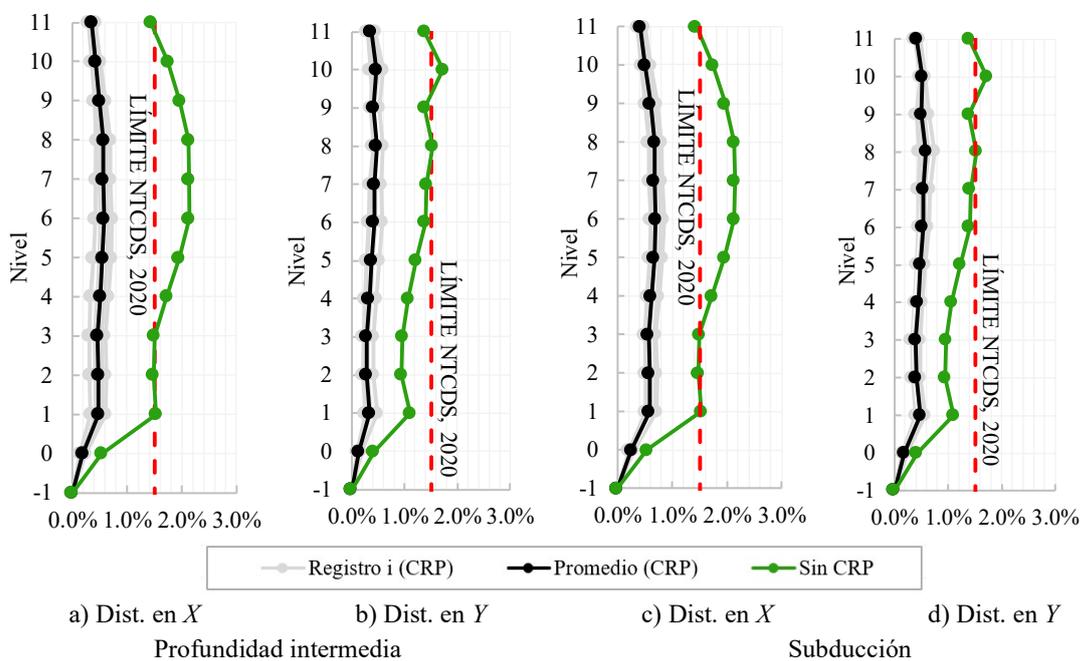
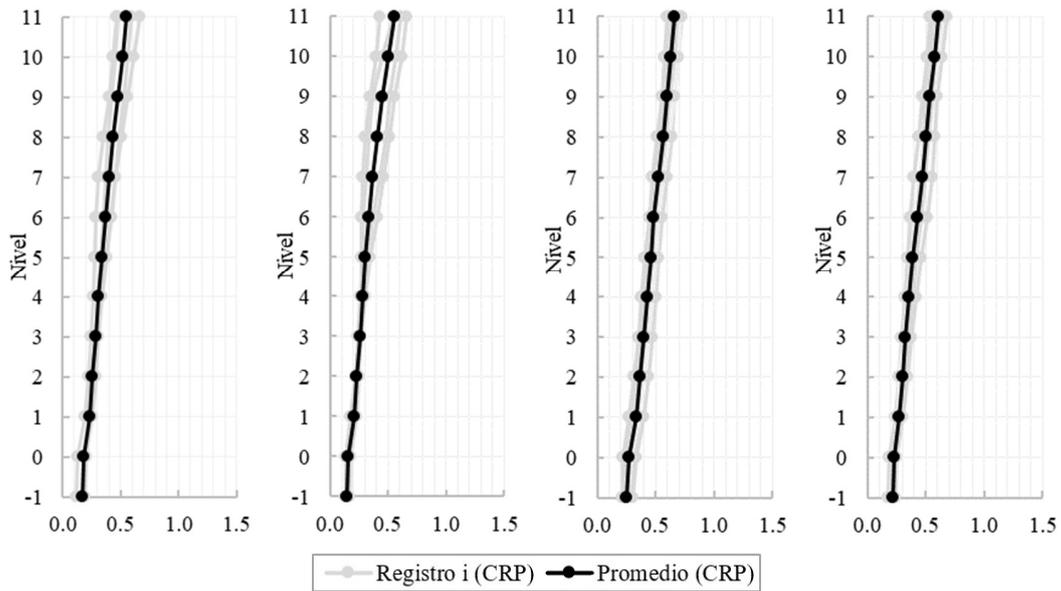


