



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

## **DISEÑO DE ESTRUCTURAS EQUIPADAS CON AMORTIGUADORES HISTERÉTICOS**

**Responsable:**

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla<sup>1</sup>

04 de diciembre de 2020

Convenio: ISCDF/CEC-04/2020-12

Número de páginas: 63

<sup>1</sup>Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM



## **CONTENIDO**

Resumen,	<b>2</b>
1. Introducción,	<b>3</b>
1.1. Antecedentes,	<b>3</b>
1.2. Justificación,	<b>4</b>
1.3. Objetivos,	<b>4</b>
2. Pruebas experimentales,	<b>5</b>
2.1. Contraventeo restringido al pandeo (CRP),	<b>5</b>
2.1.1. Descripción,	<b>5</b>
2.1.2. Geometría del dispositivo ensayado,	<b>7</b>
2.1.3. Cálculo de la rigidez,	<b>8</b>
2.1.4. Cálculo de la resistencia de fluencia esperada,	<b>9</b>
2.1.5. Cálculo de la resistencia máxima en tensión,	<b>9</b>
2.1.6. Cálculo de la resistencia máxima en compresión,	<b>10</b>
2.2. Disipador Dampo 1505,	<b>10</b>
2.3. Arreglo experimental,	<b>12</b>
2.4. Diseño del marco,	<b>20</b>
2.5. Instrumentación,	<b>21</b>
2.6. Protocolo de carga,	<b>23</b>
2.7. Resultados experimentales,	<b>25</b>
2.7.1. Capacidad de carga y deformación,	<b>25</b>
2.7.2. Capacidad de disipación de energía,	<b>27</b>
2.8. Discusión de resultados,	<b>29</b>
3. Guía de diseño de estructuras equipadas con sistemas histeréticos,	<b>31</b>
3.1. Metodología para estructuras equipadas con CRP,	<b>32</b>
3.2. Metodología para estructuras equipadas con el dispositivo Dampo 1505,	<b>40</b>
3.3. Ejemplo de diseño,	<b>41</b>
4. Conclusiones,	<b>59</b>
Agradecimientos,	<b>61</b>
Referencias,	<b>62</b>



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

## **RESUMEN**

En este reporte se presentan resultados experimentales del comportamiento de dos dispositivos histeréticos disponibles en México, instalados en un marco de concreto reforzado. Se evaluó su comportamiento en términos de capacidad de carga, capacidad de deformación y capacidad de disipación de energía al ser instalados en un marco de concreto reforzado. Después, en la segunda parte de este documento, se presenta una guía de diseño de estructuras equipadas con esos sistemas de disipación. La guía tiene la intención de ayudar a los diseñadores a implementar dispositivos histeréticos en proyectos reales. Se discuten las ventajas y desventajas del uso de los disipadores y se ofrecen conclusiones y recomendaciones sobre el uso de los dispositivos.



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

## **1 INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Antecedentes**

Después de los sismos de 2017, en México existe una gran cantidad de estructuras dañadas que necesita ser reforzada con sistemas confiables y utilizando métodos de diseño adecuados. En la actualidad, en la Ciudad de México se están realizando reforzamientos de estructuras dañadas y construcción de nuevas edificaciones con sistemas de protección de tipo histerético, tales como: contraventeos restringidos al pandeo y derivaciones del sistema Adas. Sin embargo, es necesario primero entender adecuadamente el comportamiento de estos sistemas ante carga cíclica reversible para poder realizar su correcta implementación en estructuras nuevas y existentes. En este proyecto se planteó el estudio experimental de dos sistemas histeréticos y la elaboración de una guía de diseño.



## **1.2 Justificación**

Existen varias razones para usar sistemas histeréticos. La primera es para proteger a las estructuras ya que estos sistemas absorben la energía impuesta por los sismos mientras que la estructura principal permanece esencialmente sin daño. Otra razón es que su costo es normalmente más bajo que otros sistemas de protección, lo que representa una alternativa viable para muchos proyectos. Por otro lado, el utilizarlos ayuda a llevar a las estructuras existentes a niveles de seguridad elevados. Incluso, en algunos casos se pueden lograr niveles de seguridad superiores a los que el reglamento solicita. Sin embargo, es conveniente entender con claridad el comportamiento de estos sistemas ante cargas cíclicas. Es por ello que en este proyecto se plantea su estudio experimental y la elaboración de una guía de diseño.

## **1.3 Objetivos**

El objetivo general de este proyecto es evaluar experimentalmente el desempeño de dos dispositivos histeréticos ante carga cíclica reversible; así como la elaboración de una guía de diseño práctica que sea útil para los ingenieros estructuristas.

Los objetivos particulares son:

- Incentivar el uso de sistemas de protección sísmica en México.
- Contar con una guía práctica para los diseñadores.
- Buscar una sociedad cada vez más resiliente



## **2 PRUEBAS EXPERIMENTALES**

Se seleccionaron dos dispositivos de tipo histerético para realizar pruebas experimentales en ellos y determinar su capacidad de carga, su capacidad de deformación y su capacidad de disipación de energía. Estos sistemas fueron: 1) contraventeos restringidos al pandeo (CRP), y 2) disipadores Dampo 1505. Ambos dispositivos están disponibles en México y fueron adquiridos en la empresa Dampo Systems, S.A. de C.V. En este capítulo se presentan los detalles de las pruebas realizadas y los resultados obtenidos.

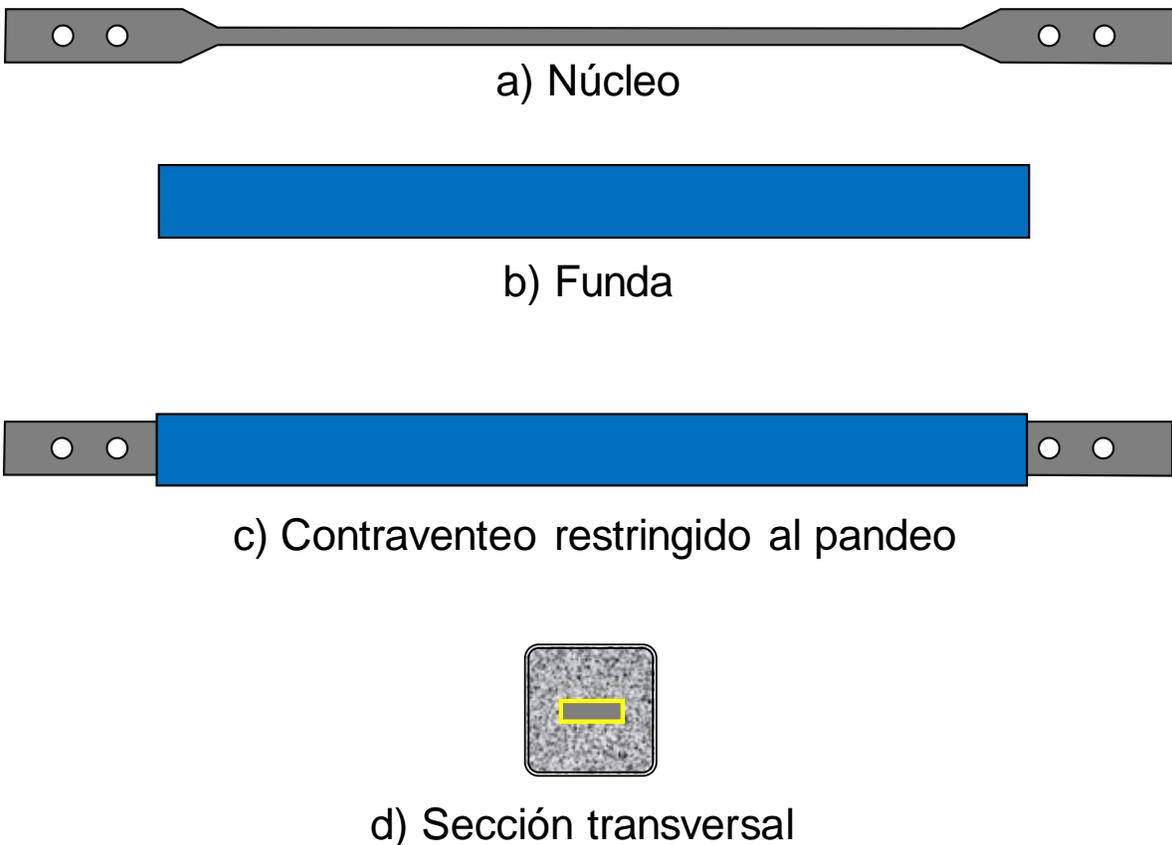
### **2.1 Contraventeo restringido al pandeo (CRP)**

#### *2.1.1 Descripción*

Los contraventeos restringidos al pandeo (CRP) son sistemas que disipan grandes cantidades de energía por medio de deformación inelástica (Guerrero et al., 2016). Típicamente, los CRP constan de un núcleo de acero y una funda, como se muestra en las figuras 1a y 1b. El núcleo es normalmente hecho de acero estructural ASTM A36 o A992. Como se observa, el núcleo es más débil en el centro y más fuerte en



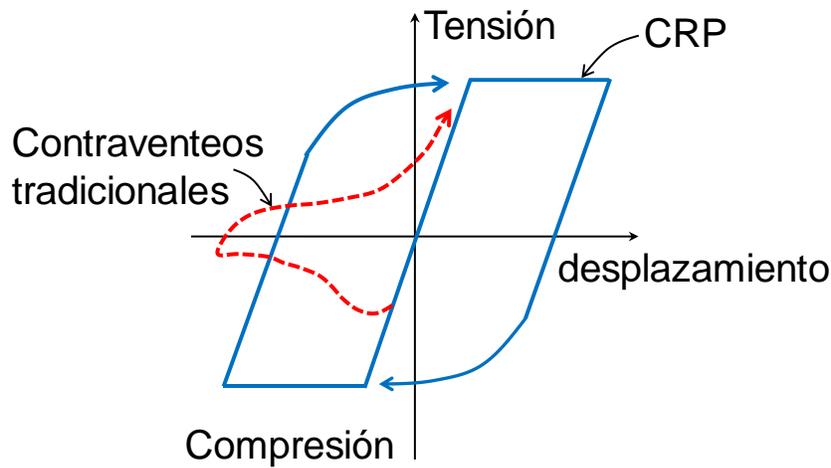
los extremos. Esto se hace para concentrar las deformaciones inelásticas en el centro y mantener los extremos elásticos, pues son los que se conectan a la estructura que hospeda al contraventeo. La funda normalmente está hecha de un tubo metálico que se rellena de concreto simple. El núcleo se introduce dentro del tubo metálico antes de realizar el relleno, como se indica en la Figura 1c. Entre el núcleo y el relleno de concreto se coloca un material desmoldante que evita el contacto directo entre el concreto y el núcleo. La figura 1d muestra un corte de la sección transversal del CRP.



**Figura 1.** Esquema de un contraventeo restringido al pandeo típico.



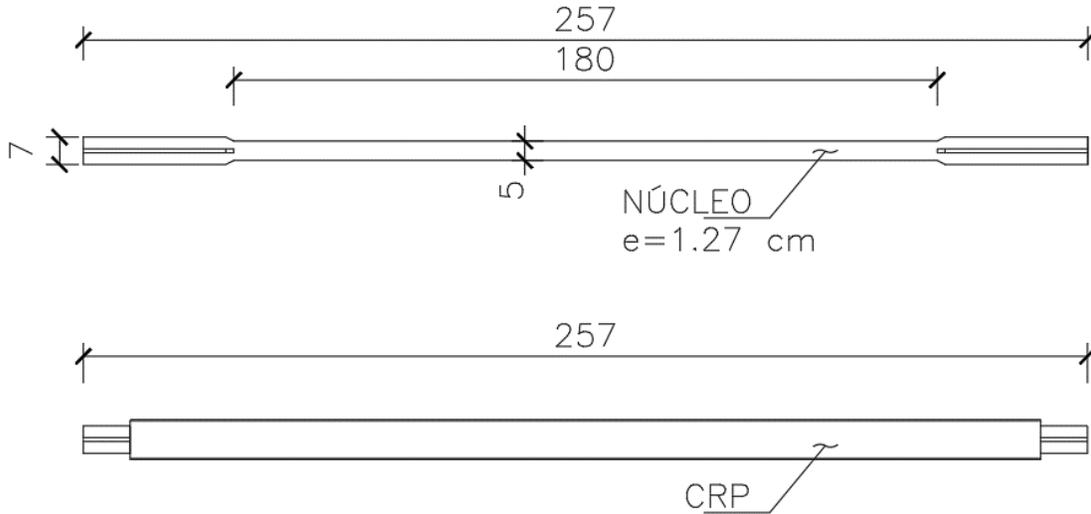
El resultado de confinar el núcleo con la funda es lograr un comportamiento estable del dispositivo ante carga axial pues, como se ilustra en la Figura 2, se logra un comportamiento inelástico estable en tensión y compresión, con ciclos carga-deformación muy amplios y simétricos. Se recuerda que el área dentro de los ciclos carga-deformación es la cantidad de energía que disipan los CRP. Por otro lado, los contraventeos tradicionales no son capaces de mostrar un comportamiento estable, pues se pandean en compresión y muestran un comportamiento degradante severo con muy poca capacidad de disipación de energía.



**Figura 2.** Ciclos carga-deformación típicos de los CRP.

### 2.1.2 Geometría del dispositivo ensayado

La Figura 3 muestra un esquema del CRP ensayado y su núcleo. Se puede ver que el CRP tenía una longitud total de 2.57 m y un área transversal, en la zona más débil, de  $1.27 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} = 6.35 \text{ cm}^2$ . En los extremos, la sección transversal aumentó a un área de  $16.17 \text{ cm}^2$ .



**Figura 3.** Detalles del CRP ensayado (cotas en cm).

### 2.1.3 Cálculo de la rigidez

La rigidez de un CRP se calcula con la ecuación (1),

$$K_{CRP} = f_k \frac{EA_n}{L} \quad (1)$$

donde  $E$  es el módulo de elasticidad del material que compone al núcleo,  $A_n$  el área de la sección transversal más débil del núcleo,  $L$  la longitud del CRP a centros de ejes del marco que lo contiene, y  $f_k$  es un factor mayor a la unidad que toma en cuenta la variación de la geometría del núcleo del CRP. Para este ejemplo se consideraron los datos de la Tabla 1. Nótese que la longitud  $L$ , es mayor a aquella del CRP, pues  $L$  se mide a centros de los ejes del marco que contiene al CRP. Esa longitud se define posteriormente en la sección 2.3.

Por lo tanto, la rigidez del CRP resultó ser:

$$K_{CRP} = f_k \frac{EA_n}{L} = 1.3 \frac{(2,100,000)(6.35)}{(332)} = 52,150 \text{ kg/cm}$$



**Tabla 1.** Parámetros para el cálculo de la rigidez del CRP.

Parámetro	Valor
Módulo de elasticidad, $E$	$2.1 \times 10^6$ kg/cm <sup>2</sup>
Área de núcleo, $A_n$	6.35 cm <sup>2</sup>
Longitud a centros de ejes del marco, $L$	3.32 m
Factor de rigidez, $f_k$	1.3

#### 2.1.4 Cálculo de la resistencia de fluencia esperada

La resistencia esperada a la fluencia,  $P_{ye}$ , de un CRP se calcula con la ecuación (2),

$$P_{ye} = A_n f_{ye} \quad (2)$$

donde  $f_{ye}$  es el esfuerzo de fluencia esperado, o medido, del material del núcleo y  $A_n$  ya fue definido.

De ensayos en tres probetas hechas del mismo material con que se fabricó el núcleo, se obtuvo un esfuerzo de fluencia promedio de 2953.80 kg/cm<sup>2</sup>. Por lo tanto, la resistencia de fluencia esperada es:

$$P_{ye} = A_n f_{ye} = 6.35 \times 2953.80 = 18,757 \text{ kg}$$

#### 2.1.5 Cálculo de la resistencia máxima en tensión

La resistencia máxima en tensión,  $P_{ut}$ , de un CRP se calcula con la ecuación (3),

$$P_{ut} = \omega A_n f_{ye} \quad (3)$$



donde  $\omega$  es un factor de sobre-resistencia que toma en cuenta el incremento de la resistencia por endurecimiento, y los otros parámetros ya han sido definidos.

