



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELADO NUMÉRICO DE
DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA
DE BAJO COSTO**

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

JOSÉ GABRIEL FLORES LEONAR

DIRECTOR DE TESIS

Dr. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

Dedicatoria

*A mi **madre** y a mi **padre** quienes siempre me brindaron su amor y apoyo incondicional.*

*A mis hermanos, **Martha** y **Amilcar** quienes me motivan todos los días.*

*A mi asesor por sus enseñanzas y consejos, **Dr. Héctor Guerrero Bobadilla**.*

*A mis **amigos** que me acompañaron durante mi formación académica.*

Agradecimientos

*A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y a la **Facultad de Ingeniería** por brindarme una formación íntegra.*

*Al **Instituto de Ingeniería de la UNAM** y a todo el personal que participó en este proyecto, por brindarme su apoyo y recursos.*

*Al **Dr. Héctor Guerrero Bobadilla** por brindarme parte de su tiempo y conocimientos y por influir en mi desarrollo, académico, profesional y personal.*

*A mis **padres y hermanos** por siempre contar con su apoyo, el cual hizo esto posible.*

RESUMEN

Los sismos son un fenómeno natural con el cual la población de México ha vivido a lo largo de su historia. Han sido varios los eventos que han impactado drásticamente a la sociedad, sufriendo cuantiosas pérdidas tanto materiales como humanas. Con el pasar de estos eventos ha sido mucha la experiencia obtenida y los estudios realizados, los cuales han permitido la evolución de nuevas tecnologías que ayudan a mitigar estos daños.

En esta investigación se hace uso de disipadores sísmicos del tipo Contraventeos Restringidos al Pandeo (CRP). El objetivo de estos dispositivos es brindar protección ante sismos y ser fácilmente reemplazables en caso de ser necesario. Quince de estos especímenes fueron fabricados y ensayados en laboratorio. Se presentan algunos resultados experimentales y se comparan con aquellos de un modelo numérico simple.

El contenido de esta tesis describe las características físicas generales de los dispositivos (materiales y geometría), así como su proceso de fabricación y los protocolos seguidos para su experimentación. Haciendo uso del programa de computadora SAP2000 (2018), se propone una estructura simple, en la cual se modela numéricamente el comportamiento de los CRP que se acoplan a ésta. Posterior a esto, la estructura es sometida a excitaciones provenientes de registros sísmicos de diversas estaciones del sur de México, registradas durante el terremoto del 7 de septiembre de 2017. Los resultados obtenidos arrojan información sobre las demandas de ductilidad de los disipadores. Estas demandas son comparadas con las capacidades de los disipadores que se probaron en laboratorio. La comparación de los resultados concluye que los dispositivos son adecuados para proteger las estructuras de baja altura ante movimientos sísmicos de gran intensidad.

ABSTRACT

Earthquakes are a natural phenomenon that the population of Mexico has lived throughout its history. There have been several events that have drastically impacted society, suffering substantial losses both material and human. Research after these events has given a significant experience, which have allowed the evolution of new technologies that help to mitigate damages.

This research studies Buckling Restrained Braces (BRB). The purpose of these devices is to provide protection against earthquakes, while they are easy to replace if required. Fifteen of these specimens were built and tested in laboratory. Some results are presented here and compared with simple numerical models.

This thesis describes the general physical characteristics of the devices (materials and geometry), as well as their manufacturing process and protocols for their testing. A simple structure is proposed and modeled using the computer software SAP2000 (2018). Afterwards the structure was subjected to excitations using seismic records of different stations, taken during the Mexico earthquake on September 7, 2017. The results obtained provide information on the ductility demands of the dissipators. These demands are compared with the capacities of the dissipators tested in laboratory. The comparison of the results concludes that the devices are capable of protecting low-rise structures when subjected to severe earthquake ground motions.

Tabla de contenido

| | |
|---|------------|
| Dedicatoria | III |
| Agradecimientos | IV |
| RESUMEN | V |
| ABSTRACT | VI |
| 1 INTRODUCCIÓN | 9 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 9 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN..... | 12 |
| 1.3 OBJETIVOS Y ALCANCE | 15 |
| 2 ANTECEDENTES | 16 |
| 2.1 SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA | 16 |
| 2.1.1 Sistemas de Control Activo | 17 |
| 2.1.2 Sistemas de Control Híbrido | 19 |
| 2.1.3 Sistemas de Control Pasivo..... | 19 |
| 2.2 CONTRAVENTEOS RESTRINGIDOS AL PANDEO | 24 |
| 3 CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO | 26 |
| 3.1 DISPOSITIVOS | 26 |
| 3.1.1 Materiales y geometría..... | 26 |
| 3.1.2 Fabricación | 31 |
| 3.2 ARREGLO EXPERIMENTAL..... | 34 |
| 3.3 PROGRAMA DE PRUEBAS | 36 |
| 3.4 INSTRUMENTACIÓN | 38 |
| 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES | 41 |
| 4.1 CURVAS FUERZA-DEFORMACIÓN | 41 |
| 4.2 CURVAS ENERGÍA | 48 |
| 5 MODELO NUMÉRICO | 50 |
| 5.1 REGISTROS SÍSMICOS | 50 |

| | | |
|-------------------------|-------------------------------------|-----------|
| 5.2 | MODELO SAP2000 | 52 |
| 6 | RESULTADOS DEL MODELO | 57 |
| 6.1 | CURVAS FUERZA-DEFORMACIÓN | 57 |
| 6.2 | CURVAS DE ENERGÍA | 78 |
| 7 | CONCLUSIONES..... | 87 |
| 7.1 | DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES | 87 |
| 7.2 | DEL MODELO NUMÉRICO | 87 |
| REFERENCIAS..... | | 89 |

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La sismicidad en México ha representado siempre un gran impacto en la sociedad y en la forma en la que se vive en ciertas regiones del territorio, de igual manera, en los avances científicos y tecnológicos que se desarrollan para tener una comprensión de su comportamiento.

Geográficamente, el país se encuentra localizado sobre la interacción de cinco placas tectónicas: Placa de Norte-América, Placa de Cocos, Placa de Rivera, Placa del Pacífico y Placa del Caribe (ver Figura 1.1). Siendo la subducción de las Placas de Cocos y Rivera con la Placa de Norte-América, la que produce la mayor concentración de actividad sísmica del país (SSN, 2016).

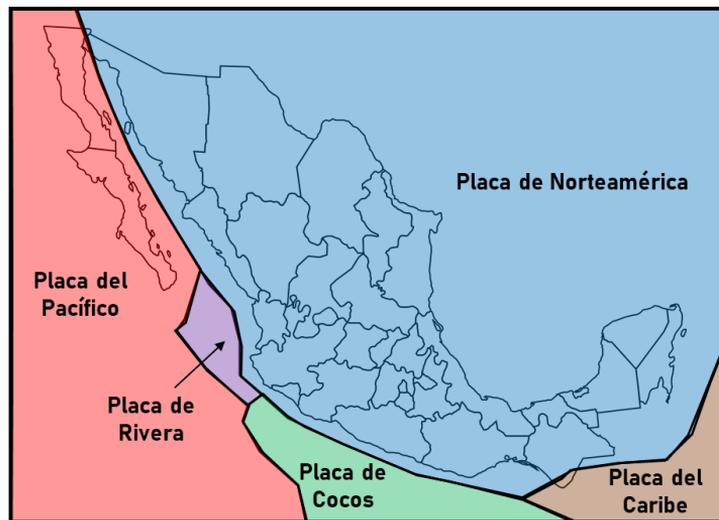


Figura 1.1: Placas tectónicas de México (Adaptada de SSN, 2016).

La subducción se refiere al movimiento de dos placas tectónicas que chocan entre sí, donde la placa más densa se hunde bajo la placa menos densa (Figura 1.2). En el caso de México, las placas de Cocos y

Rivera se les conoce como corteza oceánica, mientras que la placa norteamericana se le denomina corteza continental, siendo la interacción de estas una de tipo oceánico-continental. Durante este movimiento y debido a las enormes fuerzas de compresión que produce, las temperaturas se elevan derritiendo la corteza en magma y generando el vulcanismo. En ocasiones la fricción entre placas provoca que la corteza oceánica más densa sea la que subduce a la corteza continental menos densa, provocando así que esta última sufra deformaciones, acumulando una gran cantidad de energía. Al momento de regresar a su posición original, ésta lo hace de manera violenta y toda la energía liberada se manifiesta en lo que conocemos como un sismo (SGM, 2017).

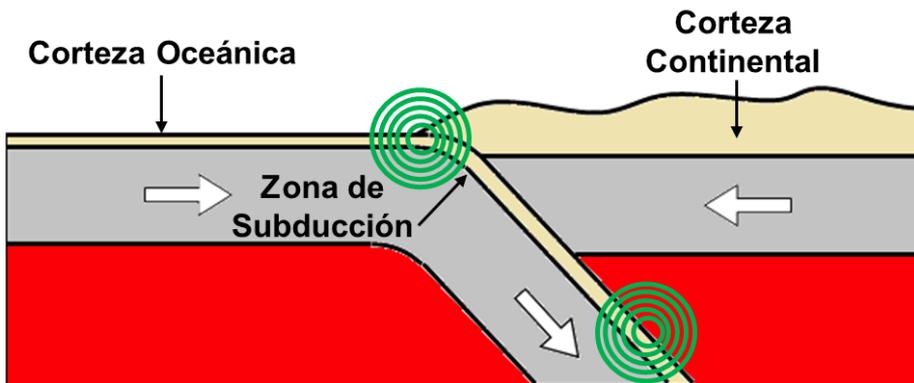


Figura 1.2: Subducción de placas tectónicas (adaptada de SGM, 2017).

Debido al movimiento de subducción de las placas antes mencionadas y por la ubicación donde éstos se presentan en el territorio nacional, los estados con mayor incidencia de sismos son Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Michoacán, Colima y Jalisco. Sin embargo, la influencia de estos sismos llega a afectar a estados más adentrados en la placa continental, como lo son: Veracruz, Tlaxcala, Morelos, Puebla, Estado de México, Sonora, Baja California, Baja California Sur y Ciudad de México (SGM, 2017). Como se puede observar en la Figura 1.3 y según la Comisión Federal de Electricidad, CFE (1993), el territorio se divide

en diversas zonas de acuerdo a la ocurrencia y a la intensidad con que se presentan los sismos.

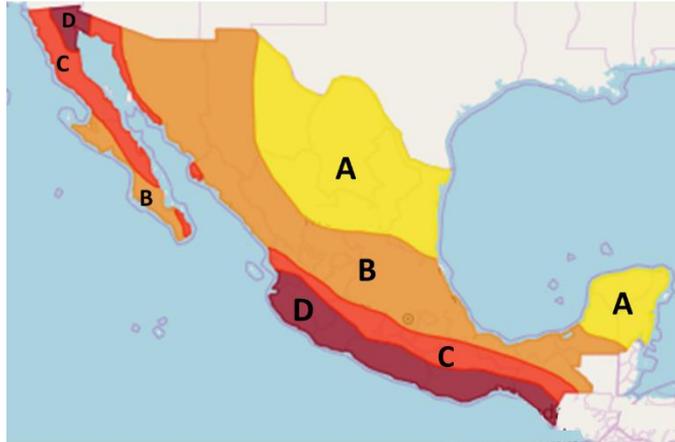


Figura 1.3: Zonificación sísmica de la República Mexicana. (Adaptada de CFE, 1993).

Zona A. No se tienen registros históricos de sismos y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.

Zonas B y C. Se registran sismos que no son tan frecuentes o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad en el suelo.

Zona D. Se reportan grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones, del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

Como ya se ha mostrado, una gran parte del país, donde se ubican grandes núcleos poblacionales, incluyendo el más grande de México y a su vez uno de los diez más grandes del mundo, se encuentra inevitablemente sujeto a las afectaciones que puede provocar un sismo. Es por ello que para la ingeniería mexicana representa un reto y una prioridad desarrollar medidas que permitan mitigar las pérdidas materiales, económicas y humanas.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El registro de los sismos ocurridos en México data desde mucho antes de que se instalaran las primeras estaciones sismológicas en 1910. Como ejemplo, el caso de los monjes dominicos y franciscanos en 1529, quienes recién llegados a la entonces Nueva España percibieron los movimientos telúricos y los registraron de forma escrita en pergaminos. Desde entonces y hasta la fecha han ocurrido bastantes sismos y algunos de ellos de intensidad considerable. Para fines de esta tesis, se enlistan los sismos más importantes en cuanto a los daños causados que han ocurrido en los últimos dos siglos, como lo describe la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros, AMIS (2019).

- 28 de julio de 1957, magnitud 7.8 grados con epicentro en el municipio de San Marcos Guerrero. El sismo afecta principalmente a la capital del estado, Chilpancingo, provoca olas de más de 2 metros en las costas del estado y daña seriamente varios inmuebles de la Ciudad de México. En cuanto a pérdidas humanas no se tiene una cifra exacta, pero se estima un total de 67 a 160 víctimas fatales y entre 500 a 2500 heridos. Se le conoce como el “Temblor del Ángel” porque el monumento de la victoria alada en Ciudad de México cae de su pedestal recibiendo daños severos.
- 19 de septiembre de 1985, magnitud de 8.1 grados con epicentro en las costas cercanas al municipio de Lázaro Cárdenas Michoacán. El terremoto se percibe en 40 % del territorio y afecta a los estados de Jalisco, Michoacán, Guerrero, México, Puebla, Veracruz, Oaxaca, Chiapas y el entonces Distrito Federal. Este último resultaría el más afectado por la naturaleza del subsuelo y por su alta densidad de población. Se calculan pérdidas económicas de entre 2.1 % y 2.4 % del Producto Interno Bruto (PIB), 150 mil personas desempleadas y un decrecimiento del turismo de 18 % en playas del país. En cuanto a pérdidas materiales, en Ciudad de México, los edificios entre 6 y 12 niveles terminan seriamente dañados y en muchos casos derrumbados, innumerables edificios de menor altura sufren de los daños colaterales por

el colapso de otras estructuras. Las pérdidas humanas son desconocidas, se habla de 4 mil a 40 mil víctimas fatales.

- 7 de septiembre de 2017, magnitud 8.2 grados con epicentro mar adentro a 137 km de Pijijiapan Chiapas. El movimiento se percibe en Ciudad de México, Puebla, Oaxaca, Chiapas, Tabasco, Yucatán, Campeche, Centroamérica, hasta Honduras. Sin embargo, es en los pequeños municipios de Oaxaca y Chiapas, cercanos al epicentro donde la devastación se hace presente. El sismo destruye el 90 % de las construcciones del Golfo de Tehuantepec. Las Pérdidas humanas fueron de aproximadamente 100 víctimas fatales y cerca de 900 heridos.
- 19 de septiembre de 2017, magnitud 7.1 grados con epicentro en Axochiapan, a 9 km al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla. Este poco frecuente sismo fue uno del 5 % que se origina al interior de la placa y no en los bordes como es común. Al producirse en el centro del país afectó a las más de 12 millones de personas en estados como Puebla, Morelos, Oaxaca y Ciudad de México. El Sistema de alerta Sísmica Mexicano (SASMEX) está pensado para advertir del peligro sísmico de un evento generado en las costas del pacifico, sin embargo, por la distancia del epicentro, la alerta no contó con tiempo para advertir del peligro. En Ciudad de México se presentaron derrumbes de edificios de nivel medio, los cuales tenían en común en que se construyeron sobre la denominada zona de transición, la cual presenta características tanto de terreno firme como de terreno blando. Las pérdidas económicas se estiman en un máximo del 1% del PIB. Las pérdidas humanas dejan un saldo de 471 personas fallecidas y cientos más de personas heridas.

La prevención de estos desastres ha sido y será de suma importancia para cualquier gobierno, con el objetivo de mitigar las pérdidas económicas, materiales y sobre todo humanas. No cabe duda que con el pasar del tiempo y el acontecer de los sismos el aprendizaje científico se ha ido enriqueciendo. En materia de ingeniería civil se han creado reglamentos de construcción que elevan la seguridad estructural de las edificaciones y que con la obtención de más y más

datos se han ido modificando para garantizar la integridad de las estructuras. Han aparecido diferentes tecnologías como lo son los sistemas de protección sísmica. Dichos sistemas son incorporados a la estructura, modificando así sus propiedades dinámicas y en dado caso haciéndolo más resistente ante un eventual sismo.

Como se ha descrito, cada sismo antes mencionado provocó una gran destrucción para las comunidades afectadas. En el mejor de los casos los daños no son severos y no requieren más que reparaciones menores. En el caso contrario, podrían generarse colapsos de las estructuras. Para prevenir esto, en el caso de algunos edificios se opta por invertir en sistemas de protección sísmica. Sin embargo, algunos sistemas resultan ser costosos.

Por otro lado, las afectaciones no sólo ocurren en las estructuras grandes, también afecta las viviendas pequeñas de uno, dos o hasta tres niveles. Muchas veces estas viviendas se encuentran en pequeñas comunidades donde la economía no les permite costear cualquier tipo de protección sísmica; generalmente patentadas.

Es por todo lo anterior que en este trabajo se optó por probar un sistema propuesto como una parte de la tesis doctoral de Guerrero, (2016). Se trata de un Contraventeo Restringido al Pandeo (CRP) de bajo costo. Dicho sistema está pensado para disipar la energía sísmica de estructuras en regiones marginadas. Otra de sus ventajas es la sustitución fácil de este elemento en caso de rebasar sus límites de deformación, permitiendo que la estructura pueda continuar en funcionamiento rápidamente.

1.3 OBJETIVOS Y ALCANCE

Esta tesis plantea como objetivo general, comprender el tipo de estructuras a las que es posible adaptar los dispositivos tipo contraventeo restringido al pandeo (CRP) propuestos por Guerrero (2016), para que éstas puedan soportar movimientos sísmicos severos. Los objetivos particulares son los siguientes:

- Emplear materiales y herramientas los más convencionales posibles, así como mano de obra no especializada, para la fabricación de los dispositivos.
- Conocer las capacidades de disipación que presentan los dispositivos estudiados, mediante pruebas experimentales de 15 CRPs en el laboratorio.
- Obtener demandas típicas de ductilidad en los dispositivos ante movimientos sísmicos, mediante un modelo numérico.
- Comparar la demanda y capacidad obtenidas del modelo numérico y las pruebas de laboratorio, respectivamente, para conocer en qué tipo de estructuras es posible adaptar estos dispositivos.

Este trabajo tiene como alcances lo siguiente:

- El estudio específico de los disipadores con las características que se presentan en el capítulo 3. Existen diversas versiones de los disipadores tipo CRP que podrían arrojar resultados diferentes a los obtenidos.
- Los registros sísmicos se obtuvieron de 10 estaciones que registraron las aceleraciones más grandes durante el sismo del 7 de septiembre de 2017 en México de magnitud 8.2. Nótese que, para un sismo diferente, los resultados podrían variar.
- El modelo numérico se limita a una idealización del comportamiento de una estructura de un solo nivel equipada únicamente con un disipador.

2 ANTECEDENTES

2.1 SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

El objetivo principal de los sistemas de protección sísmica es disminuir y controlar la forma en que las estructuras se deforman ante las vibraciones producidas por un sismo. Es por ello que a estos sistemas también se les llama de control de vibraciones. Aunque fueron concebidos para mitigar los daños por sismo, estos sistemas también funcionan ante otras fuentes de vibraciones como lo son: el viento, el tráfico de vehículos, movimiento de maquinaria, entre otros. La principal razón es que estos modifican características dinámicas de las estructuras como lo es el periodo natural de vibrar, haciéndolo distinto al periodo predominante de un sismo y así evitar el fenómeno de resonancia. También, se busca que estos sistemas logren la mayor cantidad de amortiguamiento para reducir las deformaciones que se presentan durante un sismo. Dependerá del mecanismo utilizado, las características que éste posea y la clasificación que puede recibir (Avilés, 2001).

A continuación, se muestra en la Figura 2.1, una visión general de los tipos de sistemas de control de vibraciones más empleados en el mundo y que han dado mejores resultados en las últimas décadas.

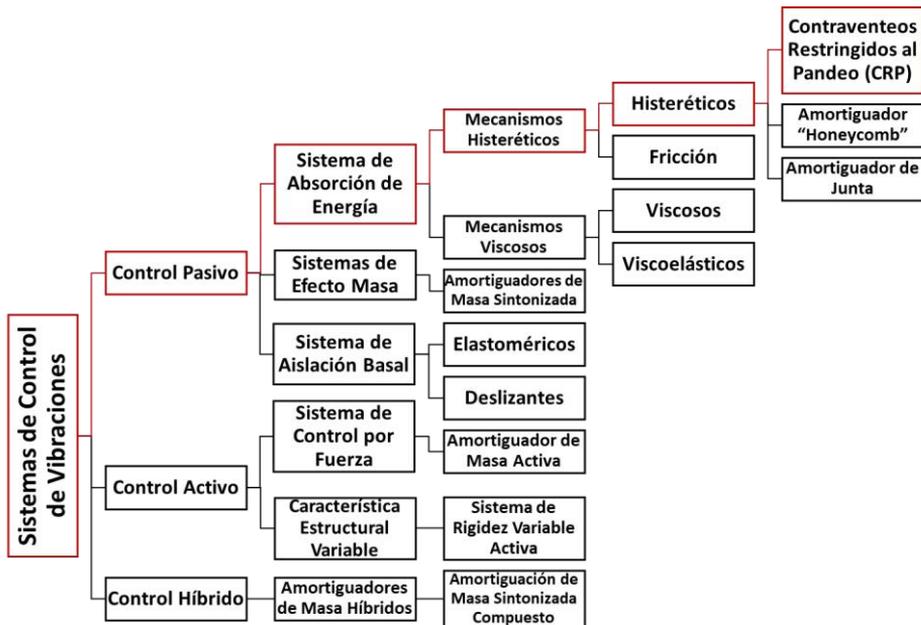


Figura 2.1: Clasificación de sistemas de control de vibraciones.