Figura 15. Perfiles de distorsión de entrepiso máximos

#### 5.4. ACELERACIONES Y VELOCIDADES DE ENTREPISO

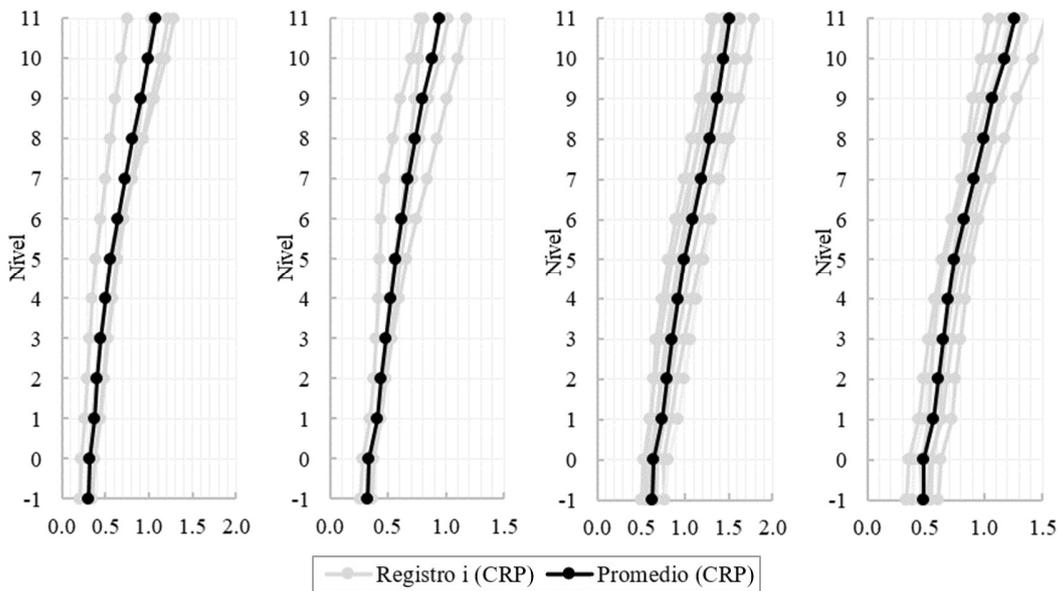
Las aceleraciones máximas absolutas se observan en la Figura 16, los valores máximos calculados para la estructura son 0.67 g y 0.61 g en dirección  $X$  e  $Y$ , respectivamente.



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 16. Perfiles de aceleración máxima absoluta de entripiso

Por su parte, las velocidades máximas absolutas se observan en la Figura 17, los valores máximos registrados son 1.51 m/s y 1.26 m/s en dirección  $X$  e  $Y$ , respectivamente.



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 17. Perfiles de velocidad máxima absoluta de entripiso

## 5.5. CURVAS DE HISTÉRESIS DE CRP

Para conocer el nivel de disipación de energía de los disipadores tipo CRP en la Figura 18 se muestran las curvas de histéresis obtenidas de los análisis. Se puede concluir que los CRP desarrollarán ductilidades por arriba de 3.0 y menores de 6.0, por lo que durante los sismos disiparán energía en cada dispositivo sin sobrepasar el límite de ductilidad recomendado.