De ensayos en tres probetas hechas del mismo material con que se fabricó el núcleo, se obtuvo  $\omega=1.26$ . Por lo tanto, la resistencia última en tensión es:

$$P_{ut} = \omega A_n f_{ye} = 1.26 \times 6.35 \times 2953.80 = 23,669 \text{ kg}$$

### 2.1.6 Cálculo de la resistencia máxima en compresión

La resistencia máxima en tensión,  $P_{uc}$ , de un CRP se calcula con la ecuación (4),

$$P_{ut} = \beta \omega A_n f_{ye} \quad (4)$$

donde  $\beta$  es un factor de sobre-resistencia que toma en cuenta el incremento de la resistencia en compresión por fricción y efecto de Poisson, y los otros parámetros ya han sido definidos.

Del catálogo del proveedor se tomó  $\beta=1.15$ . Por lo tanto, la resistencia última en compresión es:

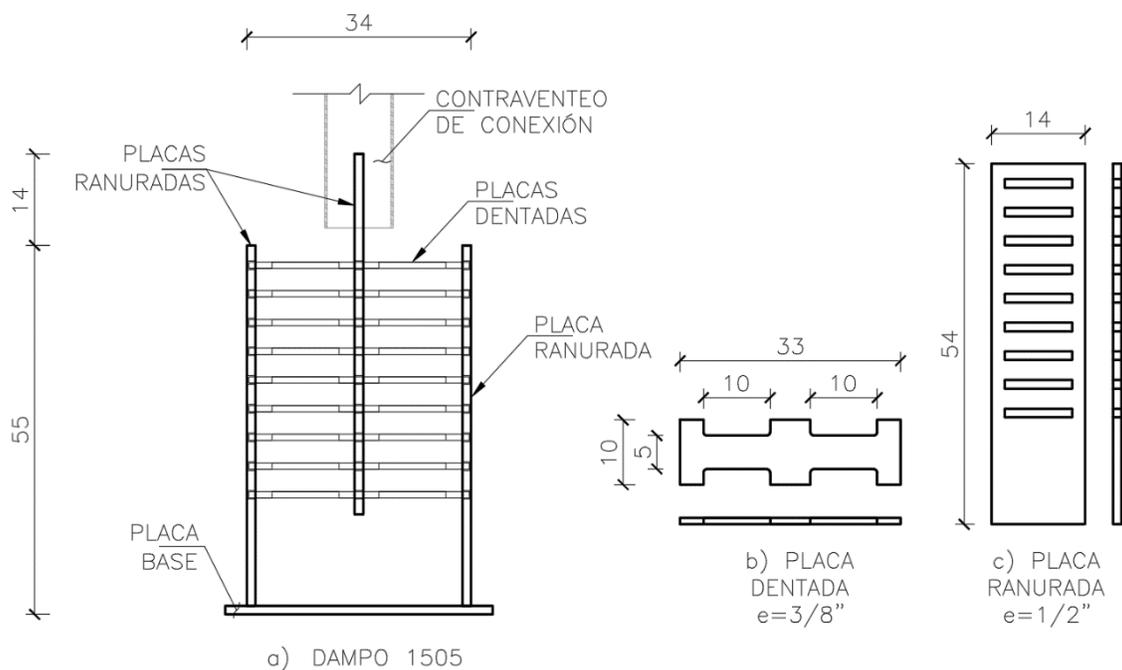
$$P_{ut} = \beta \omega A_n f_{ye} = 1.15 \times 1.26 \times 6.35 \times 2953.80 = 27,220 \text{ kg}$$

Los valores de rigidez y resistencia se comparan con los datos experimentales en la sección 2.6.

## 2.2 Disipador Dampo 1505

El disipador Dampo 1505 consta de un arreglo de placas metálicas colocadas como se muestra en la Figura 4. Se trata de tres placas ranuradas que se colocan de

manera vertical, dos de ellas en los extremos y una en el centro. También se colocan una serie de placas horizontales identificadas como dentadas. En la Figura 4 se muestran las dimensiones, en cm, de las placas utilizadas en el espécimen ensayado en este proyecto. Se puede apreciar que se utilizaron nueve placas dentadas de 3/8" de espesor con dimensiones de 10 x 33 cm, con dos zonas débiles de 5 x 10 cm. Las placas verticales fueron de 54 x 14 cm con espesor de 1/2".



**Figura 4.** Detalles del dispositivo Dampo 1505 ensayado (cotas en cm).

La rigidez, resistencia a la fluencia y resistencia última se obtuvieron del catálogo del proveedor, con los valores que se indican en la Tabla 2. Cabe mencionar que la resistencia última en tensión y compresión es la misma para el dispositivo Dampo 1505, ya que este dispositivo presenta un comportamiento simétrico, a diferencia del CRP, donde hay una diferencia entre la resistencia a compresión y a tensión dada por el parámetro  $\beta$ .



**Tabla 2.** Propiedades mecánicas del dispositivo Dampo 1505.

Parámetro	Valor
Rigidez total con contraventeo, $K$	21,452 kg/cm
Carga de fluencia esperada, $P_{ye}$	17,700 kg
Carga máxima esperada, $P_u$	25,500 kg

### 2.3 Arreglo experimental

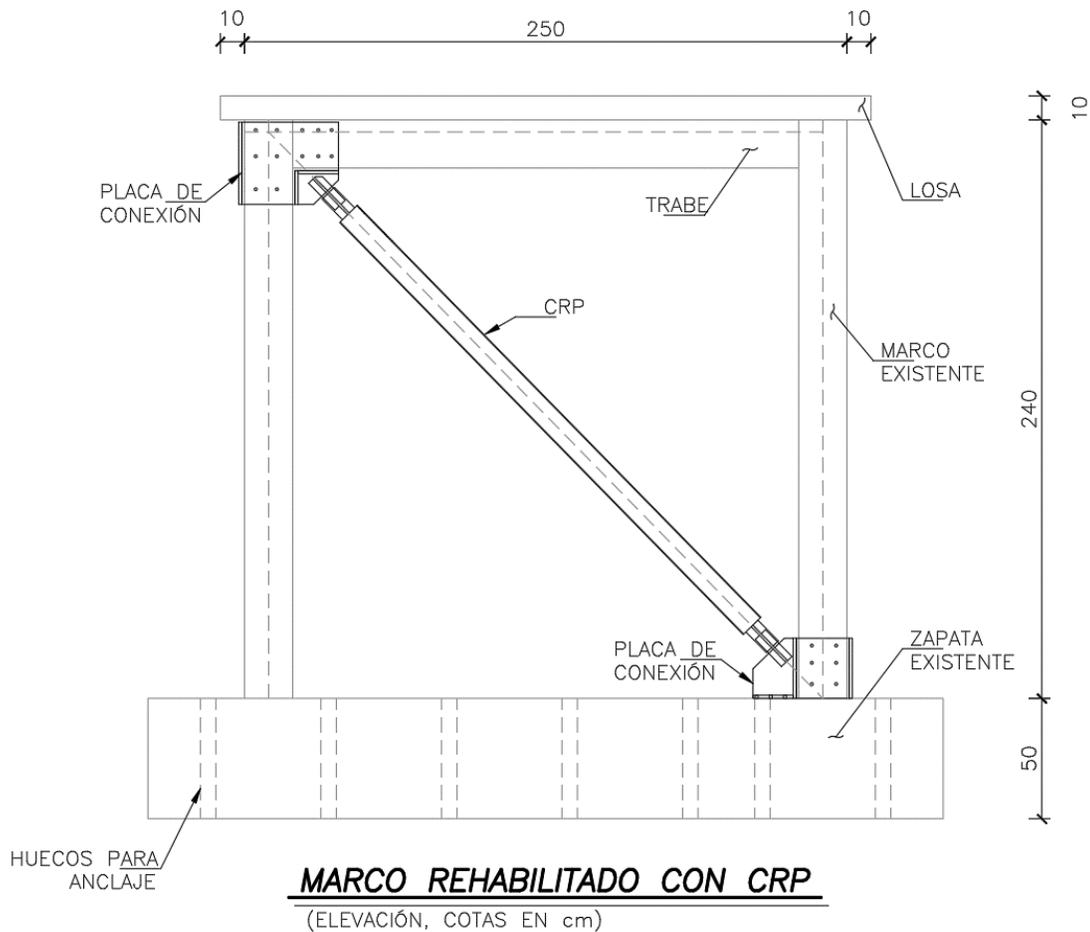
Ambos dispositivos, el CRP y el Dampo 1505, fueron colocados en un marco de concreto reforzado. Cabe mencionar que el marco tenía agrietamiento inicial, pues había sido ensayado en otro experimento anterior. Entonces, se consideró a los dispositivos como un sistema de rehabilitación de estructuras. Aunque es importante aclarar que ambos sistemas pueden ser utilizados tanto para estructuras nuevas como para rehabilitación de estructuras existentes.

Las figuras 5 y 6 muestran, respectivamente, el esquema y una fotografía del arreglo experimental del marco equipado con el CRP; mientras que las figuras 7 y 8 muestran el esquema y fotografía del marco equipado con el dispositivo Dampo 1505. Nótese que el CRP se colocó en el interior del marco y el Dampo 1505 se colocó por la parte exterior. Este último se colocó de esa manera para representar el comportamiento de un edificio rehabilitado en la Ciudad de México al que le fueron ubicados los dispositivos en la fachada del edificio. Es importante mencionar que, como se aprecia en las figuras, los nodos superior-izquierdo e inferior-derecho del marco fueron encamisados con placas de conexión para asegurar un buen desempeño de las conexiones. Las placas de conexión fueron ancladas al marco con anclaje químico y barras de anclaje de acero ASTM A36 de 13 mm de diámetro. Entre las placas de conexión y el marco se colocó mortero de baja contracción para mejorar la transferencia de esfuerzos entre las superficies. Es relevante mencionar



que el espacio entre las placas y el marco fue menor a 1 cm, lo que dificultó la colocación del mortero. Esto se apreció en algunos deslizamientos que se discuten en la sección de resultados.

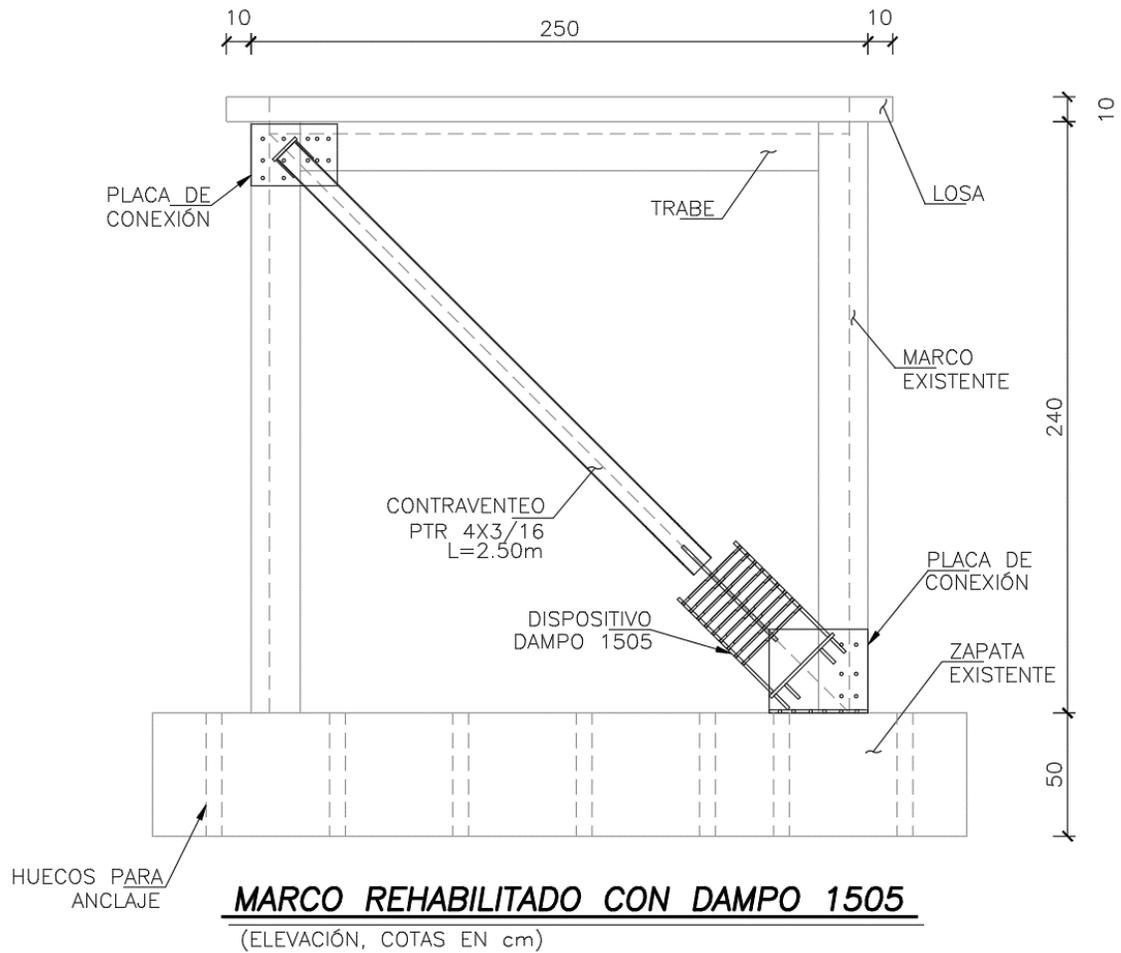
Las propiedades de los elementos que componen al marco se presentan en la Figura 9. Mientras que las columnas tenían dimensiones de 12x20 cm, la trabe era de 12x30 cm. Por su parte, la zapata de cimentación era muy rígida (con dimensiones de 50 x 80 x 300 cm) y contaba con unos huecos para el anclaje del marco a la losa de reacción del laboratorio.



**Figura 5.** Esquema del marco equipado con CRP.



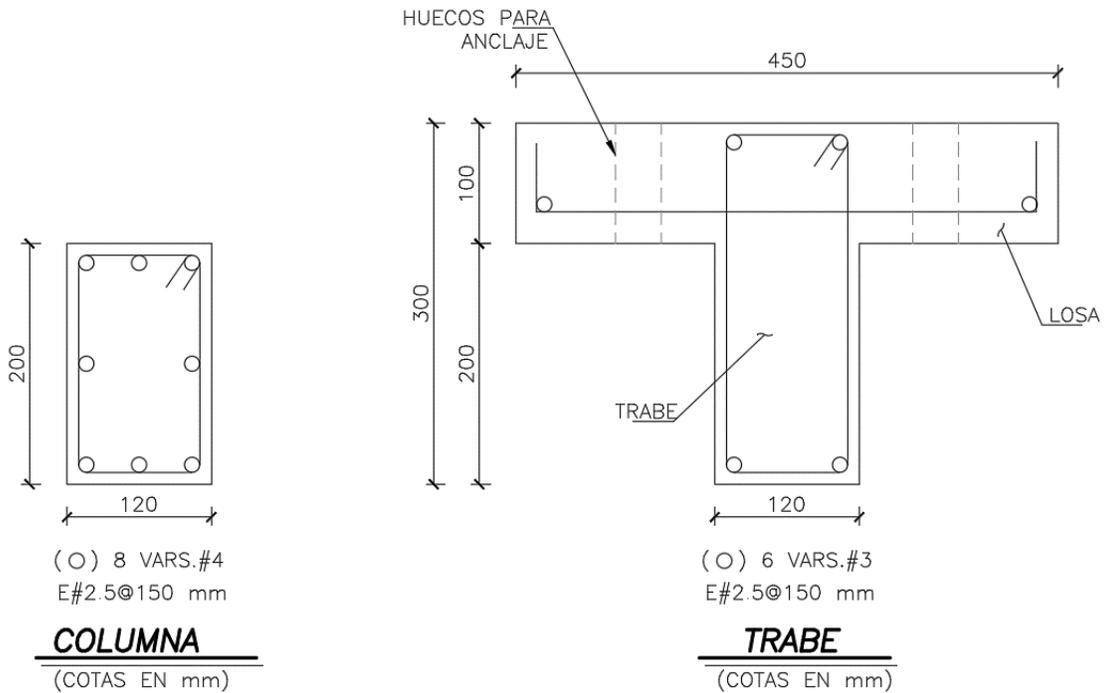
**Figura 6.** Fotografía del marco equipado con CRP.



