



Manual de diseño de estructuras equipadas con disipadores histeréticos

Engineering,
technology
& infrastructure.

DAMPO



DAMPO

ÍNDICE

Capítulo 1. Legales	1
Capítulo 2. Presentación	2
2.1. Nosotros	2
2.2. Servicios	2
2.3. Contacto	2
Capítulo 3. Objetivo del manual.....	3
Capítulo 4. Sistemas innovadores de protección sísmica.....	4
Capítulo 5. Disipadores histeréticos	6
Capítulo 6. Disipadores Dampo.....	7
6.1. Dampo 1505	8
6.2. Dampo dual protect.....	9
Capítulo 7. Conceptos generales para análisis	10
7.1. Sistema primario y secundario	10
7.2. Análisis de fuerzas y desplazamientos	11
7.3. Distorsiones de entrepiso	12
7.4. Fuerzas Cortantes de entrepiso.....	13
7.5. Modelado de disipadores	15
Capítulo 8. Criterios de análisis y diseño.....	39
8.1. Pasos para diseñar una estructura equipada con disipadores.	39
8.2. Criterios de análisis.....	41
8.3. Consideraciones de diseño	42
Capítulo 9. Ejemplo de aplicación	43
9.1. Diseño de la estructura (Paso 1).....	43
9.2. Análisis modal espectral (Paso 2)	46



DAMPO

9.3. Fuerza cortante en el sistema secundario (Pasos 3 y 4)	47
9.4. Ubicación de disipadores por piso (Paso 5)	48
9.5. Fuerza de diseño en los disipadores (Paso 6)	49
9.6. Rigidez de los disipadores (Paso 7).....	52
9.7. Modelado de los disipadores (Paso 8).....	55
9.8. Análisis modal espectral (Paso 9)	59
Capítulo 10. Comentarios finales.....	62
Capítulo 11. Referencias.....	62
Apéndice A. Propiedades del disipador Dampo 1505.....	64
Apéndice B. Propiedades del disipador Dampo Dual Protect.	66
Apéndice C. Análisis dinámico no lineal, tipo paso a paso, de un edificio de 6 niveles	69



DAMPO

CAPÍTULO 1. LEGALES

La información contenida en el presente manual se proporciona como un medio de consulta para los procesos de análisis y modelación sugeridos enfocados en incorporar disipadores histeréticos en el diseño de estructuras. Sin embargo, el desarrollo de los temas no pretende ser exhaustivo o definitivo y debe ser complementado con literatura especializada.

La información y procedimientos presentados deben conciliarse con los requerimientos de códigos, normas y reglamentos de construcción locales previo a su aplicación. Los procedimientos sugeridos deben ser utilizados únicamente por ingenieros con conocimientos en análisis y diseño estructural bajo su propia responsabilidad. Dampo Systems S.A. de C.V. queda fuera de cualquier responsabilidad derivada del uso de este manual.



DAMPO

CAPÍTULO 2. PRESENTACIÓN

2.1. NOSOTROS

Dampo Systems S.A. de C.V. está conformado por un equipo de ingenieros civiles especialistas en sistemas innovadores de protección sísmica (SIPS), apasionados por la aplicación de nuevas tecnologías al desarrollo y gestión de infraestructura. Somos una empresa dedicada al desarrollo e implementación de SIPS.

Brindamos soluciones para el desarrollo de infraestructura segura y competitiva, así como la intervención de estructuras existentes, permitiéndoles alcanzar niveles de seguridad elevados a costos competitivos. Nuestros productos están enfocados a cualquier tipo de estructura, por ejemplo: edificios de uso habitacional, oficinas, hospitales, escuelas, estadios, cines, plazas comerciales, entre otros. Se pueden aplicar tanto para estructuras nuevas y existentes.

Nuestro principal compromiso es promover las mejores prácticas de ingeniería, impulsando la resiliencia de la infraestructura con sistemas que permiten incrementar la seguridad estructural y el buen desempeño en toda la vida útil de las construcciones.

2.2. SERVICIOS

Brindamos asesoría estructural para el modelado, diseño e instalación de sistemas innovadores de protección sísmica, como: aisladores de base, amortiguadores viscosos, amortiguadores histeréticos como contraenteos restringidos al pandeo (CRPs, también conocidos como BRBs por sus siglas en inglés de *Buckling-Restrained Braces*), entre otros.

Contamos con una amplia gama de sistemas innovadores para la protección sísmica de estructuras.

Realizamos evaluaciones de riesgo sísmico para edificaciones, diagnóstico del desempeño estructural, y estimación de pérdidas estructurales y de contenidos. Además, realizamos análisis refinados (por ejemplo: análisis dinámico no lineal) y proyecto estructural en general.

2.3. CONTACTO

Empresa: Dampo Systems S.A. de C.V.

Teléfono: 5534116953 o 5544864484

Página: www.dampo.com.mx



DAMPO

CAPÍTULO 3. OBJETIVO DEL MANUAL

Este manual está dirigido a ingenieros civiles, arquitectos y personas interesadas en implementar disipadores de energía sísmica de tipo histerético en sus proyectos estructurales.

El objetivo del manual es proporcionar información sobre los siguientes temas: sistemas de protección sísmica y como mejoran el comportamiento de las estructuras; disipadores histeréticos; características de los disipadores de Dampo Systems S.A. de C.V.; conceptos generales y métodos de análisis de estructuras con disipadores; consideraciones de diseño en estructuras con disipadores; y un ejemplo de diseño de un edificio de seis niveles.

Es la intención del manual que los temas tratados sirvan como introducción a los sistemas de protección sísmica y sus ventajas. Además, que los métodos sugeridos faciliten la implementación de disipadores de energía sísmica en diseños estructurales. Y finalmente, que se cuente con toda la información necesaria para modelar disipadores en programas comerciales de análisis estructural.



DAMPO

CAPÍTULO 4. SISTEMAS INNOVADORES DE PROTECCIÓN SÍSMICA

Los sistemas innovadores de protección sísmica (SIPS) tienen como objetivo mejorar el desempeño estructural ante acciones sísmicas. Las mejoras más comunes son: incrementar el amortiguamiento, disipar la energía del sismo o aislar la estructura del suelo. En la Figura 1 se esquematizan dos estructuras, del lado izquierdo muestra una estructura convencional, y del lado derecho una equipada con SIPS. El objetivo es mostrar que, ante eventos sísmicos, la implementación de SIPS permite reducir significativamente las deformaciones laterales (y en consecuencia los daños).

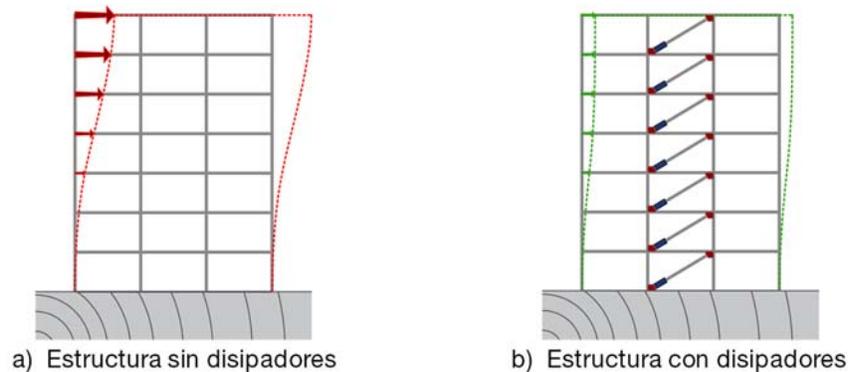


Figura 1 Reducción de deformaciones laterales por la implementación de SIPS

El control de deformaciones laterales con la implementación de SIPS tiene múltiples beneficios en el diseño estructural y en el desempeño de la estructura antes y después de los sismos. Entre los beneficios se pueden enlistar:

- Se reducen los elementos mecánicos en vigas y columnas, esto permite reducir las secciones y obtener estructuras más ligeras.
- Se reducen las velocidades y aceleraciones de piso durante el movimiento sísmico; con lo cual se protegen los contenidos, y se mejora la seguridad y el confort de las personas
- Bajan las distorsiones de entrepiso y por tanto se reducen considerablemente los daños esperados en elementos estructurales y no estructurales.
- Se reducen los tiempos y costos de construcción, así como los de reparación post sismo. Inclusive, es muy probable que las estructuras se puedan ocupar de forma inmediata después de un sismo con implicaciones positivas en la productividad de empresas y en la atención de personas. Esto es especialmente importante en hospitales, bancos, empresas diversas, escuelas, plantas industriales, así como infraestructura e instalaciones estratégicas.



DAMPO

Los SIPS se pueden instalar en estructuras nuevas o existentes. Su diseño se puede hacer usando metodologías tradicionales o innovadoras (basadas en desplazamientos).

La forma más común de instalar estas tecnologías es por medio contravientos en los marcos. En la Figura 2 se esquematizan dos tipos de dispositivos comunes. Del lado izquierdo se muestra un contraviento restringido a pandeo (CRP), y del lado derecho un dispositivo que concentra la disipación de energía en un extremo y se complementa con un perfil de acero.



Figura 2 Esquema de colocación de disipadores

Una de las grandes ventajas de los SIPS es que funcionan como fusibles estructurales; es decir, son dispositivos reemplazables que absorben y disipan la energía de los sismos. Al absorber la energía concentran el daño en ellos y lo reducen considerablemente en otras zonas de la estructura.

En la Figura 3 se esquematizan dos estructuras, del lado izquierdo se muestra una estructura convencional, en la cual la disipación de energía se logra a través de la distribución de articulaciones plásticas en los elementos estructurales que acumulan daño. Por su parte, del lado derecho se muestra una estructura equipada con disipadores, donde el daño ocurre únicamente en el disipador.

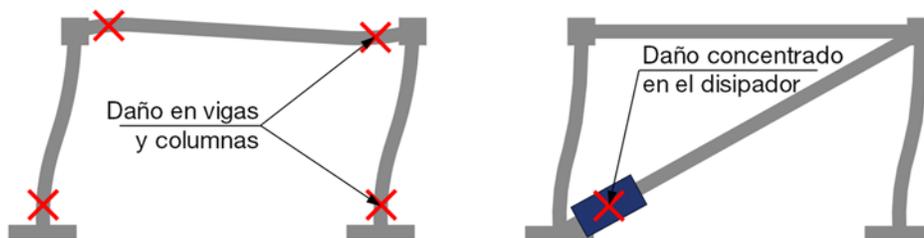


Figura 3 Concentración de daño con y sin disipadores

Idealmente, si los dispositivos absorben toda la energía del sismo, la estructura se mantendrá en su intervalo elástico y no existirá ningún daño estructural que reparar. Una ventaja adicional de incluir SIPS en las estructuras es que, si los dispositivos se degradan, éstos simplemente se sustituyen por dispositivos nuevos y la estructura recupera su condición inicial.



DAMPO

CAPÍTULO 5. DISIPADORES HISTERÉTICOS

Los SIPS se clasifican por el tipo de aportación que realizan a las estructuras, ya sea que aporten amortiguamiento o aislamiento. Los que aportan amortiguamiento se clasifican como pasivos, activos o semiactivos de acuerdo con su funcionamiento. Los sistemas pasivos son aquellos que se encuentran listos para funcionar en cualquier momento y no dependen de otro sistema para garantizar su desempeño, haciéndolos más confiables (Christopoulos, et al., 2006).

Dentro de los disipadores pasivos se incluye a los amortiguadores histeréticos, los cuales, dependen del desplazamiento relativo entre sus extremos y el desarrollo de comportamiento inelástico para disipar energía. Estos amortiguadores se pueden fabricar con elementos metálicos y así aprovechar su comportamiento histerético cuando se deforman fuera del intervalo elástico. En este grupo de disipadores se incluyen a los contravientos restringidos a pandeo y a los disipadores Dampo 1505, comercializados por Dampo Systems S.A. de C.V., que son tratados en el presente manual.

En la Figura 4 se muestran unas curvas que relacionan carga con desplazamiento, o curvas de histéresis, de una prueba experimental realizada a un disipador pasivo metálico de Dampo Systems S.A. de C.V. En las curvas se puede observar el comportamiento inelástico del metal cuando se supera la fuerza de fluencia del dispositivo. También es relevante observar el comportamiento es estable y simétrico en cada curva, tanto en tensión como en compresión, ya que para desplazamientos de la misma magnitud se tiene fuerzas de la misma magnitud. Por ejemplo, para desplazamientos de 40 mm en ambas direcciones se tienen fuerzas de 25 toneladas.

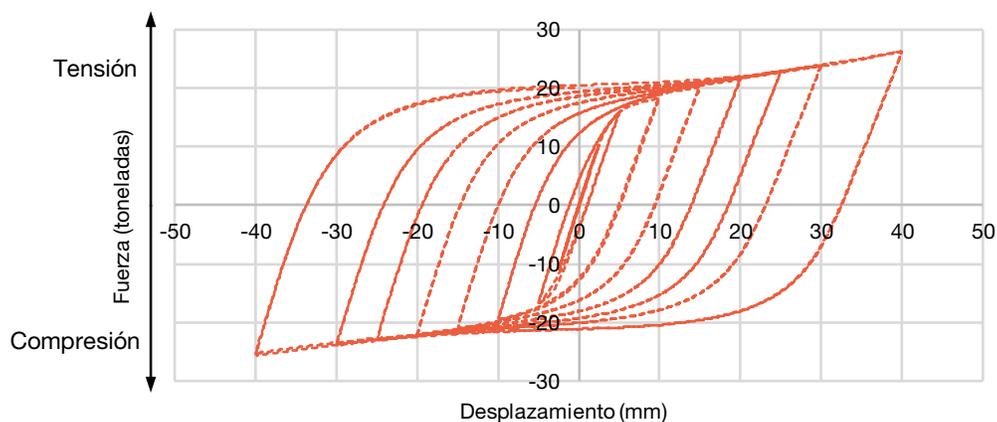


Figura 4 Curvas de histéresis de un disipador pasivo metálico de Dampo Systems SA de CV



DAMPO

En las curvas de histéresis también se observa la cantidad de energía que disipa el dispositivo en un ciclo de carga. En la Figura 5 se presenta la curva de histéresis de un ciclo de carga y se identifica el área dentro de la curva. Esta área corresponde a la cantidad de energía disipada en ese mismo ciclo de carga. De la misma forma, el área de todos los ciclos de histéresis desarrollados durante un sismo corresponde a la energía total disipada por el dispositivo.

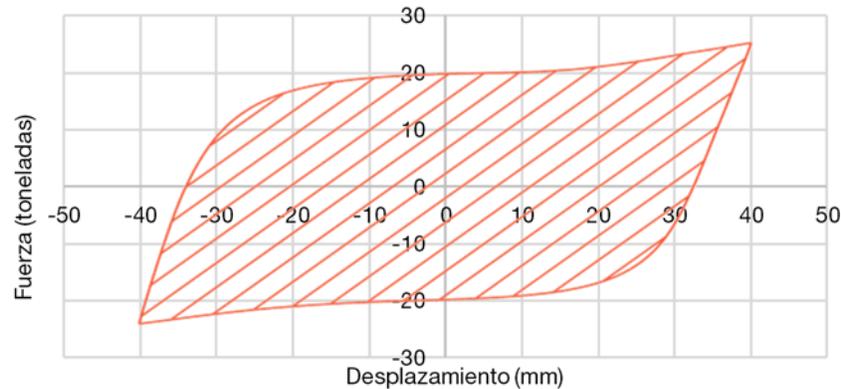


Figura 5 Energía disipada en un ciclo de carga al disipador histerético

Observando el comportamiento de las curvas de histéresis, se pueden identificar los parámetros principales que definen el desempeño de un disipador histerético, entre los cuales se incluye: la fuerza de fluencia; la rigidez; y el desplazamiento de fluencia. Otro parámetro importante es la rigidez post fluencia dado que el endurecimiento por deformación del acero incrementa el área en las curvas de histéresis.

En los disipadores histeréticos es importante conocer el desplazamiento máximo permitido, ya que se relaciona con la durabilidad, la seguridad y la capacidad de disipación. Esto se debe a que deformaciones en exceso degradan rápidamente el material y provocan fallas prematuras.

Entre las ventajas de los disipadores histeréticos metálicos se pueden enlistar las siguientes:

- Proporcionan rigidez lateral a la estructura
- Son dispositivos pasivos confiables
- Resisten fuerzas laterales independiente de su velocidad, como las cargas de viento
- Las pruebas de calidad se pueden realizar con mayor precisión
- Absorben la energía del sismo y concentran el daño en ellos
- Están hechos de acero, que es un material relativamente económico y confiable. Además, ha sido ampliamente estudiado y estandarizado
- Un mantenimiento adecuado conserva las características del disipador a lo largo del tiempo
- No son sensibles a los cambios ambientales de temperatura



DAMPO

CAPÍTULO 6. DISIPADORES DAMPO

6.1. DAMPO 1505

Dampo 1505 es un disipador de energía sísmica de tipo hysterético desarrollado y patentado en México. El dispositivo aprovecha el comportamiento hysterético del acero por medio de deformaciones plásticas. Su diseño innovador posibilita cualquier combinación de resistencia y desplazamiento requerido. Es un dispositivo compacto con redundancia en sus elementos resistentes y la confiabilidad de un material ampliamente caracterizado y estandarizado.