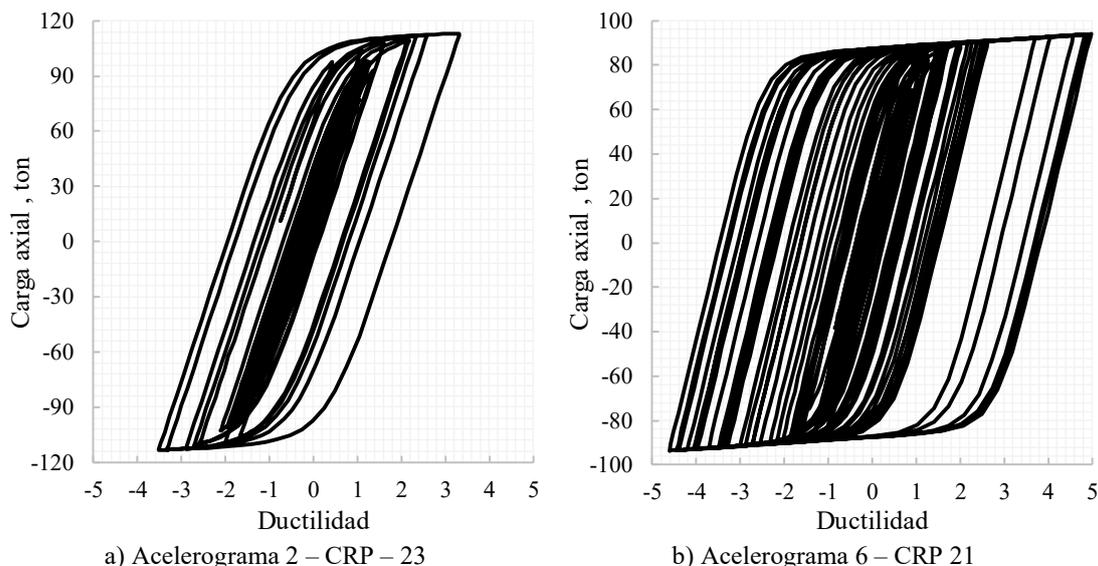


Figura 18. Curvas de histéresis de los CRP

## 5.6. ESTADOS FINALES

Los estados finales del análisis de la estructura se muestran en la Figura 19. Se aprecia que para los acelerogramas de subducción se presentan algunas articulaciones, principalmente en traveses y en su mayoría de ocupación inmediata (verde), una menor cantidad de seguridad de vida (azul) y una cantidad mínima de prevención de colapso (rojo). Sin embargo, se puede apreciar que en la mayoría de los escenarios los daños son mínimos lo cual no comprometen la integridad del edificio.

Se debe considerar que los resultados presentados de los análisis No lineales son con un modelo con base empotrada. Los efectos de ISE se consideran con la metodología que se incluye en las NTC-DS 2020, con el método del oscilador de remplazo. Una de las principales aportaciones que se obtienen al considerar los efectos de ISE el amortiguamiento adicional que se desarrolla en el sistema suelo-cimentación-estructura. En el caso de estudio, el amortiguamiento total considerando el efecto ISE es de 7.0 % del amortiguamiento crítico. Las estructuras de concreto, en general, se considera que posee un amortiguamiento inherente del 5.0 % del crítico, por lo que, en este caso de estudio, el efecto ISE aporta un 2.0% de amortiguamiento adicional, lo que permitió reanalizar la estructura y optimizar la propuesta de refuerzo con CRP y espesores de placas en el refuerzo de la estructura del edificio. El efecto inercial del ISE, también reveló el alargamiento de los periodos de vibrar del edificio de 0.1s. prácticamente en ambas direcciones el cual mantendrá prácticamente los mismos resultados de los análisis con base empotrada.

La cimentación del edificio, a base de un cajón de compensación parcial y un número de pilotes de fricción con controles metálicos para maniobras de nivelación se ha comportado adecuadamente durante la vida útil del edificio. Se ha dado el mantenimiento adecuado a los controles de pilotes y se mantiene el edificio dentro de los límites reglamentarios de verticalidad y nivelación. En este estudio no se consideró ninguna rehabilitación en la cimentación, siendo que se ha comportado de manera adecuada y la rehabilitación estructural disminuirá las demandas hacia los elementos de cimentación.