**Figura 7.** Esquema del marco equipado con dispositivo Dampo 1505.

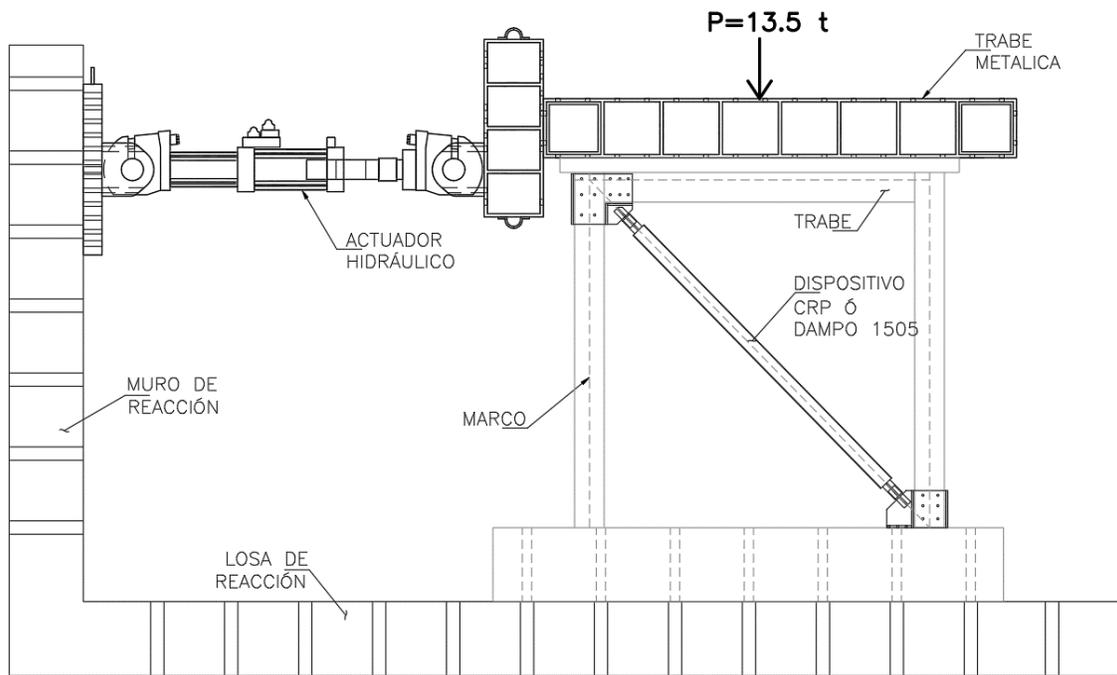


**Figura 8.** Fotografía del marco equipado con dispositivo Dampo 1505.



**Figura 9.** Secciones transversales de los elementos del marco.

Las figuras 10 y 11 muestran un esquema y una foto, respectivamente, del arreglo experimental en el laboratorio. Se puede apreciar que el marco se fijó a la losa de reacción. Un actuador hidráulico, con el que se aplicó la carga lateral, se fijó al muro de reacción. El actuador hidráulico transfería la carga al marco a través de una trabe metálica muy rígida conectada al marco con tornillos de alta resistencia. Sobre la trabe metálica se colocó un peso de 13.5 t, más 1.5 t de peso del arreglo experimental, se llegó a una carga gravitacional total sobre el marco de 15 t.



**Figura 10.** Esquema del arreglo experimental.



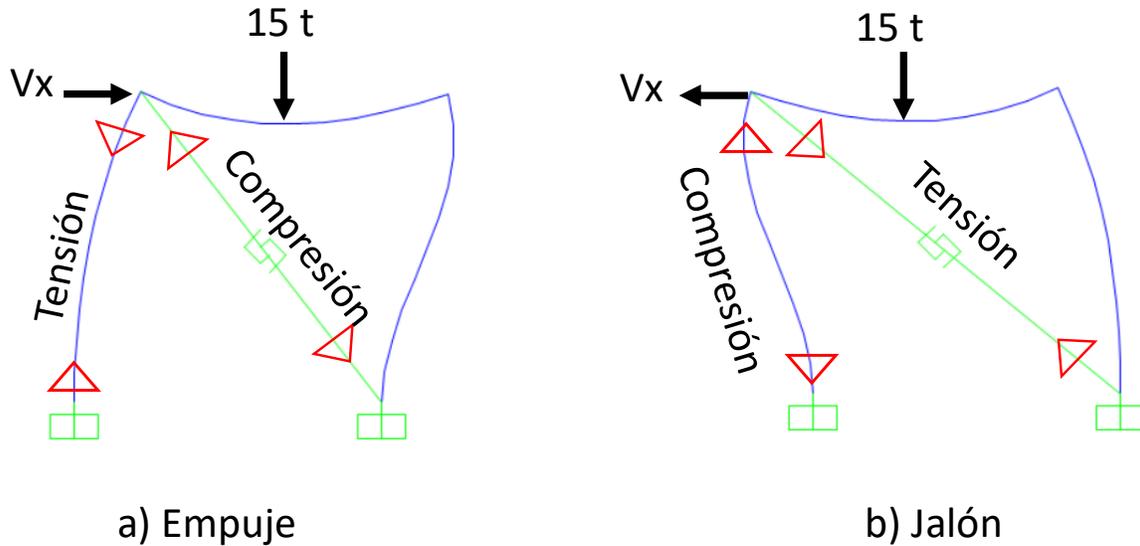
**Figura 11.** Fotografía del arreglo experimental.



## **2.4 Diseño del marco**

El marco se diseñó para una distorsión objetivo de 0.01, donde la distorsión es el cociente del desplazamiento lateral entre la altura del marco (2.5 m). Nótese que esa distorsión es menor a la máxima permitida por las NTC-Sismo (2020), sin embargo, con esa distorsión se buscaba que el marco permaneciera con daño menor mientras que la energía se disiparía a través de la deformación inelástica del CRP o del dispositivo Dampo 1505. Es importante mencionar que los elementos del marco fueron detallados como elementos de ductilidad baja según las NTC-Concreto (2017).

La Figura 12 muestra un análisis en SAP2000 (2020) del estado de deformación del marco cuando es empujado (Figura 12a) y jalado (Figura 12b) por el actuador hidráulico, de tal suerte que se imponen distorsiones de 0.01 en ambos sentidos. Cuando el marco es empujado, el dispositivo se encuentra en compresión, por lo que genera una fuerza de tensión en la columna izquierda y una fuerza de compresión en la base de la columna derecha. Por otro lado, cuando el marco está jalando, el dispositivo se encuentra en tensión e impone compresión a la columna de la izquierda y tensión a la base de la columna derecha.



**Figura 12.** Análisis de fuerzas en el marco.

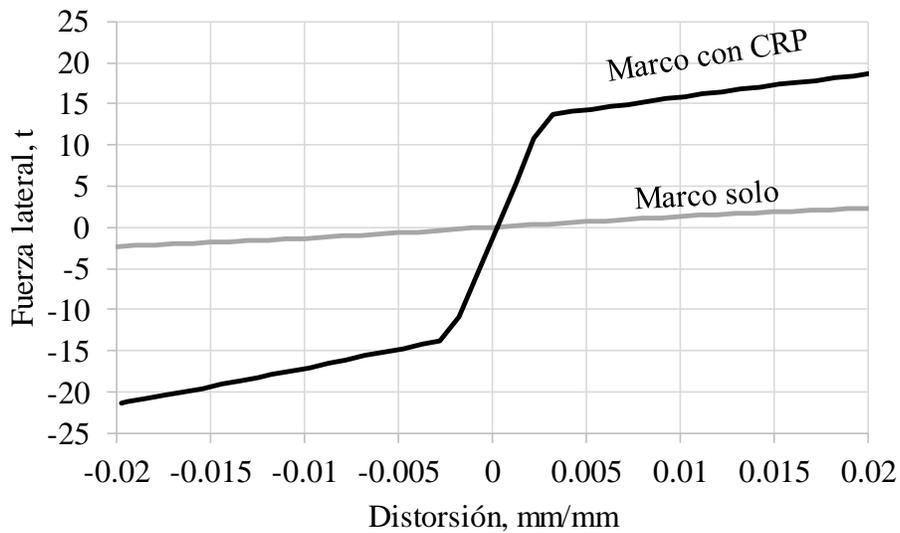
Siguiendo las recomendaciones de ASCE 41 (2013) y las NTC-Acero (2020), se realizó un análisis estático no lineal del marco. La Figura 13 muestra las curvas carga lateral-distorsión, también conocidas como curvas de capacidad, obtenidas para el marco con y sin dispositivos. Se puede apreciar que la contribución del marco a la resistencia lateral es mínima. Mientras el marco fluye a una distorsión cercana a 0.01, los dispositivos fluyen a 0.0025.

## 2.5 Instrumentación

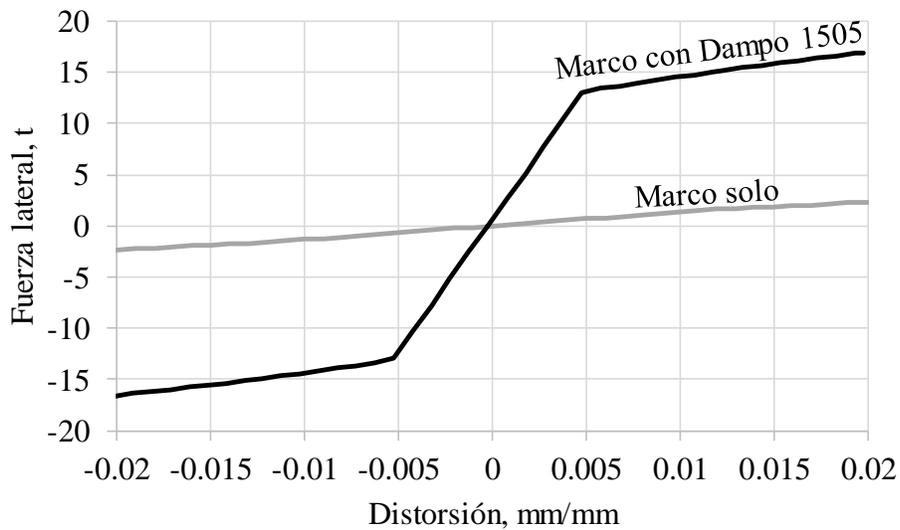
Se colocó instrumentación interna y externa en el marco. La instrumentación interna consistió de galgas eléctricas, también conocidas como *strain gauges*, en el acero de refuerzo longitudinal y transversal de las columnas. La instrumentación externa consistió de celdas de carga y transductores de desplazamiento (CDP) colocados en diferentes posiciones del marco y el dispositivo de disipación, ya sea el CRP o el Dampo 1505.



La Figura 14 muestra un croquis de la instrumentación utilizada. En total se utilizaron seis galgas eléctricas, dos celdas de carga y 14 CDP. En la figura se muestra la ubicación, orientación y el tipo de instrumento y número de canal asignado.



a) Curva de capacidad calculada para marco con CRP.



b) Curva de capacidad calculada para marco con Dampo 1505.

**Figura 13.** Curvas de capacidad del marco equipado con los dispositivos.

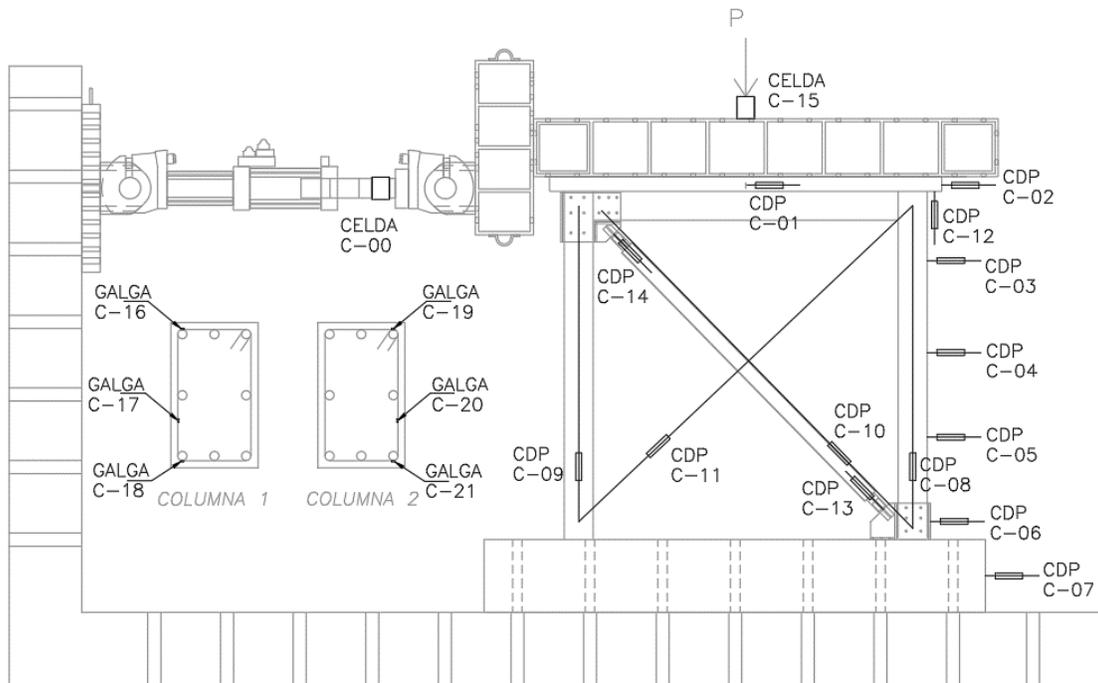


Figura 14. Croquis de instrumentación utilizada.

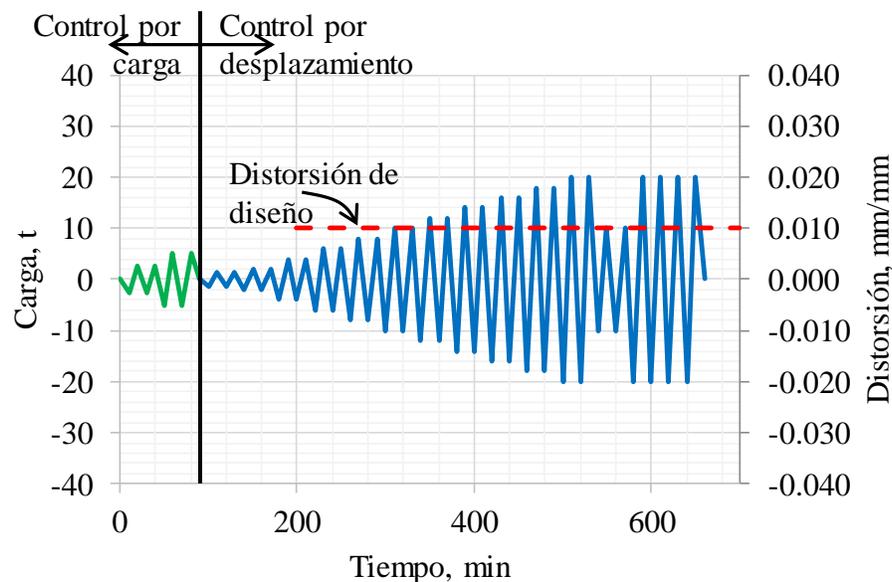
## 2.6 Protocolo de carga

Para aplicar las cargas se siguieron las recomendaciones de AISC (2016). La carga se aplicó en dos etapas. En la primera etapa se aplicaron ciclos controlados por carga. En la segunda etapa las cargas fueron controladas por desplazamiento. Todas las cargas se aplicaron de manera cuasi-estática.

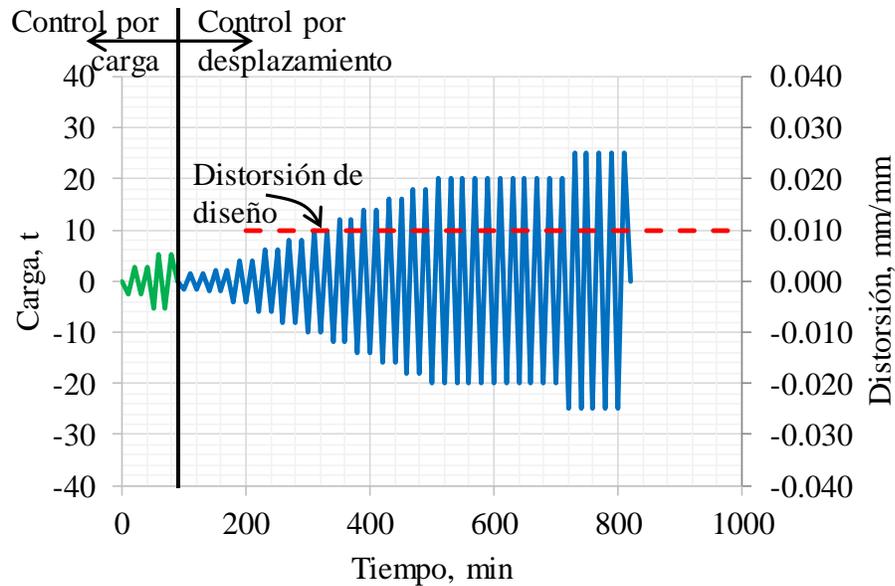
Las figuras 15 y 16 muestran el protocolo de carga aplicado al marco con CRP y con el dispositivo Dampo 1505. Se puede observar que en la primera etapa se aplicaron dos ciclos de carga lateral de 2.6 t y dos ciclos de 5.2 t. Después, se aplicaron desplazamientos laterales, equivalentes a diferentes niveles de distorsión objetivo, siendo la distorsión igual al cociente del desplazamiento lateral entre la



altura del marco (2.5 m). Nótese que después de llegar a la distorsión de diseño (0.01) se continuaron aplicando ciclos de desplazamiento con la intención de analizar el nivel de deformación que se podía alcanzar y el número de ciclos que lograban aplicar. Se puede ver que se lograron aplicar deformaciones del hasta el doble para el CRP (distorsión de 0.02) y más del doble para el dispositivo Dampo 1505 (distorsión de 0.025). El número de ciclos mayores o iguales a la deformación de diseño fue de 18 para el CRP y de 26 para el Dampo 1505. Cabe aclarar que el BRB presentó falla en el ciclo 18, mientras que el dispositivo Dampo 1505 no se pudo llevar a la falla y se optó por detener las pruebas en el ciclo 26 por cuestiones de tiempo. En ambos casos, el número de ciclos resultó mayor al mínimo requerido por las NTC-Sismo (2020).