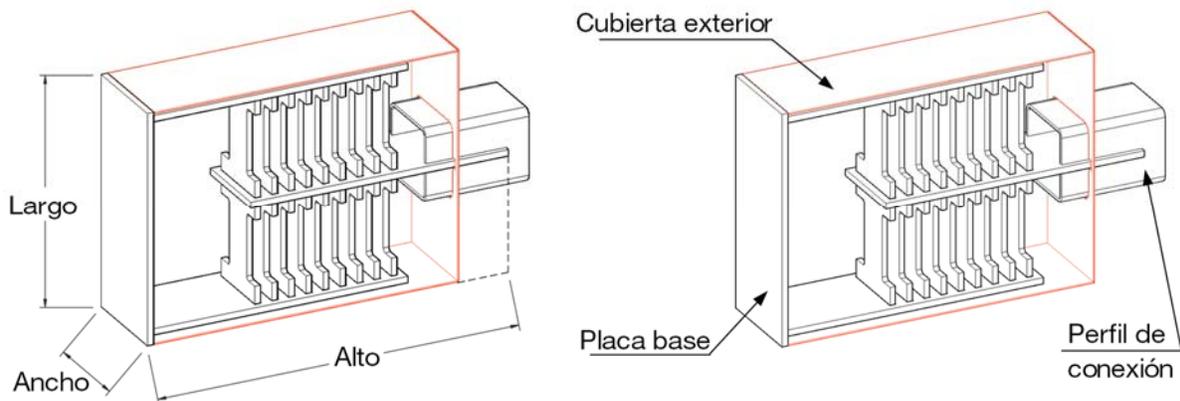


Figura 6 Características generales del disipador Dampo 1505

Gracias a su diseño, el disipador Dampo 1505 presenta un comportamiento no lineal estable, tanto en tensión como en compresión, como se observa en la curva experimental de la Figura 7a. Este desempeño lo hace ideal para incorporarlo en estructuras sismorresistentes. Los dispositivos se instalan en línea con contravientos de conexión, como se esquematiza en la Figura 7b.

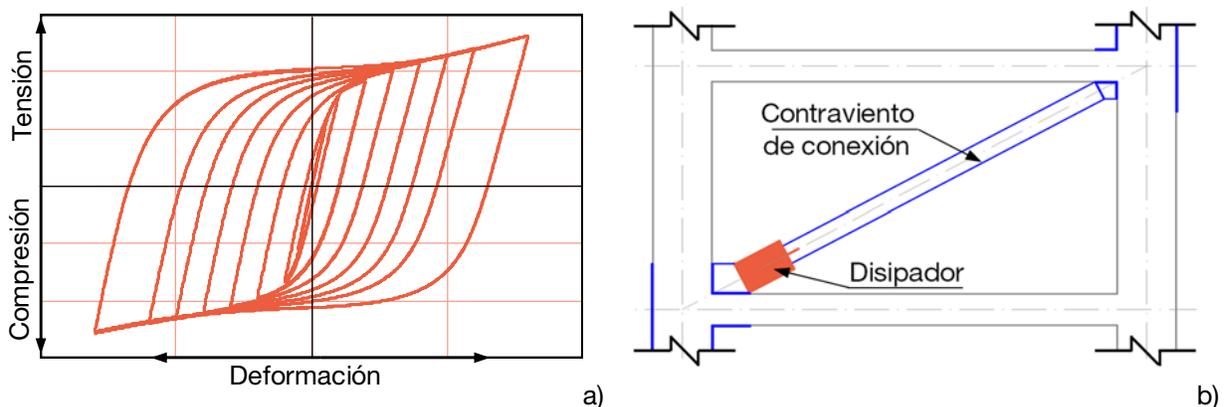


Figura 7 Curvas de histéresis y esquema de colocación del disipador Dampo 1505



DAMPO

6.2. DAMPO DUAL PROTECT

Dampo Dual Protect es un disipador de energía sísmica tipo contraviento restringido al pandeo. Fue desarrollado y patentado en México por la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente, Dampo Systems S.A. de C.V. cuenta con el licenciamiento para comercializarlo.

El dispositivo aprovecha el comportamiento histerético del acero por medio de deformación axial en el núcleo. La plastificación del acero se logra tanto para cargas de tensión como de compresión gracias a la funda que rodea el núcleo y evita el pandeo. Además, la innovadora funda de acero permite evaluar la integridad del núcleo desde el exterior después de un sismo. La geometría del disipador posibilita diferentes resistencias y puede sustituir a contravientos convencionales.

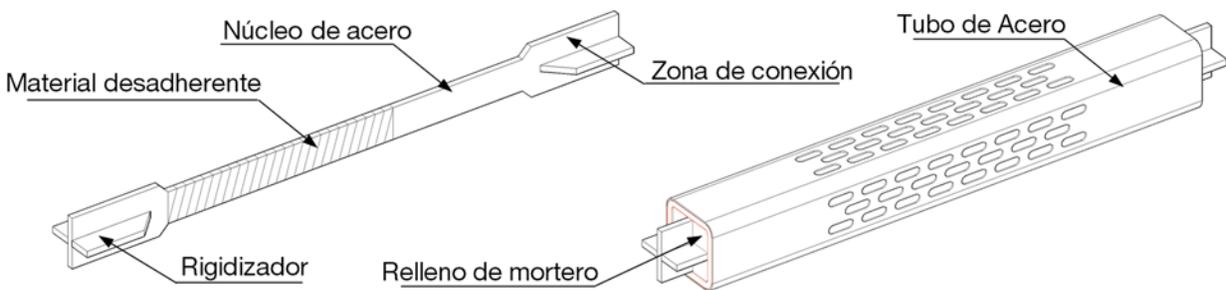


Figura 8 Características generales del disipador Dampo Dual Protect

El diseño del disipador Dampo Dual Protect permite un comportamiento no lineal estable tanto en tensión como en compresión, como se observa en la Figura 9a, haciéndolo ideal para el diseño de estructuras sismorresistentes. Los dispositivos se instalan como un contraviento convencional como se esquematiza en la Figura 9b.

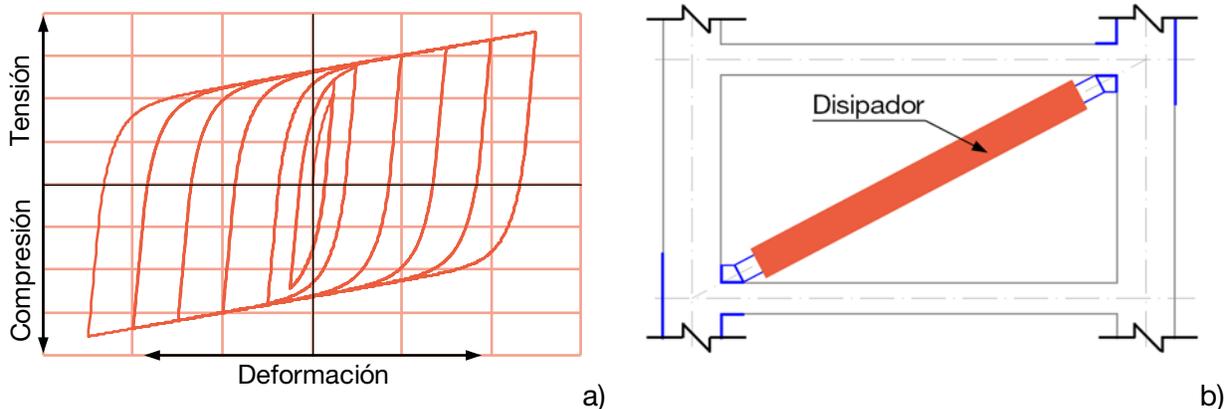


Figura 9 Curvas de histéresis y croquis de colocación del disipador Dampo Dual Protect



CAPÍTULO 7. CONCEPTOS GENERALES PARA ANÁLISIS

7.1. SISTEMA PRIMARIO Y SECUNDARIO

En una estructura equipada con disipadores, se define como sistema primario al que se compone por las trabes y columnas de la estructura; y es capaz de resistir tanto fuerzas laterales como gravitacionales. Los marcos formados por las trabes y columnas pueden ser de acero o de concreto. El sistema secundario es el compuesto por los disipadores y sus conexiones. Se considera que el sistema secundario únicamente resiste fuerzas laterales.

En la Figura 10 se presenta un ejemplo de una estructura de marcos, reforzada con disipadores sísmicos conectados por la parte exterior. En este ejemplo, el sistema secundario se compone de disipadores compactos complementados con contravientos de conexión indicados en color azul, así como las placas de conexión en color rojo. Por otro lado, el sistema primario corresponde a las trabes y columnas las cuales se definen con líneas grises. Se aclara que los disipadores pueden instalarse exteriormente (lo que es utilizado en algunos proyectos de refuerzo de estructuras), o interiormente (lo que es comúnmente utilizado en edificaciones nuevas).

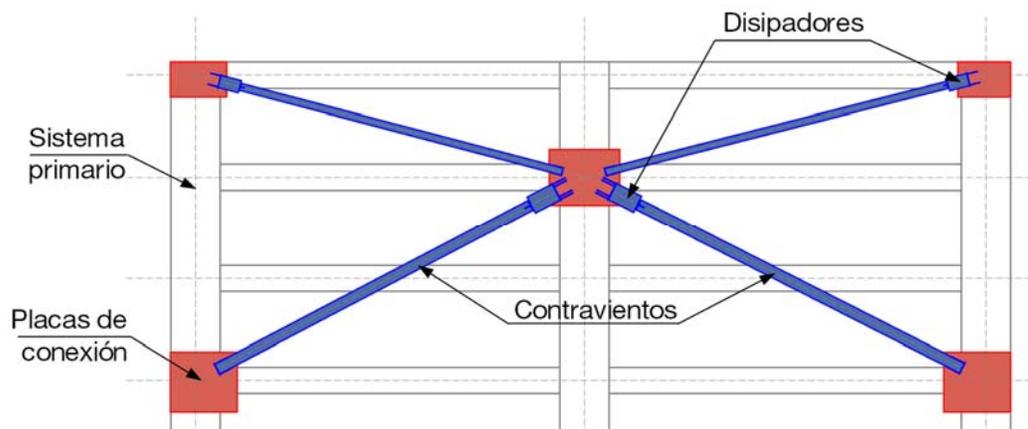


Figura 10 Identificación de elementos en una estructura equipada con disipadores



7.2. ANÁLISIS DE FUERZAS Y DESPLAZAMIENTOS

La proporción de fuerzas y desplazamientos que se impone a cada uno de los sistemas depende de la geometría del sistema primario, la distribución de los disipadores en los marcos y las rigideces de los elementos. Sin embargo, para determinar de forma preliminar las fuerzas y desplazamientos impuestos en el sistema secundario se puede hacer uso del siguiente análisis geométrico.

En la Figura 11 se esquematiza un marco articulado con dos configuraciones, la configuración original indicada con línea continua y una configuración deformada indicada con línea discontinua. Esta última configuración se debe a la acción de una fuerza lateral (F_x) en su parte superior. Esta fuerza provoca un desplazamiento lateral del marco (Δ). Considerando que el desplazamiento es relativamente pequeño, el ángulo del contraviento (θ) se considera prácticamente igual en ambas configuraciones.

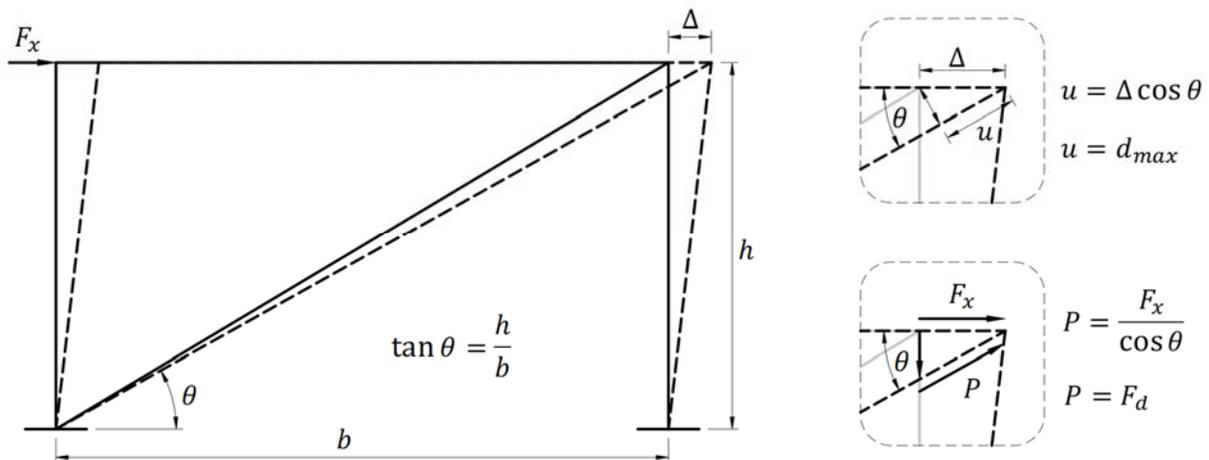


Figura 11 Análisis geométrico

Con la configuración deformada del marco, se obtiene una ecuación para el desplazamiento en el contraviento (u) y otra para la fuerza actuante (P), ambas en función del ángulo θ .

$$u = \Delta \cos \theta \quad (1)$$

donde u es el desplazamiento axial del contraviento, Δ es el desplazamiento lateral del marco y θ es el ángulo que forma el contraviento con la horizontal.

$$P = \frac{F_x}{\cos \theta} \quad (2)$$

donde P es la fuerza actuante en el contraviento y F_x es la fuerza lateral que actúa sobre el marco



Los resultados de las ecuaciones (1) y (2) se pueden asociar a características de los disipadores que se busca incorporar. Por ejemplo, el desplazamiento axial del contraviento (u) se puede asociar con el desplazamiento máximo permitido (d_{max}) en el disipador. De la misma forma, la fuerza actuante en el contraviento (P) se puede asociar con la fuerza de diseño (F_d) del disipador. Estas relaciones también se muestran en la Figura 11.

Por otro lado, en las ecuaciones (1) y (2) se pueden proponer valores para el desplazamiento lateral (Δ) y la fuerza lateral (F_x). Las propuestas se realizan en función de las características de la estructura y las demandas sísmicas. Estas últimas dependen de la ubicación de la estructura. Con los valores propuestos es posible obtener características preliminares de los disipadores.

7.3. DISTORSIONES DE ENTREPISO

El objetivo principal de instalar disipadores consiste en mejorar la respuesta de la estructura ante eventos sísmicos. Uno de los parámetros que se puede evaluar para observar las mejoras en el desempeño son las distorsiones máximas de entrepiso (γ_{max}). La distorsión de entrepiso se define como el cociente entre el desplazamiento lateral relativo de un entrepiso y la altura, como se muestra en la ecuación (3),

$$\gamma = \Delta/h \quad (3)$$

donde γ es la distorsión de entrepiso, Δ es el desplazamiento relativo de un entrepiso y h es la altura del entrepiso.

En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (NTC Sismo, 2017) se incluyen tablas que indican las distorsiones máximas permitidas para cada tipo de estructura. La información de esas tablas puede servir como referente para proponer las características de los disipadores.

Para ejemplificar la relación entre la distorsión y la definición de un disipador consideremos el marco mostrado en la Figura 12. Este marco esquematiza una estructura de marcos de acero de ductilidad baja a la cual se le ha instalado un contraviento. Se busca determinar el desplazamiento lateral del marco y la deformación axial del contraviento.

De acuerdo con la tabla 4.2.2 de las NTC Sismo (2017), a este tipo de estructura le corresponde una distorsión máxima de 0.015. Por lo tanto, utilizando la ecuación (3), el desplazamiento lateral máximo será igual a:

$$\Delta = \gamma * h \quad ; \quad \Delta = 0.015 * 300 \text{ cm} = 4.5 \text{ cm}$$



DAMPO

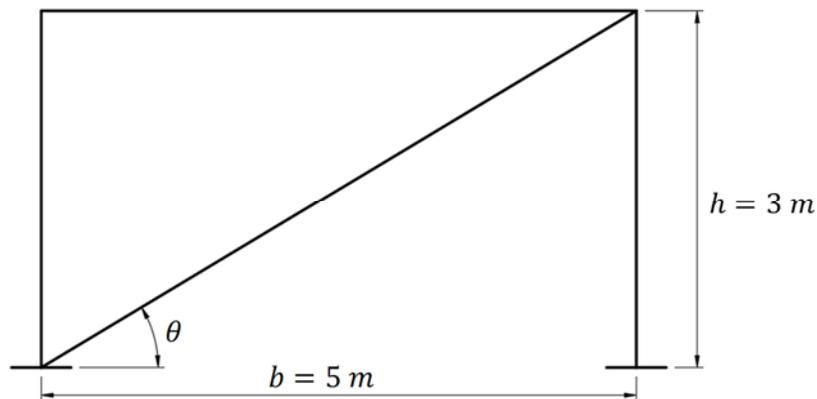


Figura 12 Esquema de un marco estructural para una distorsión dada

Usando la ecuación (1), se puede calcular la magnitud del desplazamiento en el contraviento que es igual a:

$$u = \Delta \cos \theta = 4.5 \cos(31^\circ) = 3.86 \text{ cm}$$

A partir del desplazamiento calculado, se puede proponer, para una primera revisión, un disipador con capacidad de desplazamiento de al menos 3.9 cm. A manera de ejemplo, en la tabla A.1 del Apéndice A existen disipadores con capacidad de deformación de 4 cm, que se pueden seleccionar, considerando varias capacidades de carga, para el marco de la Figura 12.