En este trabajo se describirán en primera instancia los sistemas de control activo e híbrido, dejando al final los sistemas de control pasivo. Esto con la finalidad de abrir una sección dedicada exclusivamente a los antecedentes de los CRP; que son un tipo de disipador pasivo.

2.1.1 Sistemas de Control Activo

Como se mencionó antes, el principio de los sistemas de protección sísmica radica en cambiar el periodo predominante de la estructura y para ello se emplean diversos dispositivos. A diferencia de los dispositivos de control pasivo, los de control activo no se encuentran restringidos a un intervalo de periodos dominantes en los que se comportan de manera adecuada. Si la excitación sísmica es diferente a la calculada, el dispositivo de control pasivo se ve superado y su presencia resulta nula e incluso contraproducente para la estructura. Esta incertidumbre no existe en los sistemas de control activo, ya que estos dispositivos regulan de forma automática y en tiempo real la

respuesta de la estructura ante la excitación sísmica. Esto es posible haciendo uso de actuadores, los cuales son alimentados por una fuente de energía externa y son capaces de generar las fuerzas necesarias para el control de la estructura.

Los sistemas de control activo son más complejos en su forma de operar que los pasivos, por lo que a continuación se describirá de manera general las características necesarias para un funcionamiento exitoso.

El sistema de control activo funciona mediante una red cerrada en donde participan fundamentalmente tres elementos. Estos elementos interactúan con la estructura y el sismo en una secuencia continua de tal forma que logran la disipación de energía. Esta secuencia puede observarse en la Figura 2.2.

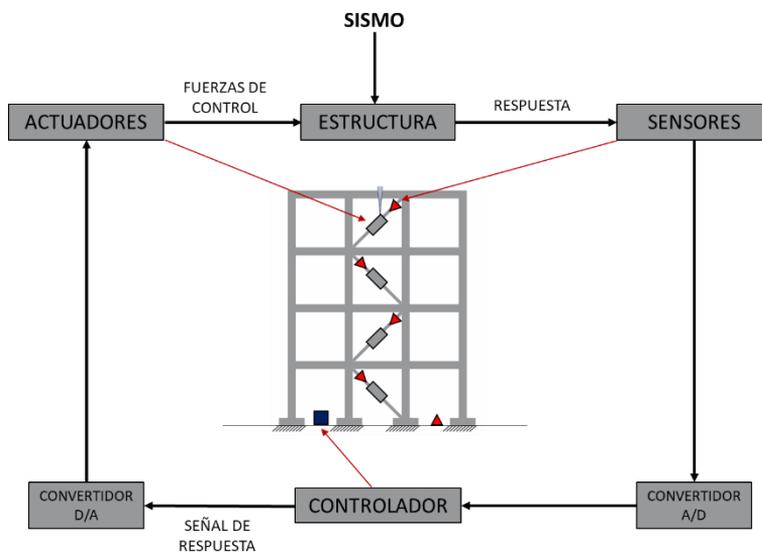


Figura 2.2: Diagrama de un sistema digital de control activo (Adaptada de Avilés, 2001).

- Actuadores: Son dispositivos mecánicos que ejercen las denominadas fuerzas de control. Estos dispositivos reciben una señal y la interpretan acorde a los requerimientos de la

estructura. Estas instrucciones toman un tiempo conocido como desfase y es considerado en el algoritmo.

- **Sensores:** Son dispositivos distribuidos en ubicaciones clave de la estructura y miden la respuesta que esta tiene. Posteriormente envían esa información al controlador para ser procesada.
- **Controlador:** Es el cerebro del sistema, es decir es donde se recibe y procesa la información proveniente de los sensores de la estructura y realiza los cálculos necesarios para generar los datos de fuerza de control que envía a los actuadores para que estos ejecuten las modificaciones adecuadas.

Actualmente la mayoría de sistemas cuentan con un controlador digital. Para tal caso se emplean convertidores de señal, Análoga-Digital (A/D) y Digital-Análoga (D/A), los cuales pueden estar integrados a cualquiera de los elementos antes mencionados.

2.1.2 Sistemas de Control Híbrido

Los sistemas de control híbrido, como su nombre lo indica, combinan características de los sistemas activos y pasivos. Lo que los hace diferentes de los sistemas pasivos es que los sistemas híbridos reciben información de la estructura, la procesan y la envían a los dispositivos para realizar ajustes, lo que nos lleva a la diferencia que tienen con los sistemas activos. Los sistemas activos para realizar estos ajustes en respuesta a la excitación sísmica, por lo general requieren de sistemas hidráulicos para su funcionamiento. Ello implica que se requieren de instalaciones especiales para su operación, pero sobre todo, precisan de una gran cantidad de energía proveniente de una fuente externa. La mayoría de los sistemas híbridos se basan en amortiguadores de masa de tipo pasivo, los cuales trabajan en conjunto con un controlador durante su actuación, utilizando una mínima cantidad de energía.

2.1.3 Sistemas de Control Pasivo

Este tipo de sistemas trabaja de dos maneras principalmente, estructural y no estructural. La estructural consiste en que los dispositivos forman parte de la estructura directamente y se les ubica

en puntos críticos de la misma, de esta forma son estos los que reciben toda la energía y la disipan al aportar ductilidad. La manera no estructural, consiste en incorporar algún mecanismo que no forme parte de la estructura pero que de algún modo interactúe con esta y absorba la energía, aumentando así su amortiguamiento y mitigando daños.

Dentro los sistemas de control pasivo podemos encontrar los siguientes tipos

1. Sistemas de efecto masa

Estos dispositivos son de tipo no estructural, ya que consisten en una gran masa colocada encima de la estructura, esta masa se calcula de tal modo que su forma natural de vibrar se asemeje a la de la estructura. De esta forma los modos de vibrar de ambos grados de libertad crean un sistema con un mayor amortiguamiento que el de la estructura por si sola. El hecho de que tanto los periodos de la estructura como el de la masa se aproximen hace que reciban el nombre de amortiguamiento de masa sintonizada (AMS) (ver Figura 2.3). Ejemplos de este tipo de mecanismos son: Apoyos de goma multiplataforma, Péndulo multiplataforma, amortiguadores de masa líquida, entre otros.

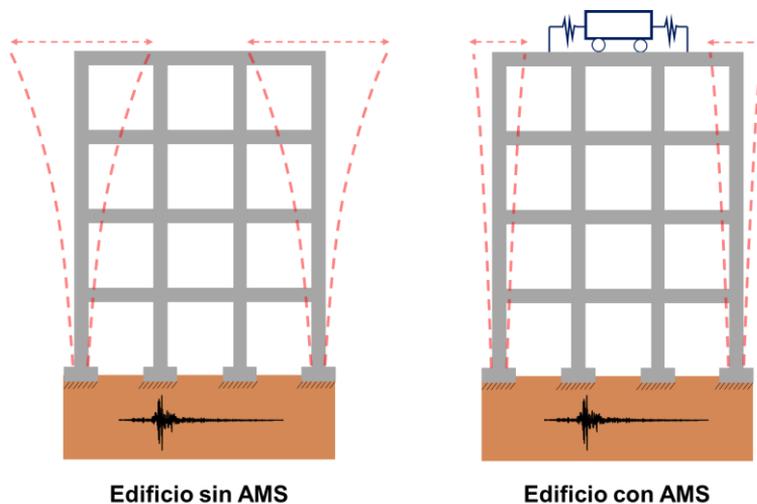


Figura 2.3: Efecto de un amortiguador de masa sintonizada (Adaptada de Cotacallapa, 2017).

2. Sistemas de aislación basal

Este tipo de sistemas emplean una técnica que consiste en colocar en las bases de la estructura, materiales constituidos principalmente de elastómeros reforzados con láminas de acero. Su funcionamiento se basa en el desplazamiento horizontal del suelo, ya que al ocurrir un sismo las aceleraciones laterales que sufren los entrepisos son cada vez mayores conforme aumenta el número de pisos. Al colocar estas conexiones flexibles en las bases del edificio se consigue que la estructura se mueva de forma independiente al suelo, consiguiendo que las vibraciones queden en los apoyos y sean absorbidas por estos para que no pasen o lo hagan en menor medida hacia los elementos de la estructura. En la Figura 2.4 se compara un sistema convencional (sin aislamiento) y un sistema aislado. Se observa que en sistema convencional se presentan deformaciones en la estructura, mientras que en el sistema aislado las deformaciones se presentan únicamente en la base.

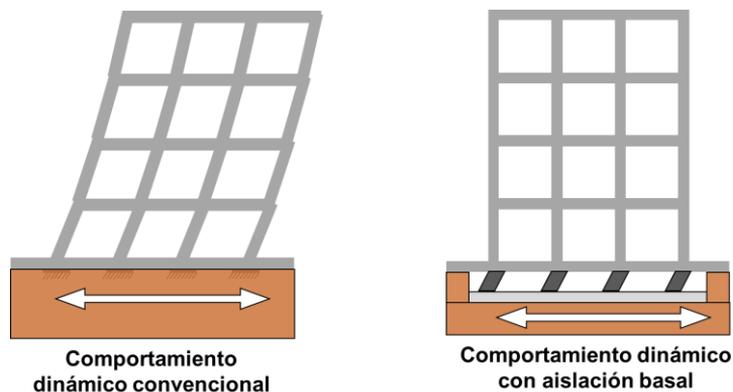


Figura 2.4: Comportamiento de una estructura convencional (izquierda) y con aislación basal (derecha) (Adaptada de Avilés, 2001).

3. Sistemas de absorción de energía

Este tipo de sistemas por lo general están acoplados a la estructura y se valen del desplazamiento relativo de los entrepisos que ocurre durante un sismo para entrar en funcionamiento. Se pueden combinar con otro tipo de sistemas o bien trabajar de forma

independiente. Estos dispositivos utilizan diferentes materiales para recibir la energía del sismo y la transforma en energía térmica. Dependiendo del material empleado para el amortiguamiento, los sistemas de absorción de energía se pueden clasificar en: Sistemas de amortiguamiento viscoso o sistemas de amortiguamiento histerético.

Sistemas de amortiguamiento viscoso

Estos amortiguadores emplean dos tipos de materiales, los viscosos y los viscoelásticos. Los materiales viscosos aprovechan la resistencia viscosa, mientras que los viscoelásticos lo hacen con la deformación de corte de ciertos polímeros disipativos. Existen ciertas condiciones en las que los sistemas viscosos trabajan con mayor eficiencia, como lo es la temperatura ambiente, el volumen del dispositivo que contenga el material de amortiguamiento, la velocidad de vibración y la frecuencia con la que reciben mantenimiento. En la Figura 2.5 se muestran los diagramas de dos dispositivos de amortiguamiento viscoso.

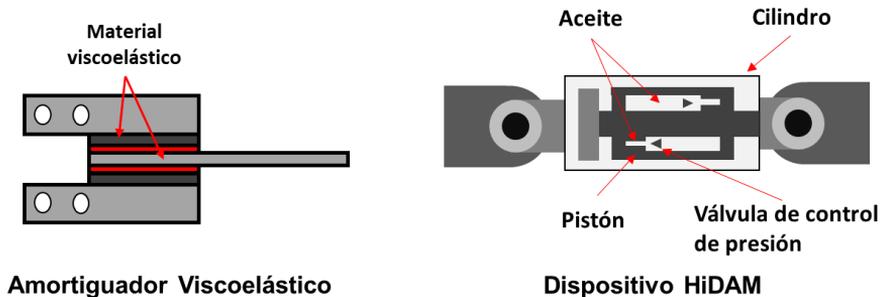


Figura 2.5: Ejemplos de dispositivos de amortiguamiento viscoso (Adaptado de Avilés, 2001).

Sistemas de amortiguamiento histerético

Los dispositivos de amortiguamiento histerético están elaborados principalmente con acero en diferentes configuraciones. Estos usan las propiedades de este material como lo es su plasticidad. A diferencia de los amortiguadores viscosos, los histeréticos requieren de un menor volumen para obtener el mismo efecto de amortiguación. Los amortiguadores histeréticos no emplean fluidos de ningún tipo para su funcionamiento, por lo que no son económicos e igualmente confiables.

2.2 CONTRAVENTEOS RESTRINGIDOS AL PANDEO

Los contraventeos restringidos al pandeo (CRP) son amortiguadores pasivos que consisten en un núcleo metálico y dúctil, principalmente de acero, que emplea algún mecanismo que impide que este se deforme al estar sometido a fuerzas de compresión. Generalmente, el mecanismo empleado es el comúnmente conocido como encamisado, el cual utiliza una sección tubular de acero, que está rellena de concreto y rodea la sección longitudinal del núcleo, total o parcialmente. El uso de este mecanismo también requiere que se aisle al núcleo del concreto, mediante el uso de un recubrimiento antiadherente. Esto con la finalidad de evitar que ambas partes funcionen como una sola. Las secciones transversales, tanto del núcleo como del encamisado, pueden presentar diversas geometrías y dimensiones. En la Figura 2.6 se puede apreciar el esquema de un contraventeo restringido al pandeo y algunas de las posibles secciones transversales que estos presentan (Sabelli et al., 2003).

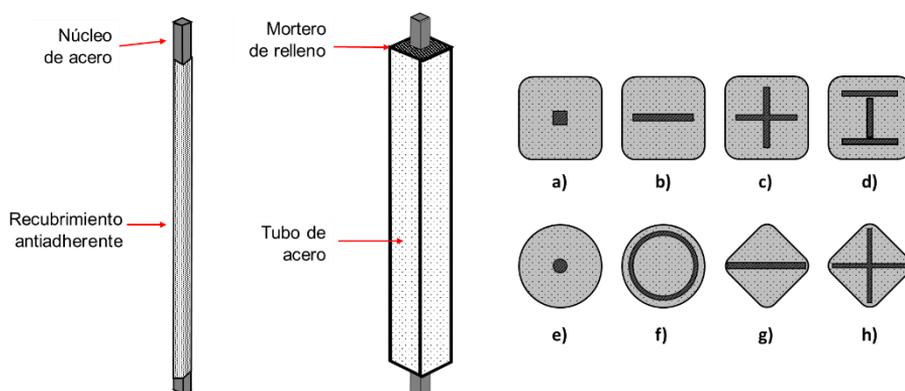


Figura 2.6: Esquema general (izquierda) y ejemplos de secciones transversales (derecha) de un CRP (Adaptada de Sabelli et al., 2003).

El propósito de los CRP es atender las deficiencias que presenta un contraventeo convencional en respuesta a la excitación sísmica. Dichas deficiencias se presentan cuando las fuerzas de compresión del contraventeo supera el límite elástico y este comienza a presentar

una deformación conocida como “pandeo lateral”. El pandeo lateral impide la disipación de energía y compromete tanto a los elementos estructurales y no estructurales que se encuentren adyacentes al contraventeo en cuestión. Un CRP, al contar con un núcleo con las propiedades dúctiles del acero y al mismo tiempo estar confinado en mortero, permite que las fuerzas de tensión y compresión que se presentan de forma cíclica, deformen en núcleo más allá del límite elástico sin presentar pandeo lateral. Esto permite que la disipación de energía se lleve a cabo de manera adecuada y sin comprometer otras partes de la estructura (Sabelli et al., 2003). En la Figura 2.7 se puede apreciar el comportamiento de un contraventeo convencional frente a un CRP ante la aplicación cíclica de fuerzas de tensión y compresión.

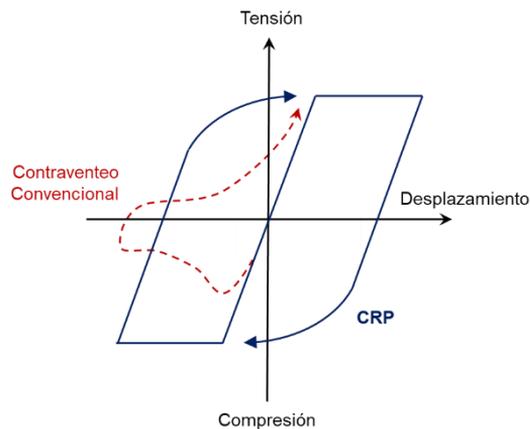


Figura 2.7: Comportamiento Fuerza Axial-Desplazamiento de un contraventeo convencional y un CRP (Adaptada de Clark et al., 1999).

El desempeño que presenten los CRP dependerá principalmente de las características de su núcleo, de su resistencia, área, y longitud, haciendo de éstos un dispositivo muy versátil capaz no sólo de integrarse a una nueva edificación, si no que de reforzar o rehabilitar estructuras dañadas o no planeadas para resistir un sismo.

3 CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO

3.1 DISPOSITIVOS

Para esta investigación se utilizaron contraventeo restringidos al pandeo (CRP). Dichos dispositivos fueron propuestos como parte de la tesis doctoral de Guerrero (2016). Dentro de esta propuesta, además de presentar un comportamiento satisfactorio ante un evento sísmico, los CRP se elaboran con materiales, herramientas y procedimientos de construcción convencionales, con el propósito de aminorar su costo y hacerlos asequibles a más sectores de población. También, en caso de ser necesario, debe ser posible sustituir estos dispositivos rápida y económicamente posterior a un sismo, para que la estructura continúe dando servicio en el menor tiempo posible.

Durante este experimento, se probaron un total de 15 dispositivos disipadores, de los cuales 3 fueron fabricados para el trabajo de investigación de Sánchez (2020) y los 12 restantes para el de García (2020), siendo los resultados de estos últimos, los utilizados como punto de comparación en esta investigación.

3.1.1 Materiales y geometría

A continuación, se presenta la geometría general de los 12 dispositivos antes mencionados, ya que con el objetivo de comparar el comportamiento de los elementos y materiales del CRP, algunos ellos presentan una variable distinta a la general, cabe mencionar que durante el desarrollo del experimento también se realizaron modificaciones que permitieron un mejor comportamiento de los dispositivos y del cual se hablara más adelante. Todas las variables se presentan en la Tabla 3.1, la cual se describe más adelante.

Para el núcleo de los disipadores se empleó una barra de acero de sección transversal cuadrada, de dimensiones de 12.2 x 12.2 mm y de longitud de 1600 mm. En ambos extremos de la barra se realizaron dobleces en forma de gancho con el propósito de anclar el núcleo y evitar así desplazamientos de este al momento de someterlo a las fuerzas axiales. En la parte central de la barra y con una longitud de 750 mm, se colocó una banda aislante. La función de este aislante es

impedir la adherencia del núcleo con el mortero que lo confina y así permitir las deformaciones axiales de la barra. En la Figura 3.1 se puede apreciar el esquema general del núcleo.

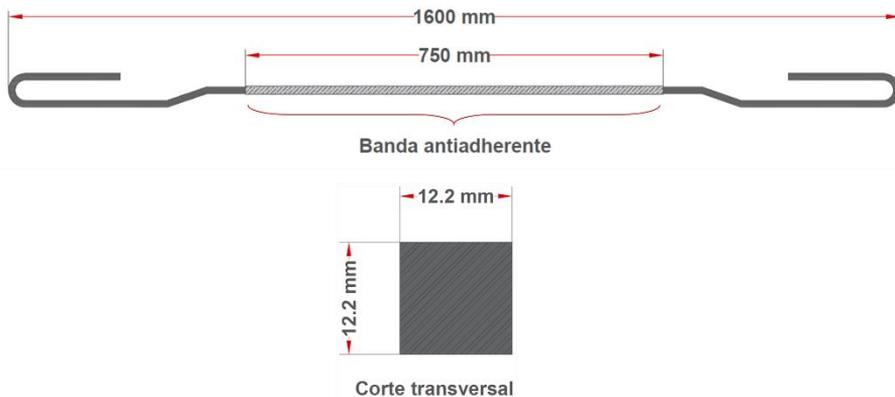


Figura 3.1: Esquema general del núcleo de un CRP.

Para el confinamiento del núcleo se utilizaron perfiles tubulares rectangulares (PTR) de acero (Figura 3.2). El dissipador se dividió en tres secciones, una sección central, utilizando un PTR de 89 mm de lado y 3 mm de espesor y dos secciones laterales, utilizando PTR de 102 mm de lado y 3 mm de espesor. La sección central tuvo una longitud de 700 mm y fue rellena con mortero simple a lo largo de toda su sección. Por otro lado, las secciones laterales tuvieron una longitud de 1000 mm, de los cuales 675 mm se rellenaron del mortero antes mencionado, 300 mm se dejaron libres para el posterior montaje con la sección central y en los restantes 25 mm se colocó poliestireno expandido, el cual es un material deformable. La finalidad de este material fue permitir la deformación a compresión independiente del núcleo, sin la participación del mortero que lo confina. Las secciones antes mencionadas pueden apreciarse en la Figura 3.2.

La fabricación original de las secciones laterales se realizó con 50 mm de material deformable y 650 mm de mortero, sin embargo, después de las primeras pruebas se detectó que esta distancia adicional afectaba el desempeño del dispositivo, llevándolo a la falla

prematura, por lo que para los siguientes dispositivos probados se retiraron 25 mm de material deformable y se sustituyeron con mortero.