**Figura 15.** Protocolo de carga aplicado al marco con CRP.



**Figura 16.** Protocolo de carga aplicado al marco con el dispositivo Dampo 1505.

## 2.7 Resultados experimentales

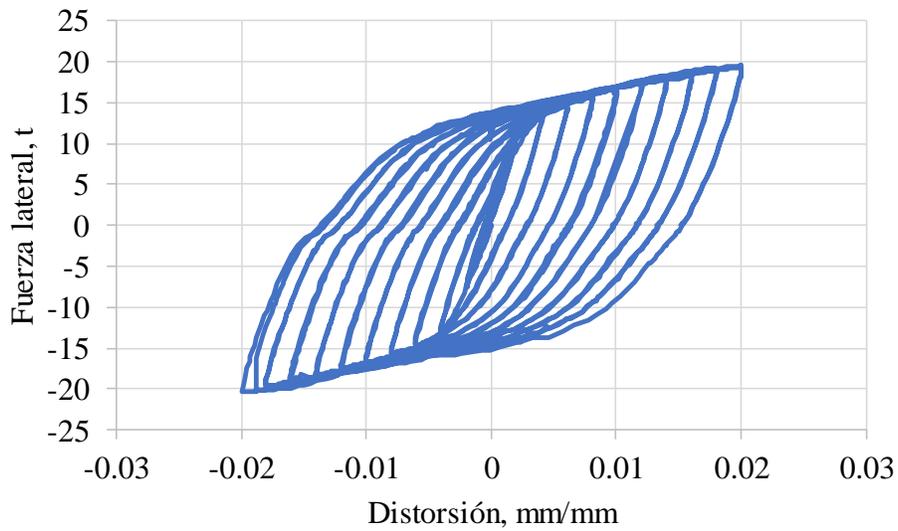
### 2.7.1 Capacidad de carga y deformación

Las figuras 17 y 18 muestran las curvas carga-distorsión, medidas durante las pruebas. Se puede apreciar que en ambos casos se observan ciclos de histéresis muy amplios y estables, en especial, el CRP.

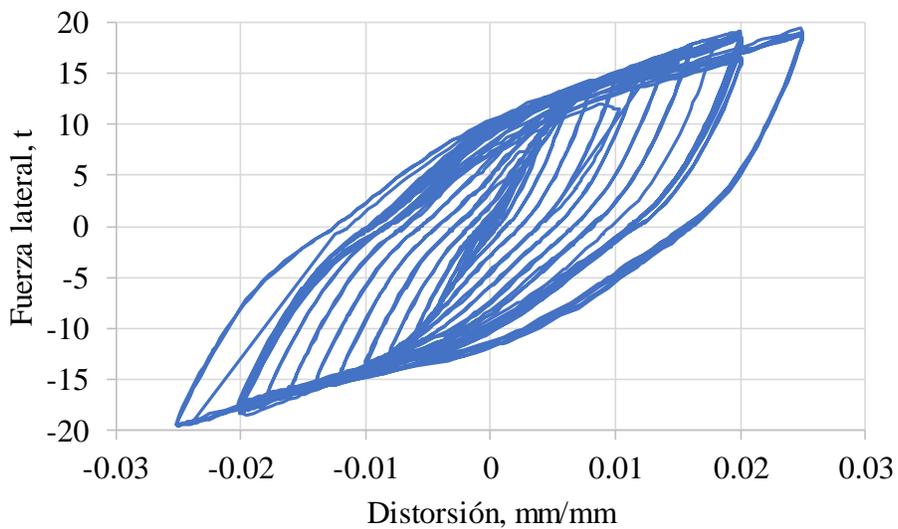
Para el caso del marco equipado con CRP, la resistencia lateral a la fluencia fue de 12.5 t, la resistencia última en tensión fue de 19.6 t y la resistencia última en compresión fue de 20.3 t. La distorsión de fluencia fue de 0.0025 y la distorsión máxima alcanzada fue de 0.02, por lo que el marco alcanzó una ductilidad de  $0.02/0.0025=8.0$ . Para el caso del marco equipado con el dispositivo Dampo 1505, la resistencia lateral fue 12 t, mientras que la resistencia última, en tensión y en compresión, fue de 19.5 t. La distorsión de fluencia fue de 0.005 y la distorsión



máxima alcanzada fue de 0.025, por lo que el marco alcanzó una ductilidad de  $0.025/0.005=5.0$ .



**Figura 17.** Curvas carga-distorsión del marco con CRP.



**Figura 18.** Curvas carga-distorsión del marco con el dispositivo Dampo 1505.



En las curvas de histéresis de las figuras 17 y 18 se alcanza a notar un deslizamiento de las curvas en valores de carga cercanos a cero. Ello se debe a que el mortero de relleno entre las placas de conexión y las columnas del marco no penetró adecuadamente, debido a que el espacio era insuficiente. Aunque los resultados no fueron afectados de manera significativa, se recomienda tener mucho cuidado en la colocación del mortero de relleno y dejar espacio suficiente (por lo menos 2 cm) para una colocación adecuada del mortero.

### 2.7.2 Capacidad de disipación de energía

Se calculó la capacidad de disipación de energía,  $E_{his}$ , y la ductilidad acumulada,  $\mu_{ac}$ , de ambos dispositivos ensayados usando las ecuaciones (5) y (6) (Merrit et al., 2003).

$$E_{his} = \int P du \quad (5)$$

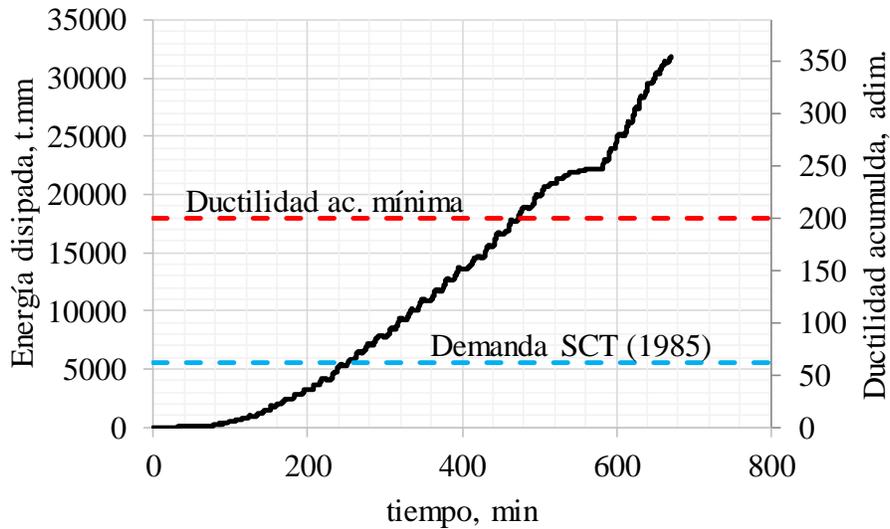
$$\mu_{ac} = \frac{E_{his}}{P_y u_y} \quad (6)$$

donde  $P$  y  $u$  son la carga y el desplazamiento axiales en el dispositivo y  $P_y$  y  $u_y$  son la carga y el desplazamiento axiales de fluencia.

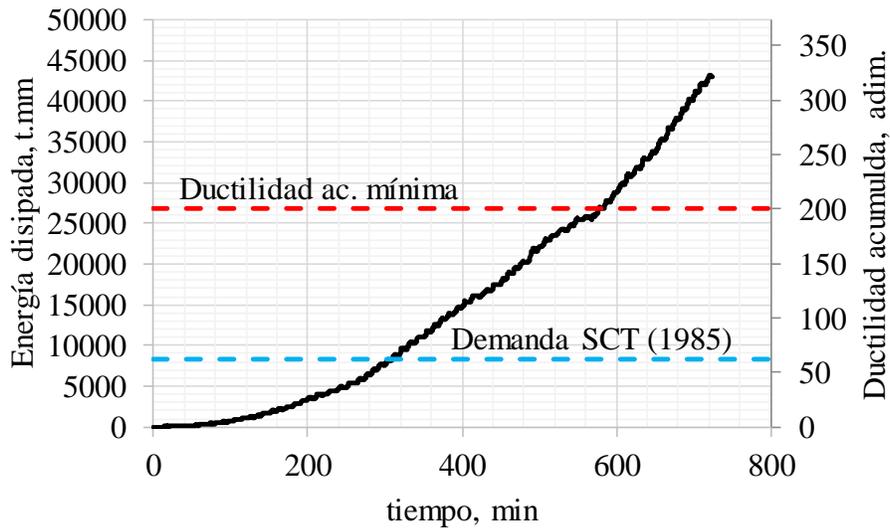
Las figuras 19 y 20 muestran la variación de la disipación de energía y la ductilidad acumulada en el tiempo que duró la prueba. Se puede ver que ambos dispositivos superaron el valor mínimo de ductilidad acumulada, de 200, que recomienda AISC (2016). Para fines ilustrativos, en las figuras se muestra la demanda de ductilidad acumulada de un oscilador de un grado de libertad sujeto al movimiento sísmico de SCT componente Este-Oeste del 19 de septiembre de 1985 para una ductilidad pico de 4, relación de amortiguamiento de 0.05 y comportamiento elasto-plástico



perfecto. Se puede ver que la demanda de ductilidad acumulada es de 61.9, lo que es alrededor de cinco veces inferior a la capacidad de disipación de los dispositivos.



**Figura 19.** Energía disipada y ductilidad acumulada del CRP.

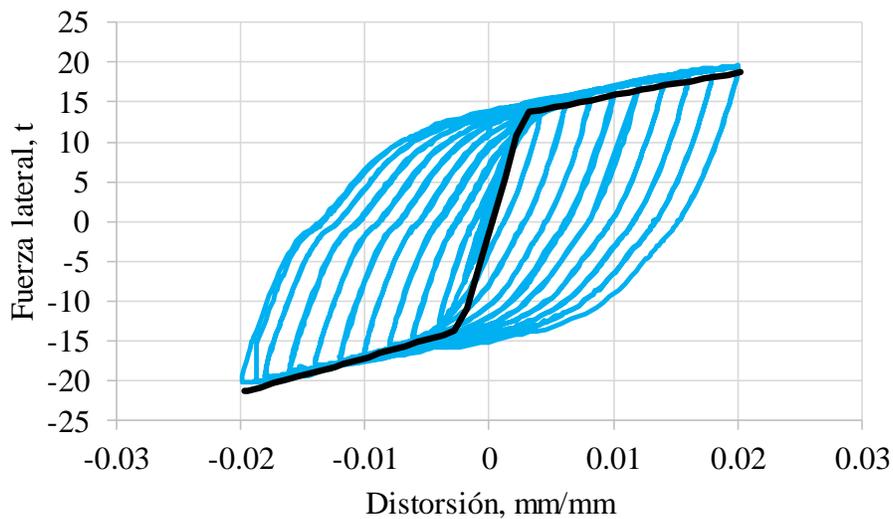


**Figura 20.** Energía disipada y ductilidad acumulada del dispositivo Dampo 1505.

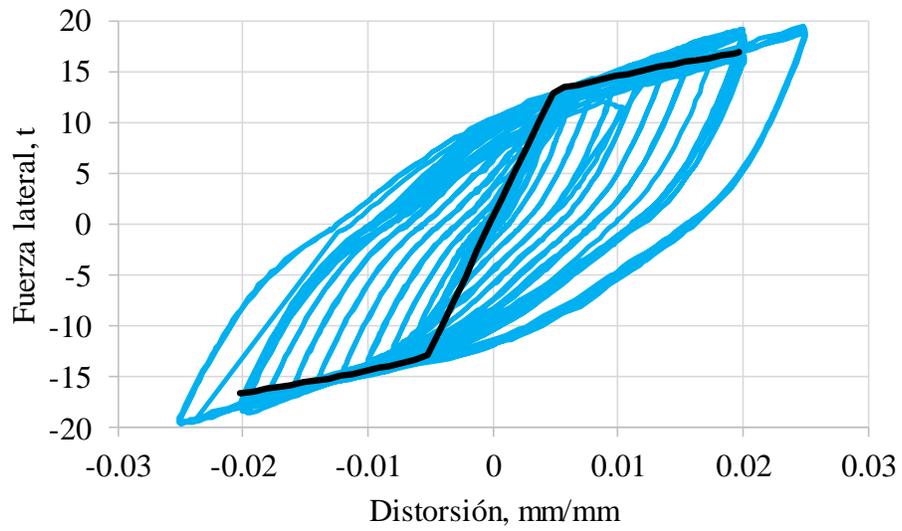


## 2.8 Discusión de resultados

Dado que uno de los objetivos de este estudio es evaluar el comportamiento de los dispositivos cuando son instalados en una estructura y comparar con modelos numéricos a fin de verificar si los resultados pueden ser replicables, las figuras 21 y 22 muestran la comparación de las curvas de capacidad de la sección 2.4 con las curvas de histéresis de la sección 2.7. Se puede apreciar que las curvas de capacidad son muy similares a lo que se puede considerar como envolvente de las curvas de histéresis, por lo que se puede decir que los dispositivos tienen un comportamiento predecible numéricamente con modelos comunes en la práctica profesional de la ingeniería.