Cabe destacar que la distorsión seleccionada depende del criterio del estructurista. Es posible proponer distorsiones menores, digamos cercanas a 0.01, que mantengan al sistema primario en su intervalo elástico-lineal, inclusive ante eventos sísmicos intensos. Con dicho criterio únicamente ocurrirían daños menores en elementos no estructurales.

7.4. FUERZAS CORTANTES DE ENTREPISO

Las fuerzas cortantes de entrepiso para diseño por sismo se pueden obtener con los métodos descritos en las NTC Sismo (2017), en los capítulos 6 o 7. Estas fuerzas dependen de la zona donde se ubica la estructura y sus características. Dependiendo de la magnitud de las fuerzas se puede orientar la decisión de utilizar SIPS para controlar los desplazamientos o ajustar las secciones de los elementos estructurales.

Una vez calculadas las fuerzas cortantes de entrepiso es posible predefinir la fuerza de diseño de los disipadores. Para esto se pueden tomar dos criterios: el primero consiste en seleccionar un porcentaje de la fuerza que tomarán los disipadores; y el segundo requiere conocer la resistencia de la estructura existente o por construir y proporcionar la capacidad faltante con



DAMPO

los disipadores. Cabe mencionar que las NTC Sismo (2017), solicitan que en sistemas duales el sistema primario soporte por lo menos el 30% de las fuerzas cortantes.

Para cualquier criterio adoptado, la fuerza de diseño de los disipadores se puede predefinir a partir del análisis geométrico de la sección 7.2. Para ejemplificar el procedimiento consideremos el marco esquematizado en la Figura 13. A este marco se le ha instalado un contraviento y se le aplica una fuerza cortante $V_x = 50t$. Se busca determinar la fuerza de diseño en el contraviento. Para esto, se toma el criterio de que el contraviento tome el 50% de la fuerza total.

Usando la ecuación (2), se puede calcular la fuerza aproximada en el contraviento, que es:

$$P = \frac{F_x}{\cos \theta} = 50\% * \frac{50t}{\cos(31^\circ)} = 29.16 t$$

A partir de la fuerza calculada, se puede proponer para una primera revisión un disipador con fuerza de diseño cercana a 29.2 t. En la tabla A.1 del Apéndice A existen disipadores con fuerza de diseño de 30 t, por lo tanto, se puede seleccionar alguno que cumpla con el desplazamiento máximo requerido.

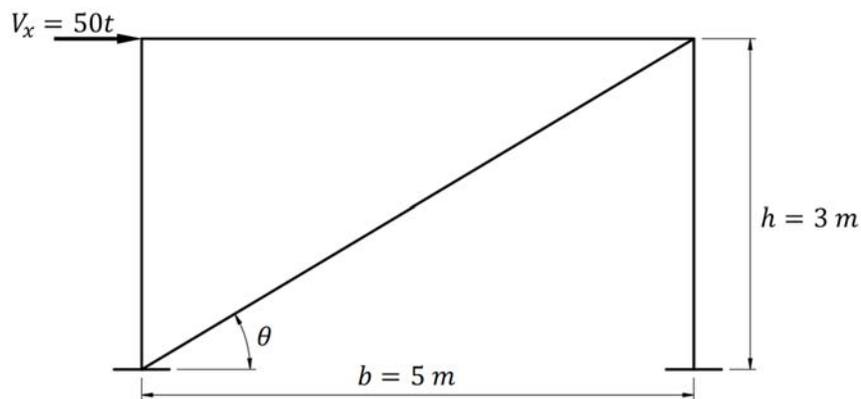


Figura 13 Esquema de un marco estructural para una distorsión dada

Cabe destacar que el porcentaje de fuerza que toma el disipador depende del criterio del estructurista. Se pueden tomar otras aproximaciones para definir la fuerza de diseño, entre ellas se encuentran: proporcionar la resistencia faltante a un diseño estructural existente; diseñar la estructura para soportar al menos el 30% de la fuerza lateral como se indica en las NTC Sismo (2017) y el resto dirigirlo a los disipadores; o realizar un diseño por cargas gravitacionales y proporcionar la resistencia lateral faltante con disipadores. En todos los casos se debe revisar que se cumplan todos los criterios y restricciones que se indican en la reglamentación.



DAMPO

7.5. MODELADO DE DISIPADORES

Los disipadores hysteréticos se pueden modelar directamente en programas comerciales de análisis estructural. Un enfoque de modelación muy conveniente consiste en usar elementos equivalentes que emulen el comportamiento hysterético del disipador mediante modelos numéricos. Utilizando estos modelos se aporta mucha eficiencia en el análisis estructural sin perder consistencia en la respuesta de los dispositivos.

En la Figura 14 se esquematiza la idealización de los disipadores como elementos equivalentes con comportamiento hysterético equiparable. Las propiedades del dispositivo como rigidez (k), fuerza de diseño (F_d) y peso (W) se utilizan para definir el elemento equivalente cuya relación carga – desplazamiento está gobernada por un modelo numérico.

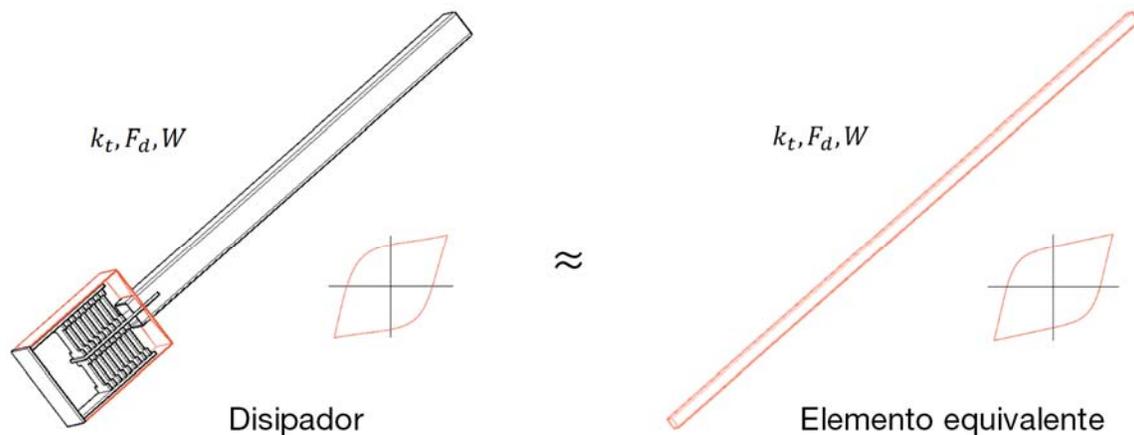


Figura 14 Idealización del comportamiento de los disipadores

Los elementos equivalentes, recomendados en este manual, se denominan en algunos programas como “links” o “resortes”. Éstos permiten utilizar varios modelos numéricos de comportamiento no lineal. Para los disipadores hysteréticos de Dampo Systems se recomienda utilizar el modelo de Bouc-Wen en ocasiones denominado como Plastic-Wen. Dicho modelo requiere de dos parámetros adicionales, la rigidez post fluencia y el exponente de fluencia. Estos parámetros ya se han calibrado para cada tipo de dispositivo a partir de pruebas experimentales. Los valores se presentan en las secciones siguientes.



7.5.1. Disipadores Dampo 1505

Los disipadores Dampo 1505 se pueden modelar en programas comerciales de análisis como un elemento equivalente. Para ejemplificarlo, se muestra el procedimiento de modelación de un elemento equivalente en el programa de análisis estructural Etabs (2016). Para esto, se utilizan los datos de un disipador modelo “100/3”, descrito posteriormente en el ejemplo del Capítulo 9. Este disipador tiene una fuerza de diseño $F_d = 100 t$ y un desplazamiento máximo $d_{max} = 3 cm$. Para conectar el disipador a la estructura se utiliza una sección de acero tipo HSS 10x1/2 con 6.7 m de longitud.

Para modelar los disipadores Dampo 1505 es importante considerar las características del contraviento de conexión (CVC). Esto implica realizar el análisis de la rigidez y el peso del sistema disipador-contraviento de conexión (S-DC). En la Figura 15 se esquematiza dicho sistema, indicando la longitud del contraviento (L_{cvc}) medida a partir de la sección donde se une con él disipador. También, se denominan las variables de peso y rigidez de cada elemento.

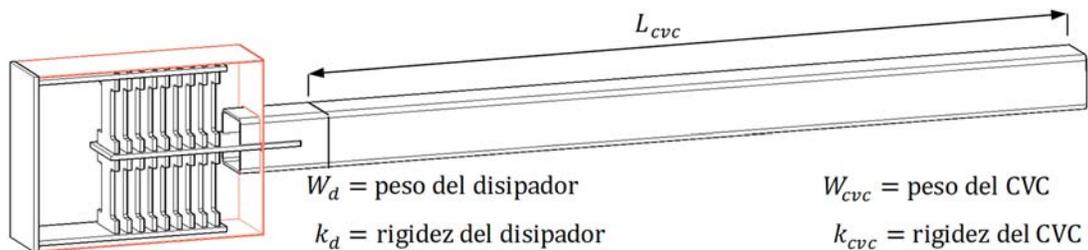


Figura 15 Definición de variables para la modelación

7.5.1.1. Cálculo de las propiedades

Para calcular la rigidez total (k_t), el peso total (W_t) y la masa total (M_t) del S-CD se requieren las características de cada elemento del sistema. Con este propósito se obtienen los datos del disipador de la Tabla A.1 del Apéndice A y los datos de la sección HSS se obtienen, por ejemplo, del Manual IMCA en su 5ª edición (IMCA, 2014)

Primero se presenta el cálculo de la rigidez total, la cual se obtiene en dos pasos:

Paso 1. se calcula la rigidez del CVC con la siguiente ecuación:

$$k_{cvc} = \frac{A_{cvc}E}{L_{cvc}} \quad (4)$$

donde E es el módulo de elasticidad del acero, A_{cvc} es el área transversal de la sección de acero y L_{cvc} es la longitud del CVC como se muestra en la Figura 15.



DAMPO

Para el ejemplo se considera una sección HSS 10x1/2, por lo tanto, la rigidez del CVC es:

$$k_{cvc} = \frac{A_{cvc}E}{L_{cvc}} = \frac{111.0 \text{ cm}^2 * 2,040,000 \text{ kg/cm}^2}{670 \text{ cm}} * \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} = 33,797 \frac{\text{kg}}{\text{mm}}$$

Paso 2. se calcula la rigidez total del S-DC con el inverso de la suma de los inversos de las rigideces del CVC y del dissipador con la siguiente ecuación:

$$k_t = \frac{1}{1/k_d + 1/k_{cvc}} \quad (5)$$

donde k_t es la rigidez del S-DC que se denomina rigidez total y k_d es la rigidez del dissipador.

Para el ejemplo se definió un dissipador modelo "100/3". Su rigidez se obtiene de la Tabla A.1 del Apéndice A y tiene un valor de $k_d = 24,600 \frac{\text{kg}}{\text{mm}}$. Con este dato se obtiene el siguiente resultado para la rigidez total:

$$k_t = \frac{1}{\frac{1}{k_d} + \frac{1}{k_{cvc}}} = \frac{1}{\frac{1}{24,600} + \frac{1}{33,797}} = 14,237 \frac{\text{kg}}{\text{mm}}$$

A continuación, se presenta el cálculo del peso total, el cual se obtiene igualmente en dos pasos:

Paso 1. se calcula el peso del CVC con la siguiente ecuación:

$$W_{cvc} = W_{HSS} * L_{cvc} \quad (6)$$

donde W_{cvc} es el peso del contraviento de conexión y W_{HSS} es el peso por metro lineal de la sección de acero.

Considerando el valor de peso por metro lineal de la sección HSS 10x1/8 obtenido de IMCA (2014) se tiene el siguiente resultado:

$$W_{cvc} = W_{HSS} * L_{cvc} = 92.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 6.7 \text{ m} = 621.8 \text{ kg}$$

Paso 2. se calcula el peso total del S-DC con la suma del peso del CVC y el peso del dissipador como se muestra en la siguiente ecuación:

$$W_t = W_d + W_{cvc} \quad (7)$$

donde W_t es el peso del S-DC denominado peso total y W_d es el peso del dissipador.



DAMPO

Utilizando el peso del disipador modelo “100/3” obtenido de la Tabla A.1 del Apéndice A y el peso del CVC calculado previamente, se obtiene como resultado:

$$W_t = W_d + W_{cvc} = 364 \text{ kg} + 622 \text{ kg} = 986 \text{ kg}$$

A continuación, se presenta el cálculo la masa la cual se obtiene de forma directa a partir del valor del peso total (W_t) con la siguiente ecuación:

$$M_t = W_t / g \quad (8)$$

donde M_t es la masa del S-DC denominada masa total y g es la aceleración de la gravedad considerada con un valor de $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

Con el peso total del S-DC calculado, cuyo valor es $W_t = 986 \text{ kg}$, se obtiene una masa de:

$$M_t = \frac{W_t}{g} = \frac{986}{9.8} = 100.6 \frac{\text{kg s}^2}{\text{m}}$$

Finalmente, se revisa la resistencia a compresión axial (R_{cvc}) de la sección definida como CVC. Se recomienda que esta resistencia sea, al menos, dos veces la fuerza de diseño del disipador. En este ejemplo el disipador modelo “100/2” tiene una fuerza de diseño 100 t, es decir, se recomienda un CVC con resistencia de al menos 200 t.

La resistencia de la sección definida como CVC se calcula utilizando las ecuaciones de la sección 5.2.1 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero (NTC Acero, 2017). Dichas ecuaciones se presentan a continuación:

$$R_c = F_R * \chi * F_y * A \quad (9)$$

donde R_c es la resistencia a compresión axial de un elemento de eje recto y sección constante, F_R es el factor de resistencia, igual a 0.9, χ es el factor de reducción por esbeltez, F_y es el esfuerzo nominal de fluencia del acero y A es el área transversal de la sección de acero.

$$\chi = \left[1 + \left(\frac{F_y}{F_e} \right)^n \right]^{-1/n} \quad (10)$$

donde n es un coeficiente adimensional que depende de la sección y el tipo de acero utilizado y F_e es el esfuerzo crítico de Euler.



DAMPO

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{(K * L / r)^2} \quad (11)$$

donde K es el factor de longitud efectiva, L es la longitud del elemento y r es el radio de giro de la sección.

Ahora se calcula la resistencia del CVC con las características de la sección HSS 10x1/2. Primero, se sustituyen valores en la ecuación (11) donde $L = L_{cvc} = 670 \text{ cm}$, $r = r_{cvc} = 9.8 \text{ cm}$ y $K = 1$ con lo cual se obtiene:

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{(K * L_{cvc} / r_{cvc})^2} = \frac{\pi^2 * 2,040,000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{(1 * 670 \text{ cm} / 9.8 \text{ cm})^2} = 4307.6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Después, se sustituyen valores en la ecuación (10) con un esfuerzo de fluencia $F_y = 3,515 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ y un valor de $n = 1.4$ obtenido de las NTC Acero (2017), con esto resulta:

$$\chi = \left[1 + \left(\frac{F_y}{F_e} \right)^n \right]^{-1/n} = \left[1 + \left(\frac{3,515 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{4,307.6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right)^{1.4} \right]^{-1/1.4} = 0.67$$

Finalmente, se sustituyen valores calculados en la ecuación (9) donde $A = A_{cvc} = 111 \text{ cm}^2$ y $F_R = 0.9$ con lo cual se obtienen:

$$R_{cvc} = F_R * \chi * F_y * A_{cvc} = 0.9 * 0.67 * 3,515 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 111 \text{ cm}^2 * \frac{1 \text{ t}}{1000 \text{ kg}} = 235.3 \text{ t}$$

Con este análisis se verifica que la resistencia a la compresión axial del CVC es superior a la resistencia recomendada de 200 t. A partir de este resultado se puede asegurar que el disipador alcanza la fuerza de fluencia esperada antes de que ocurra la falla del CVC y, por tanto, el dispositivo incursiona en el intervalo de deformación inelástica.