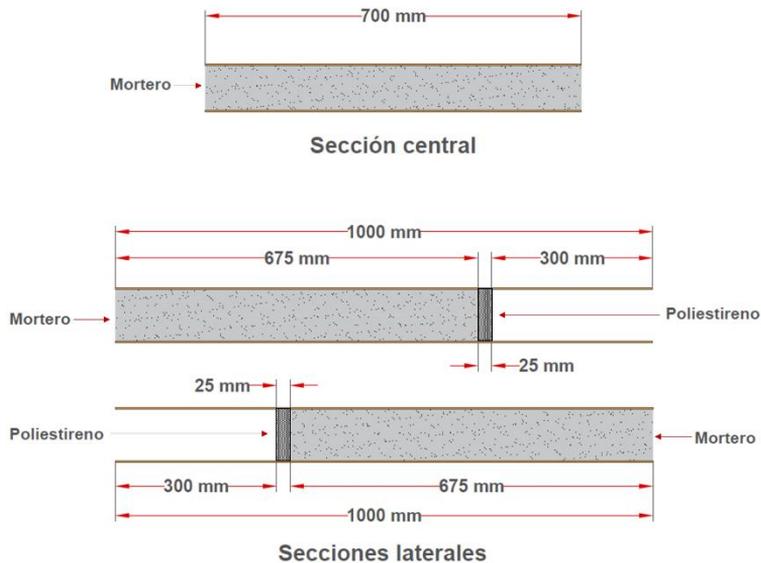


Figura 3.2: Esquema general de secciones de encamisado.

Para el montaje de las secciones, como se aprecia en la Figura 3.3, se traslapó internamente la sección central con las secciones laterales, dejando al centro un claro de 100 mm y permaneciendo unidas por el núcleo de acero ahogado en mortero. En las secciones laterales, de manera adicional se acoplaron pernos de acero, con la finalidad de evitar el deslizamiento del mortero y el PTR, además de mejorar la interacción de estos con el núcleo.

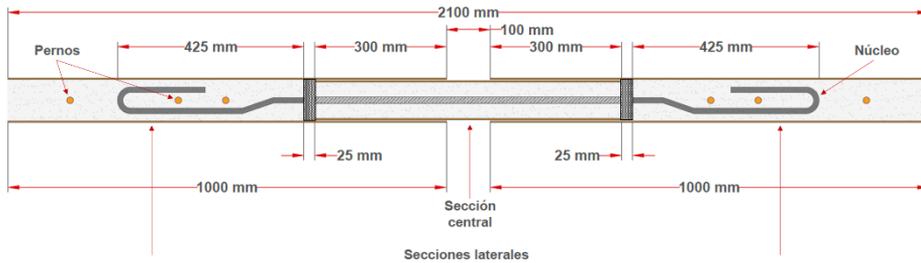


Figura 3.3: Montaje de secciones de encamisado y núcleo de un CRP.

Para ensayar los disipadores, se realizaron conexiones atornilladas. En un extremo, se utilizaron placas de acero de 320 x 152.5 mm y 9.5 mm de espesor con cuatro barrenos de 27 mm cada uno. Se utilizaron cuatro placas por cada dispositivo y se acoplaron a este mediante el uso de soldadura con espesor de 3 mm (ver Figura 3.4).

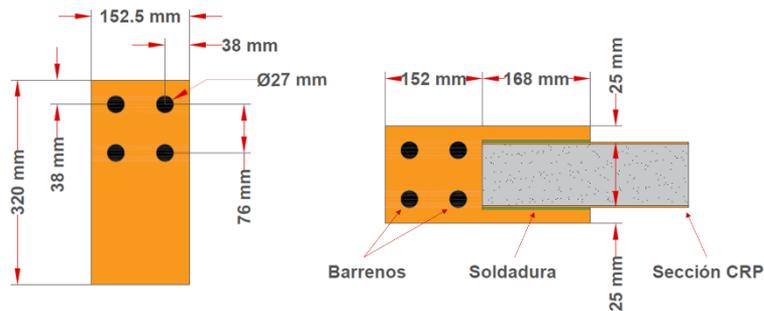


Figura 3.4: Detalle de las placas de conexión de un CRP.

En el otro extremo se utilizó una placa de 300 x 300 mm y 50 mm de espesor, con cuatro perforaciones de 55 mm de diámetro, la cual se acopla mediante tornillos de 47.6 mm al actuador posteriormente (Figura 3.5a), a esta placa se soldaron un par de placas de 180 x 152.5 mm y espesor de 9.5 mm de espesor, con cuatro barrenos de 27 mm, por los cuales se conectan a las placas del actuador mediante tornillos de 25 mm de diámetro (Figura 3.5b).

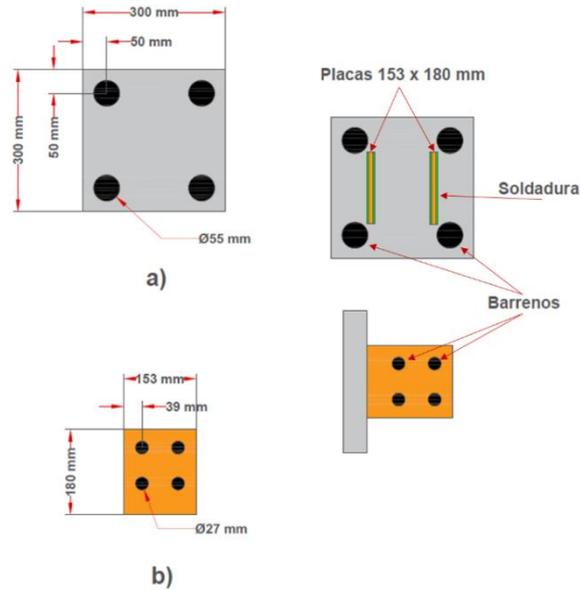


Figura 3.5: Detalles de placas para conexiones.

Finalmente, se muestra en la Figura 3.6a el esquema general de cómo luce un CRP con todas sus partes ensambladas, mientras que en la Figura 3.6b se aprecia el esquema de un CRP finalizado y con sus placas de conexión, listo para ser montado en el arreglo experimental.

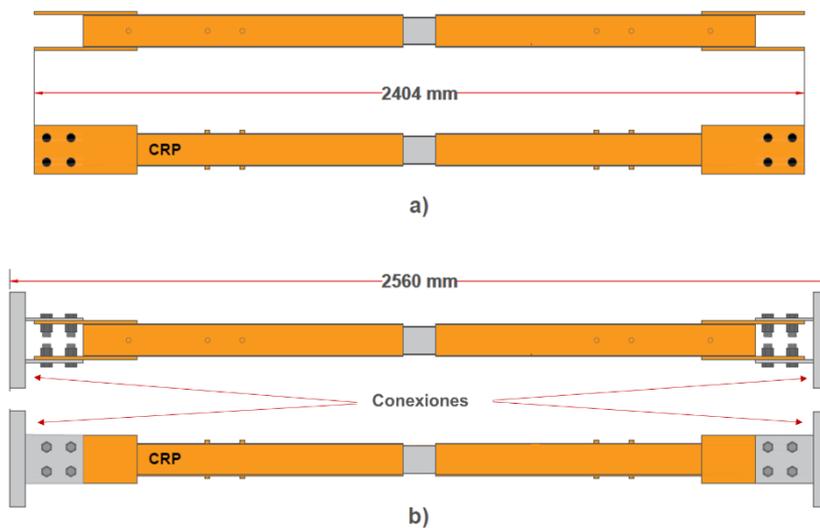


Figura 3.6: Esquema general de un CRP finalizado con y sin conexiones al arreglo.

En la tabla 3.1 se muestran las características que variaron en algunos dispositivos y que fueron previstas antes de la fabricación de estos, se apreciaron la cantidad de núcleos empleados por dispositivo, la longitud central de los núcleos (la longitud de los ganchos permanece invariable) y el tipo de material utilizado como aislante entre núcleo y mortero. Adicionalmente, durante el experimento se presentó la variable de las dimensiones en el espesor del material deformable.

Tabla 3.1: Características individuales variables de un CRP (García, 2020).

| # de CRP | No. Núcleos | Longitud Núcleos [cm] | Material Aislante | Longitud de Material deformable [cm] |
|----------|-------------|-----------------------|-------------------|--------------------------------------|
| 1 | 2 | 75 | Caucho | 2.5 |
| 2 | 1 | 75 | Caucho | 2.5 |
| 3 | 1 | 75 | Caucho | 2.5 |
| 4 | 1 | 75 | Caucho | 2.5 |
| 5 | 1 | 75 | Caucho | 2.5 |
| 6 | 1 | 75 | Polipropileno | 2.5 |
| 7* | 1 | 80 | Caucho | 5.0 |
| 8 | 3 | 75 | Polipropileno | 2.5 |
| 9 | 1 | 75 | Caucho | 2.5 |
| 10* | 1 | 80 | Polipropileno | 5.0 |
| 11 | 1 | 35 | Polipropileno | 2.5 |
| 12 | 1 | 35 | Polipropileno | 2.5 |

* Estos disipadores fueron probados con las características originales de fabricación

3.1.2 Fabricación

Como se mencionó al inicio de este capítulo, una de las características principales de estos dispositivos es el uso de materiales y procedimientos de construcción convencionales, en este caso la fabricación se llevó a cabo por un grupo de estudiantes de la UNAM de la carrera de ingeniería civil de nivel licenciatura y maestría y no se requirió de mano de obra especializada, salvo en las últimas etapas que por cuestiones de seguridad y normativa del laboratorio donde

se desarrollaron las pruebas, se requería de personal capacitado para realizar trabajos de corte y soldadura. Los materiales empleados fueron adquiridos en establecimientos comunes y éstos fueron los de uso comercial, es decir, ninguno fue hecho bajo pedido o con características especiales.

Las primeras dos etapas de fabricación serán descritas tal cual lo hace García (2019) en su trabajo de investigación.

En la primera etapa, el proceso se dividió en tres grupos que consistían en corte de piezas, doblado y habilitado de núcleos y perforación de PTR. Para esta etapa, que se refiere a la preparación de todas las piezas metálicas que conforman al dispositivo, requirió de una semana (Figura 3.7a).

La segunda etapa que comprende el colado del mortero, se llevó a cabo en una semana más y se realizó en tres partes. Primero se trabajó con la sección central, aprovechando la cubierta de material deformable de poliestireno de uno de los extremos del PTR y vertiendo el mortero por el otro extremo. Una vez endurecida la primera parte se prosiguió con una de las secciones laterales, en la cual se colocó el poliestireno en la frontera del mortero, se instaló el PTR en su posición final, se colocaron los pernos de cortante y se vació el mortero por el extremo libre. Una vez endurecido el mortero, para la segunda sección transversal se repitió el mismo procedimiento (Figura 3.7b).

La tercera etapa consistió en la colocación de las placas de conexión, tanto las que se unen al disipador, como las que se unen a la placa de contacto. Para esta etapa se empleó soldadura de filete de 3 mm en ambos lados de las placas. (Ver Figura 3.7c). Finalmente, se hizo una limpieza general de los dispositivos y se aplicó una capa de pintura, para darle una apariencia contrastante ante las deformaciones (Figura 3.7d).



a)



b)



c)



d)

Figura 3.7: Procedimiento de fabricación de los CRP (García, 2020).

3.2 ARREGLO EXPERIMENTAL

Para realizar las pruebas a los dispositivos, se optó por utilizar dos actuadores electrohidráulicos con capacidad de 50 toneladas, con el fin de realizar dos pruebas simultáneamente y agilizar el proceso de montaje de un nuevo dispositivo.

Se dispuso de ambos actuadores de forma horizontal, acoplándolos uno encima de otra a un muro de reacción mediante una placa de acero de 100 mm de espesor, con las perforaciones adecuadas para ajustar el actuador mediante tornillos 38 mm de diámetro. A cada actuador se conectó el dispositivo disipador en estudio y este, haciendo uso de una placa de acero similar a la antes mencionada se apoyó en un bloque de reacción. Para evitar el giro en la rótula anclada al muro de reacción del actuador y los movimientos laterales del mecanismo al iniciar la aplicación de fuerzas, se colocó en el extremo interior del actuador, dos barras de acero perpendiculares a la losa de reacción, restringidas firmemente por yugos de acero, las cuales también sirvieron como apoyo para este extremo del actuador. En la Figura 3.8 se aprecia un esquema gráfico de la disposición del arreglo, mientras que en la Figura 3.9 podemos ver fotografías de la disposición real del arreglo en diferentes ángulos.

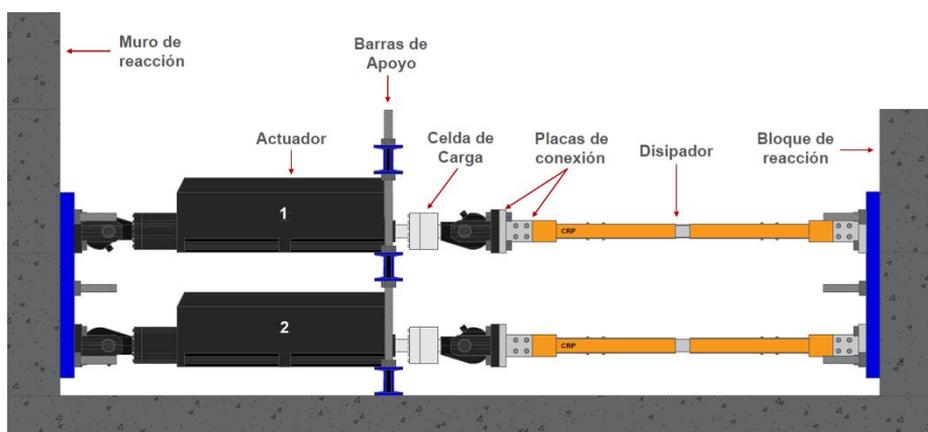


Figura 3.8: Esquema del arreglo experimental.



Figura 3.9: Fotografías del arreglo experimental.

Posterior al ensayo de los 12 disipadores, se adicionó un actuador más para llevar a cabo las pruebas de simulación híbrida que forman parte de la tesis de Sánchez (2019) y en la cual se describe dicho arreglo con más detalle.

3.3 PROGAMA DE PRUEBAS

El programa se dividió en dos grupos de pruebas. El primer grupo consistió en estudiar las propiedades y capacidades de los dispositivos, el segundo tipo consistió en simulación híbrida utilizando un modelo numérico de un edificio.

Para el primer grupo se aplicaron dos protocolos de carga diferentes consecutivamente a cada disipador. El primer protocolo es una modificación al propuesto por el código AISC 341 (2016), también conocido como protocolo estándar, el cual acredita los disipadores CRP. El objetivo de este protocolo es recabar información del desempeño de los disipadores para poder predecir su comportamiento. El segundo protocolo, conocido como “protocolo de fatiga” consiste en la aplicación de ciclos continuos de ductilidad constante hasta alcanzar la falla en el dispositivo. El objetivo es conocer las capacidades de los disipadores para diferentes condiciones en las deformaciones. En la Figura 3.10 se puede apreciar gráficamente los dos protocolos aplicados a este primer grupo de pruebas.

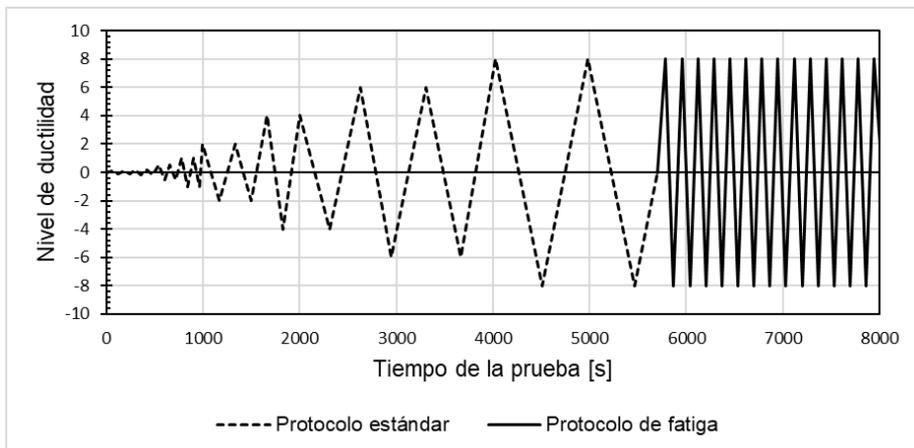


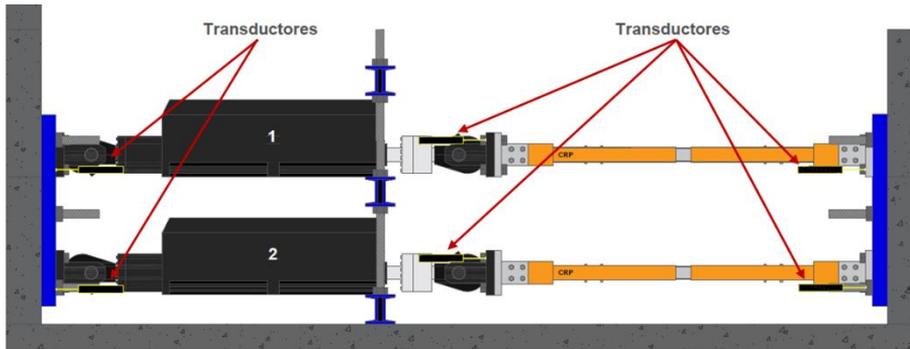
Figura 3.10: Protocolo de carga estándar y de fatiga.

Para el segundo grupo se aplicó un protocolo para simulación híbrida, este consistió en el modelo numérico de un edificio sometido a cargas sísmicas, dichas cargas son simuladas en un programa de elementos finitos y aplicadas por los actuadores para generar deformaciones en los disipadores. La respuesta es introducida nuevamente al modelo numérico para procesar nuevas instrucciones para los actuadores, este proceso se repite cíclicamente y con ello se puede determinar la demanda de ductilidad que requiere un disipador. Más detalles pueden encontrarse en la tesis de Sánchez (2020).

3.4 INSTRUMENTACIÓN

Para llevar el registro de información que se genera al momento de las pruebas, como lo son los desplazamientos y las fuerzas que se aplican, los actuadores cuentan con un sistema de control integrado. Sin embargo, para aumentar la cantidad de información y garantizar la fiabilidad de la información ya disponible, se optó por implementar sistemas de instrumentación adicionales.

El primero de los sistemas integró transductores de desplazamiento. Estos transductores fueron instalados en los extremos del arreglo, los cuales hacen contacto con los bloques de reacción y proporcionan información sobre posibles desplazamientos que pudieran presentar dichos bloques. Estos datos sirven para hacer correcciones a la información del sistema de control interno del actuador, el cual no contempla estos movimientos. Un tercer transductor fue colocado en la placa de conexión del actuador con el dissipador, la función de este era medir desplazamientos reales a los actuadores. En la Figura 3.11a se muestra el esquema con la ubicación de los transductores en el arreglo. En la Figura 3.11b y c se muestran fotografías de los transductores.



a)



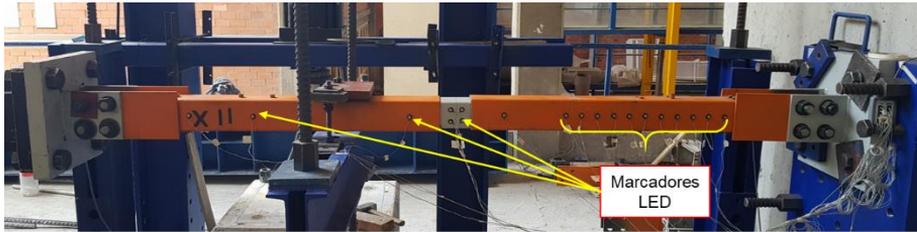
b)



c)

Figura 3.11: Distribución y detalle de transductores de desplazamiento.

El segundo sistema de instrumentación es un sistema óptico de captura de movimiento que emplea marcadores led y una cámara que captura su posición mediante luz estroboscópica. Para hacer uso de este sistema se colocaron los marcadores a lo largo del CRP. Al finalizar las pruebas se comparaba la posición inicial y la posición final de los marcadores. El objetivo es comprobar si el núcleo del dispositivo presentaba deformaciones plásticas en algún momento de la prueba. En la Figura 3.12.a se muestra la distribución de los marcadores en el CRP y en la Figura 3.12b se aprecia la cámara capturadora.



a)



b)

Figura 3.12: Distribución de marcadores LED y capturadora.

Finalmente, de manera adicional se hizo uso de una cámara de video. Esta se colocó de manera que pudiera tomar toda la longitud del disipador. Dado que los desplazamientos que se presentan lo hacen de forma muy lenta y a su vez estos pueden ser muy pequeños, se programó la cámara para que tomara una foto cada cierto intervalo de tiempo, el objetivo de esto es tomar un video donde se puedan apreciar los movimientos que realizó el dispositivo durante la prueba y que simple vista resulta muy difícil observarlos.

4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez ensayados todos los dispositivos se realizó el procesamiento de todos los datos obtenidos. En este capítulo se muestran resultados generales. Más detalles se pueden encontrar en García (2020).

4.1 CURVAS FUERZA-DEFORMACIÓN

A continuación, se muestran de manera breve las curvas de fuerza-deformación y energía, de cada dispositivo, graficadas a partir de los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio.

Las figuras 4.1 a 4.11 muestran las curvas fuerza-deformación de los dispositivos ensayados.

En el caso del disipador No. 4, durante las pruebas presentó un comportamiento muy deficiente e inestable y tras analizar los resultados, estos distaban mucho del resto de los disipadores, por lo que se optó por descartar este dispositivo.

Se puede apreciar en las curvas fuerza-deformación de los disipadores 7 y 10 se presentan pocos ciclos de histéresis. Esto debido a una deficiencia en la fabricación, donde no se restringía el pandeo del núcleo correctamente y se provocaba su falla prematura. El problema fue detectado y corregido posterior a las pruebas de estos especímenes.

Para las curvas fuerza-deformación del resto de los dispositivos, se aprecia que los ciclos de histéresis son muy amplios y estables.