**Figura 21.** Comparación de curvas de capacidad y de histéresis del marco equipado con CRP.



**Figura 22.** Comparación de curvas de capacidad y de histéresis del marco equipado con el dispositivo Dampo 1505.



### **3 GUÍA DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS EQUIPADAS CON SISTEMAS HISTERÉTICOS**

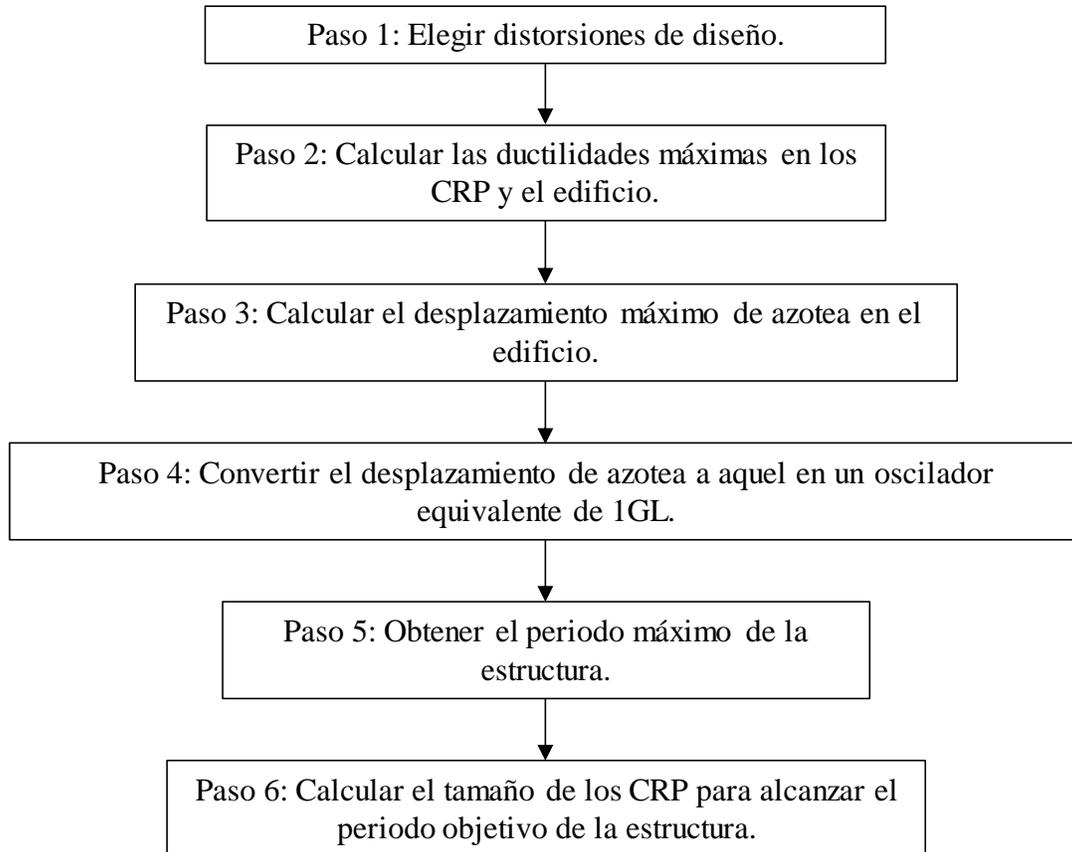
En este capítulo se divide en tres partes. En las primeras dos partes se presentan guías de diseño de edificios equipados con disipadores histeréticos usando metodologías basadas en el control de desplazamientos laterales. Las metodologías se aplican por separado para estructuras equipadas con CRP y para estructuras con dispositivos Dampo 1505. Se eligen metodologías basadas en desplazamientos porque el reglamento lo permite y porque es más adecuado realizarlo de esa manera ya que los sistemas histeréticos presentan comportamiento altamente no lineal, que es difícil de representar con métodos convencionales. En la tercera parte de este capítulo se presenta un ejemplo de diseño práctico que consta de un edificio nuevo de acero de seis niveles. Aunque el edificio es nuevo, se aclara que la guía es útil para diseñar edificios nuevos y para diseñar el reforzamiento de edificios existentes.



### **3.1 Metodología para estructuras equipadas con CRP**

La metodología presentada en esta sección se basa en aquella propuesta por Terán y Virto (2009) para edificios de mediana y baja altura. No se aborda el diseño de edificios altos, sin embargo, se recomienda consultar Terán y Coeto (2011) si se desea diseñar ese tipo de edificios. Es importante aclarar que la metodología se aplica a estructuras a base de marcos rígidos, ya que éstos tienden a contar con una flexibilidad tal que permiten que los dispositivos histeréticos disipen una gran cantidad de energía, como se observó en las pruebas experimentales del capítulo 2, mientras que los marcos permanecen en su estado elástico-lineal o con incursión menor en su intervalo inelástico.

La metodología consta de seis pasos que se describen a continuación con la ayuda del diagrama de flujo de la Figura 23:



**Figura 23.** Diagrama de flujo de la metodología de diseño.

**Paso 1.** Elegir distorsiones de entrepiso. Se deben elegir tantas distorsiones máximas como niveles de desempeño se consideren en el diseño. Por ejemplo, se pueden elegir dos distorsiones: una para Limitación de Daños y otra para Seguridad de Vida. Mientras que la distorsión para Limitación de Daños podría ser 0.004, que considera que los elementos no estructurales están desligados de la estructura (NTC-Sismo, 2020), la distorsión para Seguridad de Vida podría ser 0.01, como se consideró en el marco de las pruebas experimentales del capítulo 2.



**Paso 2.** Calcular las ductilidades máximas en los CRP y en el edificio. A partir de las distorsiones de entrepiso de diseño del Paso 1, se calculan las ductilidades esperadas en los CRP. Después éstas se convierten a una ductilidad global en el edificio. La ductilidad de cada CRP se calcula con la ecuación (7),

$$\mu_{CRP} = \frac{u_{max}}{u_y} \quad (7)$$

donde  $u_{max}$  y  $u_y$  son los desplazamientos axiales máximo y de fluencia del CRP.

El desplazamiento axial máximo,  $u_{max}$ , se calcula como:

$$u_{max} = \theta_{max} h_i \cos(\alpha) \quad (8)$$

donde  $\theta_{max}$  es la distorsión de entrepiso para el objetivo de desempeño para el que se esté diseñando,  $h_i$  es la altura de entrepiso y  $\alpha$  es el ángulo de inclinación del CRP. Se debe calcular un  $u_{max}$  para cada CRP y para cada nivel de desempeño que se esté revisando.

El desplazamiento axial de fluencia,  $u_y$ , se calcula como:

$$u_y = \frac{L f_{ye}}{f_k E} \quad (9)$$

donde  $L$  es la longitud del CRP (medida a centros de nodos),  $f_k$  es el factor de rigidez que toma en cuenta la variación de la geometría del CRP (como se definió en la sección 2.1),  $f_{ye}$  y  $E$  son, respectivamente, el esfuerzo de fluencia esperado y el módulo de elasticidad del material que compone al núcleo del CRP. Adicionalmente, se calculan la rigidez y las resistencias con las ecuaciones (1) a (4).



Una vez calculada la ductilidad máxima de cada CRP, para cada nivel de desempeño, se elige la ductilidad máxima y se convierte a ductilidad global del edificio con la ecuación (10).

$$\mu_{global} = \frac{\mu_{CRP}}{f_{ductilidad}} \quad (10)$$

donde  $f_{ductilidad}$  es un factor que convierte la ductilidad máxima de los CRP en ductilidad global del edificio, y se obtiene de la Tabla 3 (Terán y Virto, 2009). Cualquier valor no disponible en la Tabla 3 se puede obtener por interpolación lineal.

**Tabla 3.** Factor de ductilidad.

Número de pisos	$f_{ductilidad}$	
	$\mu_{CRP} = 2$	$\mu_{CRP} = 6$
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

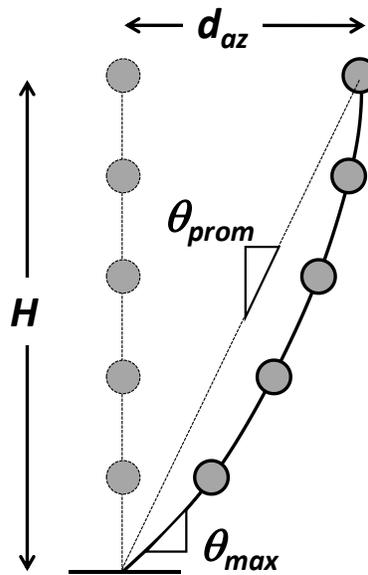
**Paso 3.** Calcular el desplazamiento máximo en la azotea del edificio. Como se aprecia en la Figura 24, el desplazamiento de azotea se puede calcular como el producto de la altura del edificio,  $H$ , por la distorsión promedio,  $\theta_{prom}$ . Y la distorsión promedio se puede calcular como el cociente de la distorsión de entrepiso máxima



entre un factor de corrección que toma en cuenta la variación de la distorsión en la altura del edificio. Matemáticamente,

$$d_{az} = H\theta_{prom} = H \frac{\theta_{max}}{f_{distorsión}} \quad (11)$$

donde  $H$  es la altura del edificio,  $\theta_{max}$  se eligió en el paso 1 y  $f_{distorsión}$  se obtiene de la Tabla 4 (Terán y Virto, 2009).



**Figura 24.** Esquema para el cálculo del desplazamiento de azotea.



Tabla 4. Factor de distorsión.

Área de diagonales <i>sigue</i> distribución de cortantes de entrepiso			Área de diagonales <i>no sigue</i> distribución de cortantes de entrepiso		
$\mu$	$f_{distorsión}$		$\mu$	$f_{distorsión}$	
	Regular	Irregular		Regular	Irregular
1	1.2	1.5	1	1.2	1.5
2+	1.2	1.5	2+	1.5	2.0

**Paso 4.** Convertir el desplazamiento de azotea a aquel en un oscilador equivalente de un grado de libertad (1GL). Como se puede deducir de la Figura 25, esto se puede hacer con un factor de corrección, como se indica en la ecuación (12).

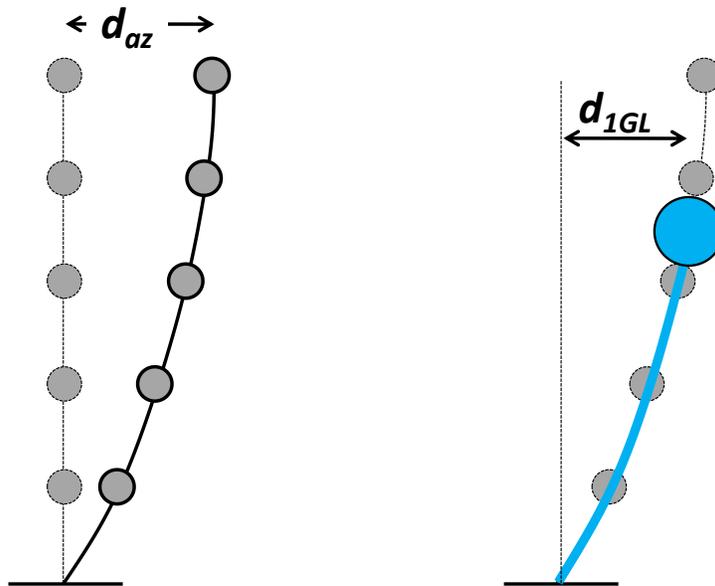


Figura 25. Convertir desplazamiento de azotea a aquel en un oscilador de 1GL.



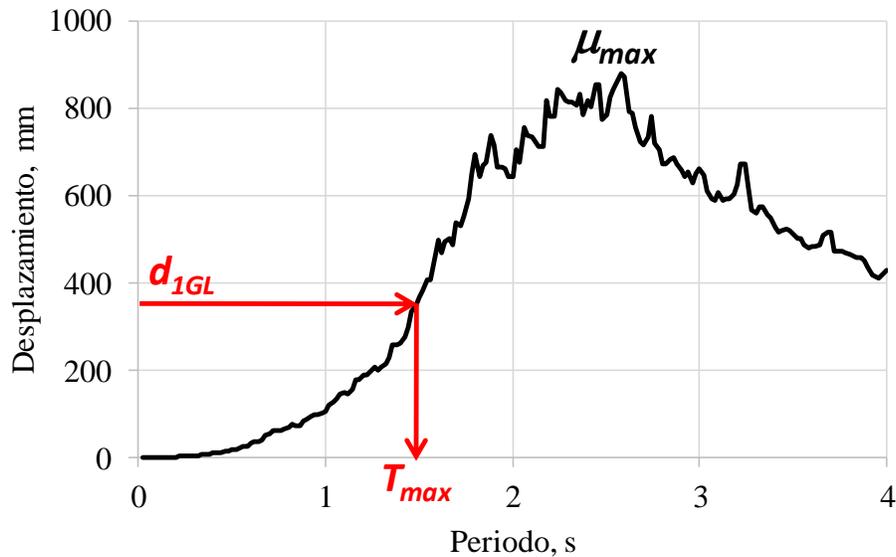
$$d_{1GL} = \frac{d_{az}}{f_{VGL}} \quad (11)$$

donde  $f_{VGL}$  es un factor que toma en cuenta el cambio de uno a varios grados de libertad, y se obtiene de la Tabla 5 (Terán y Virto, 2009).

**Tabla 5.** Factor de efecto de grados de libertad.

Número de pisos	$f_{VGL}$	
	$\mu = 1$	$\mu = 2+$
1	1.0	1.0
2	1.2	1.1
3	1.3	1.2
5+	1.4	1.2

**Paso 5.** Obtener el periodo máximo de la estructura. A partir de un espectro de diseño, se obtiene el periodo máximo que debe tener la estructura. Esto se observa esquemáticamente en la Figura 26, donde se ingresa con el desplazamiento máximo en el eje de las ordenadas y se obtiene el periodo máximo de la estructura en el eje de las abscisas. Se recuerda que se debe tener un espectro de diseño y un desplazamiento máximo para cada nivel de desempeño con el que se desee diseñar. Además, el espectro de diseño debe ser consistente con el nivel de ductilidad global estimada en el Paso 2.



**Figura 26.** Obtención del periodo máximo de la estructura.

**Paso 6.** Calcular el tamaño de los CRP para alcanzar el periodo objetivo de la estructura. Esto se logra con la ayuda de un programa de análisis estructural. Como un primer paso se modelan los marcos de la estructura y se calcula el periodo de vibrar sin CRP, que se denomina  $T_1$ . Después se colocan los CRP en el modelo con una configuración deseada. Se recomienda que los CRP se coloquen de manera simétrica en planta y que su colocación abarque desde el desplante hasta el nivel de azotea. Se debe colocar un área preliminar a los CRP. Se recomienda que el área de los CRP del primer nivel sea  $1 \text{ cm}^2$  y que el resto tenga un área proporcional al perfil de fuerza cortante esperado en el edificio. Se obtiene el periodo de vibrar del modelo,  $T_{pre}$  y se itera el área de los CRP hasta que se alcance el periodo objetivo,  $T_{obj}$ . Alternativamente, se puede usar la ecuación (12) para calcular el área de los CRP. Esta ecuación evita las iteraciones y permite alcanzar el periodo de vibrar objetivo de manera directa.



$$A_{obj} = A_{pre} \frac{B}{A} \quad (12)$$

donde  $A_{pre}$  es el área preliminar de cada CRP,  $A_{obj}$  el área a la que se desea llegar, y

$$A = \frac{1}{T_{pre}^2} - \frac{1}{T_1^2} \quad (13)$$

$$B = \frac{1}{T_{obj}^2} - \frac{1}{T_1^2} \quad (14)$$

siendo  $T_1$ ,  $T_{pre}$  y  $T_{obj}$ , respectivamente, el periodo de la estructura sin CRP, el periodo de la estructura con CRP con áreas preliminares y el periodo objetivo de la estructura (es decir: al que se desea llegar).

### 3.2 Metodología para estructuras equipadas con el dispositivo Dampo 1505

La metodología para diseñar una estructura a base de marcos, equipada con el dispositivo Dampo 1505, es la misma de la sección 3.1. Las únicas diferencias son:

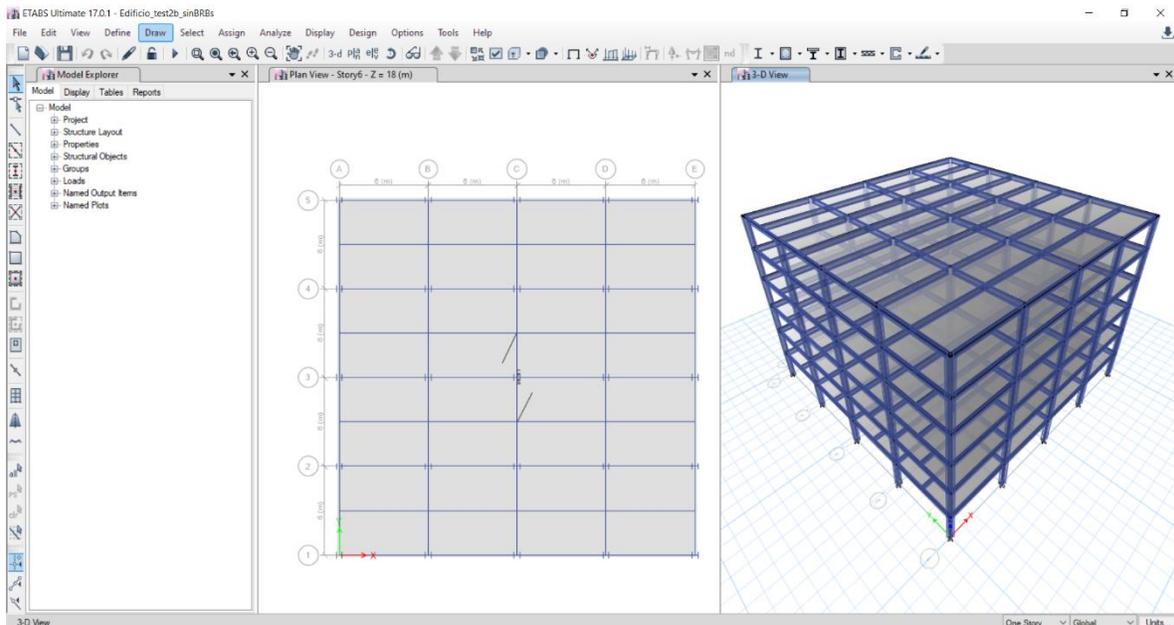
- En el Paso 2, el desplazamiento de fluencia, la rigidez y las resistencias, a la fluencia y máxima, se obtienen del catálogo del proveedor. Una vez obtenidas las propiedades, se procede a calcular la ductilidad esperada en los dispositivos y la ductilidad global de la estructura usando las (7) y (10), respectivamente.
- En el Paso 6, en el lugar de iterar el área de los dispositivos para alcanzar el periodo objetivo de la estructura, se itera su rigidez por medio de la selección de diferentes dispositivos del catálogo del proveedor.