DAMPO

7.5.1.2. Definición en programa de análisis estructural

A continuación, se muestra el proceso de modelado de los disipadores en Etabs (2016). Para esto es necesario definir un elemento con los parámetros calculados previamente. El elemento utilizado en el programa es denominado “link”. Para definirlo es necesario entrar en el menú “Define” – “Section Properties” – “Link/Support Properties”, como se muestra en la Figura 16.

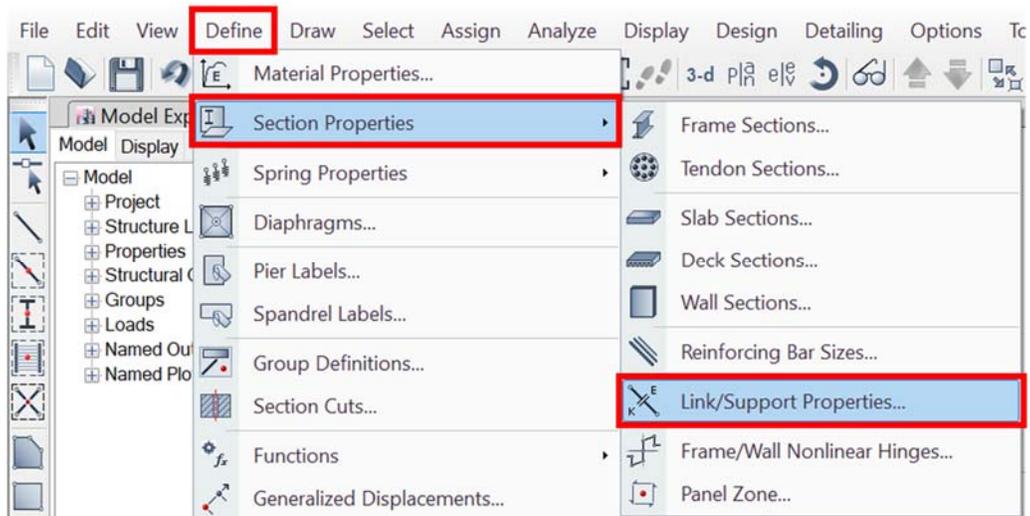


Figura 16 Acceso a la definición de “link” en Etabs (2016)

Posteriormente se activará una ventana donde se enlistan los “links” definidos. Dicha ventana se muestra en la figura la Figura 17. En la nueva ventana se debe seleccionar el botón de “Add New Property” como se indica.

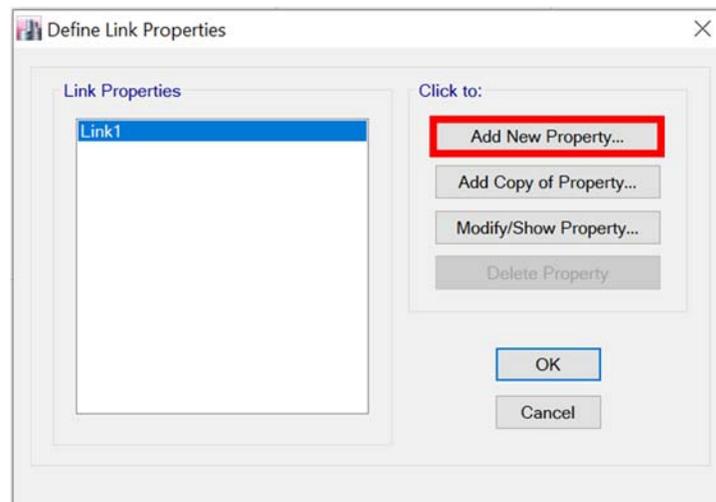


Figura 17 Agregar nuevo elemento tipo “link”



DAMPO

A continuación, se activa una ventana (Figura 18) donde se capturan las características del elemento equivalente. En la figura se indican, con un número consecutivo, las casillas que se capturan o modifican. Estos números corresponden con la información que se presenta en la siguiente lista:

- 1) Se asigna un nombre único al elemento. Para esto, se recomienda utilizar el modelo del disipador seleccionado. En este ejemplo el modelo del disipador es “100/3”
- 2) Se selecciona el tipo de “link” que corresponde al modelo numérico. Para el disipador Dampo 1505 se recomienda el modelo “Plastic (Wen)”
- 3) Se captura el peso total (W_t) del S-DC calculado con la ecuación (7) y la masa total (M_t) calculada con la ecuación (8)
- 4) Se define la inercia rotacional del elemento. Se recomienda utilizar el valor de cero (0) en las tres direcciones
- 5) Se selecciona la casilla para la dirección de análisis “U1” que corresponde a la dirección axial del elemento. También se activa la casilla que define al elemento como no lineal.
- 6) Se selecciona el botón “Modify/Show for U1” para activar la ventana donde se definen el resto de los parámetros del elemento

The screenshot shows the 'Link Property Data' dialog box with the following details:

- General:** Link Property Name: 100/3; Link Type: Plastic (Wen).
- Total Mass and Weight:** Mass: 100.6 kgf-m²/m; Weight: 986 kgf; Rotational Inertia 1, 2, and 3: 0 kgf-m-s².
- Directional Properties:** Direction U1 is checked, NonLinear is checked. The 'Modify/Show for U1...' button is highlighted.

Figura 18 Definición del elemento equivalente en Etabs (2016)



DAMPO

En la Figura 19 se presenta la ventana para capturar la información que ajusta el modelo numérico al comportamiento del disipador. En dicha figura se indican, con un número consecutivo, las casillas que se capturan. Estos números corresponden con la información que se obtuvo previamente la cual se describe en la siguiente lista:

- 1) La rigidez lineal efectiva (k_t) del S-DC. Calculada con la ecuación (5).
- 2) El amortiguamiento efectivo se recomienda que sea cero (0) como valor conservador.
- 3) La rigidez no lineal efectiva cuyo valor es igual a la rigidez lineal efectiva (k_t).
- 4) La fuerza de fluencia que corresponde a la fuerza de fluencia esperada (F_{fe}) del dispositivo, este valor se obtiene de la Tabla A.1 del Apéndice A. Para el disipador modelo "100/3" el valor es $F_{fe} = 130 t$
- 5) Relación de rigidez post fluencia que tiene el valor de 0.05 calibrado con datos experimentales de acuerdo con (García Mora Pinto, et al., 2020).
- 6) Exponente de fluencia que tiene el valor de 1.2 calibrado con datos experimentales de acuerdo (García Mora Pinto, et al., 2020).

Section	Property	Value	Unit
Identification	Property Name	100/3	
	Direction	U1	
	Type	Plastic (Wen)	
	NonLinear	Yes	
Linear Properties	Effective Stiffness (1)	14240	kgf/mm
	Effective Damping (2)	0	kgf-s/mm
Nonlinear Properties	Stiffness (3)	14240	kgf/mm
	Yield Strength (4)	130000	kgf
	Post Yield Stiffness Rat (5)	0.05	
	Yielding Exponent (6)	1.2	

Figura 19 Definición de parámetros para ajustar el modelo numérico



DAMPO

Una vez capturada toda la información se selecciona “Ok” en todas las ventanas y se guardan todos los cambios. Una vez asignadas las propiedades es posible dibujar el elemento por medio del menú “Draw” – “Draw links” que se muestra en la Figura 20.

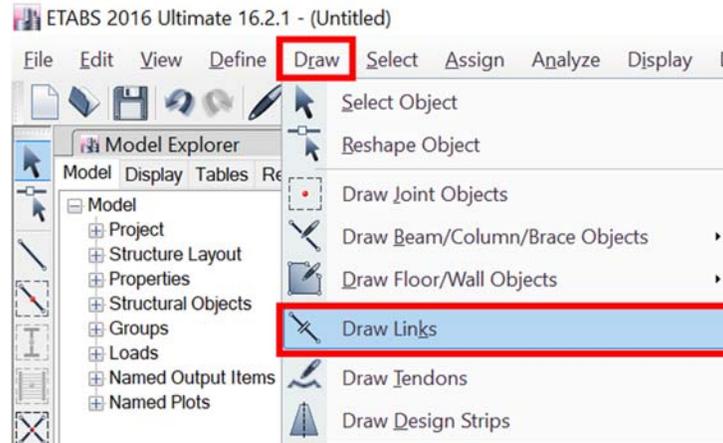


Figura 20 Menú de dibujo de elementos tipo “link”

Finalmente, en la Figura 21 se presenta una vista de la modelación del elemento tipo “link” colocado como diagonal en un marco estructural. Se puede observar un símbolo representativo en la parte central del elemento que permite identificarlo entre el resto de los elementos que conforman la estructura.

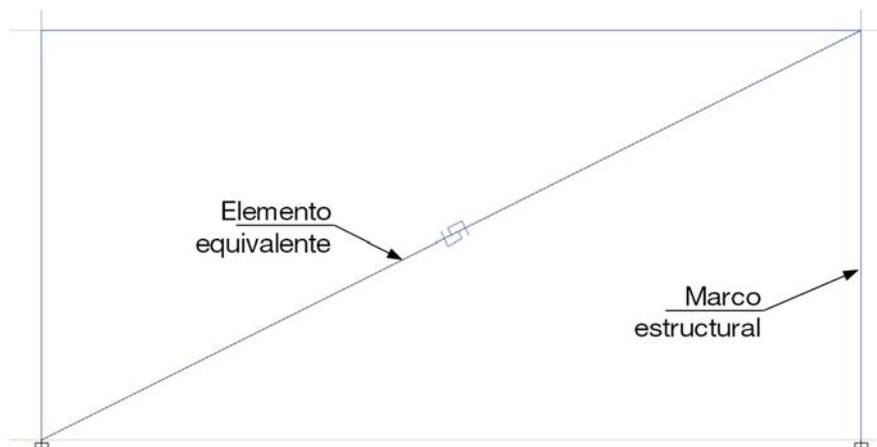


Figura 21 Elemento equivalente colocado en un marco de la estructura



DAMPO

Para dibujar un marco en Etabs (2016) se recomienda tener en la vista una elevación de la retícula que sirve de guía para la estructura como se observa en la Figura 22. Esto se puede lograr presionando el icono indicado en la misma figura y seleccionando un eje para visualizarlo.

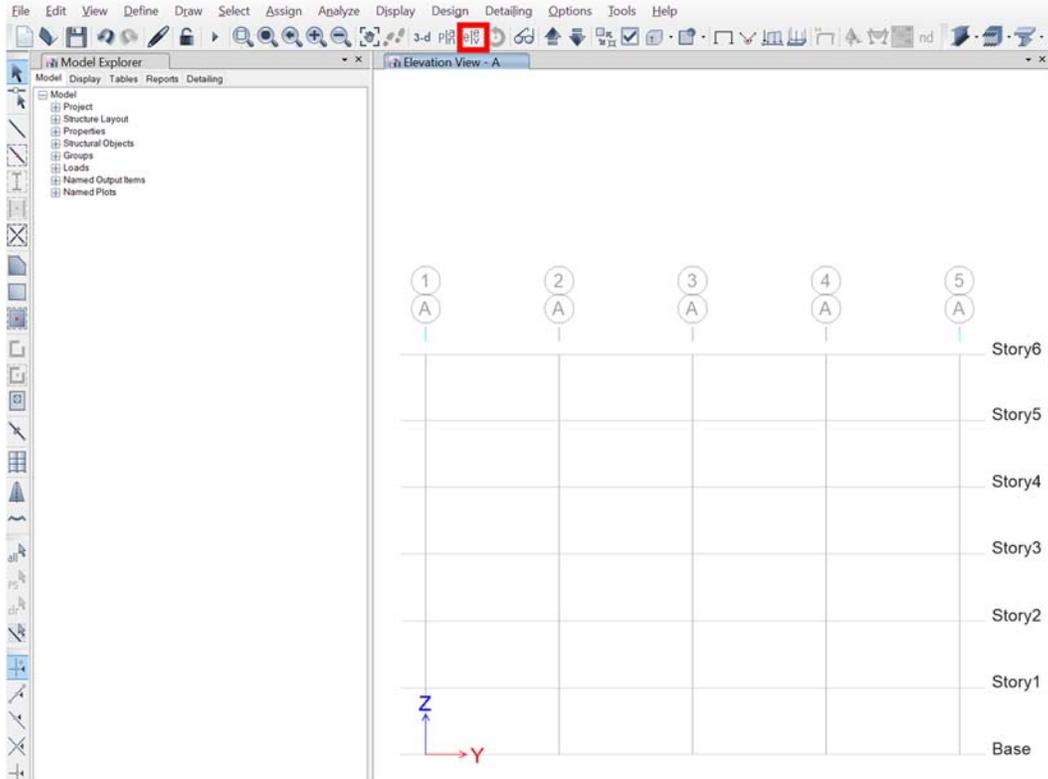


Figura 22 Vista de elevación en la interfaz gráfica de Etabs (2016)

Posteriormente, para dibujar el marco es necesario entrar al menú “Draw” – “Draw Beam/Column/Brace” o presionar el icono indicado en la Figura 23 para dibujar elementos tipo barra.

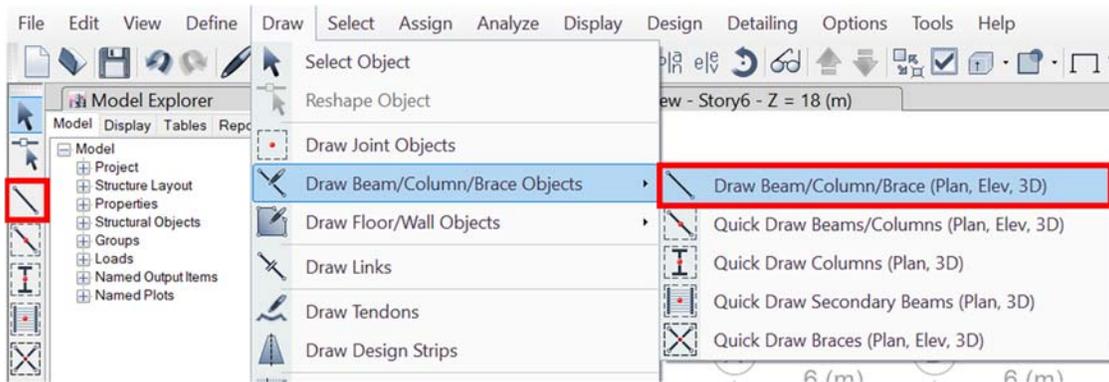


Figura 23 Ruta para dibujar elementos tipo barra



DAMPO

Después se debe seleccionar el tipo de sección que se requiere dibujar. Esto se logra presionando en la lista desplegable que aparece en la parte inferior izquierda (1). Esta ventana aparece una vez activada la función de dibujar. En la lista se localiza la sección deseada y se presiona para activarla (2) como se observa en la Figura 24.

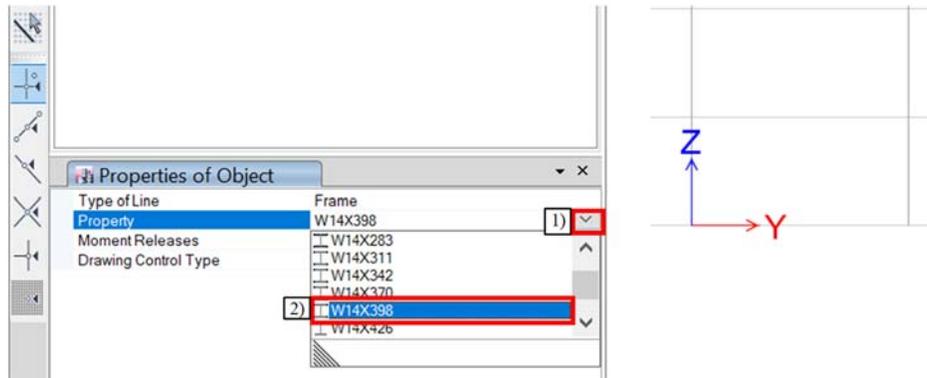


Figura 24 Selección del tipo de sección a dibujar

Con el puntero del ratón se indica sobre la retícula de Etabs el punto inicial del elemento que se va a dibujar, ya sea columna o trabe, y se da “click” como se indica en la parte izquierda de la Figura 25. Posteriormente, se indica el punto final sobre la retícula y se vuelve a dar “click” como se observa en la parte derecha de la figura.