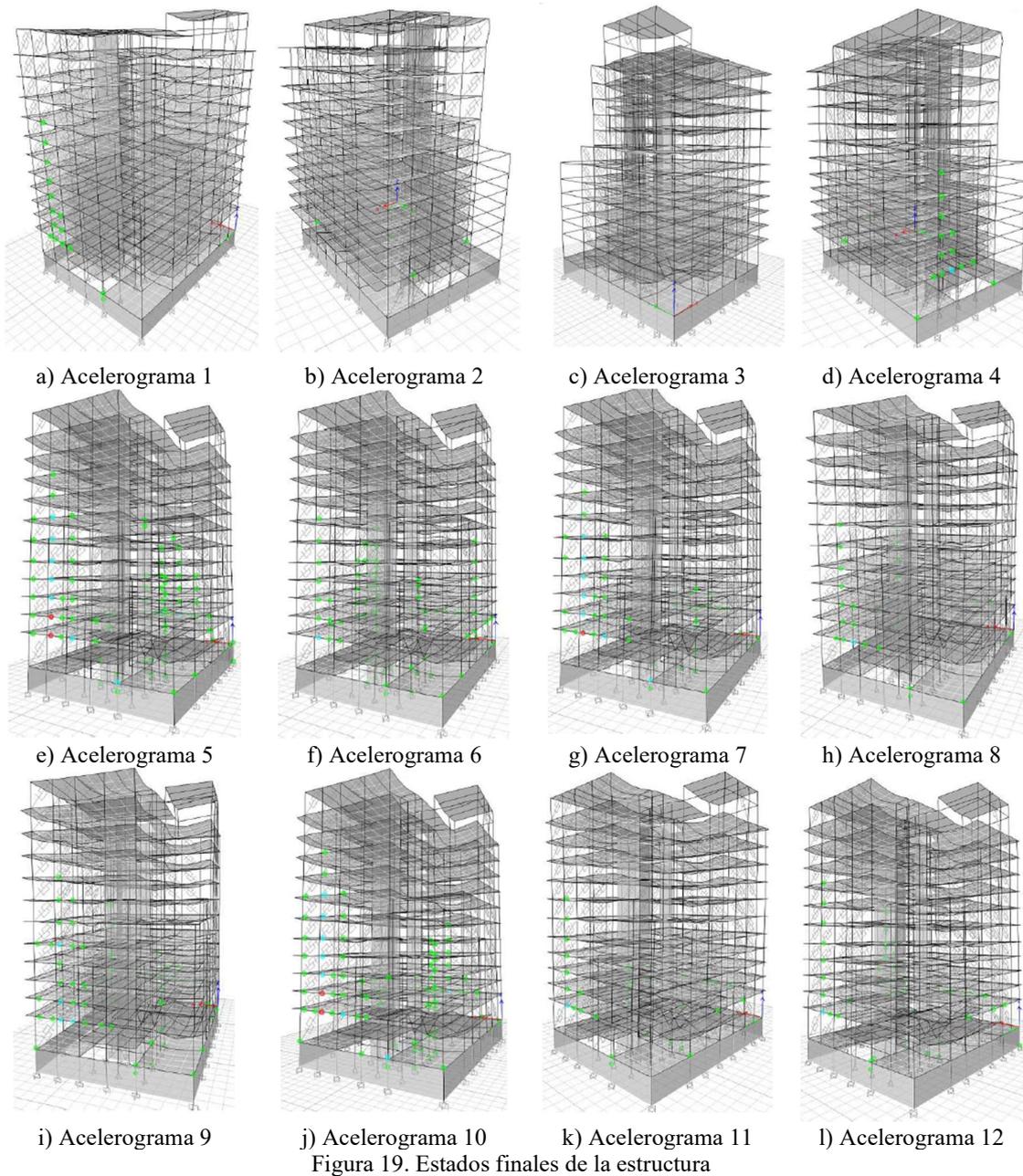


Figura 19. Estados finales de la estructura

## 6. COSTOS DE REHABILITACIÓN

En la 50 años, representa una inversión razonable a los costos de mercado. Suponiendo una inversión en elementos no estructurales, como son renovación de todas sus instalaciones, fachadas, cancelerías, recubrimientos arquitectónicos para viviendas, carpinterías y otros costos asociados a la comercialización de vivienda terminadas, el costo por m<sup>2</sup> de estos elementos rondará los \$ 5,000.00 a \$5,700.00 pesos en números brutos. Siendo que los costos de venta, al usuario final de las viviendas, en zona de alta plusvalía en la CDMX es de mínimo \$45,000.00, es factible la inversión por parte de los desarrolladores inmobiliarios en este u otros casos similares.