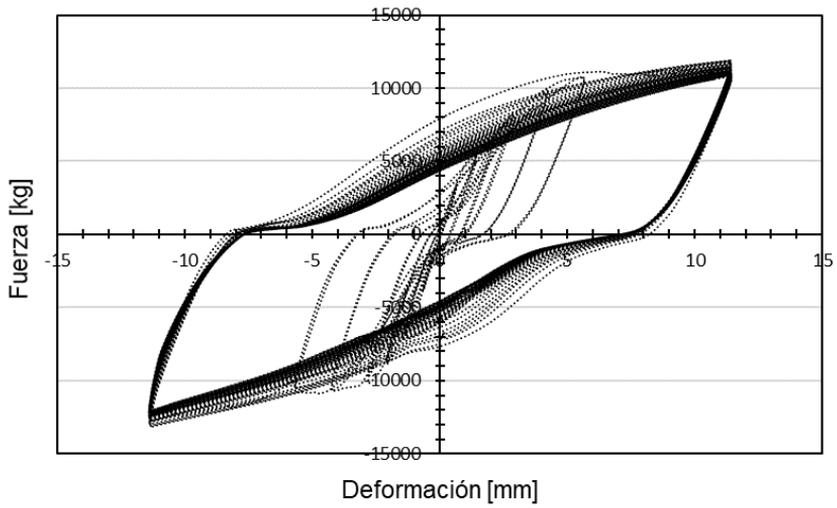


Figura 4.1: Curva fuerza-deformación CRP 1

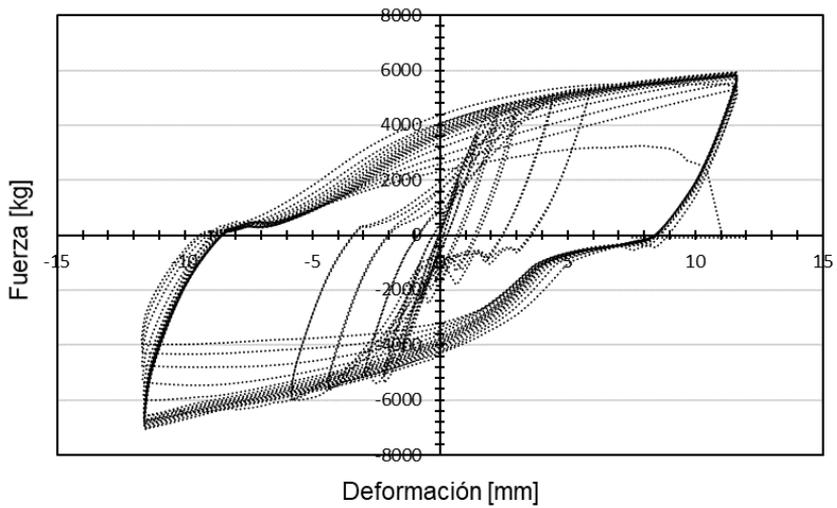


Figura 4.2: Curva fuerza-deformación CRP 2

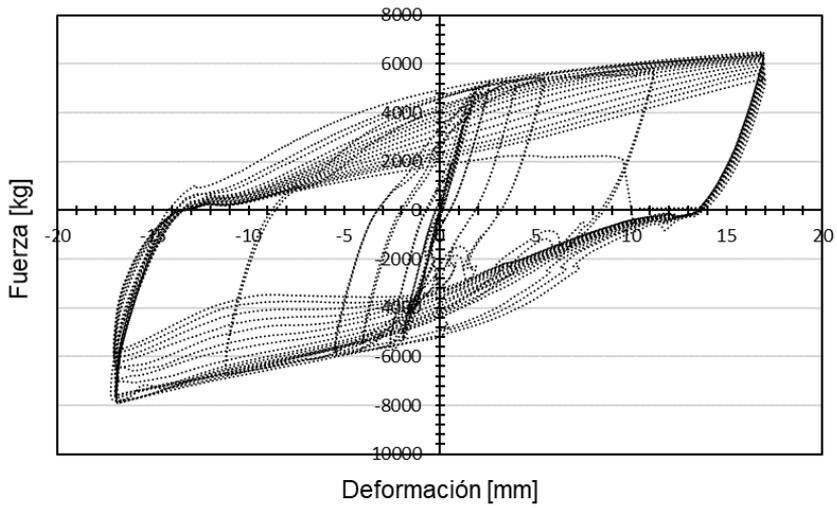


Figura 4.3: Curva fuerza-deformación CRP 3.

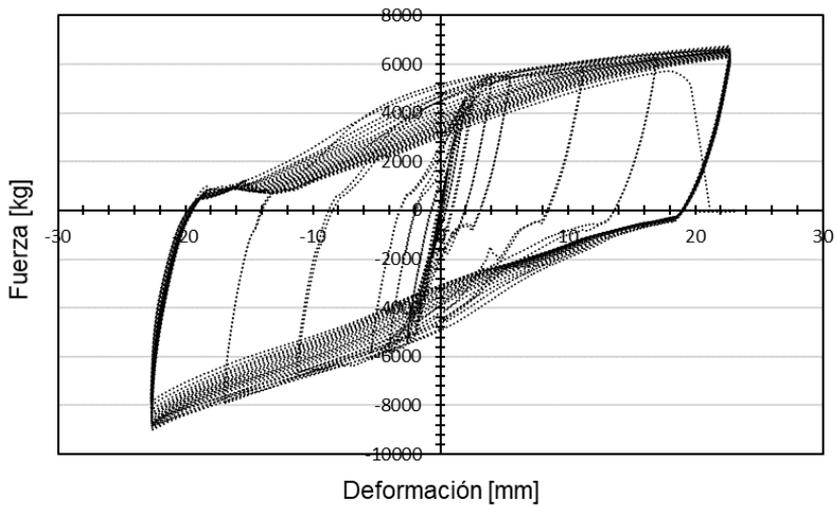


Figura 4.4: Curva fuerza-deformación CRP 5

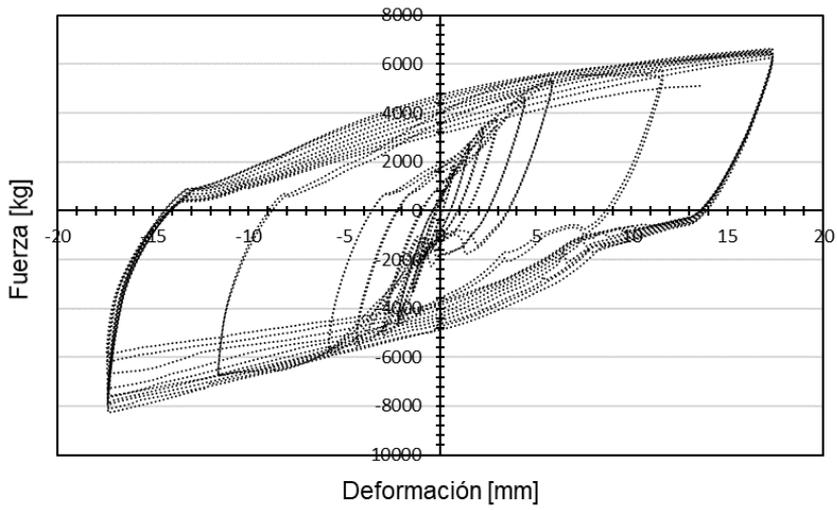


Figura 4.5: Curva fuerza-deformación CRP 6

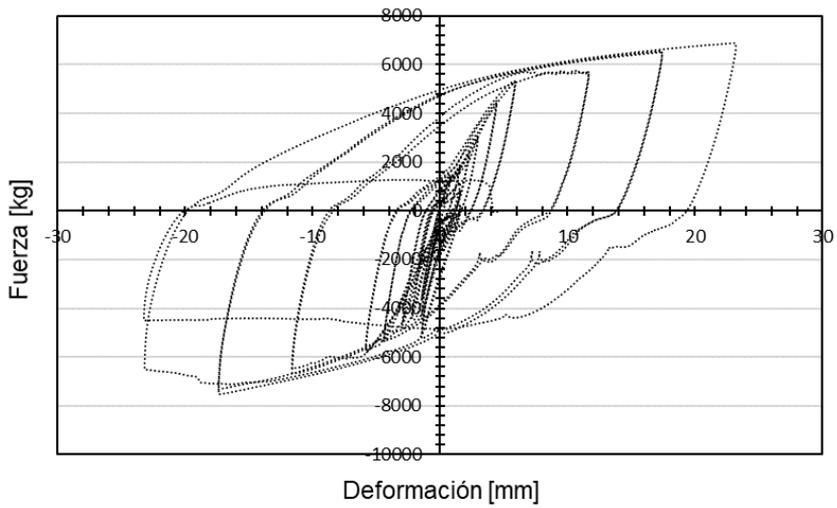


Figura 4.6: Curva fuerza-deformación CRP 7

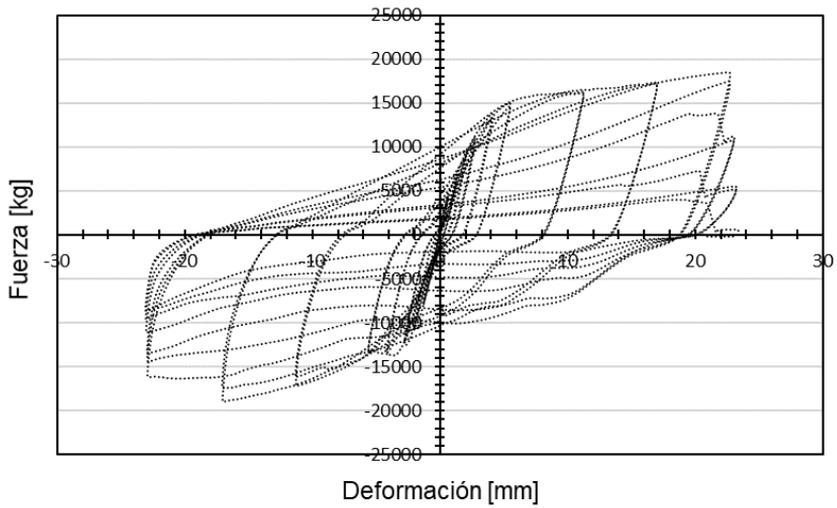


Figura 4.7: Curva fuerza-deformación CRP 8

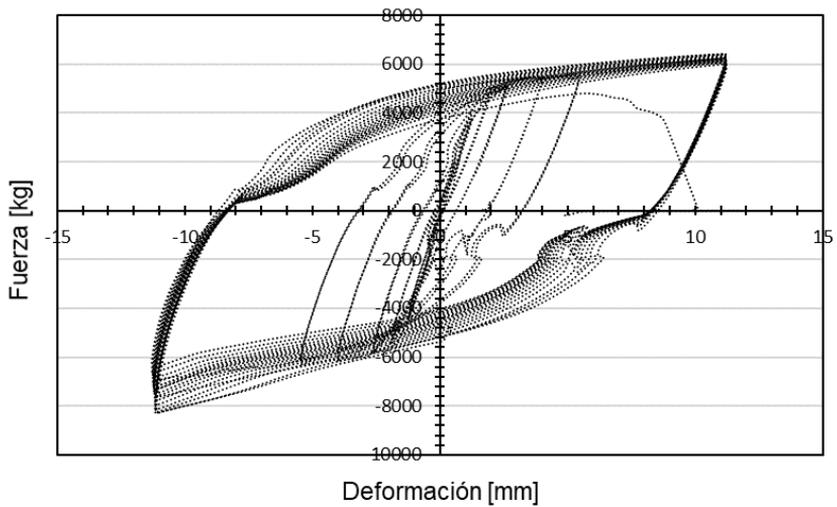


Figura 4.8: Curva fuerza-deformación CRP 9

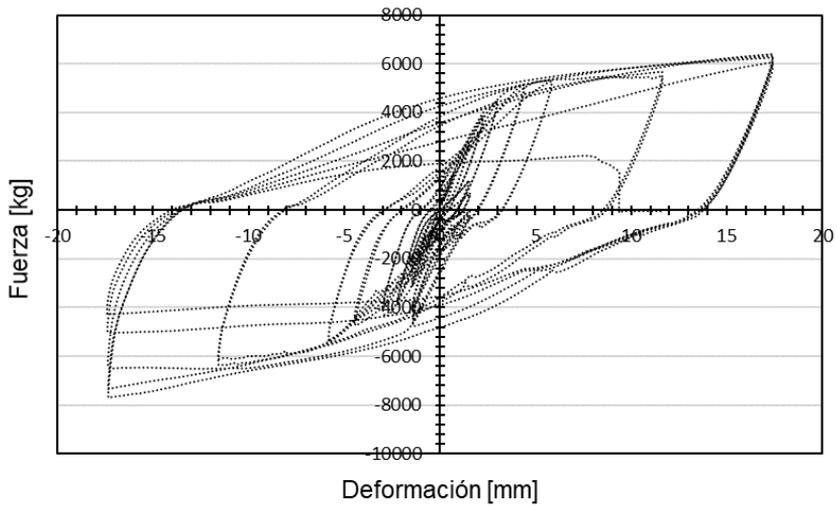


Figura 4.9: Curva fuerza-deformación CRP 10

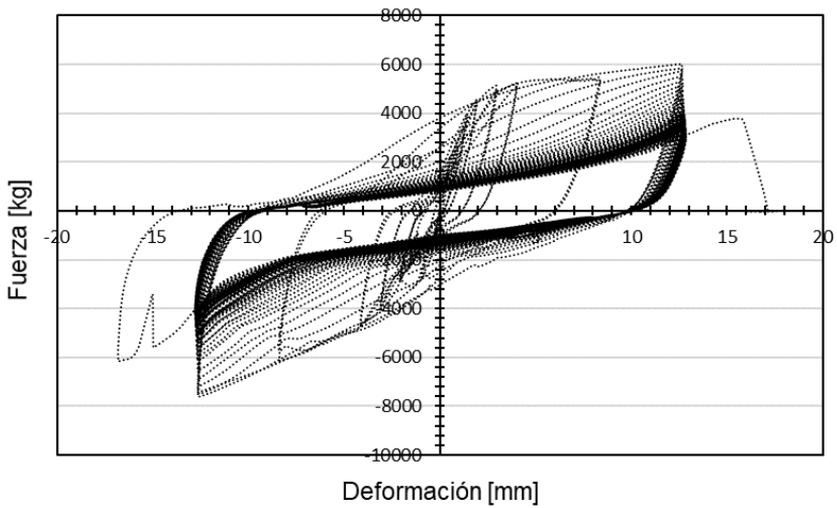


Figura 4.10: Curva fuerza-deformación CRP 11

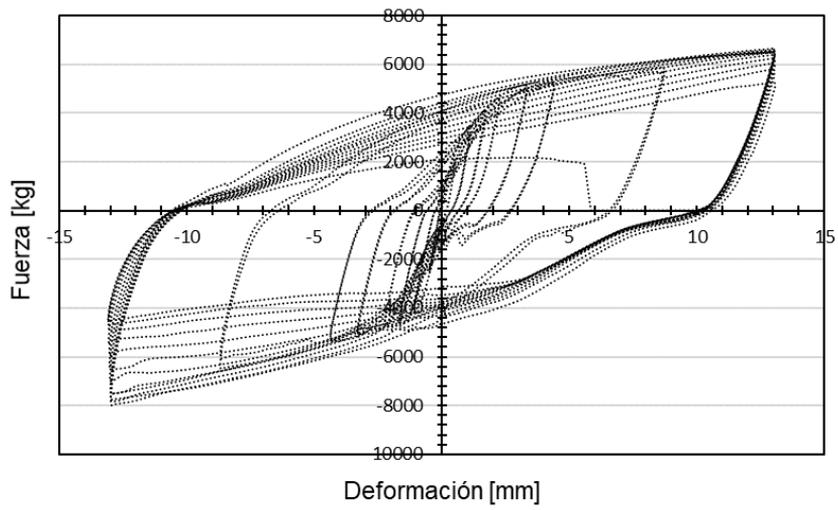


Figura 4.11: Curva fuerza-deformación CRP 12

4.2 CURVAS ENERGÍA

Para obtener la energía disipada por los dispositivos, E , se realizó la integral numérica de las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas experimentalmente. Para ello se empleó la ecuación (1)

$$E = \sum \frac{(F_i + F_{i-1})}{2} \cdot (u_i - u_{i-1}) \quad (1)$$

Donde:

- F_i : Es la fuerza que se presenta en el disipador en el tiempo i .
- F_{i-1} : Es la fuerza que se presenta en el disipador en el tiempo $i-1$.
- u_i : Es la deformación que presenta el disipador en el tiempo i .
- u_{i-1} : Es la deformación que presenta el disipador en el tiempo $i-1$.

Con el objetivo de lograr una comparación alternativa entre los disipadores, se obtuvo la ductilidad acumulada, esta se calcula dividiendo cada valor de energía obtenido de la ecuación (1) entre el producto de la resistencia y el desplazamiento de fluencia del acero empleado. En la Figura 4.12 se aprecia el comportamiento de las curvas de energía a través del tiempo para cada uno de los dispositivos, mientras que en la Figura 4.13 se muestran los valores máximos obtenidos de ductilidad acumulada y energía disipada en cada dispositivo. Se puede apreciar que los datos son muy dispersos y que la ductilidad acumulada es mayor a 100 en la mayoría de los dispositivos. Estos resultados cobran relevancia en el siguiente capítulo.

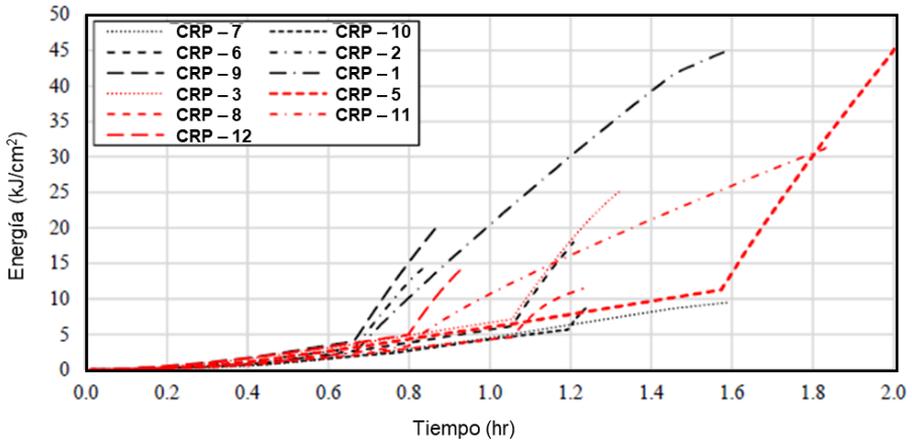


Figura 4.12: Curvas de energía disipada respecto al tiempo por dispositivo (García, 2019).

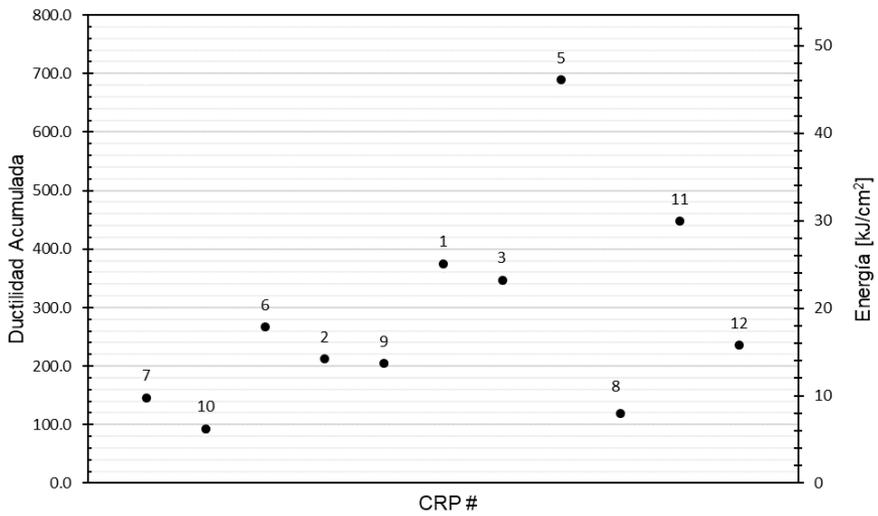


Figura 4.12: Ductilidad y energía disipada máxima por dispositivo.

5 MODELO NUMÉRICO

5.1 REGISTROS SÍSMICOS

Para realizar las simulaciones en el modelo, se utilizaron 10 registros de acelerogramas del sismo del 7 de septiembre de 2017 con epicentro al suroeste de Pijijiapan, Chiapas. Dichos registros se eligieron de las estaciones que presentaron las aceleraciones mayores. Esta información fue obtenida de la base de datos de registros acelerográficos de la RAI-UNAM (2020). En la Figura 5.1 se muestran las ubicaciones de las diez estaciones, así como el epicentro del sismo antes mencionado.



Figura 5.1: Ubicación de las estaciones con mayor aceleración registrada durante el sismo de 7 de septiembre de 2017.

Antes de introducir los acelerogramas al modelo por computadora fue necesario realizar un filtrado de las señales. Para esto se hizo uso del programa de computadora Prism (2018). En la Figura 5.2 aparecen los acelerogramas obtenidos del filtrado de cada una de las estaciones antes mencionadas.