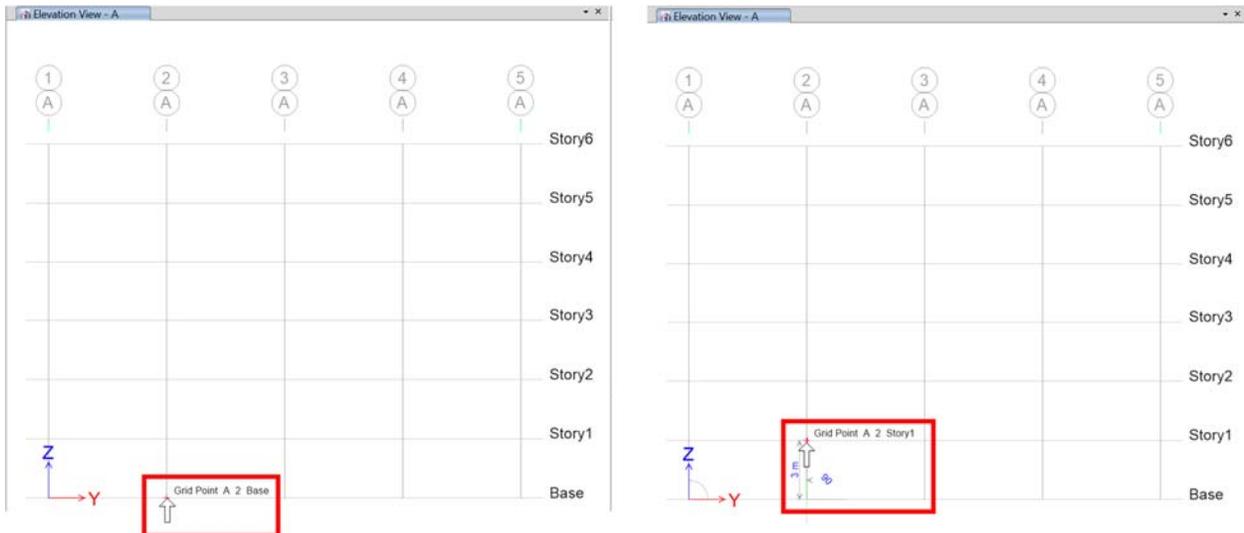


Figura 25 Dibujo de un elemento barra sobre la retícula



DAMPO

Se puede continuar seleccionando puntos finales sobre la retícula si se desea continuar dibujando, por ejemplo, una columna hasta la parte superior, como se observa en la parte izquierda de la Figura 26. Si se desea dibujar una nueva columna o trabe se debe presionar la tecla “Enter” y se puede iniciar el dibujo de un nuevo elemento con la misma sección. Como se observa en la parte derecha de la figura.

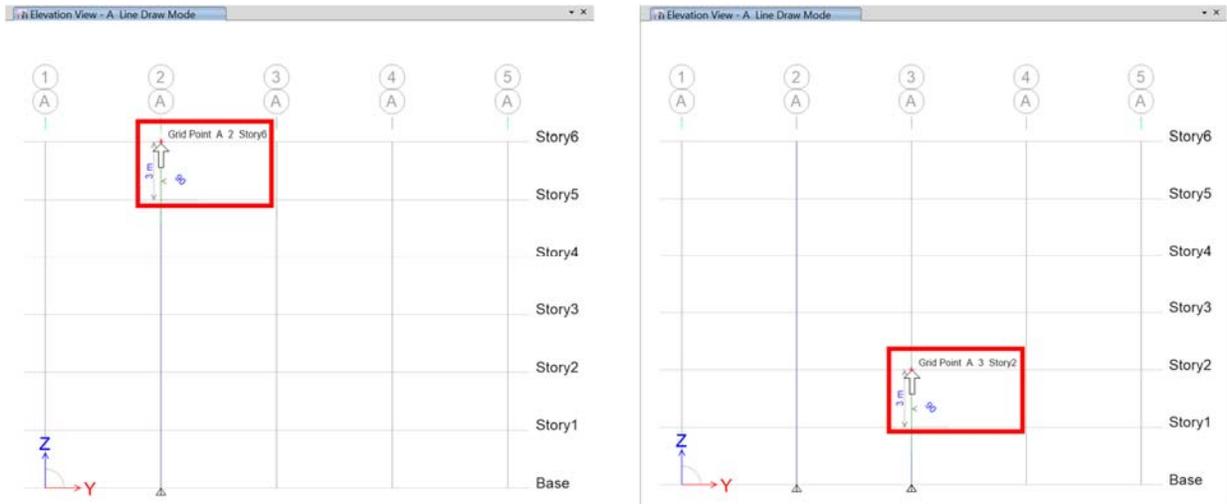


Figura 26 Dibujo de elementos tipo barra

Cabe mencionar que las columnas se pueden dibujar en una sola operación desde la parte inferior hasta el último piso. Existen herramientas útiles para duplicar elementos ya dibujados en el menú “*Edit – Replicate*” como se observa en la Figura 27.

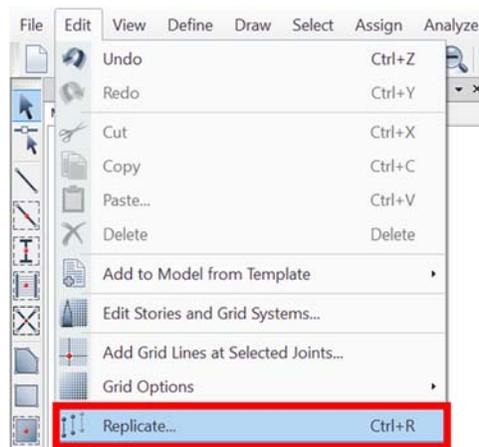


Figura 27 Comando replicar en el menú “Edit”

Es importante destacar que en cualquier momento durante el dibujo de elementos se puede cambiar la sección utilizada. Finalmente, para concluir con el dibujo se presiona la tecla “Esc”.



DAMPO

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los parámetros que se deben preparar para definir los elementos tipo “link” en el programa Etabs (2016) y las ecuaciones generales para obtener los valores de peso, masa y rigidez efectiva del S-DC.

Tabla 1. Parámetros para definir el elemento equivalente en programas de análisis

Tipo de “link”	Masa	Peso	Inercia rotacional	Dirección de propiedades
Plastic Wen	$M_t = W_t/g$ (ec. (8))	$W_t = W_d + W_c$ (ec. (7))	$R_1 = R_2 = R_3 = 0$	U_1
Rigidez efectiva	Amortiguamiento	Fuerza de fluencia esperada	Relación de rigidez post fluencia	Exponente de fluencia
$\frac{1}{k_t} = \frac{1}{k_d} + \frac{1}{k_{cvc}}$ (ec. (5))	0	F_{fe} (Tabla A.1)	0.05	1.2

En la Figura 28 se muestran dos curvas de histéresis, una experimental y una numérica. La curva con línea punteada en color gris corresponde a datos experimentales. Los datos se midieron en una prueba realizada a un disipador Dampo 1505 con un protocolo de carga. La línea continua en color naranja corresponde a datos de un modelo numérico utilizando el mismo protocolo de carga que la prueba experimental.

Se observa que el comportamiento es muy similar entre ambas curvas, lo que indica que el comportamiento de estos disipadores se puede modelar con una precisión muy aceptable. Para mayor referencia sobre el proceso para obtener las curvas numéricas y la comparación se puede consultar el artículo *Recomendaciones de modelado de un disipador histerético mexicano* (García Mora Pinto, et al., 2020)

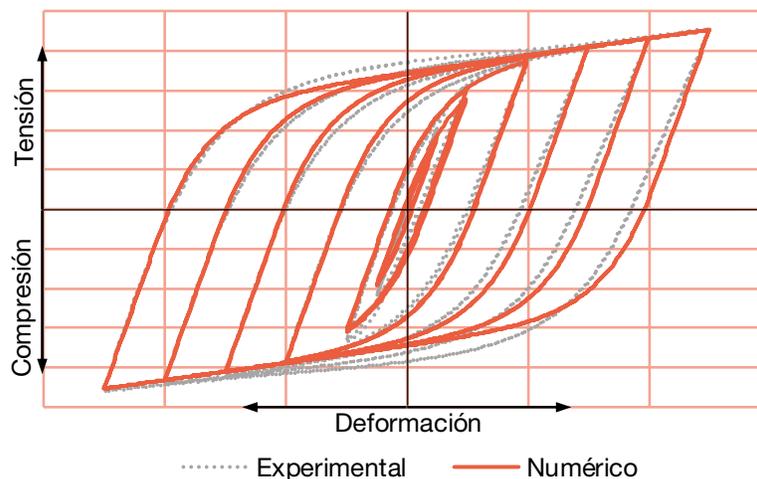


Figura 28 Curvas experimentales y modelo numérico del disipador Dampo 1505



DAMPO

7.5.2. Disipadores Dampo Dual Protect

Los disipadores Dampo Dual Protect se pueden modelar en programas comerciales de análisis como un elemento equivalente con comportamiento no lineal. Para ejemplificarlo, se muestra el procedimiento de modelación de un elemento equivalente en el programa de análisis estructural Etabs (2016). Para esto se utilizan los datos de un disipador seleccionado de la Tabla B.1 del 0, específicamente el modelo “240/6” con una fuerza de diseño $F_d = 240 t$ y una longitud $L = 6 m$.

En la Figura 29 se esquematiza un disipador Dampo Dual Protect. Se indica la longitud del dispositivo (L) y se denominan las variables de rigidez (k_D), fuerza de diseño (F_D) y peso del disipador (W_D).

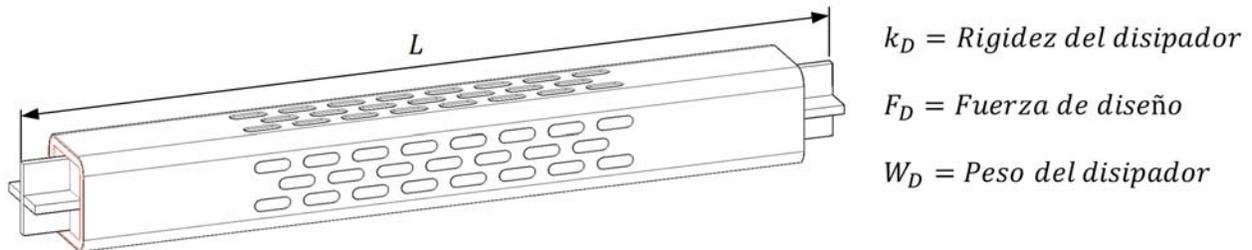


Figura 29 Definición de variables para la modelación

7.5.2.1. Cálculo de las propiedades

En la Tabla 2 se muestran los parámetros del disipador “240/6” requeridos para la modelación. En la primera columna se muestra el modelo del disipador. Posteriormente, se muestra la rigidez, la fuerza de fluencia esperada, el peso y la masa. La masa se calculó utilizando la ecuación (8) y ajustando las variables al disipador.

Tabla 2. Parámetros del disipador Dampo Dual Protect modelo “240/6”

Modelo	Rigidez efectiva k_D (kg/mm)	Fuerza de fluencia esperada F_{fe} (t)	Peso W_D (kg)	Masa M_D (kgf*s ² /m)
240/6	32370	267	1798	183.5

Cabe destacar la importancia de seleccionar una longitud de disipador adecuada a la geometría de la estructura. Cambiar la longitud del disipador modifica la rigidez del dispositivo de forma importante.



DAMPO

Por ejemplo, un disipador con la misma fuerza de diseño $F_d = 240 t$, pero una longitud $L = 8 m$, tiene una rigidez $k_D = 24,290 kg/mm$. Es decir, un incremento de 2 m en la longitud del disipador reduce la rigidez del dispositivo en 25%.

Un método alternativo para definir los parámetros del disipador es a partir de las condiciones de la estructura. Específicamente, con los requerimientos de fuerza de diseño y longitud del disipador. La fuerza de diseño se relaciona con la capacidad lateral que se necesita proporcionar a la estructura. Por otro lado, la longitud del disipador depende de la geometría de la estructura.

Para ejemplificar el proceso se utilizan las mismas características del disipador descrito en la Tabla 2. Suponiendo que se requiere un disipador con fuerza de diseño $F_d = 240 t$ y una longitud $L = 6 m$. El primer paso es calcular el área de la parte central del núcleo necesaria para proporcionar la fuerza de diseño, esto se logra con la siguiente ecuación:

$$F_D = A_n * F_y * F_R \quad (12)$$

donde A_n es el área de la parte central del núcleo del disipador, F_y es el esfuerzo de fluencia del acero con el que se fabrica el núcleo y F_R es un factor de reducción de resistencia cuyo valor se recomienda sea igual a 0.9.

Se propone un $F_y = 3515 kg/cm^2$ y se despeja el área del núcleo de la ecuación (12), con eso se obtiene el siguiente resultado:

$$A_n = \frac{F_D}{F_y * F_R} = \frac{240,000 kg}{3515 kg/cm^2 * 0.9} = 75.9 cm^2$$

Con este resultado se puede calcular la rigidez del dispositivo utilizando la ecuación (13). Esta ecuación utiliza el área de la parte central del núcleo del CRP (A_n) y la longitud total del dispositivo (L) para calcular la rigidez axial. Esta rigidez se ajusta utilizando un factor (f_k), que agrega la rigidez de las conexiones en los extremos. Estas conexiones se forman con el aumento de sección del núcleo y la inclusión de rigidizadores.

$$k_D = \frac{A_n E}{L} f_k \quad (13)$$

donde f_k es el factor de ajuste de la rigidez, E es el módulo de elasticidad del acero y L es la longitud requerida.



DAMPO

Para proponer un valor de f_k se puede inspeccionar la Tabla B.1 del 0 y buscar un disipador con las características requeridas. En la tabla referida se localiza el disipador con fuerza de diseño $F_d = 240 t$ y longitud $L = 6 m$ y se recupera el factor $f_k = 1.26$. Cabe mencionar que para valores de fuerza o longitud no presentes en la Tabla B.1 es válido interpolar linealmente entre dispositivos para obtener un valor aproximado de f_k .

Con el valor de $f_k = 1.26$ se sustituyen valores en la ecuación (13) y se obtiene lo siguiente:

$$k_D = \frac{A_n E}{L} f_k = \frac{75.9 \text{ cm}^2 * 2,040,000 \text{ kg/cm}^2}{6000 \text{ mm}} 1.26 = 32,516 \frac{\text{kg}}{\text{mm}}$$

Comparando el resultado de la ecuación con el valor de rigidez que se muestra en la Tabla B.1, cuyo valor es $k_D = 32,370 \text{ kg/mm}$, se puede observar que la diferencia es menor a 150 kg/mm . Si se expresa el error en forma porcentual se tiene:

$$\% \text{error} = \frac{32,516 - 32,370}{32,370} 100\% = 0.45\%$$

El error que se genera se debe al redondeo de factores, sin embargo el resultado de rigidez calculado es muy adecuado para modelar los disipadores y realizar análisis estructurales.



DAMPO

7.5.2.2. Definición en programa de análisis estructural

A continuación, se muestra el proceso de modelado de los disipadores en Etabs (2016). Para ejemplificarlo se define un elemento con los parámetros de la Tabla 2. El elemento utilizado en el programa es denominado “link”. Para definirlo es necesario entrar al menú “Define” – “Section Properties” – “Link/Support Properties”, como se muestra en la Figura 30.

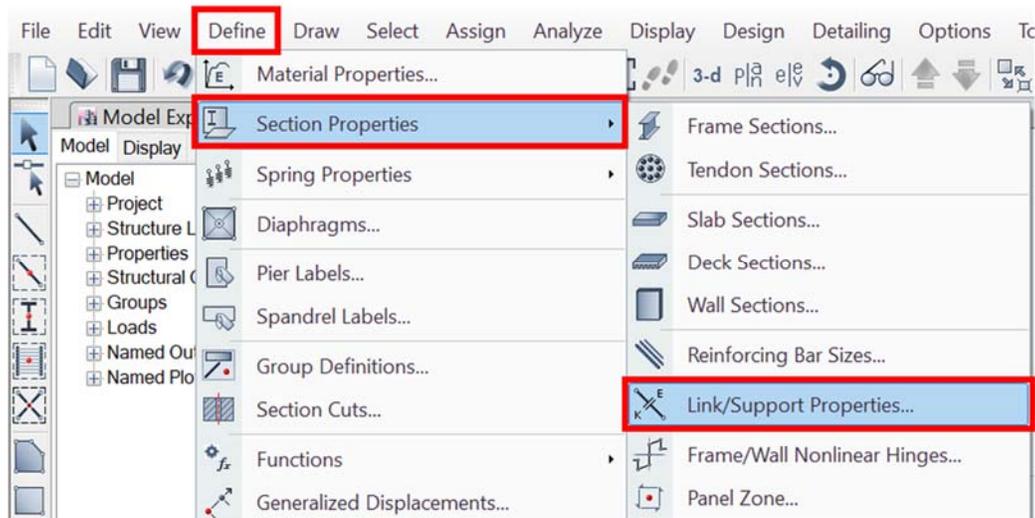


Figura 30 Acceso a la definición de “link” en Etabs (2016)

Posteriormente, se activará una ventana donde se enlistan los “links” definidos. Dicha ventana se muestra en la figura la Figura 31. En la nueva ventana se debe seleccionar el botón de “Add New Property” como se indica.