Todos los demás pasos se aplican de la misma forma que se describe en la sección 3.1.



### 3.3 Ejemplo de diseño

Se diseñó un edificio de seis niveles en 3D, estructurado a base de marcos de acero. La Figura 27 muestra un modelo del edificio en el programa Etabs (2017). Se puede apreciar que la estructura tiene cuatro crujeías en cada dirección horizontal, todas con longitud de 6 m. La altura de entrepiso es uniforme con un valor 3 m. Los elementos estructurales constan de columnas con sección W14x193 y las trabes con W18x35. El acero estructural es ASTM A992 con esfuerzo de fluencia nominal  $f_y = 3515 \text{ kg/cm}^2$ . El sistema de piso consta de losacero de 16 cm de espesor total. Se asumió diafragma rígido en cada piso, base empotrada del edificio y conexiones rígidas en las uniones trabe columna con un factor de rigidez de 0.5. La Figura 28a muestra una vista en planta de un piso típico del modelo, donde se aprecia la orientación de la losacero y las trabes secundarias. La Figura 28b muestra una vista en elevación que muestra la altura de entrepiso y los perfiles usados. La estructura se considera desplantada en un sitio de la Ciudad de México con suelo blando, cuyo periodo dominante es  $T_s = 2 \text{ s}$  con coordenadas: 19.43434, -99.13815.



**Figura 27.** Modelo de edificio del ejemplo de diseño.



**Figura 28.** Vistas del modelo: a) planta, b) elevación.



La Tabla 6 muestra las cargas consideradas en el ejemplo. Mientras que en los entrepisos se consideraron cargas de oficina, en la azotea se consideraron cargas para reuniones.

**Tabla 6.** Cargas consideradas.

Tipo	Oficina, kg/m <sup>2</sup>	Azotea, kg/m <sup>2</sup>
Carga muerta adicional al PP (C <sub>Ma</sub> )	200	400
Carga viva máxima (C <sub>Vm</sub> )	250	350
Carga viva instantánea (C <sub>Va</sub> )	180	250

En este ejemplo se consideró que el edificio estaba equipado con CRP, por lo que se aplicó la metodología descrita en la sección 3.1 como se describe a continuación:

**Paso 1.** Se eligieron las distorsiones de entrepiso. Para este ejemplo se eligió 0.004 para limitación de daños y 0.01 para seguridad de vida.

**Paso 2.** Se calcularon las ductilidades máximas en los CRP y en el edificio. A partir de las distorsiones de entrepiso de diseño del Paso 1, se calcularon las ductilidades esperadas en los CRP como sigue:

- Los desplazamientos máximos para cada nivel de desempeño fueron:

$$u_{max1} = \theta_{max1} h_i \cos(\alpha) = 0.004 \times 300 \times 0.8944 = 1.07 \text{ cm}$$

$$u_{max2} = \theta_{max2} h_i \cos(\alpha) = 0.010 \times 300 \times 0.8944 = 2.68 \text{ cm}$$

- El desplazamiento de fluencia resultó:



$$u_y = \frac{L f_{ye}}{f_k E} = \frac{670.82 \cdot 2953.80}{1.3 \cdot 2100000} = 0.7258 \text{ cm}$$

- Con ello, se calculó la ductilidad máxima en los CRP para cada nivel de desempeño:

$$\mu_{CRP1} = \frac{u_{max1}}{u_y} = \frac{1.07}{0.7258} = 1.48$$

$$\mu_{CRP2} = \frac{u_{max2}}{u_y} = \frac{2.68}{0.7258} = 3.70$$

- Entonces, con las ductilidades máximas en los CRP y con los factores de la Tabla 3, la ductilidad global para cada nivel de desempeño se calculó como:

$$\mu_{global1} = \frac{\mu_{CRP1}}{f_{ductilidad}} = \frac{1.48}{1} = 1.48$$

$$\mu_{global2} = \frac{\mu_{CRP2}}{f_{ductilidad}} = \frac{3.7}{1.1} = 3.36$$

**Paso 3.** Se calculó el desplazamiento máximo en la azotea del edificio para cada nivel de desempeño. Se asumió que el área de CRP sigue el perfil de cortante, y dado que la estructura es regular, de la Tabla 4 se obtiene  $f_{distorsión} = 1.2$  para ambos niveles de desempeño.

$$d_{az1} = H \frac{\theta_{max1}}{f_{distorsión}} = (6 \times 300) \frac{0.004}{1.2} = 6.0 \text{ cm}$$

$$d_{az2} = H \frac{\theta_{max2}}{f_{distorsión}} = (6 \times 300) \frac{0.010}{1.2} = 15.0 \text{ cm}$$



**Paso 4.** Se convirtió el desplazamiento de azotea a aquel en un oscilador equivalente de un grado de libertad (1GL). Dado que la estructura tiene más de cinco niveles, de la Tabla 5 se tomó  $f_{VGL}$  como 1.3 para Limitación de Daños y 1.2 para Seguridad de Vida, entonces:

$$d_{1GL1} = \frac{d_{az1}}{f_{VGL}} = \frac{6.0}{1.3} = 4.60 \text{ cm}$$
$$d_{1GL2} = \frac{d_{az2}}{f_{VGL}} = \frac{15.0}{1.2} = 12.5 \text{ cm}$$

**Paso 5.** Se obtuvo el periodo máximo de la estructura.

Para ello, se obtuvieron espectros de desplazamiento a partir de movimientos sísmicos sintéticos descargados del programa SASID (2020) para la ubicación de la estructura. La Figura 29 muestra una imagen del programa SASID (2020) durante la descarga de los movimientos sintéticos. Las figuras 30 y 31 muestran los movimientos descargados de profundidad intermedia y subducción, respectivamente. Sus espectros se calcularon con el programa PRISM (2020) para una relación de amortiguamiento del 2.5% del crítico. Éstos se muestran en las figuras 32 y 33 correspondientes a espectros para Limitación de Daños y espectros para Seguridad de Vida, respectivamente. También se dividieron en movimientos de profundidad intermedia y movimientos de subducción. Mientras que los espectros individuales se muestran en línea gris, sus promedios se muestran en línea negra. Se debe aclarar que los espectros para Limitación de Daños se obtuvieron después de escalar los movimientos sísmicos descargados de SASID (2020) por un factor de 1/4 según la sección 3 de las NTC-Sismo (2020). Nótese que los espectros se calcularon para respuesta elástica y para respuesta inelástica con ductilidad constante igual a 1.48 y 3.36 para Limitación de Daños y Seguridad de Vida, respectivamente.



### Mapa de la Ciudad de México

Coordenadas: (19.43434 -99.13615)

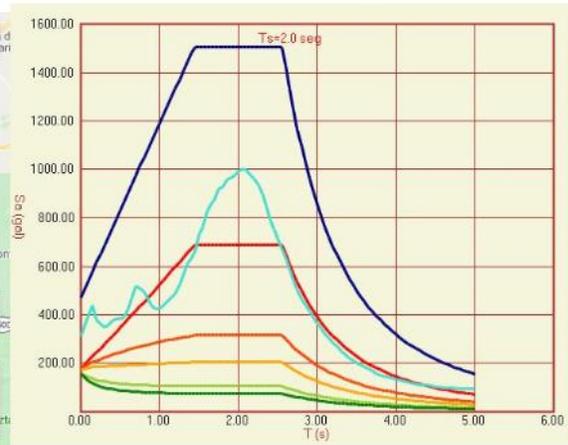
Búsqueda de predio por dirección



Factor de hiperestaticidad ( $k_1$ ): 1.25    Factor de importancia (Grupo): A1  
Factor de Irregularidad: 1    Estructura de mampostería: No

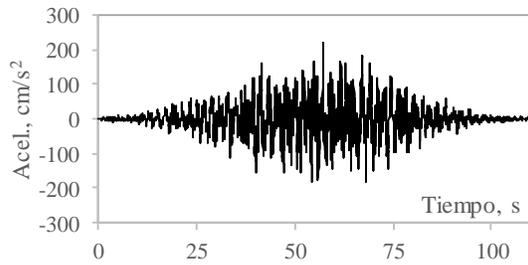
### Espectros

— Elástico sin reducir    — Daño, Q=1.5    — Daño, Q=3    — Peligro uniforme  
— Daño, Q=1    — Daño, Q=2    — Daño, Q=4

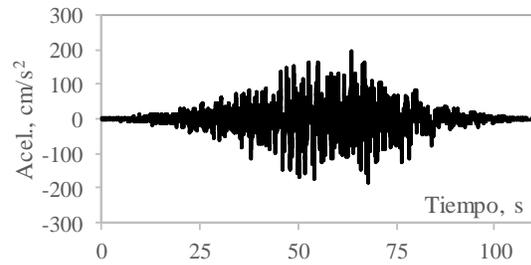


Procesar    Generar documento

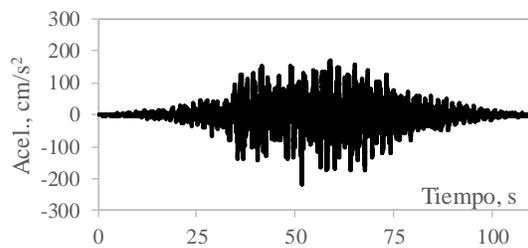
**Figura 29.** Descarga de movimientos sísmicos de SASID (2020).



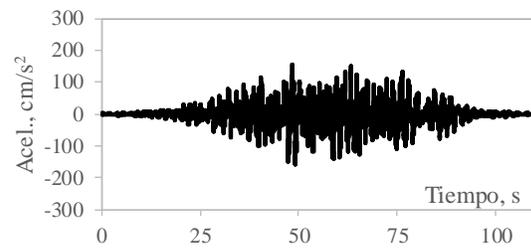
a) movimiento 1, componente 1



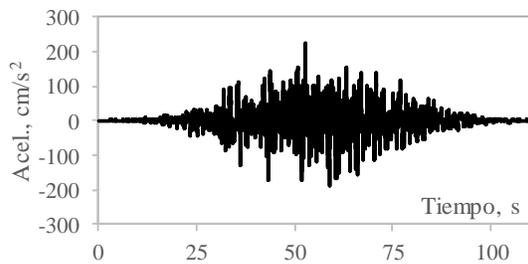
b) movimiento 1, componente 2



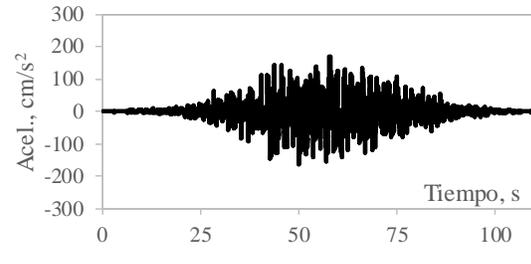
c) movimiento 2, componente 1



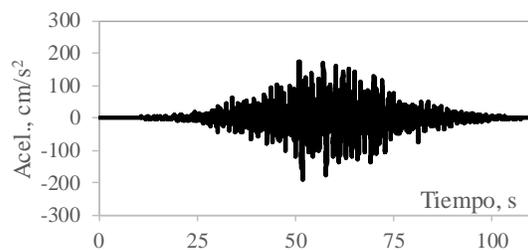
d) movimiento 2, componente 2



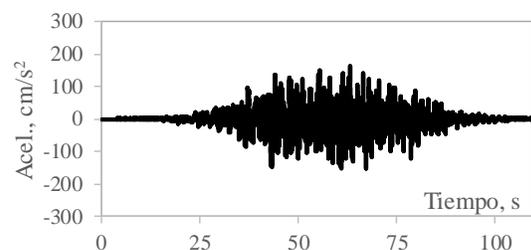
e) movimiento 3, componente 1



f) movimiento 3, componente 2

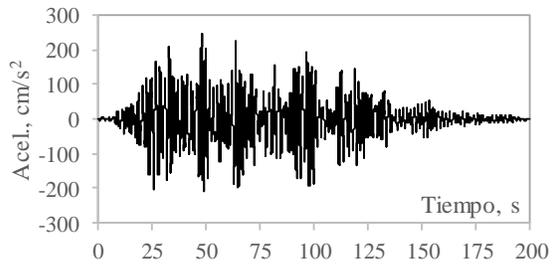


g) movimiento 4, componente 1

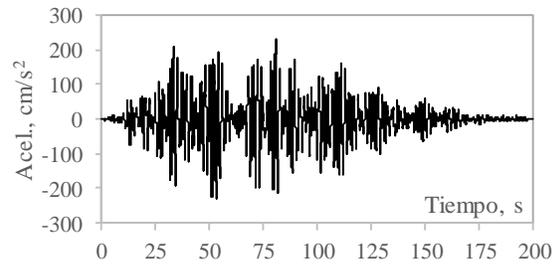


h) movimiento 4, componente 2

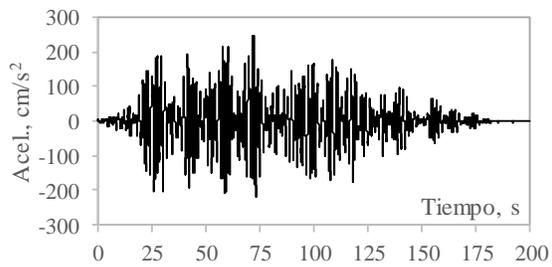
**Figura 30.** Movimientos sísmicos de profundidad intermedia.



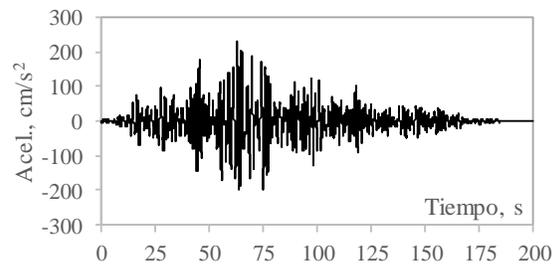
a) movimiento 1, componente 1



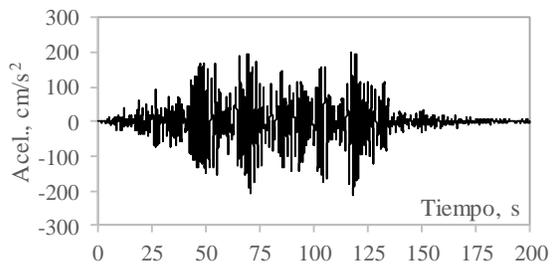
b) movimiento 1, componente 2



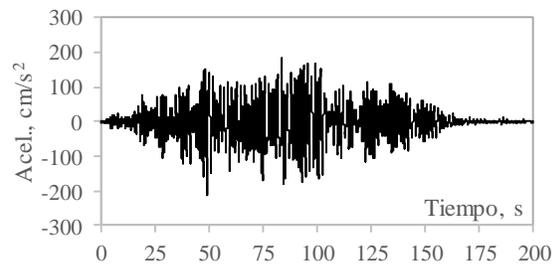
c) movimiento 2, componente 1



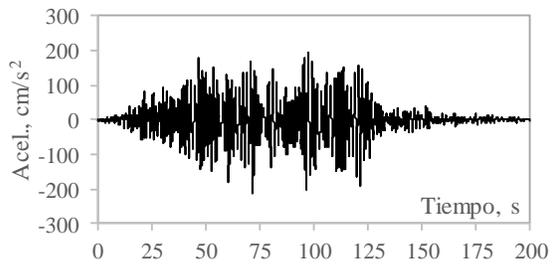
d) movimiento 2, componente 2



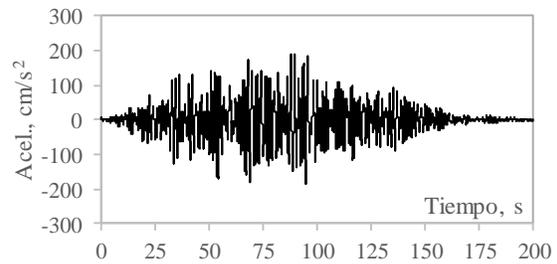
e) movimiento 3, componente 1



f) movimiento 3, componente 2

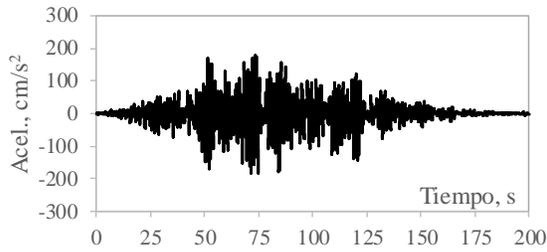


g) movimiento 4, componente 1

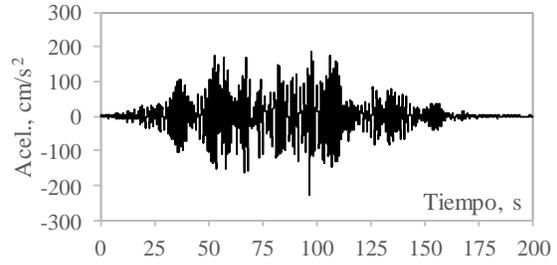


h) movimiento 4, componente 2

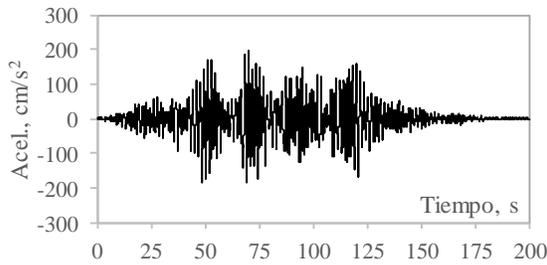
**Figura 31.** Movimientos sísmicos de subducción (continúa).