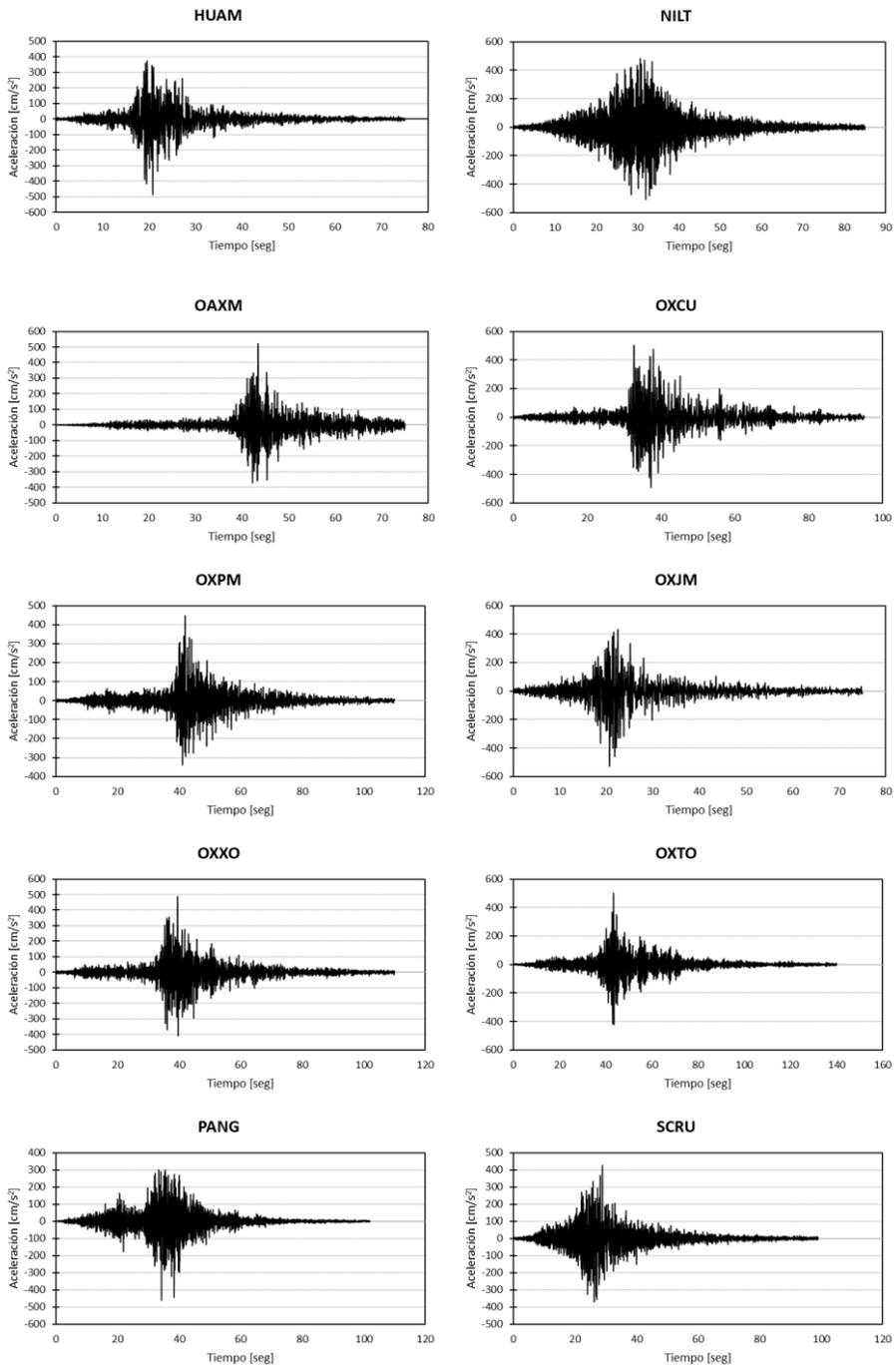


Figura 5.2: Acelerogramas correspondientes al sismo de magnitud 8.2 en Pijijiapan, Chiapas del 7 de septiembre de 2017.

5.2 MODELO SAP2000

Para realizar el modelo se utilizó el programa de computadora SAP2000 (2018) en su versión v.20.0.1 Dicho modelo consiste en un marco simple de concreto con acero de refuerzo, de 1.90 m de alto y 1.50 m de ancho, empotrado en ambos apoyos. Las columnas tienen una sección cuadrada de 15 cm, mientras que la trabe presenta una sección de 15 x 30 cm. Conectado al marco de forma diagonal se colocó un elemento tipo “link” al cual se le agregaron las características de los dispositivos ensayados. En la parte superior del elemento trabe se colocó una carga uniformemente distribuida (ver Figura 5.1).

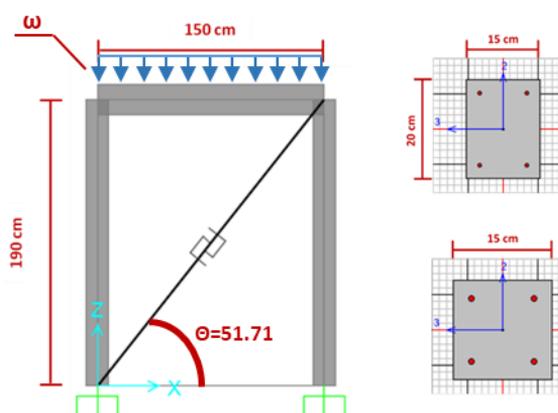


Figura 5.1: Dimensiones del marco, viga y columnas del modelo en SAP2000.

Para poder modelar los CRP en el programa, se hizo uso de las propiedades físicas y geométricas del acero empleado en los CRP en estudio. Estas propiedades se tomaron de las pruebas experimentales reportadas en la tesis de García (2020). La Tabla 5.1 muestra un resumen de las propiedades del disipador. La rigidez k y resistencia P_y del dispositivo se calcularon, mediante el uso de las ecuaciones (2) y (3), respectivamente.

$$k = f_k \cdot \frac{E \cdot A}{L} \quad (2)$$

$$P_y = F_y \cdot A \quad (3)$$

Donde:

- k : Es la rigidez del CRP .
 f_k : Es el factor que ajusta la rigidez del CRP debido a las distintas áreas que este presenta en su núcleo.
 E : Es el módulo de elasticidad del acero del núcleo del CRP
 A : Es el área de la sección transversal del núcleo del CRP
 L : Es la longitud del núcleo del CRP
 P_y : Es la resistencia del CRP
 F_y : Es el límite de fluencia del acero del núcleo del CRP

Tabla 5.1: Propiedades físicas y geométricas del acero empleado en CRP.

| Propiedades Acero CRP | |
|-----------------------|----------|
| E [kg/cm^2] | 2100000 |
| f_y [kg/cm^2] | 3290 |
| A [cm^2] | 1.63 |
| f_k | 1.7 |
| K_{BRB} [kg/cm] | 24038.48 |
| P_y [kg] | 5362.70 |

En esta tesis se varió el periodo de la estructura evaluada entre 01. Y 0.5 segundos. Para que el modelo en SAP2000 (2018) alcanzara estos periodos, dado que las propiedades otorgadas por la geometría y materiales de todos sus elementos son constantes, se aplicó una carga uniformemente distribuida en la parte superior del elemento trabe. Esta carga se fue variando para alcanzar los periodos en cuestión. Cabe destacar que no se consideró el peso propio de ninguno de los elementos del modelo, por lo cual la masa la aporta únicamente la carga distribuida. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se puede definir al modelo como una

estructura de un grado de libertad, permitiendo aplicar la ecuación (4), la cual define su periodo.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_L}} \quad (4)$$

donde m representa la masa, la cual es directamente proporcional a la carga uniformemente distribuida y k_L representa la rigidez lateral de la estructura, la cual también es proporcional a la rigidez del disipador. Dado que por el momento la carga ω permanece como incógnita, el cálculo de la masa es dado por la ecuación (5).

$$m = \frac{W_T}{g} \quad (5)$$

Donde W_T es el peso de la estructura proporcionado por ω y g es la aceleración gravitacional. La resistencia horizontal del sistema V_y , queda definida por la ecuación (6)

$$V_y = P_y \cos \theta \quad (6)$$

donde θ es el ángulo de inclinación del CRP y P_y es la resistencia del disipador, que se calcula de la ecuación (3). W_T y V_y guardan una relación definida por la ecuación (7).

$$R = \left(\frac{V_y}{W_T} \right) \quad (7)$$

Por lo que sustituyendo la ecuación (6) en (7) y a su vez ésta en (5), obtenemos la ecuación (8).

$$m = \frac{P_y \cos \theta}{g \cdot R} \quad (8)$$

Para el cálculo de la rigidez lateral K_L se emplea la ecuación (9).

$$k_L = k_{CPR} \cdot \cos^2 \theta \quad (9)$$

donde k_{CPR} se calculan con la ecuación (2). Ahora, sustituyendo la ecuación (2) en (9), se obtiene la ecuación (10).

$$k_L = \left(f_k \cdot \frac{E \cdot A}{L} \right) \cdot \cos^2 \theta \quad (10)$$

Una vez obtenidas las ecuaciones que definen la masa y la rigidez lateral, podemos sustituir las ecuaciones (8) y (10) en (4), para obtener finalmente la ecuación (11).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{f_y \cdot L}{g \cdot E \cdot R \cdot f_k \cdot \cos \theta}} \quad (11)$$

Dado que se desconoce el valor de la relación R (que involucra a la carga distribuida) adecuada para proporcionar el periodo de vibrar, ésta se hace variar en la ecuación (11). Una vez obtenido el par periodo objetivo, se obtiene W_T y ω de las ecuaciones (7) y (12).

$$\omega = \frac{W_T}{l} \quad (12)$$

donde l corresponde a la longitud de la trabe en la que se aplica la carga distribuida.

Una vez obtenidos los valores de ω , para diferentes periodos objetivo se introducen al modelo las aceleraciones sísmicas de las estaciones

mencionadas en la sección 5.1. Posteriormente se realiza el análisis del modelo para cada periodo. El programa permite calcular las fuerzas axiales y las deformaciones que sufre el disipador a lo largo del tiempo que dura el movimiento sísmico. Este proceso se repite para cada uno de los diez acelerogramas seleccionados.

La tabla 5.2 muestra los valores calculados considerando los valores de la tabla 5.1.

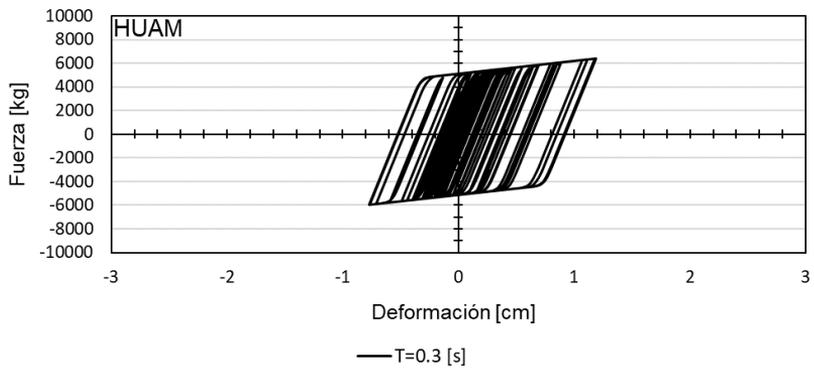
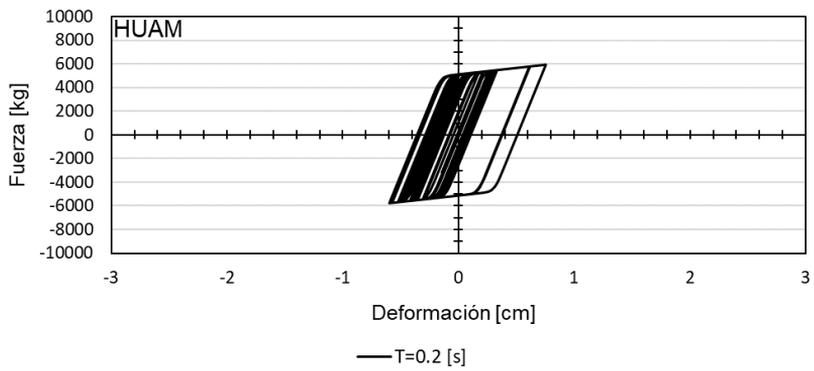
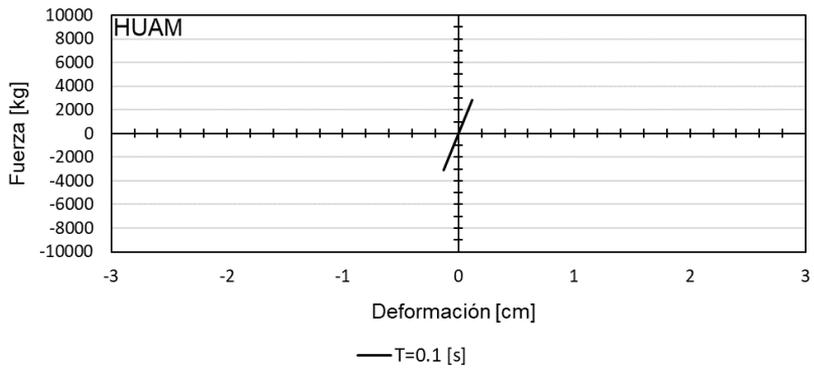
Tabla 5.2: Valores calculados de la estructura.

| R | T_0 [s] | P_y [kg] | V_y [kg] | W_T [kg] | ω [kg/cm] |
|------|-----------|------------|------------|------------|------------------|
| 1.44 | 0.1 | 5362.70 | 3322.97 | 2302.96 | 15.35 |
| 0.36 | 0.2 | 5362.70 | 3322.97 | 9168.54 | 61.12 |
| 0.16 | 0.3 | 5362.70 | 3322.97 | 20663.11 | 137.75 |
| 0.09 | 0.4 | 5362.70 | 3322.97 | 36843.82 | 245.63 |
| 0.06 | 0.5 | 5362.70 | 3322.97 | 57345.40 | 382.30 |

6 RESULTADOS DEL MODELO

6.1 CURVAS FUERZA-DEFORMACIÓN

El modelo numérico permitió calcular las curvas fuerza-deformación de cada movimiento sísmico de cada una de las estaciones y para cada uno de los periodos considerados. Las figuras 6.1 a 6.10 muestran las curvas obtenidas para cada estación. Se puede observar que, a medida que el periodo crece, las deformaciones y la ductilidad máxima crecen. La Tabla 6.1 muestra un resumen de las deformaciones y ductilidad. Se puede apreciar que la demanda de ductilidad máxima (μ_{\max}) crece con el periodo.



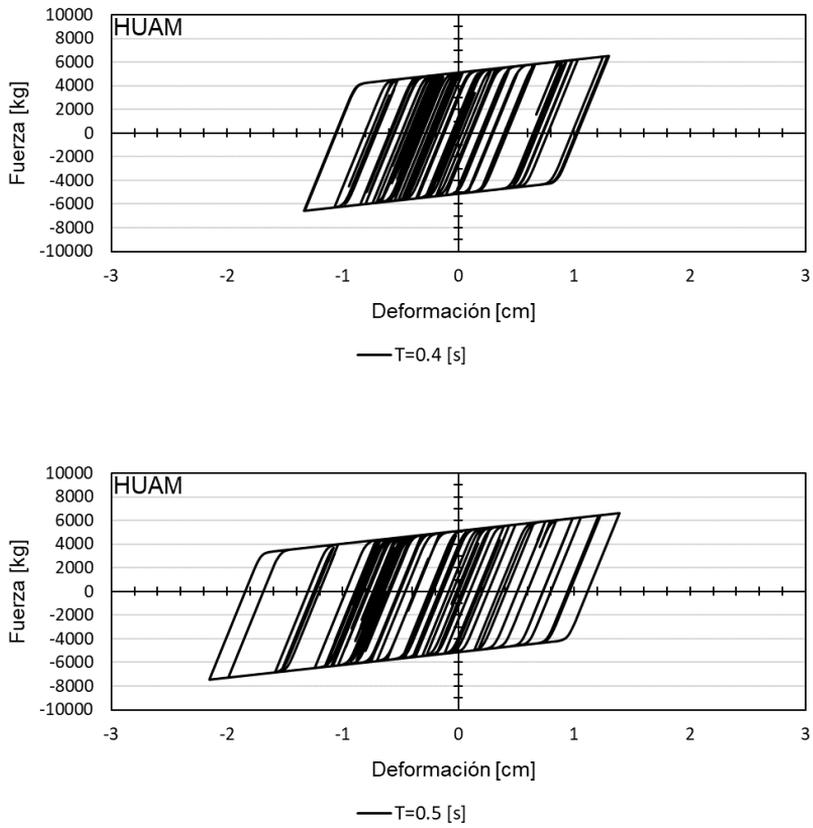
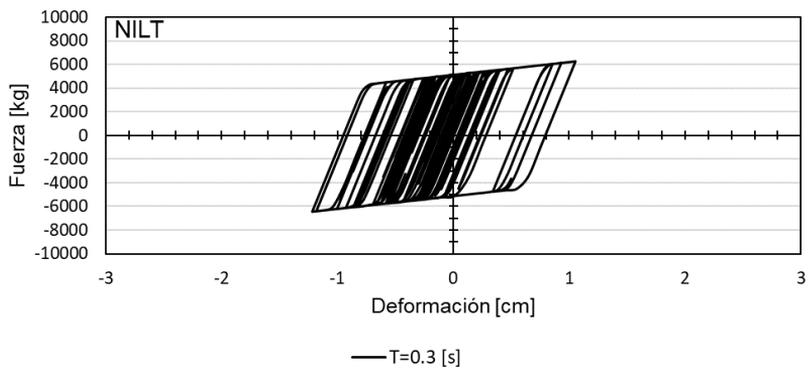
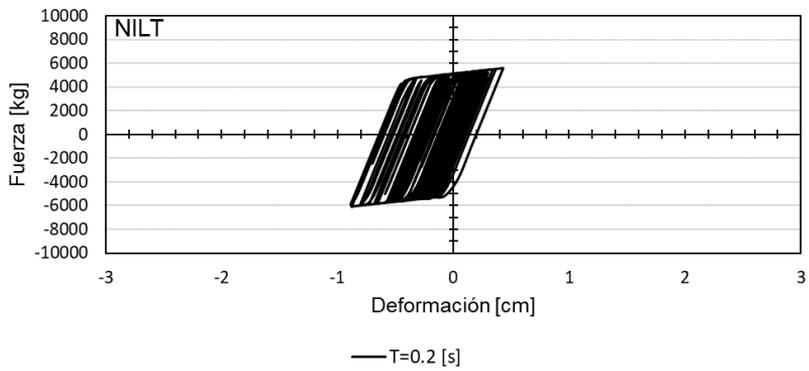
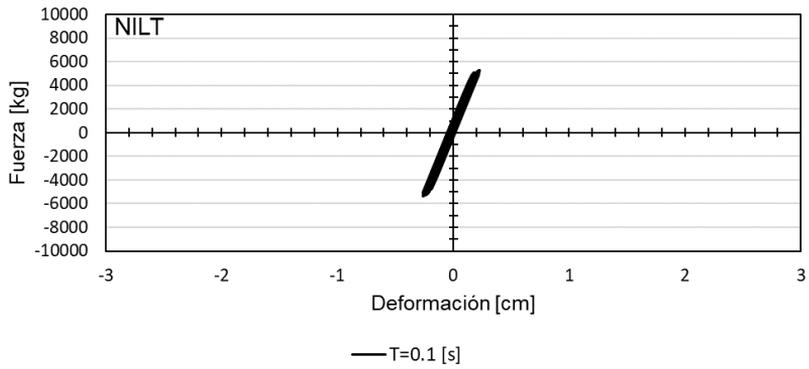


Figura 6.1: Curvas fuerza-deformación estación HUAM.