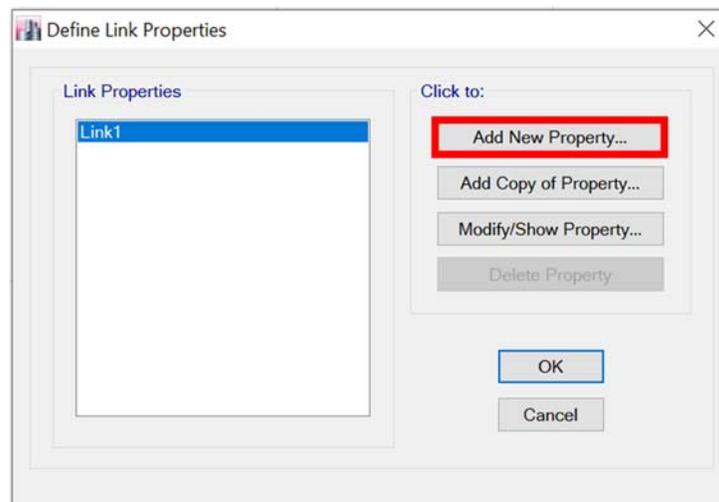


Figura 31 Agregar nuevo elemento tipo “link”



DAMPO

A continuación, se activa una ventana (Figura 32) donde se capturan las características del elemento equivalente. En la figura se indican, con un número consecutivo, las casillas que se capturan o modifican. Estos números corresponden con la información que se presenta en la siguiente lista:

- 1) Se asigna un nombre único al elemento. Para esto, se recomienda utilizar el modelo del dissipador seleccionado. En este ejemplo el modelo del dissipador es “240/6”
- 2) Se selecciona el tipo de “link” que corresponde al modelo numérico. Para el dissipador Dampo Dual Protect se recomienda el modelo “Plastic (Wen)”
- 3) Se captura el peso del dissipador (W_D) y la masa (M_D) mostrados en la Tabla 2
- 4) Se define la inercia rotacional del elemento. Se recomienda utilizar el valor de cero (0) en las tres direcciones
- 5) Se selecciona la casilla para la dirección de análisis “U1” que corresponde a la dirección axial del elemento. También, se activa la casilla que define al elemento como no lineal
- 6) Se selecciona el botón “Modify/Show for U1” para activar la ventana donde se definen el resto de los parámetros del elemento

The screenshot shows the 'Link Property Data' dialog box with the following details:

- General:** Link Property Name: 240/6; Link Type: Plastic (Wen).
- Total Mass and Weight:** Mass: 183.5 kg; Weight: 1798 tonf; Rotational Inertia 1, 2, and 3: 0 tonf-m-s².
- Directional Properties:** U1 is checked; NonLinear is checked; the 'Modify/Show for U1...' button is highlighted.

Figura 32 Definición del elemento equivalente en Etabs (2016)



DAMPO

En la Figura 33 se presenta la ventana para capturar la información que ajusta el modelo numérico al comportamiento del disipador. En dicha figura se indican, con un número consecutivo, las casillas que se capturan. Estos números corresponden con la información que se obtuvo previamente la cual se describe en la siguiente lista:

- 1) La rigidez lineal efectiva (k_D) del disipador, la cual se muestra en la Tabla 2.
- 2) El amortiguamiento efectivo se recomienda que sea cero (0) como valor conservador.
- 3) La rigidez no lineal efectiva cuyo valor es igual a la rigidez lineal efectiva (k_D).
- 4) La fuerza de fluencia que corresponde a la fuerza de fluencia esperada (F_{fe}) del dispositivo. También se incluye en la Tabla 2.
- 5) Relación de rigidez post fluencia que tiene el valor de 0.016 calibrado con datos experimentales de acuerdo con (García Mora Pinto, et al., 2020).
- 6) Exponente de fluencia que tiene el valor de 3 calibrado con datos experimentales de acuerdo con (García Mora Pinto, et al., 2020).

Section	Property Name	Value	Unit
Identification	Property Name	240/6	
	Direction	U1	
	Type	Plastic (Wen)	
	NonLinear	Yes	
Linear Properties	Effective Stiffness	32370	kgf/mm
	Effective Damping	0	tonf-s/mm
Nonlinear Properties	Stiffness	32370	kgf/mm
	Yield Strength	267	tonf
	Post Yield Stiffness Rat	0.016	
	Yielding Exponent	3	

Figura 33 Definición de parámetros para ajustar el modelo numérico



DAMPO

Una vez capturada toda la información se selecciona “Ok” en todas las ventanas y se guardan todos los cambios. Una vez asignadas las propiedades es posible dibujar el elemento por medio del menú “Draw” – “Draw links” que se muestra en la Figura 34.

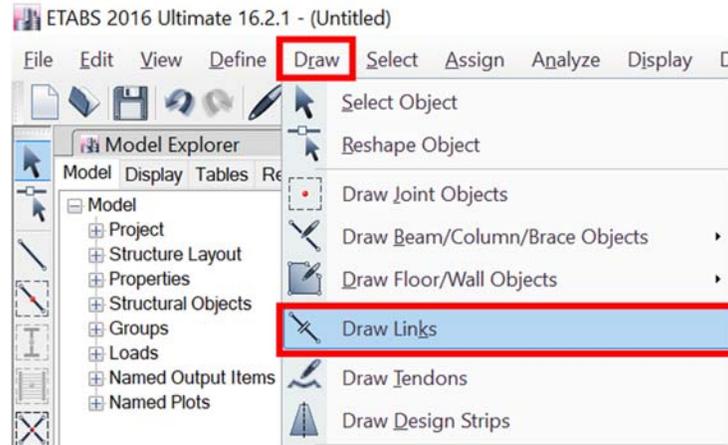


Figura 34 Menú de dibujo de elementos tipo “link”

Finalmente, en la Figura 35 se presenta una vista de la modelación del elemento tipo “link” colocado como diagonal en un marco estructural. Se puede observar un símbolo representativo en la parte central del elemento que permite identificarlo entre el resto de los elementos que conforman la estructura.

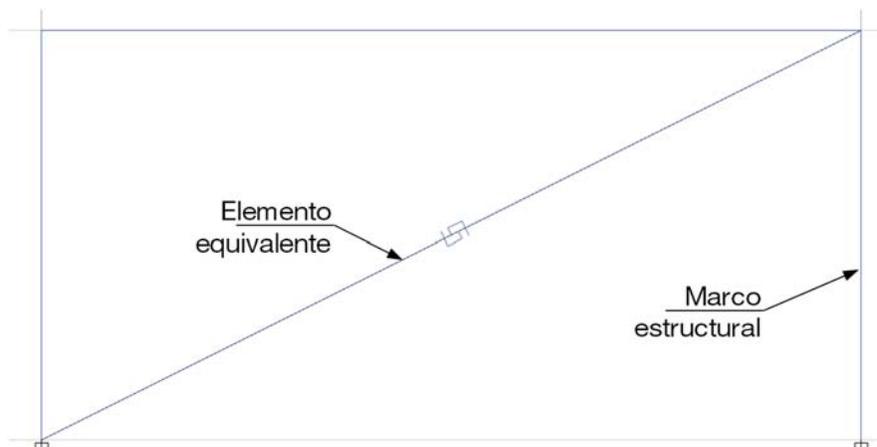


Figura 35 Elemento equivalente colocado en un marco de la estructura



DAMPO

Para dibujar un marco en Etabs (2016) se recomienda tener en la vista una elevación de la retícula que sirve de guía para la estructura como se observa en la Figura 36. Esto se puede lograr presionando el icono indicado en la misma figura y seleccionando un eje para visualizarlo.

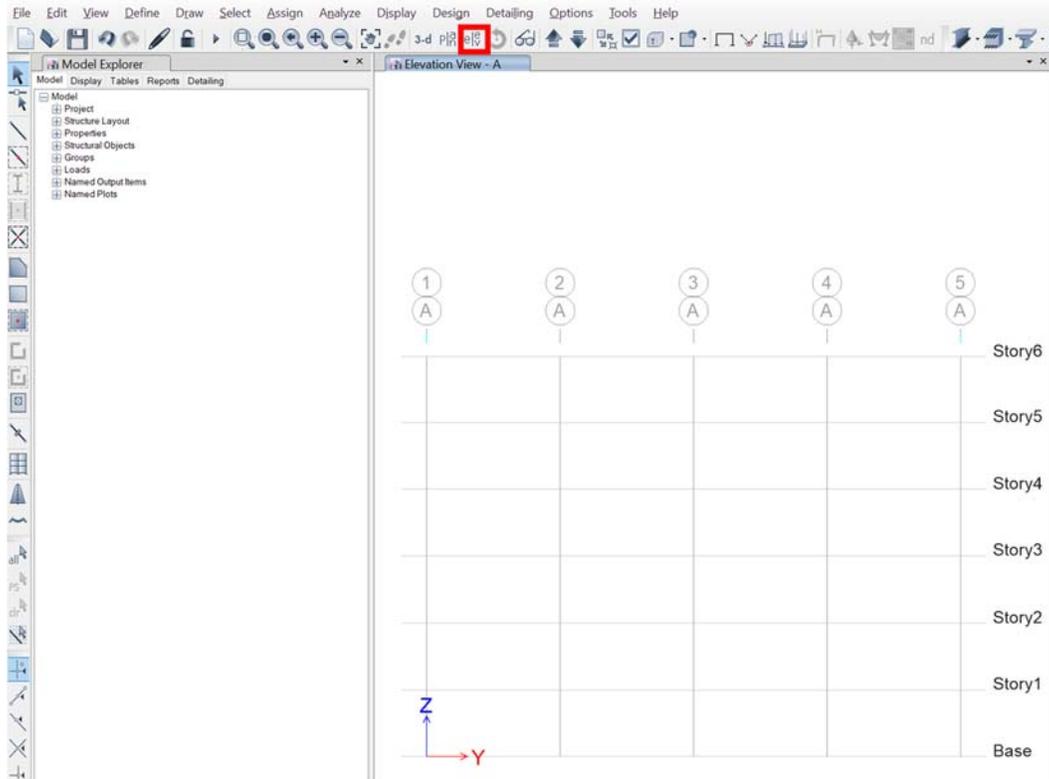


Figura 36 Vista de elevación en la interfase de Etabs (2016)

Posteriormente, para dibujar el marco es necesario entrar al menú “Draw” – “Draw Beam/Column/Brace” o presionar el icono indicado en la Figura 37 para dibujar elementos tipo barra.

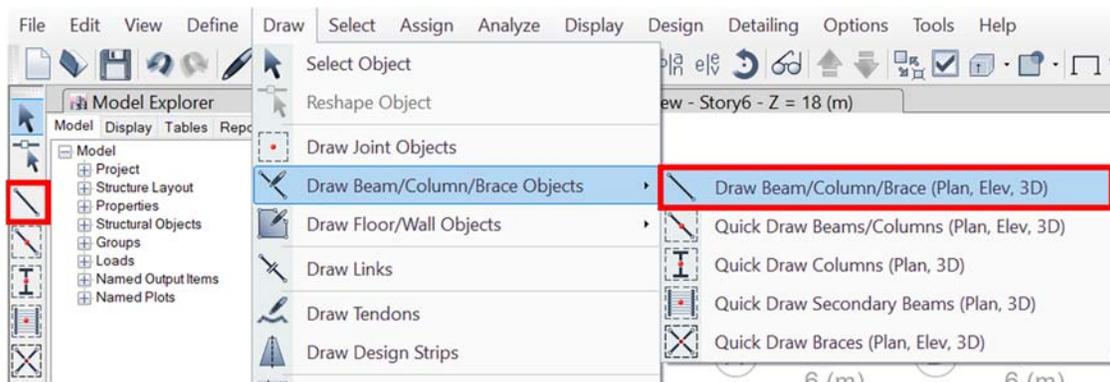


Figura 37 Ruta para dibujar elementos tipo barra



DAMPO

Después se debe seleccionar el tipo de sección que se requiere dibujar. Esto se logra presionando en la lista desplegable que aparece en la parte inferior izquierda (1). Esta ventana aparece una vez activada la función de dibujar. En la lista se localiza la sección deseada y se presiona para activarla (2) como se observa en la Figura 38.

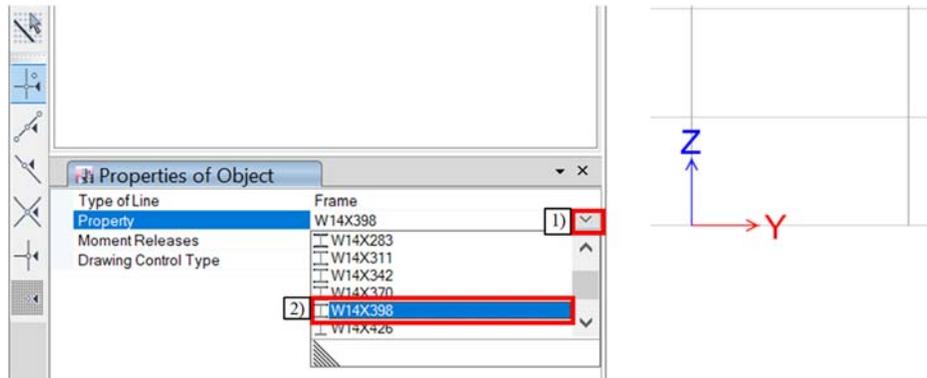


Figura 38 Selección del tipo de sección a dibujar

Con el puntero del ratón se indica sobre la retícula el punto inicial del elemento que se va a dibujar, ya sea columna o trabe, y se da “click” como se indica en la parte izquierda de la Figura 39. Posteriormente se indica el punto final sobre la retícula y se vuelve a dar “click” como se observa en la parte derecha de la figura.



Figura 39 Dibujo de un elemento barra sobre la retícula



DAMPO

Se puede continuar seleccionando puntos finales sobre la retícula si se desea continuar dibujando, por ejemplo, una columna hasta la parte superior. Como se observa en la parte izquierda de la Figura 40. Si se desea dibujar una nueva columna o trabe se debe presionar la tecla “Enter” y se puede iniciar el dibujo de un nuevo elemento con la misma sección. Como se observa en la parte derecha de la figura.

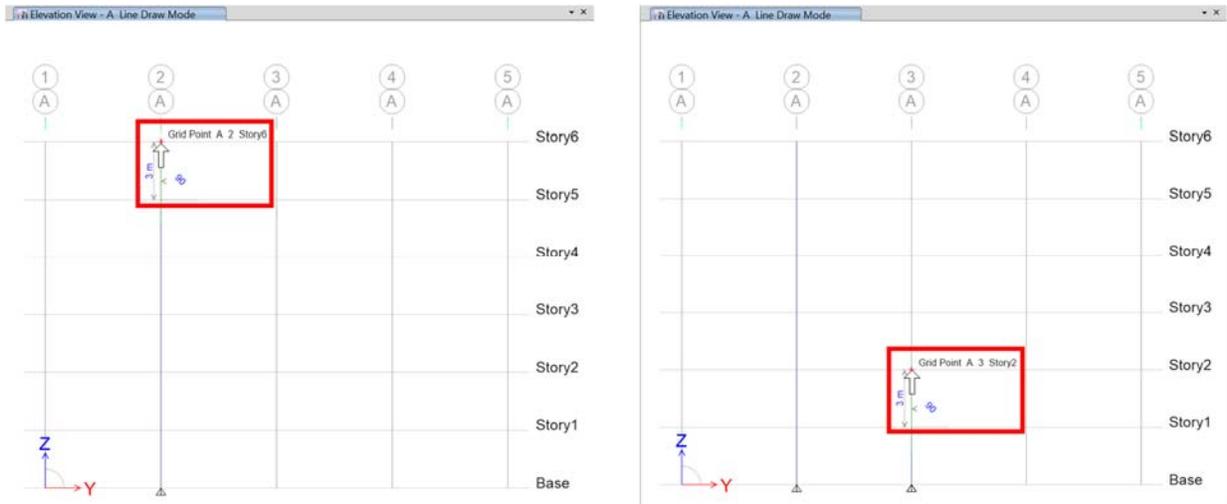


Figura 40 Dibujo de elementos tipo barra

Cabe mencionar que las columnas se pueden dibujar en una sola operación desde la parte inferior hasta el último piso. Existen herramientas útiles para duplicar elementos ya dibujados en el menú “*Edit – Replicate*” como se observa en la Figura 41.

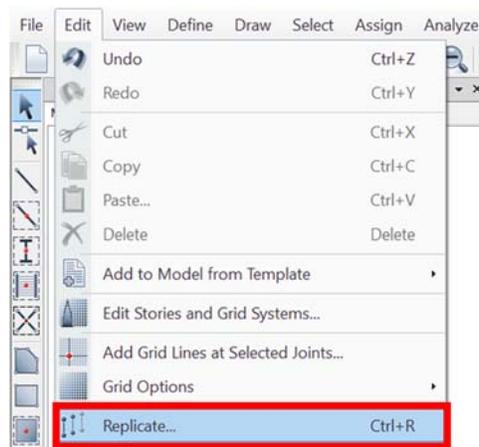


Figura 41 Comando replicar en el menú “Edit”

Es importante destacar que en cualquier momento durante el dibujo de elementos se puede cambiar la sección utilizada. Finalmente, para concluir con el dibujo se presiona la tecla “Esc”.



DAMPO

En la Tabla 3 se presenta un resumen de los parámetros que se deben preparar para definir los elementos tipo “link” en el programa Etabs (2016) y las ecuaciones para obtener la masa del disipador y en su caso la rigidez.