Tabla 10 se presenta un resumen de los costos de rehabilitación del edificio considerando el uso de contraventeos restringidos al pandeo (CRP), el área de construcción es 8,530 m<sup>2</sup> por lo que la rehabilitación por metro cuadrado es de \$3,820.00. Se considera importante mencionar, que siendo un edificio existente, que prácticamente ha concluido su primer ciclo de vida desde su construcción original en la década de 1970, el costo asociado a esta rehabilitación, para un nuevo ciclo de vida de 50 años, representa una inversión razonable a los costos de mercado. Suponiendo una inversión en elementos no estructurales, como son renovación de todas sus instalaciones, fachadas, cancelerías, recubrimientos arquitectónicos para viviendas, carpinterías y otros costos asociados a la comercialización de vivienda terminadas, el costo por m<sup>2</sup> de estos elementos rondará los \$ 5,000.00 a \$5,700.00 pesos en números brutos. Siendo que los costos de venta, al usuario final de las viviendas, en zona de alta plusvalía en la CDMX es de mínimo \$45,000.00, es factible la inversión por parte de los desarrolladores inmobiliarios en este u otros casos similares.

Tabla 10. Costos asociados a la rehabilitación del edificio usando CRP

Elemento	Material	Cantidad	Costo unitario	Importe
Columna	Acero	1.3 ton	\$ 65,000.00	\$ 84,500.00
	Concreto	579.0 m <sup>3</sup>	\$ 15,000.00	\$ 8,684,550.00
Trabes	Acero	20.9 ton	\$ 65,000.00	\$ 1,358,500.00
	Concreto	686.7 m <sup>3</sup>	\$ 15,000.00	\$ 10,300,500.00
Muros	Concreto	139.9 m <sup>3</sup>	\$ 15,000.00	\$ 2,098,650.00
Sistema piso	Concreto	3.8 m <sup>3</sup>	\$ 15,000.00	\$ 57,000.00
Disipadores	CRP	175 piezas	\$ 10,000,000.00	\$ 10,000,000.00
Total				\$ 32,584,000.00
Área total				8,530 m <sup>2</sup>
Costo / m <sup>2</sup>				\$ 3,820.00

## 7. CONCLUSIONES

Se presentó el caso de la rehabilitación de un edificio existente de más de 40 años de antigüedad de 10 niveles sobre nivel de banqueta y un sótano con un cajón de cimentación con pilotes de fricción con control metálico ubicado en la zona de suelo blando de la Ciudad de México. Esta edificación se pretende rehabilitar para uso de vivienda y se contempla el refuerzo estructural para alcanzar

---

razonablemente los requerimientos de seguridad estructural que se establecen en la Reglamentación actual para la CDMX. Se realizó la evaluación de la propuesta de rehabilitación utilizando contraventeos restringidos al pandeo colocados en los marcos perimetrales del edificio y considerando los espectros de Peligro Uniforme y de diseño con efectos de interacción suelo estructura cinemática e inercial (ISE CIN-INE). Se realizaron análisis de verificación dinámicos no lineales paso a paso con acelerogramas incidentes al nivel de la base de la cimentación. Se revisó el comportamiento de la estructura en términos de desplazamiento lateral, distorsión de entrepiso, aceleración y velocidad absolutas. De este estudio se concluye lo siguiente:

- Se debe verificar en sitio las dimensiones reales de elementos estructurales especialmente para edificaciones existentes de varias décadas de antigüedad y que no cuenta con toda su información técnica disponible.
- Se considera de gran utilidad y valor realizar mediciones de vibración ambiental, previas a la rehabilitación estructural y para calibrar adecuadamente los modelos matemáticos de la estructura. Se considera realizar nuevas mediciones de vibración ambiental posteriores a la rehabilitación y se sugerirá instrumentar permanentemente la edificación para conocer su respuesta antes sismos futuros.
- El edificio existente ha presentado un comportamiento adecuado durante su vida útil y se mantuvo habitable por varias décadas. El edificio presenta un refuerzo estructural elaborado a finales de la década de 1980 consistente en el aumento de rigidez a los marcos perimetrales incrementando peralte de trabes y adicionando columnas de concreto estructural. Una de las razones por las que la estructura no ha sufrido daños mayores durante eventos sísmicos ocurridos en la CDMX en los últimos 40 años se debe en gran medida a los efectos de Interacción Suelo Estructura (ISE) que han alejado la respuesta del edificio de la zona de resonancia con el subsuelo donde es mayor el peligro sísmico en el sitio. El nuevo proyecto de rehabilitación estructural deberá considerar los efectos de ISE.
- El empleo de los CRP como rehabilitación estructural, solo en marcos perimetrales, la adición de algunos muros de concreto en zona de elevadores y escaleras ayudó a que la estructura redujera sus desplazamientos y los periodos de vibrar fundamentales en cada dirección. La reducción en los periodos de vibrar considerando la rigidez de los CRP y el refuerzo de placas de acero en algunos elementos de la estructura es de entre 50 y 70 %.
- Los desplazamientos máximos para la estructura sin refuerzo resultaron de entre 62.6 cm y 44 cm en dirección *X* y *Y*, respectivamente. En el caso de las distorsiones de entrepiso máximas del edificio sin reforzar presenta valores de 2.14 % y 1.73 % en dirección *X* y *Y*, respectivamente, valores no adecuados para el tipo de estructuración y límites normativos.

- El evaluar la estructura reforzada y considerando las disminuciones en las ordenadas espectrales de diseño por efecto de ISE cinemático (del orden de 20% menores) y el aporte de 2.0 % adicional de amortiguamiento por efecto de ISE inercial, se observó que los valores máximos de distorsión de entrepiso se redujeron a valores de 0.69 % y 0.59% en dirección  $X$  y  $Y$ , respectivamente, teniendo reducciones a un 32% en comparación con la estructura original sin refuerzo. Lo anterior, confirma que considerar los efectos de ISE y el uso de elementos CRP mejora el comportamiento estructural, reduciendo desplazamientos laterales y distorsiones de entrepiso.
- El empleo de la metodología simplificada de Terán y Gilmore (Terán & Gilmore, 2009) permitió identificar un periodo objetivo para una distorsión planteada de 1%, al obtener un periodo menor al objetivo era de esperarse que las distorsiones también se redujeran. Lo anterior se observó en los resultados de análisis no lineales donde consistentemente las distorsiones fueron menores a 1%. Esta metodología puede servir para determinar de manera aproximada los desplazamientos de la estructura equipada con CRP.
- 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 el nuevo ciclo de vida útil del edificio.
- Los estados finales de los análisis muestran que se presentan articulaciones plásticas en elementos estructurales, sin embargo, se puede concluir que no se compromete la integridad de la estructura, ya que en su mayoría se catalogan como operación inmediata (IO) y a excepción de 3 todas se ubican en las trabes.
- El costo de rehabilitación para la estructura por metro cuadrado es de \$3,820.00, dado que la edificación se construyó en la década de 1970, el costo asociado a los trabajos de reacondicionamiento estructural puede considerarse viable, esto si se compara principalmente con otros métodos de refuerzo que requieran re-cimentación en su alcance.

## 8. REFERENCIAS

- ETABS (2023), Integred 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.
- 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://sasid.unam.mx/webNormasCDMX/>

- 
- Sísmica de Suelos S.A de C.V. (2022). Espectro de diseño sísmico de sitio con efectos de interacción suelo-estructura y generación de pares de acelerogramas para el edificio ubicado en Londres No. 107, Col. Juárez, Alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México.
  - Terán Gilmore A. y Virtro Cambrey N. (2009), “Diseño basado en desplazamientos de edificaciones bajas rigidizadas con contravientos desadheridos”, *Revista de ingeniería Sísmica No. 80* 1-29.