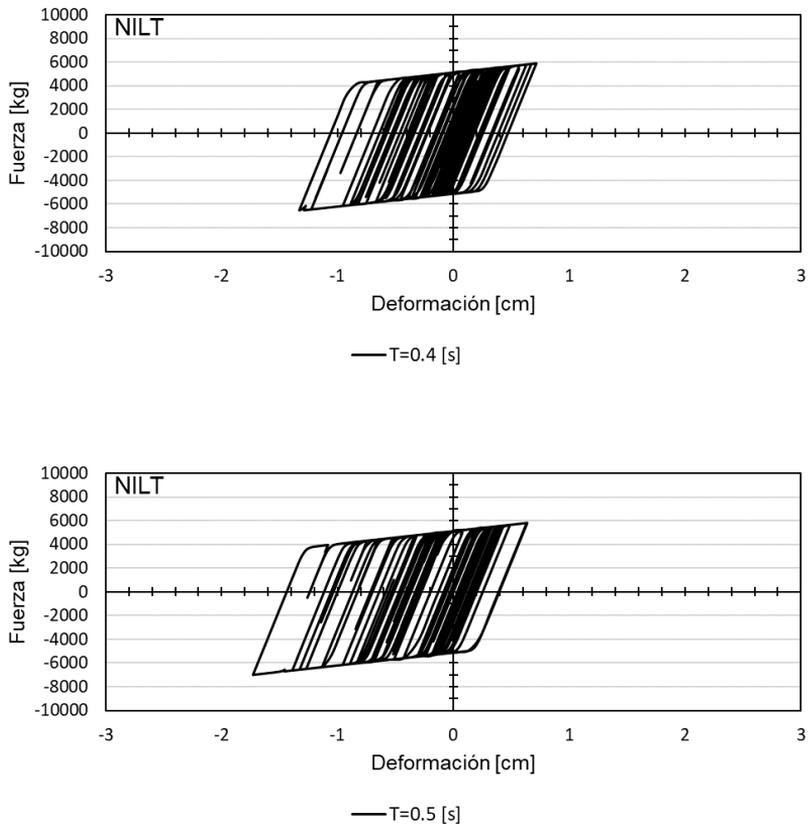
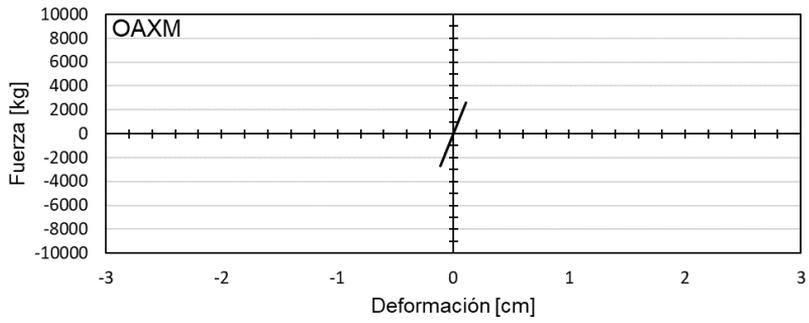
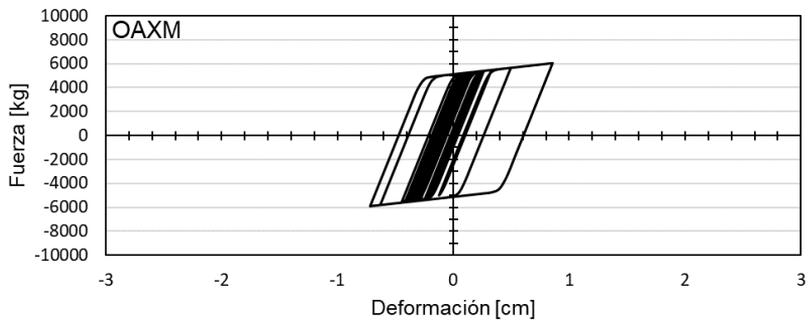


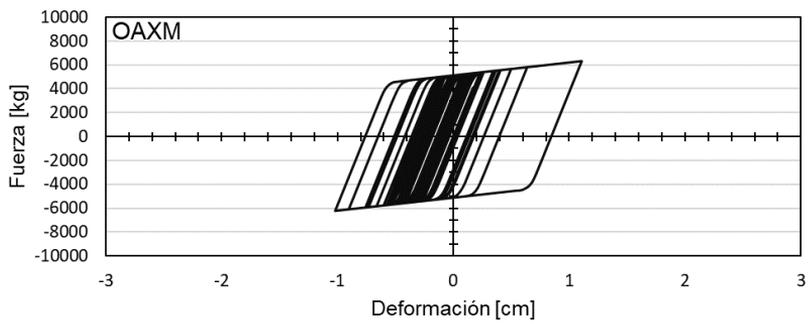
Figura 6.2: Curvas fuerza-deformación estación NILT.



— $T=0.1$ [s]



— $T=0.2$ [s]



— $T=0.3$ [s]

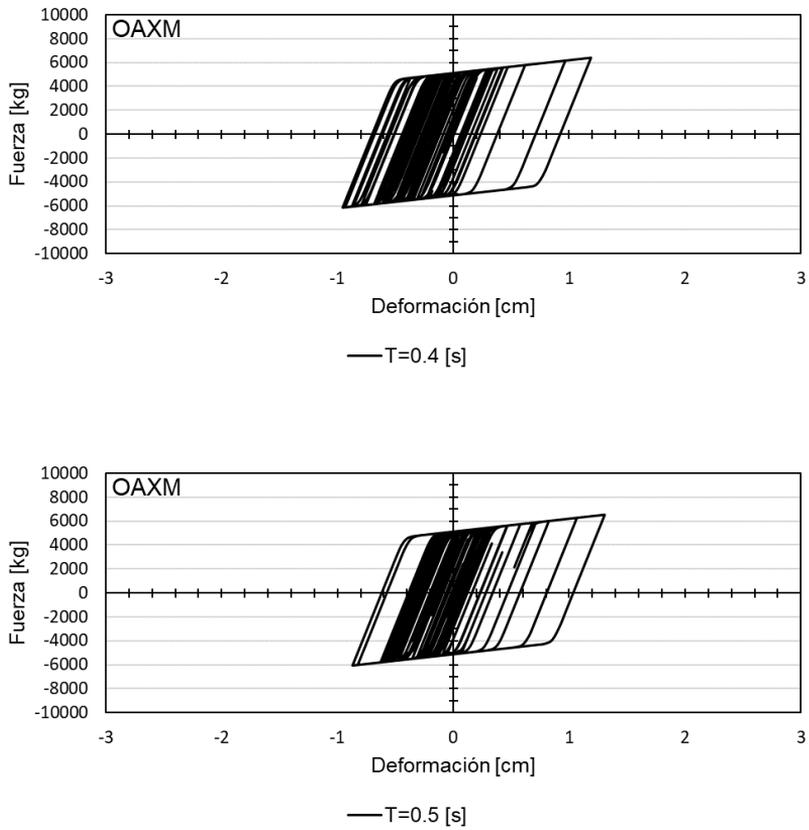
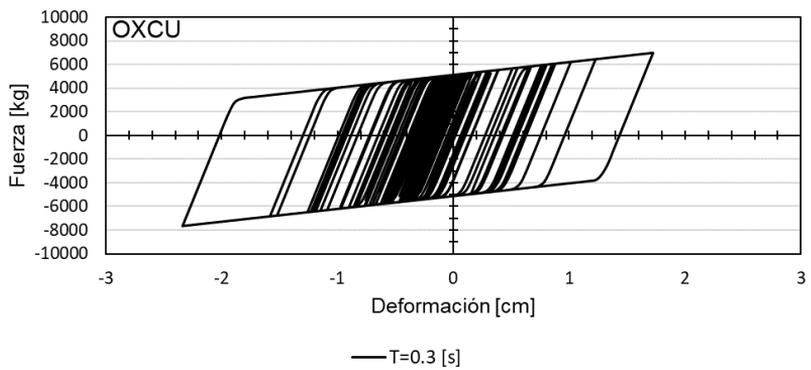
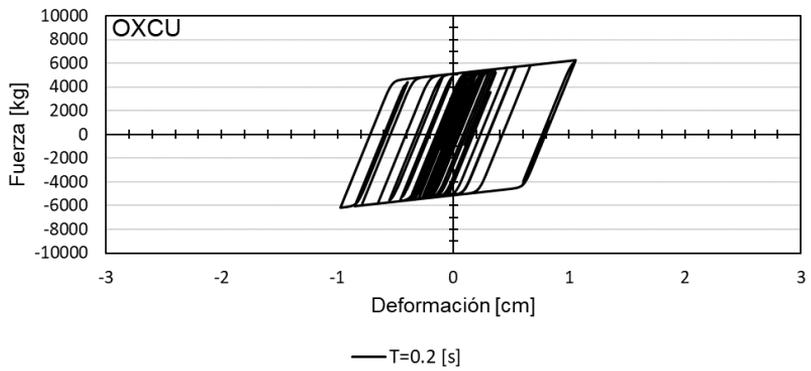
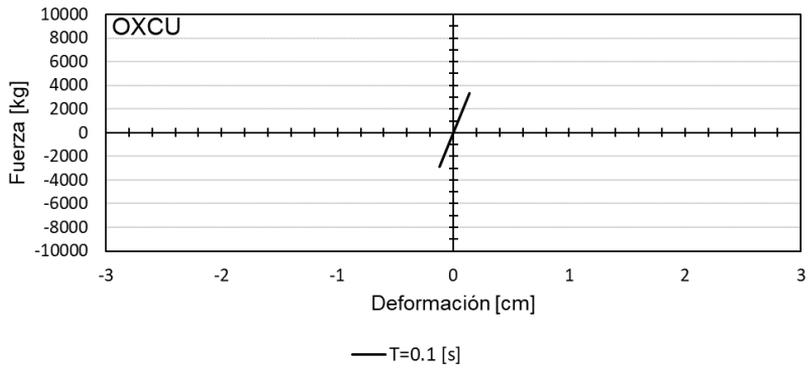


Figura 6.3: Curvas fuerza-deformación estación OAXM.



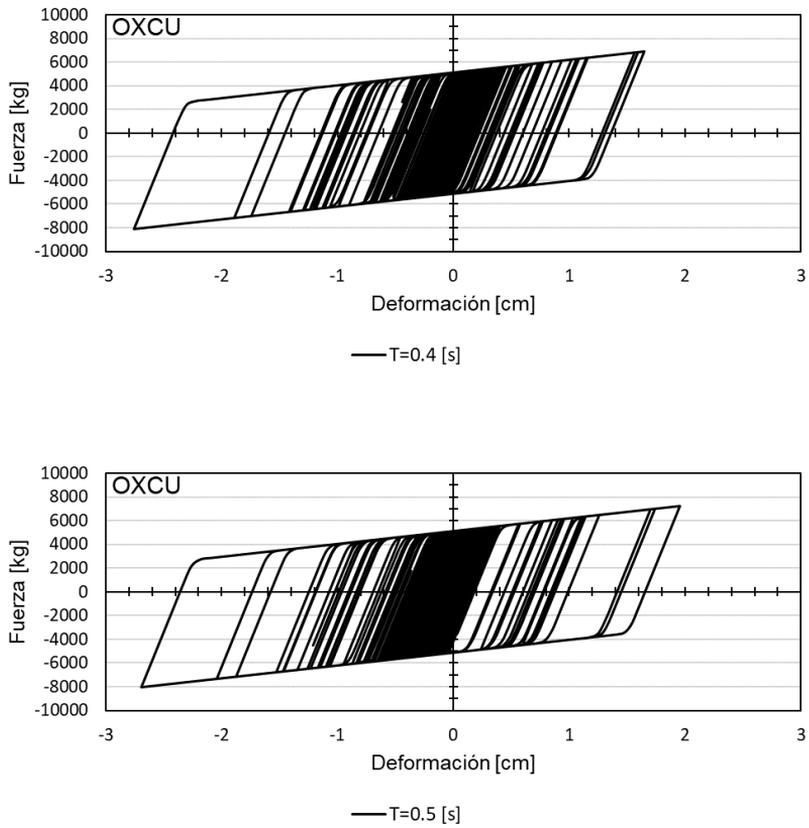
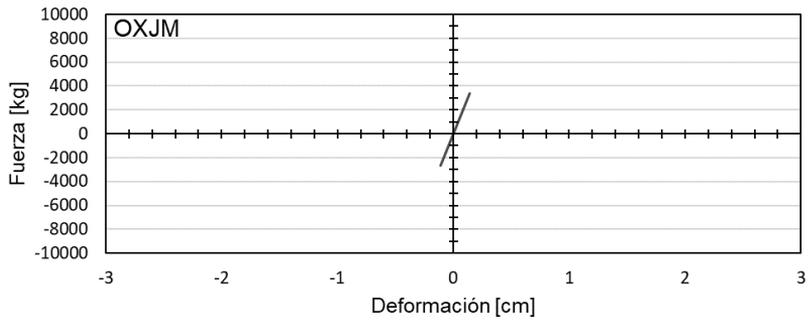
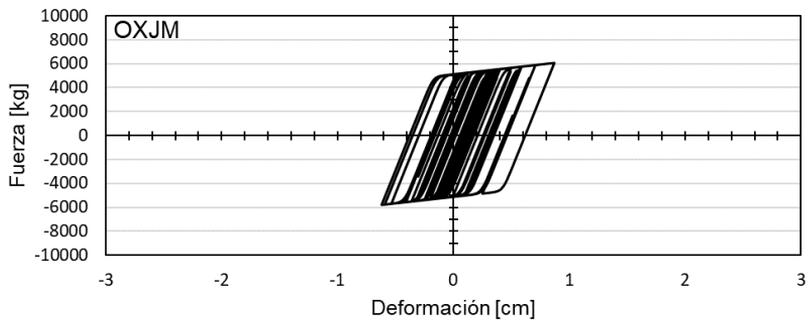


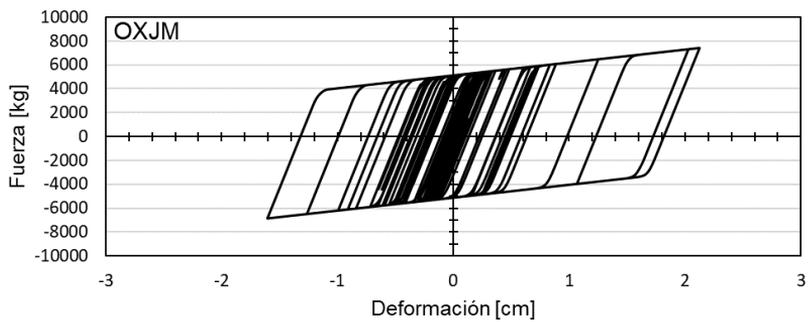
Figura 6.4: Curvas fuerza-deformación estación OXCU.



— $T=0.1$ [s]



— $T=0.2$ [s]



— $T=0.3$ [s]

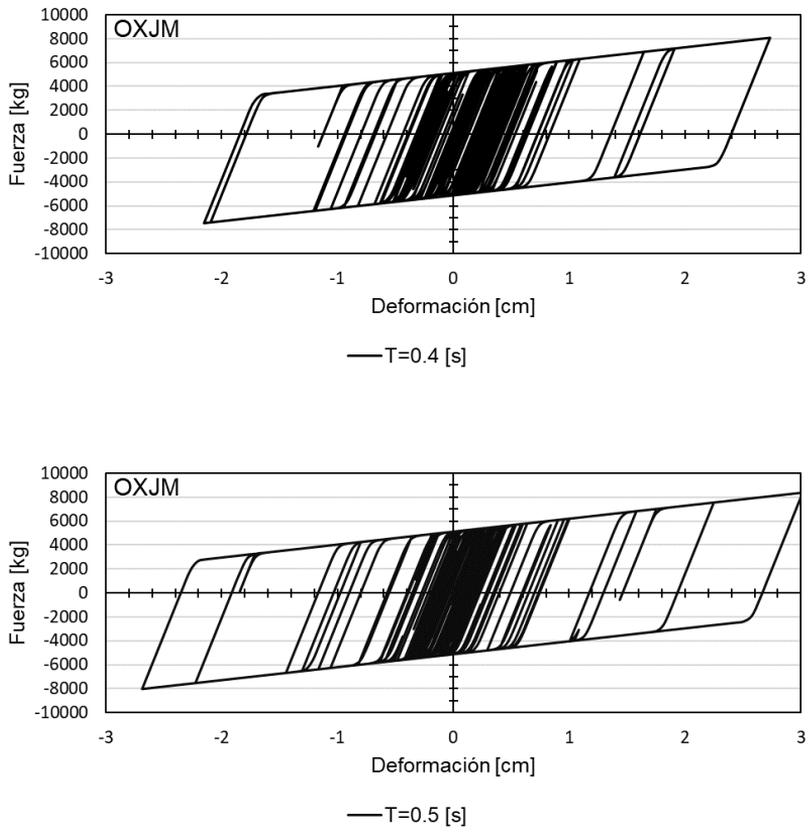
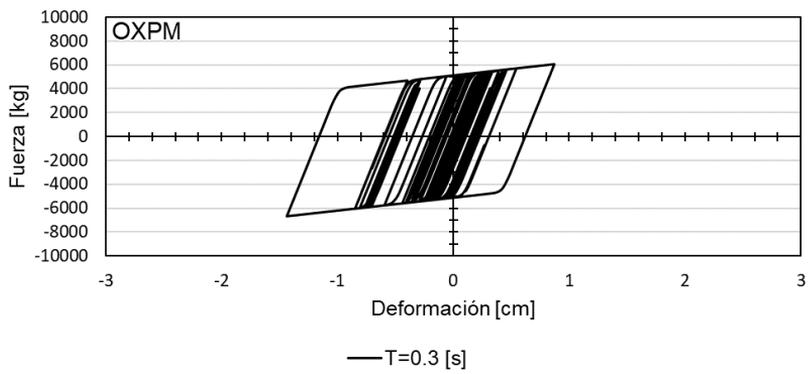
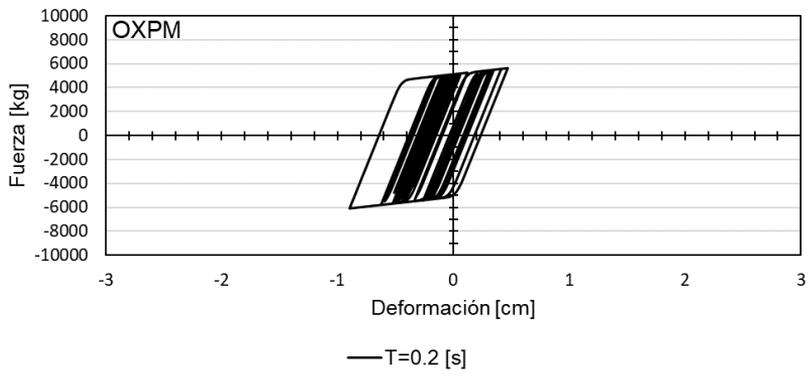
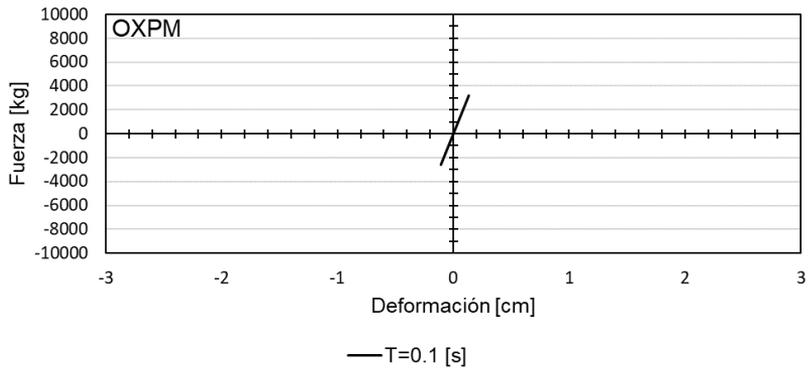


Figura 6.5: Curvas fuerza-deformación estación OXJM.



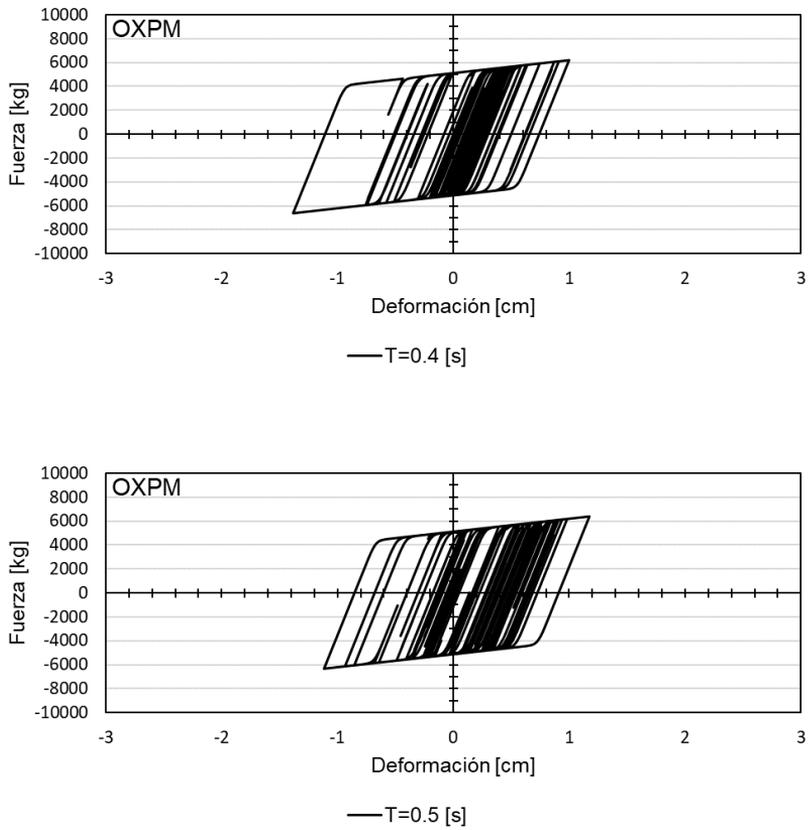
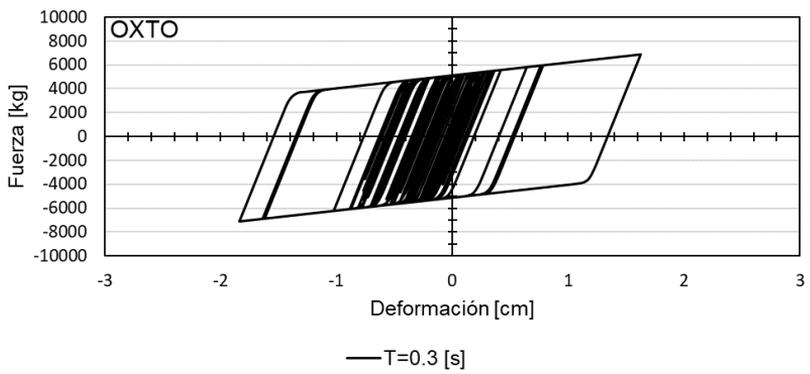
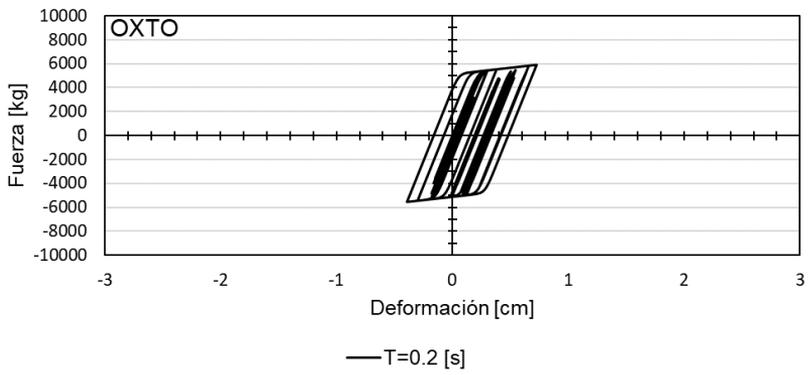
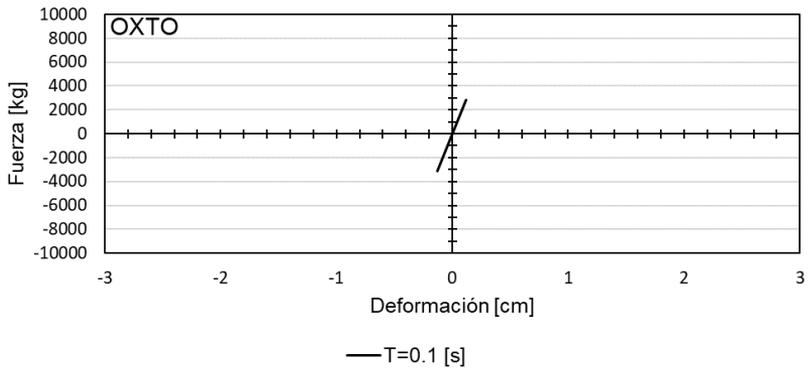


Figura 6.6: Curvas fuerza-deformación estación OXPM.