Tabla 3. Parámetros para definir el elemento equivalente en programas de análisis

Tipo de “link”		Masa	Peso	Inercia rotacional	Dirección de propiedades
Plastic Wen		$M_D = W_D/g$	W_d	$R_1 = R_2 = R_3 = 0$	U_1
Rigidez efectiva		Amortiguamiento	Fuerza de fluencia esperada	Relación de rigidez post fluencia	Exponente de fluencia
k_D	$k_D = f_k \frac{A_n E}{L}$	0	F_{fe}	0.016	3

En la Figura 42 se muestran dos curvas de histéresis, una experimental y una numérica. La curva con línea punteada en color gris corresponde a datos experimentales. Los datos se midieron en una prueba realizada a un disipador Dampo Dual Protect con un protocolo de carga. La línea continua en color naranja corresponde a datos de un modelo numérico utilizando el mismo protocolo de carga que la prueba experimental.

Se observa que el comportamiento es muy similar entre ambas curvas, lo que indica que el comportamiento de estos disipadores se puede modelar con una precisión muy aceptable. Para mayor referencia sobre el proceso para obtener las curvas numéricas y la comparación se puede consultar (García Mora Pinto, et al., 2020) o Black et al. (2003).

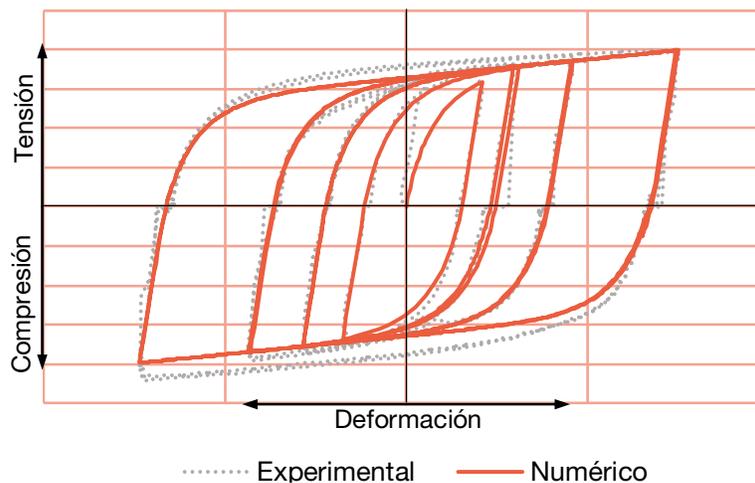


Figura 42 Curvas experimentales y modelo numérico del disipador DAMPO Dual Protect



CAPÍTULO 8. CRITERIOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO

8.1. PASOS PARA DISEÑAR UNA ESTRUCTURA EQUIPADA CON DISIPADORES.

En esta sección se presentan una serie de pasos muy generales para diseñar una estructura equipada con disipadores histeréticos. Posteriormente, en el Capítulo 9 se presenta un ejemplo detallado en donde se aplican los pasos que a continuación se enuncian.

Paso 1. Realizar el diseño de la estructura considerando únicamente cargas gravitacionales, asegurando que los elementos estructurales no se esfuercen arriba del 60% de su capacidad.

Paso 2. Realizar un análisis modal espectral de la estructura, obteniendo los cortantes y distorsiones de entrepiso. Comparar las distorsiones con los límites indicados en las normas NTC Sismo (2017) para comprobar la necesidad de utilizar disipadores.

Paso 3. Definir el porcentaje de cortante de entrepiso (% V) que resistirá el sistema secundario. Se recomienda iniciar la propuesta con el sistema secundario soportando un 50% de la demanda. Una segunda opción es calcular el porcentaje de cortante con el cociente de la distorsión máxima y la distorsión calculada como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\%V = \left(1 - \frac{\gamma_{max}}{\gamma_{calc}}\right) * 100\% \quad (14)$$

donde % V es el porcentaje de cortante que resiste el sistema secundario, γ_{max} es la distorsión de entrepiso máxima permitida y γ_{calc} es la distorsión de entrepiso calculada en el análisis modal.

Paso 4. Calcular la fuerza cortante que toma el sistema secundario en cada piso. Esta fuerza se obtiene multiplicando el porcentaje del paso anterior por el cortante total calculado en la dirección de análisis como se muestra en la siguiente ecuación:

$$V_{ss} = \%V * V \quad (15)$$

donde V_{ss} es la fuerza cortante que debe resistir el sistema secundario en un nivel y V es la fuerza cortante calculada en el análisis modal para un nivel y una dirección.

Paso 5. Definir la cantidad de disipadores por piso (n) y su ubicación, esto muchas veces depende de la arquitectura y se negocia con los involucrados en el proyecto. Cabe resaltar que se deben favorecer distribuciones que no provoquen torsiones en la estructura. Es importante mencionar que con una correcta distribución en planta de los disipadores es posible disminuir problemas de torsión en la estructura.



DAMPO

Paso 6. Calcular la fuerza de diseño de cada disipador tomando como base la ecuación (2), pero dividiendo el cortante que toma el sistema secundario en el piso entre el número de disipadores. Esto se muestra en la siguiente ecuación:

$$F_d = \frac{V_{ss}/n}{\cos \theta} \quad (16)$$

donde F_d es la fuerza de diseño en cada disipador de un nivel, n es el número de disipadores del nivel analizado y θ es el ángulo que forma el disipador con la horizontal.

Paso 7. Obtener la rigidez (k_d) de los disipadores dependiendo del tipo de disipador seleccionado siguiendo los procedimientos expuestos en la sección 7.5. Se debe tomar en consideración el nivel de desempeño deseado y las demandas sísmicas. Por ejemplo, para los disipadores Dampo 1505 primero se define el desplazamiento máximo (d_{max}) en función de las distorsiones máximas de entrepiso indicadas en las NTC Sismo (2017). Posteriormente en la Tabla A.1 del Apéndice A se busca un disipador que tenga la fuerza de diseño y desplazamiento máximo requerido y se obtiene el dato de la rigidez.

Paso 8. Modelar los disipadores en el programa de análisis estructural con elementos equivalentes que proporcionen la rigidez axial calculada para los disipadores. Los disipadores se modelan con los parámetros descritos en la sección 7.5.

Paso 9. Realizar un análisis modal espectral de la estructura equipada con los disipadores y obtener sus distorsiones de entrepiso. Verificar que las distorsiones cumplan los límites indicados en las NTC Sismo (2017) o el límite impuesto para el diseño.

Paso 10. De la revisión de las distorsiones de entrepiso se ajusta la fuerza de diseño (F_d) de los disipadores si es necesario. Por ejemplo, en caso de no cumplir los límites indicados en las NTC Sismo (2017) se puede incrementar la fuerza de diseño hasta cumplir los requerimientos.



8.2. CRITERIOS DE ANÁLISIS

Al incluir disipadores histeréticos en un análisis estructural, adicional a los pasos de la Sección 8.1, también se recomienda lo siguiente:

- La distorsión de entrepiso se puede definir con criterios de diseño por desempeño de la estructura siempre y cuando sean más estrictos que los límites indicados en las NTC Sismo (2017).
- La distribución y rigidez de los disipadores en planta debe ser simétrica para evitar torsiones.
- En estructuras cuya geometría induzca torsión, ésta se puede llegar a reducirse con la inclusión de disipadores.
- Es recomendable no usar disipadores demasiado grandes. Es decir, si las fuerzas de diseño (F_d) de los disipadores son superiores a 300 toneladas, es recomendable incrementar la capacidad del sistema primario o el número de disipadores para tener dispositivos más pequeños.
- La fuerza de diseño (F_d) de los disipadores debe ser al menos 130% superior a la fuerza máxima demanda por cargas de viento.
- Cuando se proponen disipadores Dampo 1505 se requieren contravientos de conexión. Se recomienda que la sección propuesta para los contravientos tenga una capacidad a carga axial muy superior a la fuerza de diseño de los disipadores (al menos dos veces).
- De acuerdo con las NTC Sismo (2017), el sistema primario debe ser capaz de soportar al menos el 30% de la fuerza sísmica. Esta revisión se puede realizar verificando que el cociente del cortante que resisten los disipadores entre el cortante total sea menor que 0.7. Otro método de verificación es realizar un análisis modal sin disipadores con el espectro de diseño reducido al 30%.
- La propuesta de disipadores obtenida con los pasos de la sección 8.1 se debe verificar realizando análisis dinámicos no lineales, como lo indica la sección 6.2 de las NTC Sismo (2017). Este procedimiento es el más racional para garantizar que las distorsiones calculadas cumplan con los límites establecidos.



DAMPO

8.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Una vez concluidos los análisis, se recomienda tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las fuerzas máximas esperadas en los disipadores son superiores a las fuerzas de diseño mostradas en los catálogos del Apéndice A. Esta sobre resistencia es provocada por el fenómeno de endurecimiento por deformación y por la variación del esfuerzo de fluencia del acero con respecto al esfuerzo nominal
- En las Tablas A.1 del Apéndice A y la Tabla B.1 del 0 se enlistan las fuerzas máximas esperadas para los modelos de disipadores Dampo. Estas fuerzas están calibradas con pruebas experimentales.
- Para la propuesta con disipadores Dampo 1505, se debe revisar la resistencia a carga axial de los contravientos de conexión propuestos. La revisión debe considerar las cargas máximas esperadas en los disipadores y las longitudes de los perfiles.
- Las conexiones para unir los disipadores a la estructura deben estar diseñadas para resistir las fuerzas máximas esperadas en los disipadores. Se recomienda diseñar todos los elementos de conexión por esfuerzos permisibles y mantenerlos en su intervalo elástico-lineal.
- Se recomienda diseñar el sistema primario como trabes y columnas, para los elementos mecánicos de mayor magnitud entre: a) un diseño por capacidad considerando la sobre resistencia de los disipadores; o b) los elementos mecánicos obtenidos de los análisis modales.
- Verificar que los elementos estructurales del sistema primario resistan al menos el 30% del cortante de diseño como lo indican las NTC Sismo (2017).



DAMPO

CAPÍTULO 9. EJEMPLO DE APLICACIÓN

En este capítulo se muestra un ejemplo de diseño de una estructura equipada con disipadores sísmicos. Se siguen las recomendaciones planteadas en los capítulos previos y se utilizan los disipadores Dampo 1505. La configuración estructural es sencilla, con el objetivo de facilitar el ejemplo de aplicación. Sin embargo, el método es aplicable a estructuras más complejas.

9.1. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA (PASO 1)

9.1.1. Características de la estructura y condiciones de carga

La estructura tiene uso de oficinas con cuatro crujías en cada dirección, con separación a ejes de columnas de 6 m. Cuenta con seis niveles y altura de entrepiso constante de 3 m. En la Tabla 4 se presentan los datos de la estructura para definir el espectro de diseño. En la Figura 43 se presenta del lado izquierdo la geometría en planta de la estructura y de lado derecho se muestra un modelo tridimensional.

Tabla 4. Parámetros para diseño sísmico

Ubicación	Importancia	Factor de irregularidad	Factor de comportamiento sísmico	Factor de hiperestaticidad
19.39425, -99.147939	B	1.0	2.0	1.0

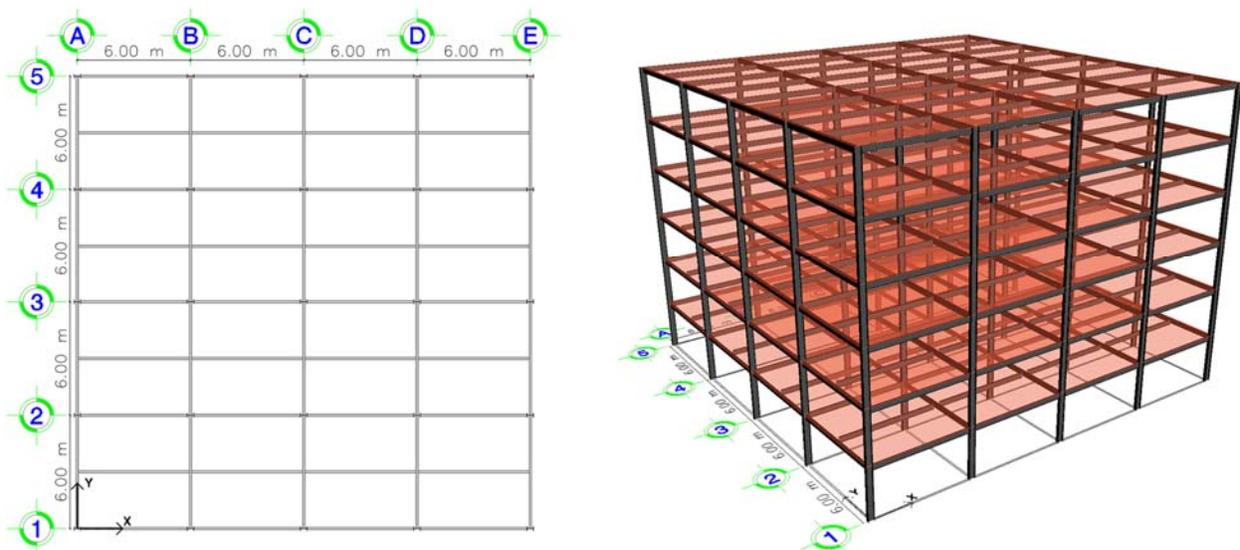


Figura 43 Planta y modelo tridimensional de la estructura



En la Tabla 5 se presentan las cargas consideradas para el análisis. Las cargas vivas se definieron con las recomendaciones de las Normas Técnicas Complementarias para las Acciones de Diseño de la Ciudad de México (NTC Acciones, 2017). Nótese que en los entresijos se usaron cargas de oficinas y en la azotea se definieron cargas como lugar de reunión ya que se considera que tendrá uso para fiestas y eventos sociales. El peso propio se consideró directamente en el programa de análisis estructural.

Tabla 5. Cargas sobre la estructura

Niveles	Sobre carga muerta CM (kg/m ²)	Carga viva instantánea CVi (kg/m ²)	Carga viva Máxima CVm (kg/m ²)
Nivel 1 a 5 (oficinas)	200	180	250
Azotea (lugares de reunión)	200	250	350

A partir de un diseño preliminar, que consideró únicamente cargas gravitacionales, se definieron las secciones y materiales que se muestran en la 0. Con esta propuesta estructural se verifica la capacidad ante cargas sísmicas y, en su caso, se recomiendan disipadores para complementar la resistencia lateral. Esto con el objetivo de cumplir con las distorsiones máximas permisibles.

Tabla 6. Elementos estructurales

Elemento	Material	Material	Designación
Columnas	Acero	A992 Gr.50	W14x193
Trabes	Acero	A992 Gr.50	W18x50
Piso	Losacero	Relleno de concreto con f'c = 280 kg/cm ²	Ternium 25

Se definieron combinaciones de carga de acuerdo con las recomendaciones de las NTC Acciones (2017); las cuales se muestran en la Tabla 7. La primera columna corresponde al número de combinación y la segunda presenta los tipos de carga considerados en la combinación y los factores utilizados. Adicional a las cargas de la Tabla 5, se considera en la combinación el peso propio (PP), y las cargas sísmicas en dirección X (SX) y en dirección Y (SY) que se obtienen con el espectro de diseño que se muestra más adelante.



DAMPO

Tabla 7. Combinaciones de carga

Combinación	Desarrollo
1	1.3 (CM + PP) + 1.5 (CVm)
2	1.1 (CM + PP + CVi + SX + 0.3 SY)
3	1.1 (CM + PP + CVi + SX - 0.3 SY)
4	1.1 (CM + PP + CVi - SX + 0.3 SY)
5	1.1 (CM + PP + CVi - SX - 0.3 SY)
6	1.1 (CM + PP + CVi + 0.3 SX + SY)
7	1.1 (CM + PP + CVi + 0.3 SX - SY)
8	1.1 (CM + PP + CVi - 0.3 SX + SY)
9	1.1 (CM + PP + CVi - 0.3 SX - SY)

Para la determinación del espectro de diseño se utilizó el Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID, 2017) ingresando la ubicación de la estructura. En la Figura 44 se muestra el espectro elástico y el espectro de diseño del sitio considerando un factor de comportamiento sísmico $Q=2$. Se seleccionó ese factor Q para revisar, inicialmente, la capacidad que tiene la estructura sin disipadores. En la figura también se muestran, con líneas verticales, los periodos fundamentales de vibración de la estructura sin disipadores para cada dirección.