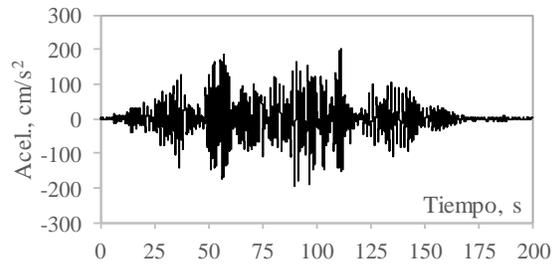
i) movimiento 5, componente 1



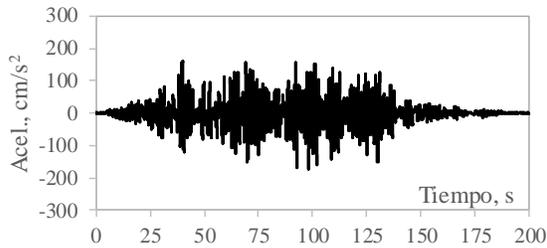
j) movimiento 5, componente 2



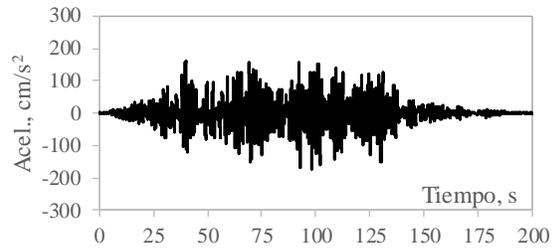
k) movimiento 6, componente 1



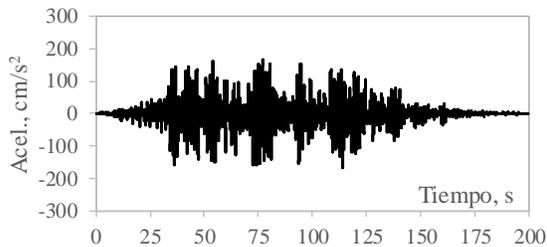
l) movimiento 6, componente 2



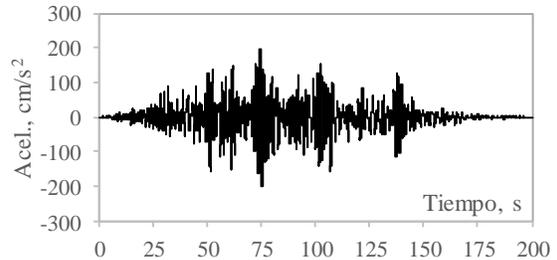
m) movimiento 7, componente 1



n) movimiento 7, componente 2



o) movimiento 8, componente 1



p) movimiento 8, componente 2

**Figura 31.** Movimientos sísmicos de subducción.

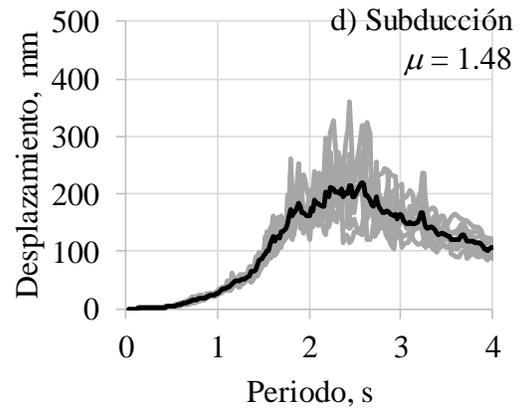
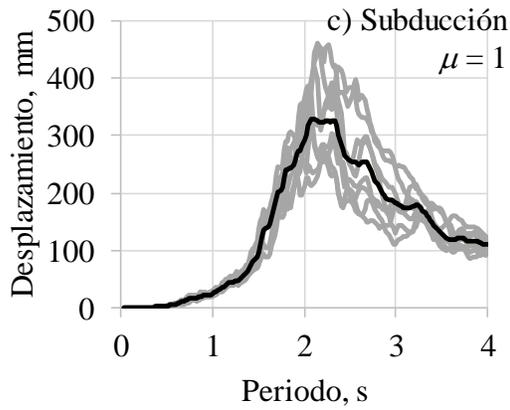
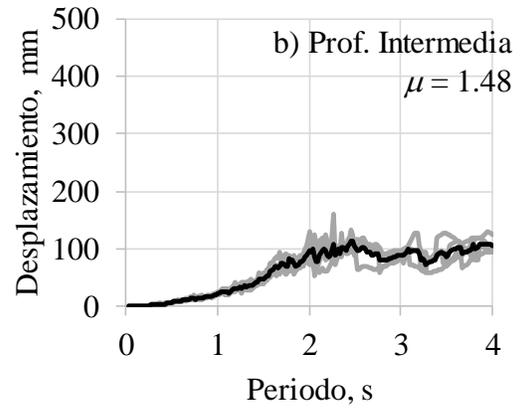
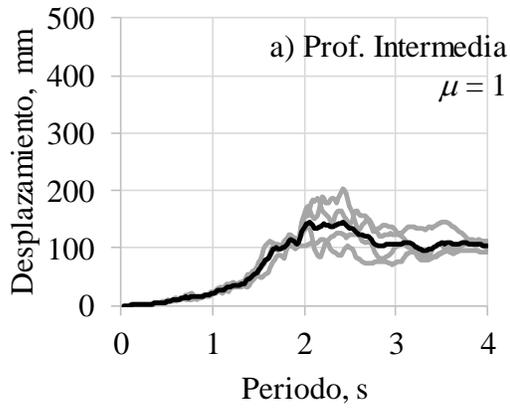
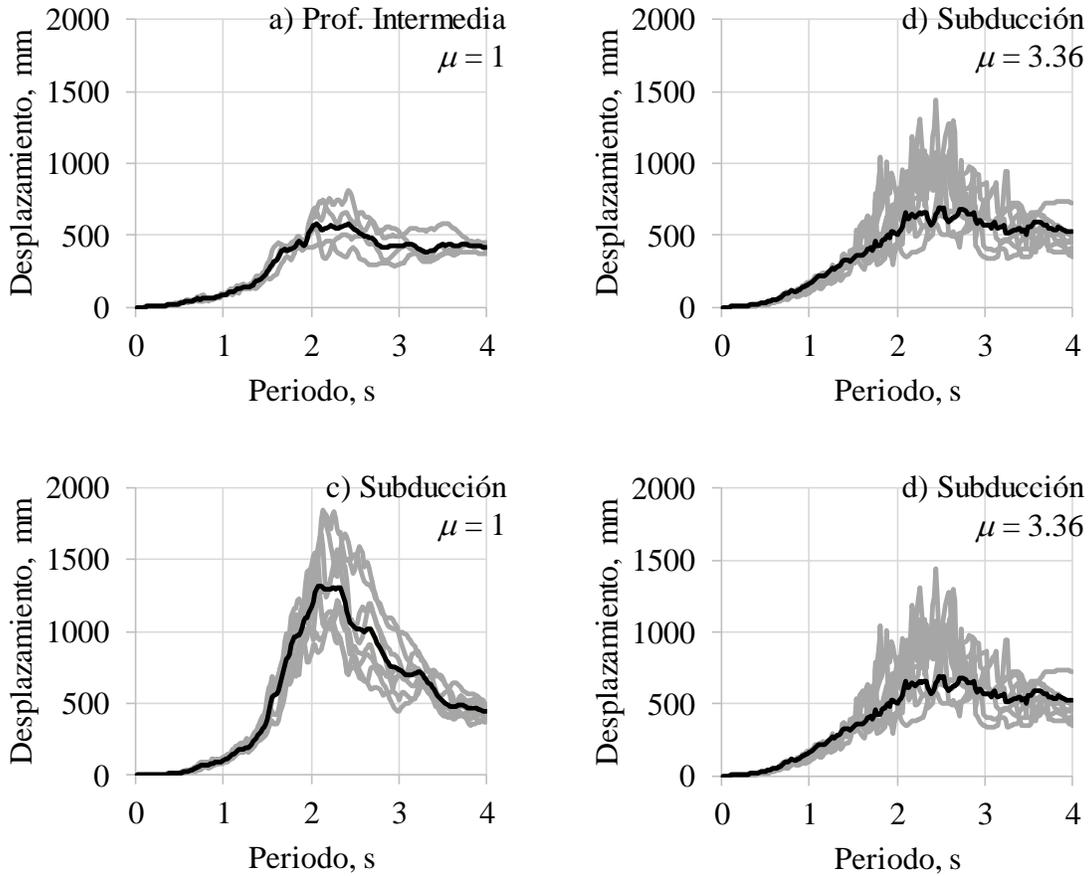


Figura 32. Espectros de diseño para Limitación de Daños.



**Figura 33.** Espectros de diseño para Seguridad de Vida.

A partir de los espectros de diseño para Limitación de Daño (figuras 32b y d), se entró en el eje de las ordenadas con un desplazamiento de 46 mm y se obtuvieron dos periodos, uno de 1.44 s para el espectro promedio de profundidad intermedia y uno de 1.18 s para el espectro promedio de subducción. De manera similar, de las figuras 33b y d se obtuvieron los periodos para un desplazamiento de 125 mm correspondiente a Seguridad de Vida. Se leyó un periodo de 1.12 s del espectro



promedio de profundidad intermedia y 0.88 s del espectro promedio de subducción. Se eligió el menor de todos que resultó ser:

$$T_{obj} = 0.88 \text{ s}$$

A este periodo se le denomina periodo objetivo y corresponde al periodo máximo que puede tener la estructura para controlar los desplazamientos adecuadamente.

**Paso 6.** Se calculó el tamaño de los CRP para alcanzar el periodo objetivo de la estructura.

Esto se hizo con la ayuda del programa Etabs (2017). Como un primer paso se calculó el periodo fundamental de vibrar sin CRP en cada dirección de análisis, que resultó ser:

$$T_{1y} = 1.28 \text{ s}$$

$$T_{1x} = 1.16 \text{ s}$$

Después se colocaron los CRP en el modelo con la configuración de la Figura 34. Nótese que los CRP se colocaron de manera simétrica en planta y que su colocación abarcó desde el desplante hasta el nivel de azotea. De manera inicial se colocó, en ambas direcciones, un área preliminar de 1 cm<sup>2</sup> a los CRP de los niveles 1 a 3 y de 0.5 a los niveles 4 a 6.

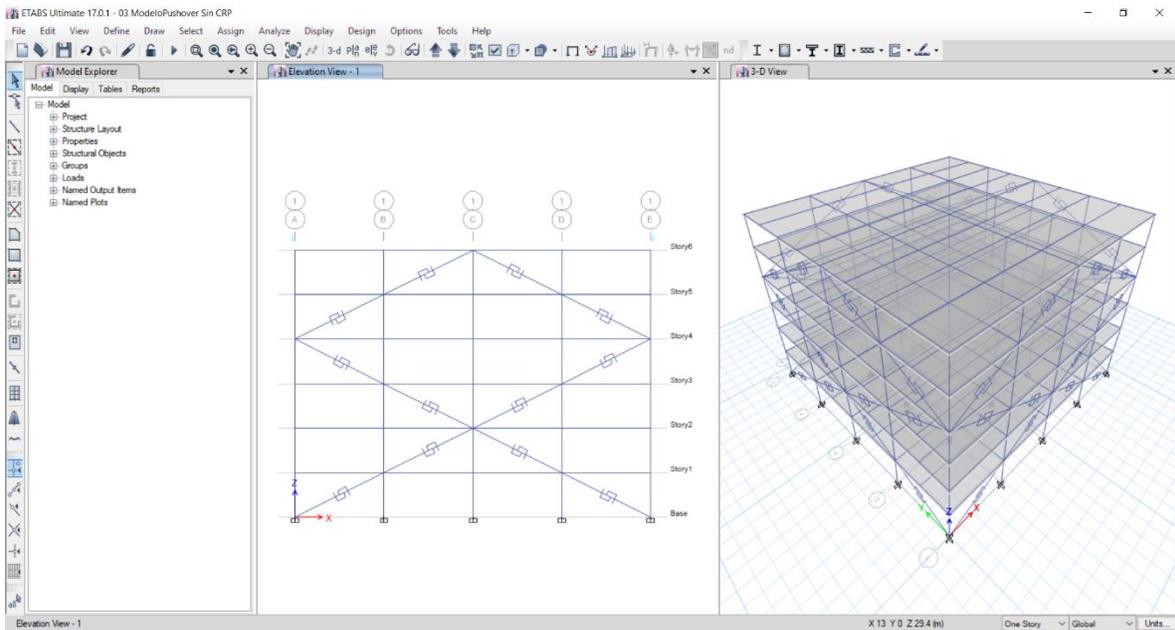
Aunque esas áreas no son estrictamente proporcionales al perfil de fuerza cortante esperado en el edificio, se pueden considerar apropiadas desde un punto de vista



práctico. Con ello, se obtuvo el periodo de vibrar del modelo con esas áreas, que resultó ser:

$$T_{pre\_y} = 1.25 \text{ s}$$

$$T_{pre\_x} = 1.13 \text{ s}$$



**Figura 34.** Modelo de la estructura equipada con CRP.

Se aplicó la ecuación (12) y se llegó al periodo objetivo de  $T_{obj} = 0.88 \text{ s}$  en ambas direcciones, con las áreas de los CRP indicadas en la Tabla 7.



**Tabla 7.** Propiedades de los CRP.

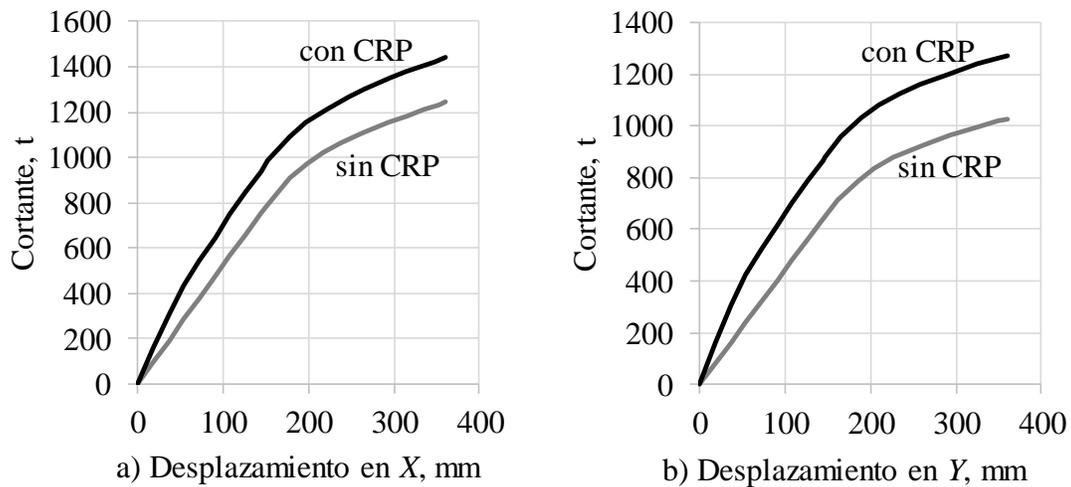
Niveles	Dirección	Área, cm <sup>2</sup>	$K_{CRP}$ , t/mm	$P_{ye}$ , t	$P_{uc}$ , t	$P_{ut}$ , t
1-3	Y	21.0	8.55	62.0	78.2	89.9
4-6	Y	10.5	4.27	31.0	39.1	44.9
1-3	X	17.0	6.92	50.2	63.3	72.8
4-6	X	8.50	3.46	25.1	31.6	36.4

Con eso quedó diseñada la estructura equipada con CRP. Las conexiones y otros elementos estructurales se deben revisar para soportar las cargas máximas que los dispositivos les transfieren.