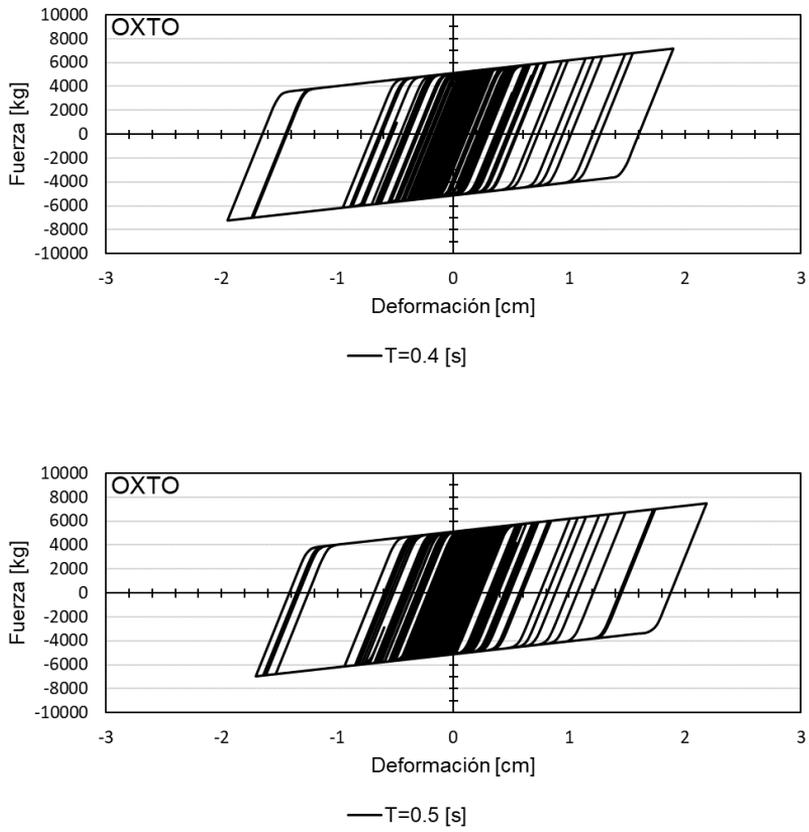
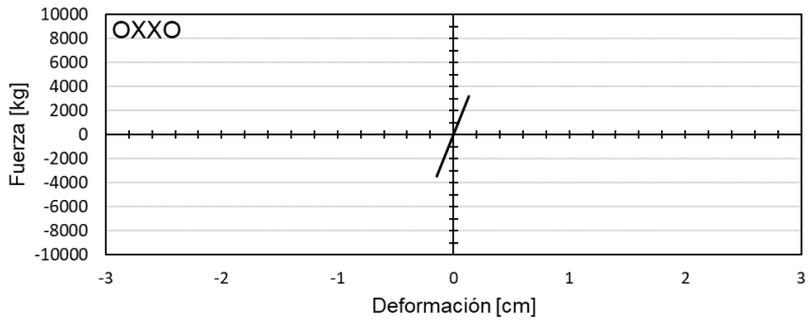
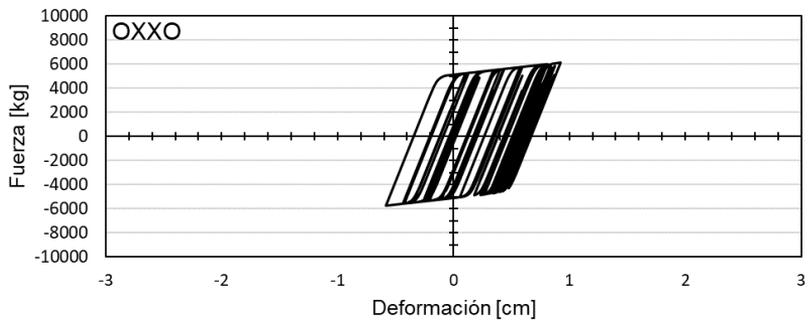


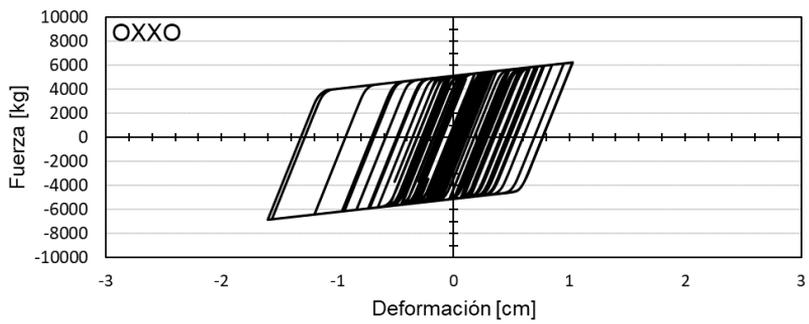
Figura 6.7: Curvas fuerza-deformación estación OXTO.



— $T=0.1$ [s]



— $T=0.2$ [s]



— $T=0.3$ [s]

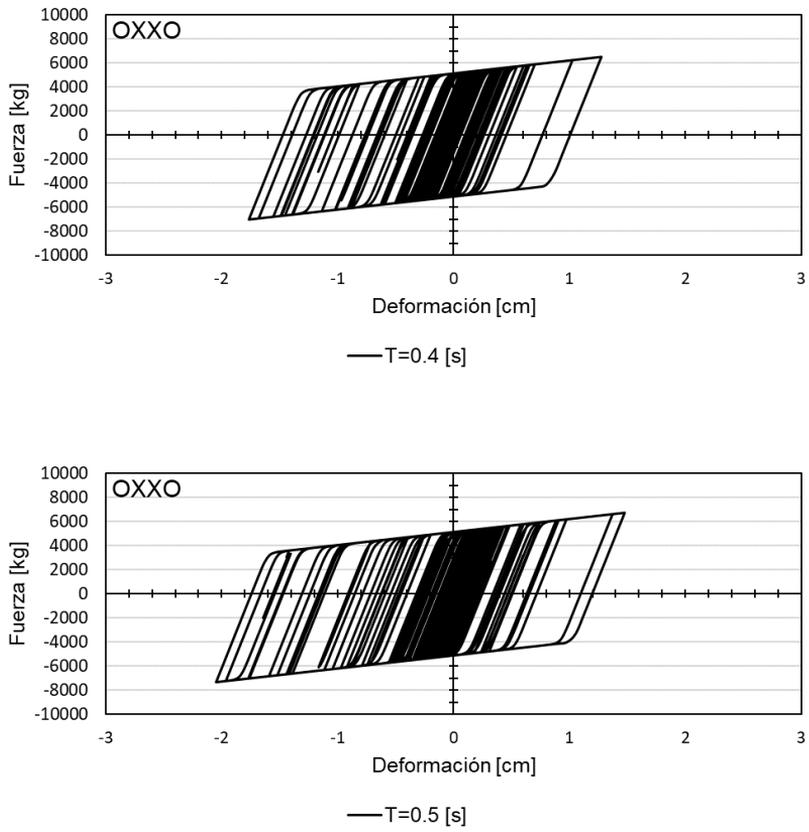
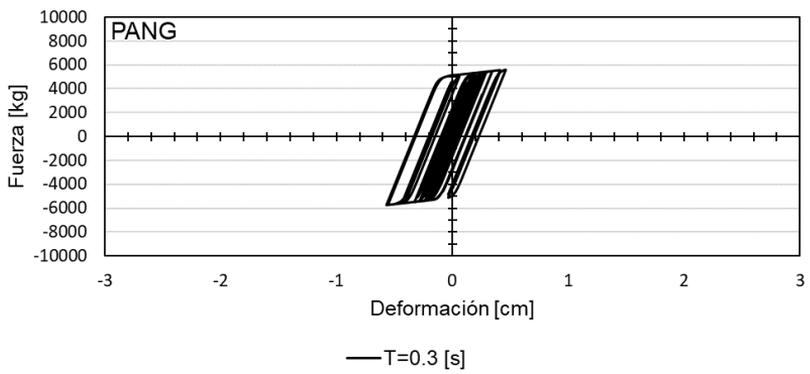
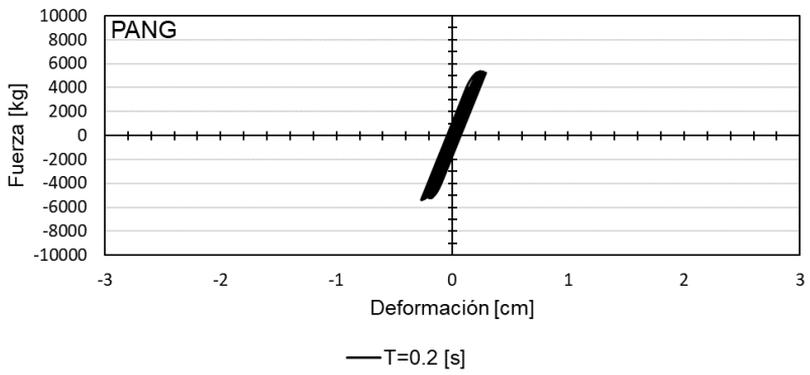
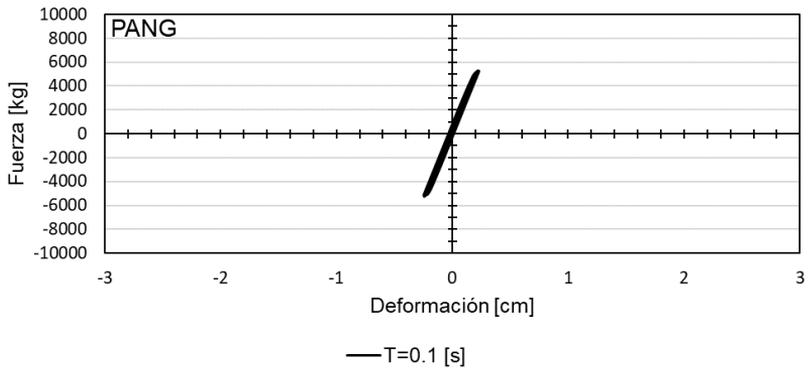


Figura 6.8: Curvas fuerza-deformación estación OXXO.



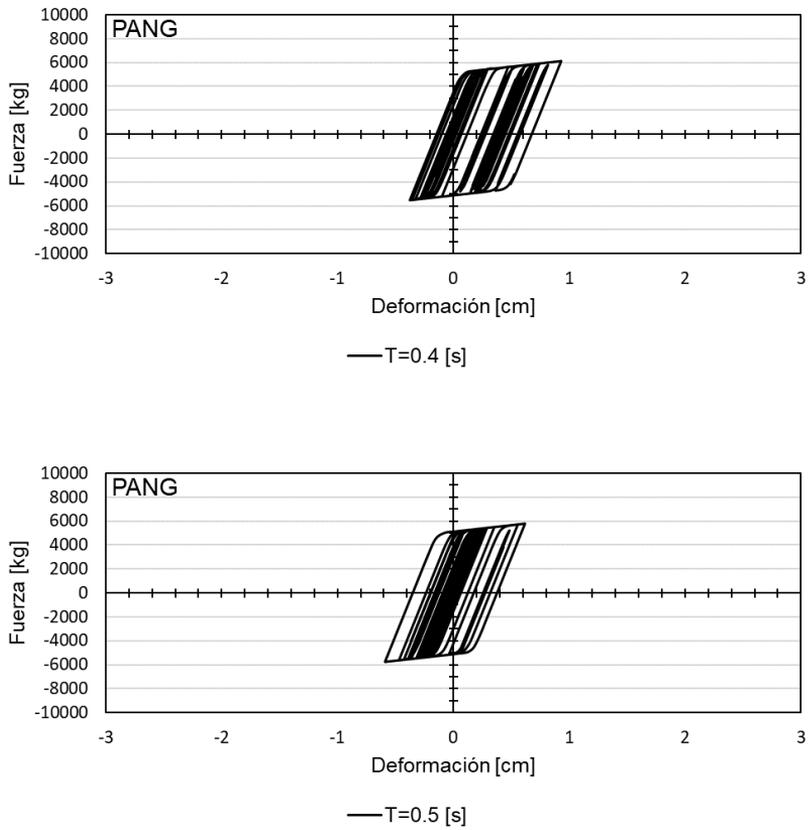
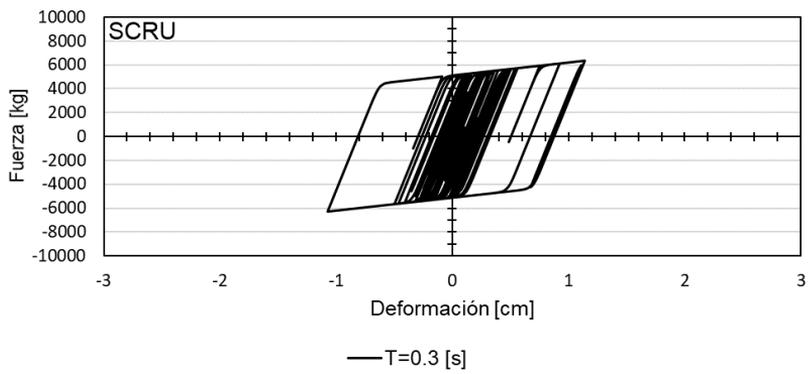
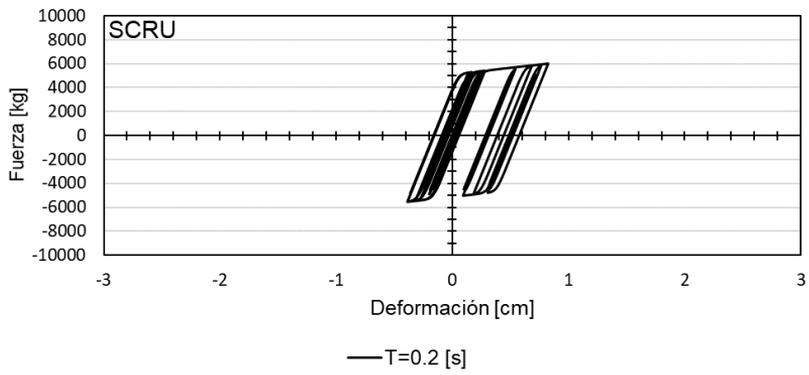
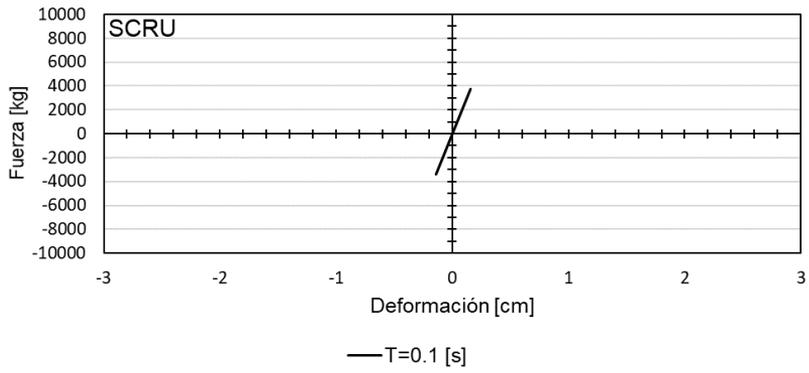


Figura 6.9: Curvas fuerza-deformación estación PANG.



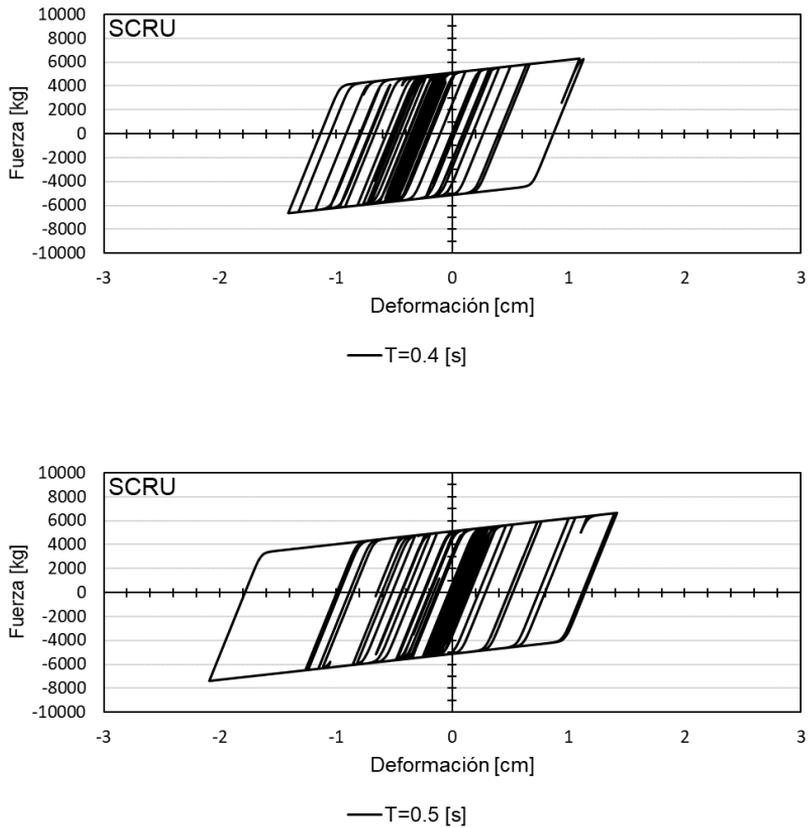


Figura 6.10: Curvas fuerza-deformación estación SCRU.

Tabla 6.1: Resumen de resultados

| T_0 [s] | P_{\max} [kg] | d_{\max} | μ_{\max} [d_{\max}/d_v] |
|-----------|-----------------|------------|------------------------------------|
| 0.1 | 5287.1 | -0.26 | 1.03 |
| 0.2 | 6263.0 | 1.06 | 4.73 |
| 0.3 | 7420.0 | -2.34 | 9.53 |
| 0.4 | 8078.1 | -2.76 | 12.25 |
| 0.5 | 8382.9 | 3.02 | 13.52 |

6.2 CURVAS DE ENERGÍA

Se integró numéricamente cada una de las curvas de fuerza-deformación del modelo numérico haciendo uso de la ecuación (1), obteniendo los resultados en términos de ductilidad acumulada y energía disipada con unidades en sistema internacional. En las figuras 6.11 a 6.20 se muestra gráficamente la energía disipada y ductilidad acumulada por cada análisis realizado. Se puede apreciar que a medida que el periodo crece, las demandas de energía y ductilidad acumulada crecen también.

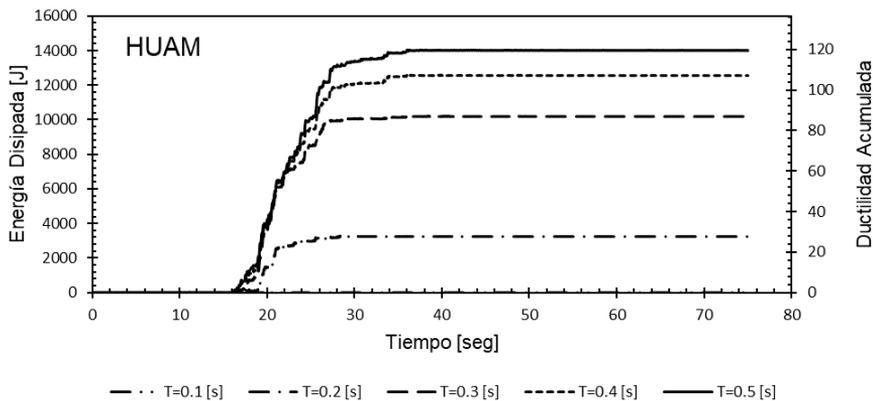


Figura 6.11: Curvas energía y ductilidad acumulada. Estación HUAM.

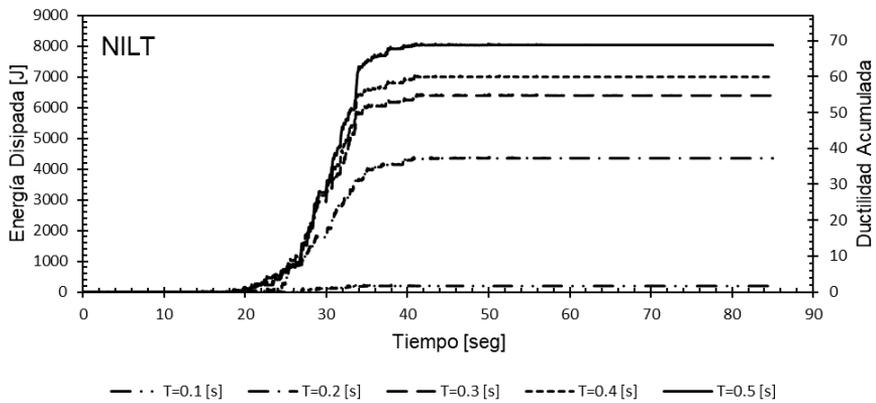


Figura 6.12: Curvas energía y ductilidad acumulada. Estación NILT.

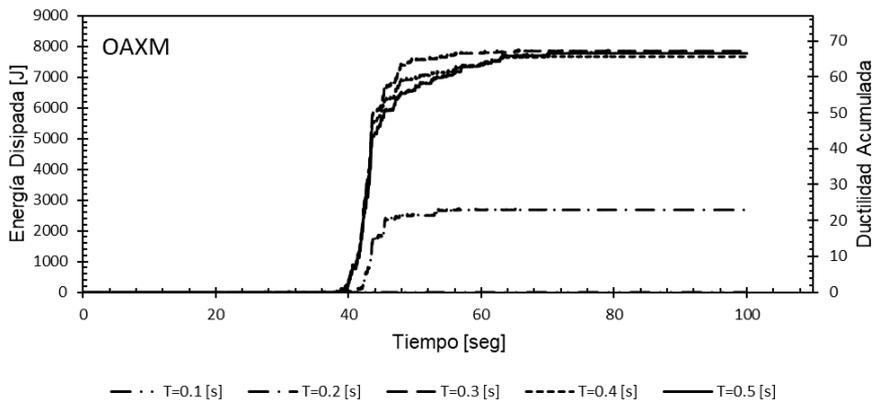


Figura 6.13: Curvas energía y ductilidad acumulada. Estación OAXM.

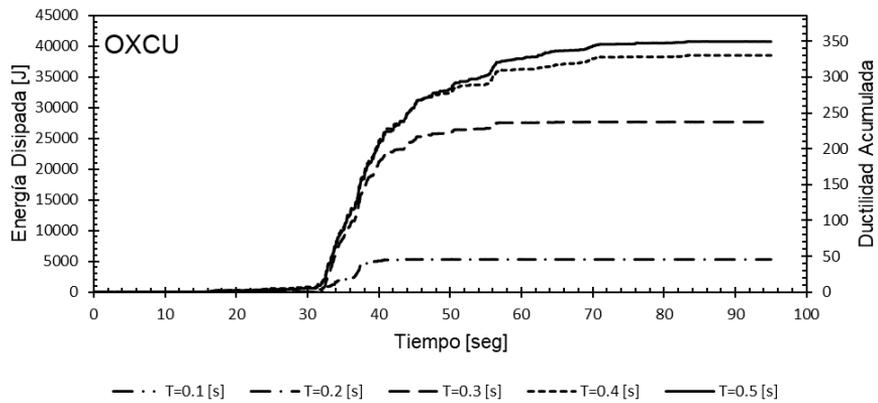


Figura 6.14: Curvas energía y ductilidad acumulada. Estación OXCU.

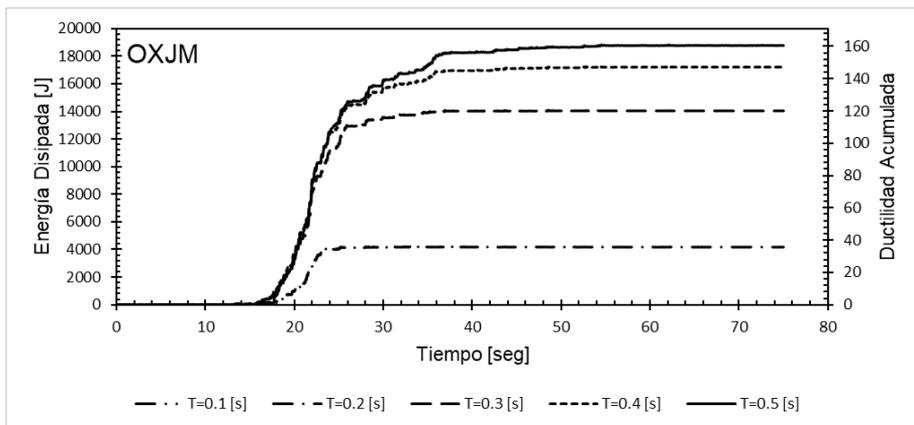


Figura 6.15: Curvas energía y ductilidad acumulada estación OXJM.

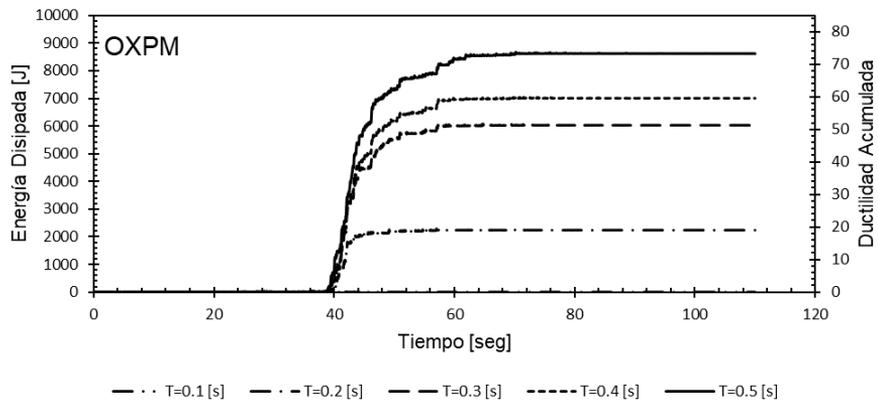


Figura 6.16: Curvas energía y ductilidad acumulada. Estación OXPM.

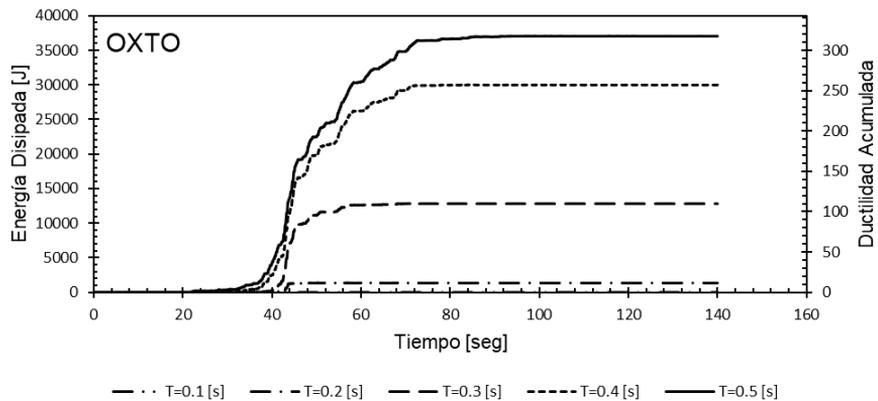


Figura 6.17: Curvas energía y ductilidad acumulada. Estación OXTO.

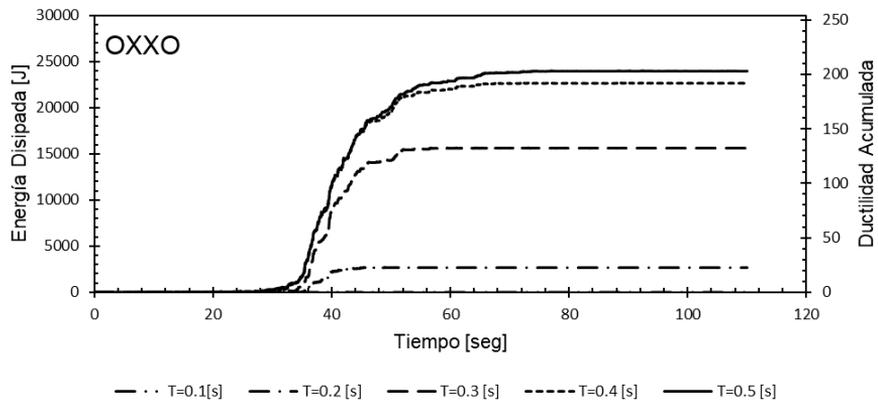


Figura 6.18: Curvas energía y ductilidad acumulada. Estación OXXO.

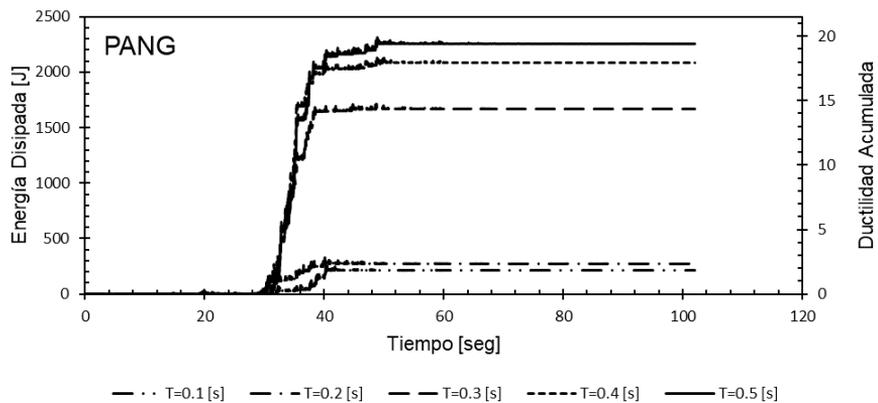


Figura 6.19: Curvas energía y ductilidad acumulada. Estación PANG.

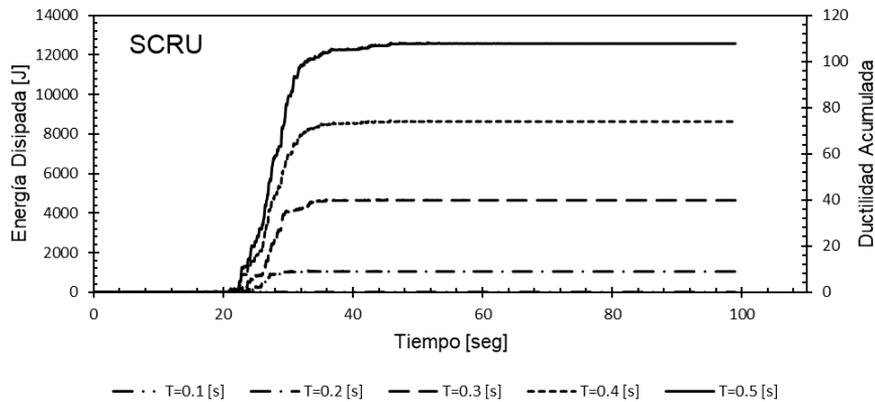


Figura 6.20: Curvas energía y ductilidad acumulada. Estación SCRU.

Las curvas de ductilidad acumulada y energía disipada obtenidas del modelo numérico, representan la demanda de energía que debe acomodar un disipador ante las aceleraciones presentadas.

Para el análisis y comparación de los resultados con los de las pruebas experimentales, se obtuvo la media aritmética de demandas de cada estación y para cada periodo. En la Figura 6.21 se observa en líneas la media que presentó cada periodo en las diez estaciones, mientras que los puntos representan la energía que soportó cada dispositivo en las pruebas experimentales hasta antes de su falla.

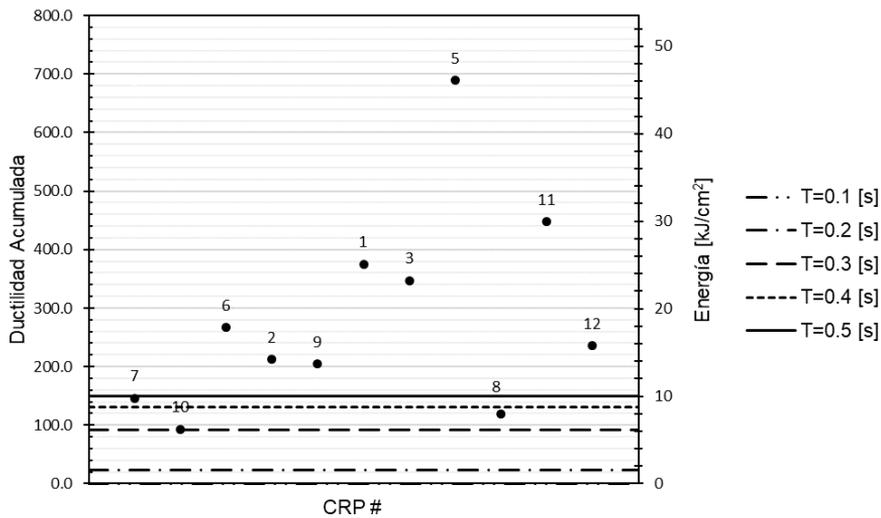


Figura 6.21: Comparación de demanda de energía y ductilidad acumulada contra capacidad de disipación de los CRP.

Para obtener una comparación más adecuada que la simple media aritmética, se empleó una distribución de probabilidad Log-Normal para los resultados de ductilidad acumulada y energía obtenidos del modelo numérico. En la Figura 6.22 se representa con líneas verticales la capacidad que cada dispositivo desarrolló en las pruebas experimentales, mientras que las curvas representan la probabilidad de cumplir con la demanda de ductilidad según el periodo. Se puede apreciar que para periodos de 0.1 y 0.2 segundos prácticamente todos los CRP tienen un 100% de probabilidad de acomodar las demandas sísmicas. Por lo que se podría decir que estos CRP son adecuados para estructuras con esos periodos. Por otro lado, las probabilidades son menores para periodos mayores a 0.2 segundos por lo que la eficiencia de los CRP es menor para esos periodos. Note que los CRP 3, 1, 11 y 5 presentan probabilidades muy altas por lo que hay algunos CRP que son muy eficientes.

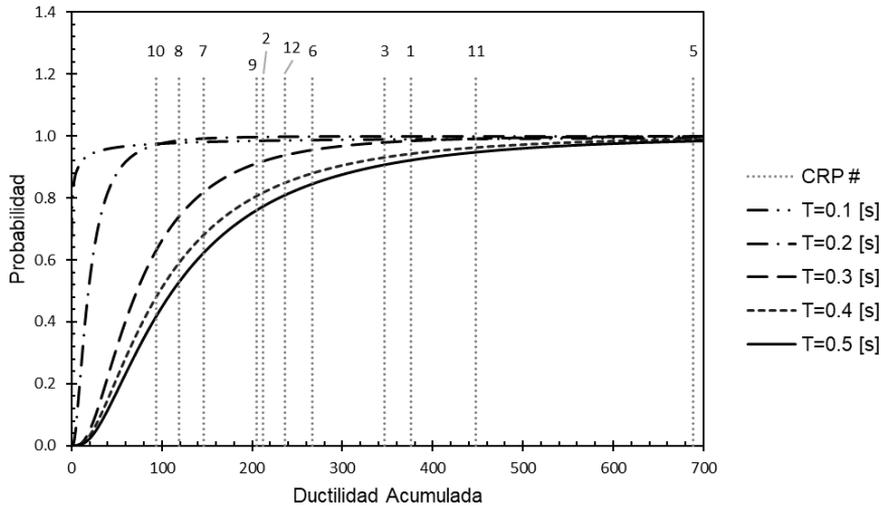


Figura 6.22: Distribución de probabilidad Log-Normal para demanda de energía.

Se considera que los CRPs ensayados funcionan de manera exitosa cuando éstos tienen una probabilidad de satisfacer las demandas de energía mayor al 90%. En la Tabla 6.1 se presentan las probabilidades de éxito de cada dispositivo para cada periodo. En color rojo se muestran los eventos para los cuales el CRP no tiene la capacidad suficiente. Finalmente, en la parte inferior de la tabla se muestra el porcentaje de éxito para que cualquiera de los dispositivos funcione para cierto periodo, considerando de igual manera un porcentaje mayor del 90% como un funcionamiento exitoso.

Tabla 6.1: Resultados de probabilidad para cumplir con la demanda de energía.

| T_0 [s] | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
|----------------|--|--------|-------|-------|-------|
| CRP # | Probabilidad de cumplir demanda | | | | |
| 1 | 99.1% | 100.0% | 98.4% | 94.2% | 92.2% |
| 2 | 98.6% | 99.8% | 91.8% | 81.6% | 77.2% |
| 3 | 99.0% | 100.0% | 97.9% | 93.0% | 90.7% |
| 5 | 99.4% | 100.0% | 99.8% | 98.9% | 98.3% |
| 6 | 98.8% | 99.9% | 95.4% | 87.9% | 84.5% |
| 7 | 98.2% | 99.3% | 81.7% | 67.8% | 62.1% |
| 8 | 97.9% | 98.6% | 73.7% | 58.6% | 52.5% |
| 9 | 98.6% | 99.8% | 91.1% | 80.5% | 76.0% |
| 10 | 97.6% | 97.2% | 62.7% | 47.6% | 41.4% |
| 11 | 99.2% | 100.0% | 99.1% | 96.2% | 94.8% |
| 12 | 98.7% | 99.9% | 93.7% | 84.7% | 80.8% |
| % Éxito | 100.0% | 100.0% | 72.7% | 36.4% | 36.4% |

7 CONCLUSIONES

7.1 DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

- De acuerdo con los objetivos planteados, lo que respecta a la fabricación de los dispositivos, éstos se realizaron con materiales convencionales, de fácil manipulación y accesibles al público en general. Con respecto a la mano de obra, ésta fue realizada por estudiantes de licenciatura y maestría, si bien se requirió de personal capacitado para los trabajos de soldadura y también de herramientas especiales para el corte y perforación del acero, estos pueden cubrirse con relativa facilidad.
- Durante la fase de pruebas se manifestaron problemas con la longitud del material deformable que impide la participación del mortero ante las fuerzas de compresión. Dicha distancia provocaba que el núcleo se pandeara en esa sección y no donde estaba previsto. Por lo que se optó por reducir la distancia de material aislante y sustituirla con mortero. Sin embargo, dichos problemas se presentaron en una etapa temprana, lo cual permitió que se hicieran adecuaciones al resto de dispositivos, mismos que tuvieron un comportamiento conforme a lo esperado. Por lo anterior, los CRP presentan un comportamiento relativamente uniforme y arrojan datos que permiten llegar a un resultado satisfactorio.

7.2 DEL MODELO NUMÉRICO

- De la Tabla 6.1 se observa que los CRP cuentan con la suficiente capacidad de disipación de energía para estructuras que tengan periodos de 0.1 y 0.2 segundos. Para las estructuras de periodo de 0.3 segundos, los resultados arrojan que los dispositivos comienzan a presentar dificultades para cumplir con la demanda de energía. Sin embargo, hubo disipadores con un desempeño muy bueno, como el 3, 1, 11 y 5. Un detallado cuidadoso en la fabricación de los CRP y procesos estandarizados podrían llevar a tener CRP con

comportamiento muy satisfactorio. Teniendo en cuenta lo anterior cabe la posibilidad de que los dispositivos se desempeñen adecuadamente para estructuras con un periodo mayor a 0.3 segundos.

- Los alcances de esta tesis contemplan en su modelo numérico únicamente estructuras de un solo nivel que alcanzan periodos desde 0.1 hasta 0.5 segundos. Sin embargo, para estructuras de varios niveles, en donde el periodo se relaciona con el número de niveles, los resultados podrían variar, pues se emplean varios disipadores conectados en serie. Analizando los resultados de la Tabla 6.1, estructuras con periodos mayores 0.3 segundos son susceptibles a que el disipador no cumpla con las demandas de energía. No obstante, tratándose de edificios con periodos mayores a 0.3 segundos (aproximadamente tres niveles), se emplearían tres o más disipadores, haciendo que el trabajo en serie de éstos logre demandas menores y en consecuencia, un mejor desempeño. Esto abre la posibilidad para para usar este tipo de CRP en edificios de tres o más niveles. El estudio de esos casos es objeto de otra tesis.

REFERENCIAS

- American Institute Of Steel Construction, AISC 341, (2016) *Seismic provisions for structural steel buildings*.
- Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros, (2019) *Crónicas de seis siglos de sismos en México: lecciones aprendidas y perspectivas*. México.
- Base de datos de registros acelerográficos de la RAI-UNAM, (2020). <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM>, fecha de consulta: octubre 2019.
- Clark, P. et al., 1999. *Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices*. Santa Barbara, California. 68va convención SEAOC (1999).
- Comisión Federal de Electricidad, (2008) *Manual de diseño de Obras Civiles*. México.
- Cotacallapa, R. P., (2017) *Análisis de un edificio asimétrico de 10 niveles de concreto armado con amortiguadores de masa sintonizada*. Arequipa, Perú: Universidad Nacional de San Agustín.
- García, J. E., (2020). *Caracterización experimental de disipadores de energía sísmica de bajo costo*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- Sabelli, R., Mahin, S., & Chang, C. (2003). *Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces*. Engineering structures, 25, 655-666.
- Salazar, R. M., (2001) *Dispositivos para el control de vibraciones*. Valdivia, Chile: Facultad de Ciencias de la Ingeniería.
- Sánchez, D., (2020) *Simulación híbrida de una estructura equipada con disipadores tipo BRB*. México: Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- SSN, Servicio Sismológico Nacional, (2016) *Sismicidad en México*. Recuperado de <http://www.ssn.unam.mx/divulgacion/carteles/>, fecha de consulta: octubre 2019.

REFERENCIAS

SGM, Sistema Geológico Mexicano, (2017) *Tectónica de placas, Museo virtual*. Recuperado de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>, fecha de consulta: octubre 2019.