Con la intención de verificar el diseño, se realizó un análisis estático no lineal de la estructura con y sin CRP. Se siguieron las recomendaciones de ASCE 41 (2013) y de las NTC-Acero (2020) para tomar en cuenta la no linealidad de los elementos estructurales. Los CRP se modelaron usando el modelo de Wen (1976), disponible en Etabs (2017) considerando las propiedades de la Tabla 7, una rigidez pos-fluencia de 1.6% de la elástica y un exponente de transición, de respuesta elástica a inelástica, de 3.0. La Figura 35 muestra las curvas de capacidad obtenidas. Se puede observar que los CRP incrementan la resistencia de la estructura en 15 y 25% en las direcciones X y Y, respectivamente. También se aprecia que los CRP fluyen antes que la estructura, lo que asegura que la protegen. Éstos fluyen a desplazamientos laterales cercanos a 55, mm mientras que la estructura fluye a 190 mm aproximadamente. Esto hace notar que la estructura tendrá una ductilidad global cercana a 3.36, calculada en el Paso 2, cuando los marcos apenas estén en su límite elástico.

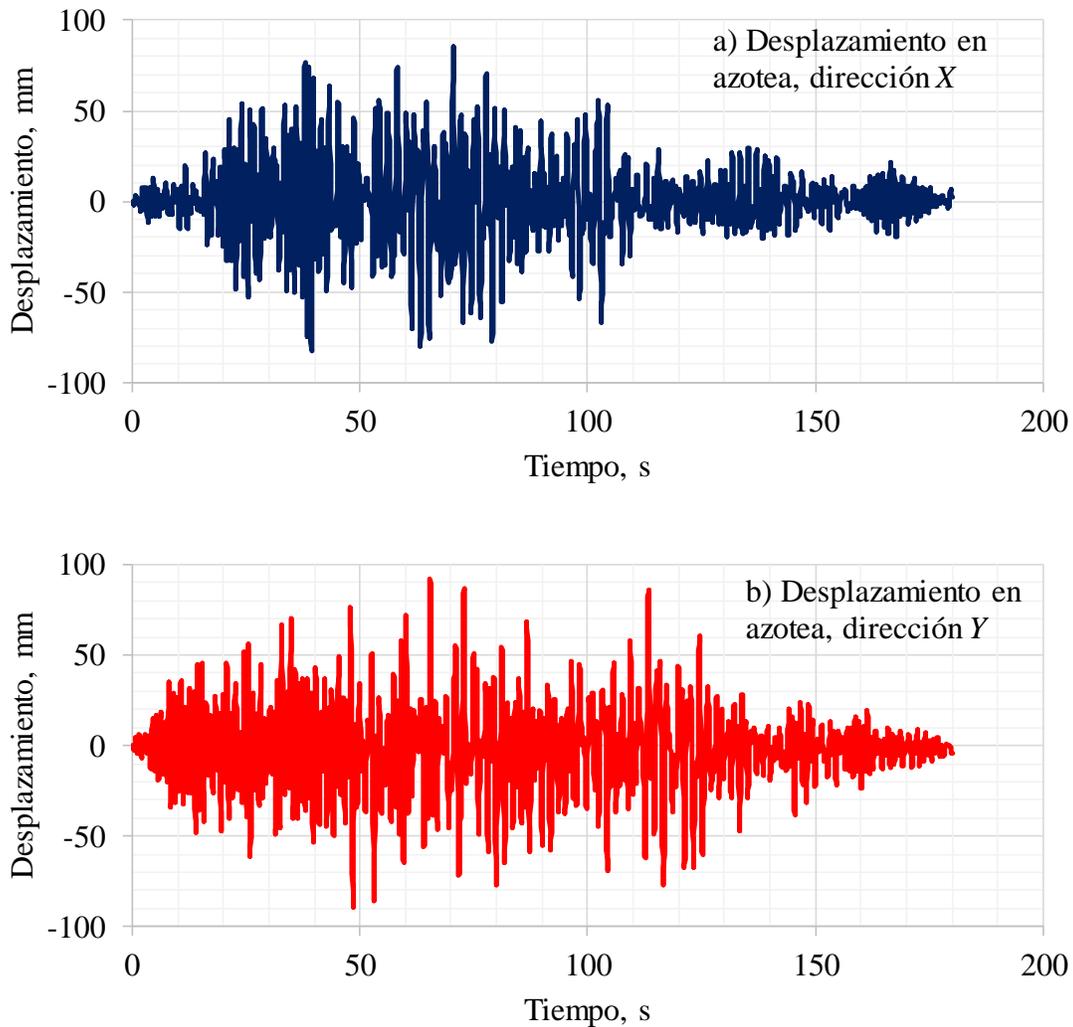


El análisis estático no lineal también puede servir para obtener diagramas de elementos mecánicos en trabes y columnas, así como para revisar descargas en la cimentación. Con esa información se puede validar que el diseño de los elementos estructurales es apropiado; además, se pueden diseñar conexiones y cimentación.



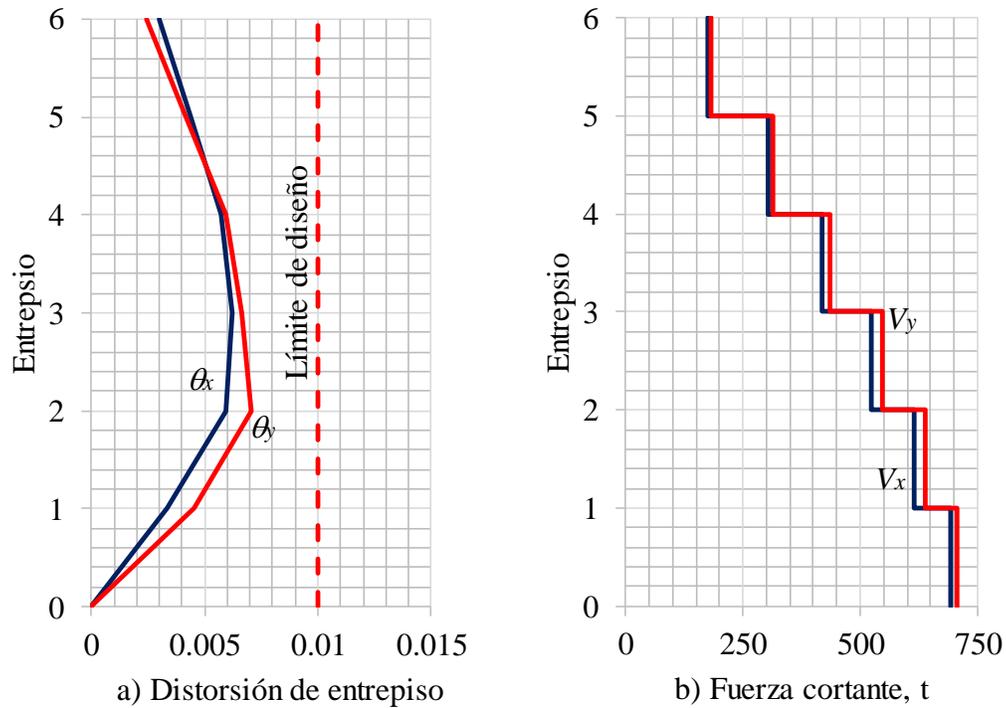
**Figura 35.** Curvas de capacidad de la estructura.

Por otro lado, para fines de validación del comportamiento dinámico de la estructura, ésta fue sometida a uno de los movimientos sísmicos en su base. Se eligió el movimiento 2 de subducción por ser el que tenía la ordenada espectral máxima para un periodo de 0.88 en la Figura 33. Se consideró un amortiguamiento equivalente a 2.5% del crítico mediante una matriz de Rayleigh y se usó el método de Newmark para calcular la respuesta. La Figura 36 muestra la historia de desplazamientos calculados en la azotea del edificio en ambas direcciones de análisis. Se puede apreciar que los desplazamientos máximos están por debajo de los 100 mm en ambas direcciones.



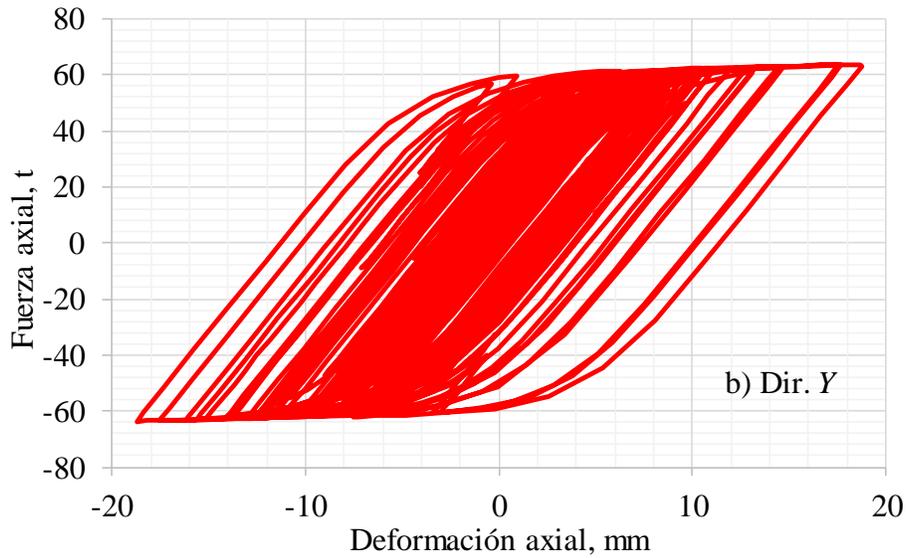
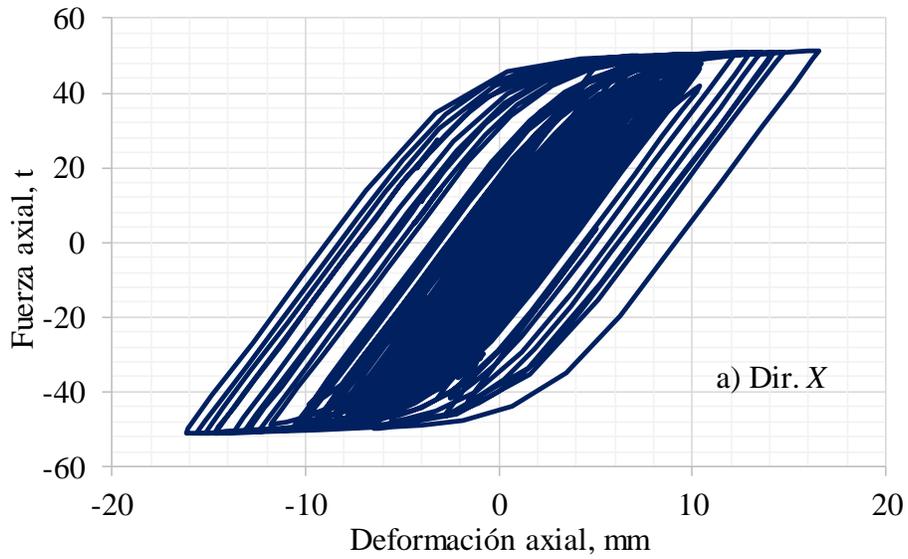
**Figura 36.** Desplazamientos, en el tiempo, en la azotea del edificio.

La Figura 37 muestra los perfiles de respuesta máxima en términos de distorsión de entrepiso y fuerza cortante. Se puede ver que las distorsiones de entrepiso están por debajo del límite de diseño de 0.01, por lo que el diseño se considera adecuado.



**Figura 37.** Perfiles de distorsión de entrepiso y fuerza cortante.

Por su parte, la Figura 38 muestra curvas de histéresis calculadas para los dos CRP más demandados en ambas direcciones de análisis. Se puede observar que los CRP tienen comportamiento no lineal, lo que significa que están disipando una gran cantidad de energía durante el movimiento sísmico, mientras que los elementos estructurales del marco permanecen en su estado elástico lineal.



**Figura 38.** Curvas de histéresis de los dos CRP más demandados.



#### **4 CONCLUSIONES**

Se presentaron resultados experimentales del comportamiento de dos dispositivos histeréticos disponibles en México, instalados en un marco de concreto reforzado. Después, en la segunda parte de este documento, se presentó una guía de diseño de estructuras equipadas con dispositivos histeréticos y se realizó un ejemplo de diseño. Se ofrecen las siguientes conclusiones:

- Las pruebas experimentales muestran que los dispositivos histeréticos son de gran utilidad para proteger estructuras. Al ser instalados en un marco de concreto reforzado, se pudo ver que la capacidad de carga y deformación del marco fue satisfactoria.
- Los ciclos de histéresis que presentaron los dispositivos ensayados mostraron comportamiento estable y gran capacidad de disipación de energía. La ductilidad acumulada en ambos dispositivos fue superior al mínimo recomendado por AISC (2016) y muy superior a las demandas esperadas en un movimiento sísmico de gran intensidad.



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

- La metodología de diseño presentada en el capítulo 3 es sencilla y práctica. Tiene la ventaja de estar basada en control de desplazamientos laterales, lo que permite, por un lado, controlar el nivel de daño que se esperaría en una estructura y, por otro lado, aprovechar al máximo las propiedades de los dispositivos histeréticos, que son altamente no lineales.
- El ejemplo de aplicación mostró que la metodología es simple y fácil de aplicar. Además, mediante análisis no lineales, estáticos y dinámicos, se pudo ver que la metodología produce diseños satisfactorios.



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece al Instituto para la Seguridad de las Construcciones de la Ciudad de México por el apoyo económico brindado durante el desarrollo de este proyecto. Se agradece al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) por brindar las facilidades para la realización de las pruebas experimentales. Se agradece al Instituto de Ingeniería de la UNAM por las facilidades otorgadas para la realización del proyecto. Se agradece a la empresa Dampo Systems, SA de Cv por su apoyo durante las pruebas experimentales. Se agradece al Dr. Amador Terán Gilmore por sus aportes y comentarios en varios foros y documentos que han servido de base para la elaboración de este proyecto. También se agradece la labor del estudiante Cyprien Lubin por su apoyo en algunas actividades relacionadas con este proyecto.



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

## **REFERENCIAS**

AISC (2016). AISC 341 - Seismic provisions for structural steel buildings. American Institute Of Steel Construction.

Asce 41. (2013). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. American Society of Civil Engineers.

Etabs. (2017). Integrated Building Design Software. Computers & Structures, Inc., Berkeley, California, EEUU.

Guerrero-Bobadilla, H., T. Ji, and J.A. Escobar-Sanchez. (2017). Experimental studies of a steel frame model with and without buckling-restrained braces. Ingeniería Sísmica. 95: p. 33-52.

Merrit, S., C.-M. Uang, and G. Benzoni. (2003). Subassemblage testing of Corebrace Buckling-Restrained Braces. 2003, University of California, San Diego: La Jolla, California.

NTC-Acero. (2020). Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero. Gobierno de la Ciudad de México.

NTC-Concreto, 2017. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto. Gobierno de la Ciudad de México.



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

- NTC-Sismo. (2017). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por sismo. Gobierno de la Ciudad de México.
- PRISM (2020). A Software for Seismic Response Analysis of Single-Degree-of-Freedom Systems. Departamento de Ingeniería Arquitectónica. Universidad de INHA, Seúl, Corea.
- SAP2000 (2020). Structural Analysis Program. Computer and Structures, Inc. Berkeley, California, EEUU.
- SASID (2020). Sistema de Acciones Sísmica de Diseño de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por sismo. Gobierno de la Ciudad de México.
- Teran-Gilmore, A. and G. Coeto. (2011). Displacement-Based Preliminary Design of Tall buildings stiffened with a system of Buckling-Restrained Braces. *Earthquake Spectra*. 27(1): p. 153-182.
- Teran-Gilmore, A. and N. Virto. (2009). Preliminary design of low-rise buildings stiffened with buckling restrained braces by a displacement-based approach. *Earthquake Spectra*. 25(1): p. 185-211.
- Wen, Y.K. (1976). Method for random vibration of hysteretic systems. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*. 102(2): p. 249–263.