Tabla 8. Características del espectro elástico

Ts [s]	a0	c	Ta [s]	Tb [s]	k
1.8	0.29	1.062	1.3	2.3	0.208

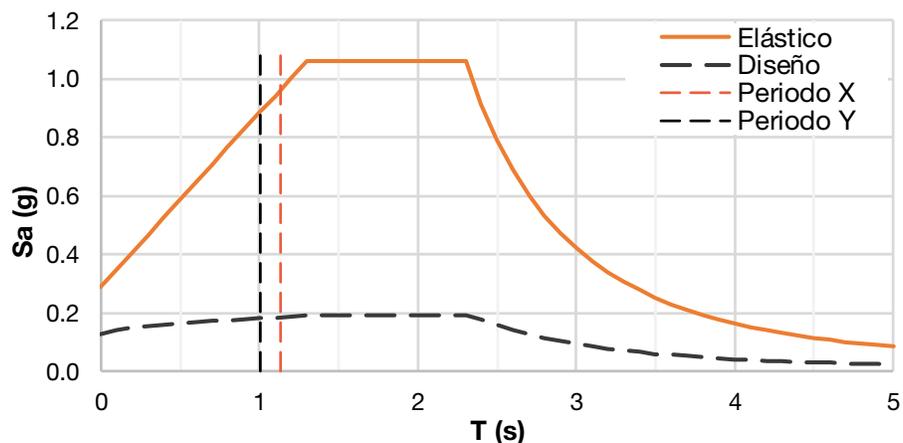


Figura 44 Espectro elástico y espectro de diseño



9.2. ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL (PASO 2)

9.2.1. Resultados del análisis

La estructura sin disipadores se revisó realizando un análisis modal espectral. Se tomaron los primeros 6 modos de vibrar para obtener una masa modal efectiva acumulada superior al 90%. Del análisis, se obtuvieron los resultados de fuerzas cortantes y distorsiones máximas de entrepiso para cada dirección. En la Figura 45 se muestra el perfil de fuerzas cortantes de entrepiso. Se muestra una línea para cada dirección de análisis, la línea negra corresponde al cortante en dirección X y la línea gris al cortante en dirección Y. La fuerza representada en ambas líneas está en toneladas.

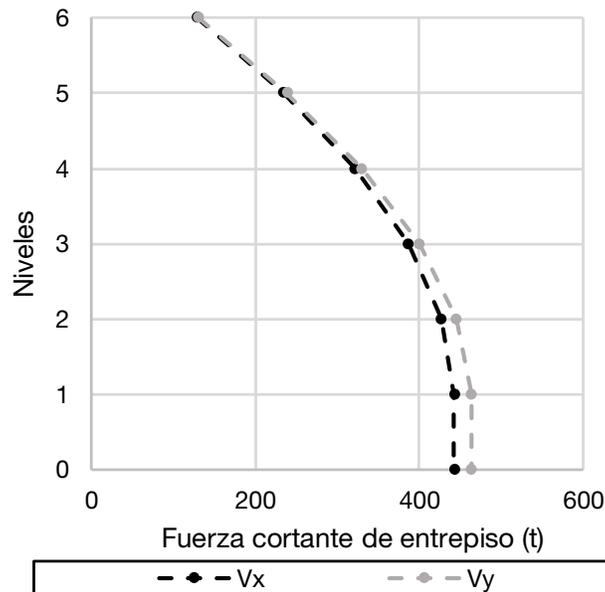


Figura 45 Perfil de fuerza cortante de entrepiso sin disipadores

Por otro lado, en la Figura 46 se muestran los resultados de las distorsiones máximas de entrepiso en cada dirección y se incluye una línea que indica un límite máximo de distorsión de 0.01. Se consideró ese límite para el ejemplo, aunque el reglamento recomienda un límite mayor (de 0.15). Un límite de 0.01 ayuda a reducir el nivel de daños esperados, por eso se usó ese límite aquí. En la gráfica se puede observar que en ambas direcciones y en todos los niveles se supera considerablemente el límite máximo de distorsión considerado. A partir de estos resultados se recomienda incluir disipadores en la estructura para el control de desplazamientos.



DAMPO

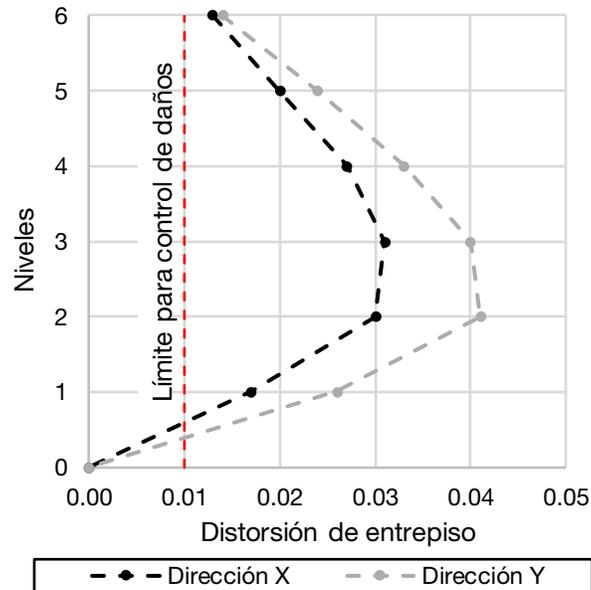


Figura 46 Distorsiones de entrepiso sin disipadores

9.3. FUERZA CORTANTE EN EL SISTEMA SECUNDARIO (PASOS 3 Y 4)

Como se indica en la sección 8.1, en el paso 3, primero se propone el porcentaje de cortante ($\%V$) que resiste el sistema secundario. Para este propósito se utiliza el cociente de la distorsión máxima de entrepiso (γ_{max}) y la distorsión calculada (γ_{calc}) como se muestra en la ecuación(14). Para el ejemplo, se toma como distorsión máxima de entrepiso $\gamma_{max} = 0.01$ con el objetivo de minimizar daños en el sistema primario. Para ejemplificar el análisis se calcula el $\%V$ del segundo nivel en la dirección X cuya distorsión calculada es $\gamma_{max} = 0.030$ por lo tanto:

$$\%V = \left(1 - \frac{\gamma_{max}}{\gamma_{calc}}\right) * 100\% = \left(1 - \frac{0.010}{0.030}\right) * 100\% = 66.7\%$$

El paso 4 de acuerdo con la sección 8.1 es calcular la magnitud de cortante que debe resistir el sistema secundario (V_{ss}) en cada nivel. Esto se obtiene multiplicando el porcentaje de cortante de entrepiso ($\%V$) por el cortante total calculado en la dirección de análisis utilizando la ecuación (15) para cada dirección. Para ejemplificar el cálculo nuevamente se utiliza el segundo nivel en la dirección X cuya fuerza cortante es $V = 427.1 t$ por lo tanto:

$$V_{ss} = \%V * V = 66.7\% * 427.1 t = 284.7 t$$



Repitiendo los análisis para todos los niveles en ambas direcciones se obtienen los valores que se presentan en la Tabla 9. En esta se resume el cálculo del porcentaje de cortante ($\%V$) y la fuerza cortante que debe resistir el sistema secundario (V_{ss}).

En las primeras dos columnas se presenta la dirección de análisis y el entrepiso. Posteriormente, se muestra la distorsión máxima considerada, la distorsión calculada en el análisis modal y el porcentaje de cortante de entrepiso ($\%V$) que debe tomar el sistema secundario. Después, se muestran los cortantes de entrepiso calculados en el análisis modal y la magnitud de cortante que debe resistir el sistema secundario (V_{ss}).

Tabla 9. Cálculo de fuerzas en el sistema secundario por piso

Dirección	Piso	γ_{max}	γ_{calc}	$\%V$	$V(t)$	$V_{ss}(t)$
X	6	0.01	0.013	23.1	129.7	29.9
	5	0.01	0.020	50.0	234.8	117.4
	4	0.01	0.027	63.0	321.5	202.4
	3	0.01	0.031	67.7	386.5	261.8
	2	0.01	0.030	66.7	427.1	284.7
	1	0.01	0.017	41.2	442.5	182.2
Y	6	0.01	0.014	28.6	130.7	37.3
	5	0.01	0.024	58.3	239.0	139.4
	4	0.01	0.033	69.7	329.8	229.8
	3	0.01	0.040	75.0	399.7	299.7
	2	0.01	0.041	75.6	445.1	336.5
	1	0.01	0.026	61.5	463.7	285.3

9.4. UBICACIÓN DE DISIPADORES POR PISO (PASO 5)

El siguiente paso es determinar el número de dispositivos a colocar en cada nivel y su ubicación dentro de la estructura. Esto muchas veces depende de la arquitectura y se negocia con los involucrados en el proyecto. Para este ejemplo, se consideraron dispositivos en las cuatro fachadas exteriores.

En la Figura 47a se muestra una de las fachadas en elevación con la propuesta de ubicación de los disipadores. En la Figura 47b se muestra un modelo tridimensional con la ubicación de los disipadores en las cuatro fachadas exteriores. Con esa configuración, se tiene un total de cuatro disipadores por nivel para cada dirección de análisis; es decir, un total de 48 disipadores. Este conjunto de dispositivos conforma el sistema secundario de la estructura.



DAMPO

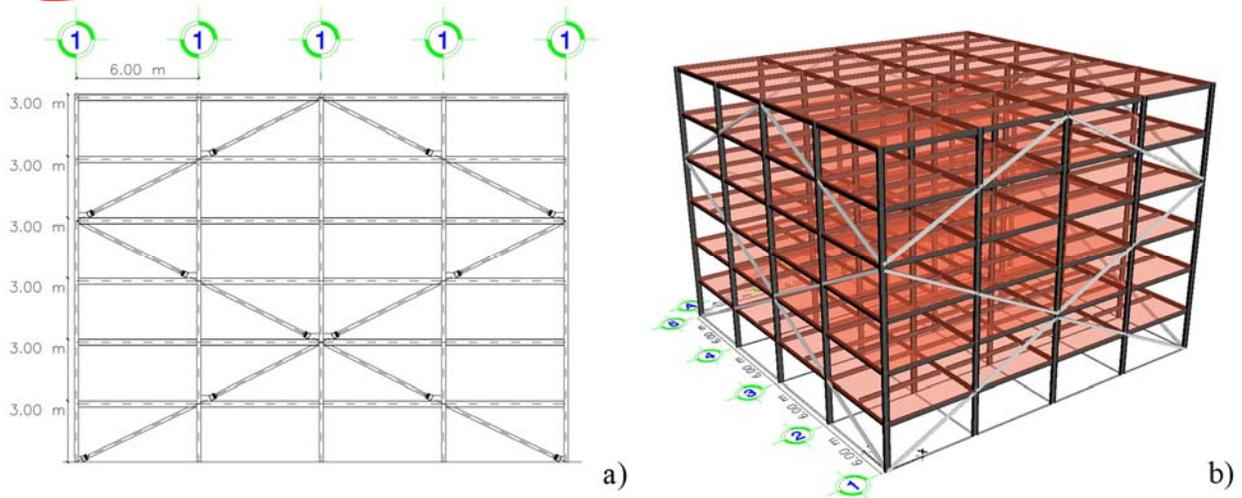


Figura 47 Distribución de disipadores en la estructura, elevación y modelo 3D

9.5. FUERZA DE DISEÑO EN LOS DISIPADORES (PASO 6)

A partir de las ecuaciones (1) y (2), el número de dispositivos por entrepiso y los resultados del Paso 4, se calculan las fuerzas de diseño (F_d) requeridas para cada disipador. Con estas fuerzas es posible identificar, en la Tabla A.1 del Apéndice A, los disipadores Dampo 1505 que tengan una capacidad similar a las fuerzas calculadas. Después, se puede diseñar los contravientos de conexión requeridos para instalar los disipadores en la estructura.

A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo de la fuerza de diseño (F_d) del disipador del segundo nivel en dirección Y con la información de la penúltima fila de la Tabla 9. Primero, se calcula la fuerza de diseño del disipador con la ecuación (16).

$$F_d = \frac{V_{ss}/n}{\cos \theta} \quad ; \quad F_d = \frac{336.5/4}{\cos(26.4)} = 94.1 \text{ t}$$

A partir de la fuerza de diseño calculada se puede seleccionar una familia de disipadores de la Tabla A.1 del Apéndice A que cuente con una capacidad cercana al resultado. Para el ejemplo de cálculo, se selecciona la familia de disipadores con capacidad de 100 t que es cercana al resultado de 94.1 t.



Reproduciendo el cálculo para todos los niveles y en ambas direcciones de análisis se obtiene las fuerzas de diseño que se resumen en la Tabla 10. En las primeras dos columnas se presenta la dirección de análisis y el entrepiso analizado. Posteriormente, se presenta la fuerza de diseño calculada y en la última columna la fuerza de diseño seleccionada de acuerdo con las capacidades disponibles en la Tabla A.1 del Apéndice A.

Tabla 10. Fuerzas de diseño para los disipadores

Dirección	Piso	F_d (t) Calculada	F_d (t) Seleccionada
X	6	8.4	10
	5	32.8	70
	4	56.6	70
	3	73.2	100
	2	79.6	100
	1	50.9	100
Y	6	10.4	10
	5	39.0	70
	4	64.2	70
	3	83.8	100
	2	94.1	100
	1	79.8	100

Cabe destacar que las capacidades seleccionadas se determinaron siguiendo la recomendación de definir los disipadores por bloques de 2 niveles o más. Para definir los bloques se tomó en cuenta los valores calculados y el perfil de cortante mostrado en la Figura 45. Los grupos son: niveles 1, 2 y 3; niveles 4 y 5; y nivel 6. Esta agrupación considera que las fuerzas de diseño calculadas en los entrepisos son similares.

Para la selección del disipador de cada grupo se consideró la mayor fuerza de diseño calculada. Por ejemplo, para el grupo de los entrepisos 4 y 5 se tomó como base la fuerza de diseño mayor, es decir 64.2 t, que corresponde al piso 4 de la dirección Y. A partir de este resultado se seleccionó un disipador con capacidad de 70 t el cual es cercano al calculado.

Con la capacidad de los disipadores seleccionada ahora se diseña el contraviento de conexión (CVC), el cual se recomienda que tenga una resistencia de al menos el doble de la capacidad del disipador. El proceso de diseño se ejemplifica a continuación con la revisión de la sección de acero utilizada para el disipador de los niveles 1, 2 y 3.



DAMPO

Para conectar el disipador de 100 t a la estructura se propone una sección HSS 10x1/2. Se recomienda que la resistencia a compresión axial (R_{cvc}) de la sección sea, al menos, dos veces la fuerza de diseño del disipador. Es decir, se recomienda que la sección tenga una resistencia de al menos 200 t. Para calcular la resistencia se utilizan las ecuaciones incluidas en las NTC Acero (2017) que se presentan a continuación:

$$R_c = F_R * \chi * F_y * A \quad (9)$$

donde R_c es la resistencia a compresión axial de un elemento de eje recto y sección constante, F_R es el factor de resistencia, igual a 0.9, χ es el factor de reducción por esbeltez, F_y es el esfuerzo nominal de fluencia del acero y A es el área transversal de la sección de acero.

$$\chi = \left[1 + \left(\frac{F_y}{F_e} \right)^n \right]^{-1/n} \quad (10)$$

donde n es un coeficiente adimensional que depende de la sección y el tipo de acero utilizado y F_e es el esfuerzo crítico de Euler.

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{(K * L / r)^2} \quad (11)$$

donde K es el factor de longitud efectiva, L es la longitud del elemento y r es el radio de giro de la sección.

Ahora se calcula la resistencia del CVC con las características de la sección HSS 10x3/8. Primero, se sustituyen valores en la ecuación (11) donde $L = L_{cvc} = 670 \text{ cm}$, $r = r_{cvc} = 9.8 \text{ cm}$ y $K = 1$ con lo cual se obtiene:

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{(K * L_{cvc} / r_{cvc})^2} = \frac{\pi^2 * 2,040,000 \text{ kg/cm}^2}{(1 * 670 \text{ cm} / 9.8 \text{ cm})^2} = 4307.6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Después, se sustituyen valores en la ecuación (10) con un esfuerzo de fluencia $F_y = 3,515 \text{ kg/cm}^2$ y un valor de $n = 1.4$ obtenido de las NTC Acero (2017), con esto resulta:

$$\chi = \left[1 + \left(\frac{F_y}{F_e} \right)^n \right]^{-1/n} = \left[1 + \left(\frac{3,515 \text{ kg/cm}^2}{4,307.6 \text{ kg/cm}^2} \right)^{1.4} \right]^{-1/1.4} = 0.67$$

Finalmente, se sustituyen valores calculados en la ecuación (9) donde $A = A_{cvc} = 111 \text{ cm}^2$ y $F_R = 0.9$ con lo cual se obtiene:

$$R_{cvc} = F_R * \chi * F_y * A_{cvc} = 0.9 * 0.67 * 3,515 \text{ kg/cm}^2 * 111 \text{ cm}^2 = 235,270 \text{ kg}$$



Con este análisis se verifica que la resistencia a la compresión axial del CVC es superior a la resistencia recomendada de 200 t. A partir de este resultado se puede asegurar que el dissipador alcanza la fuerza de fluencia esperada antes de que ocurra la falla del CVC y, por tanto, el dispositivo incursiona en el intervalo de deformación inelástica.

En la Tabla 11 se presenta el resumen de la propuesta total de dissipadores y CVC. En las primeras dos columnas se presenta el grupo de pisos definidos y las fuerzas de diseño seleccionada para cada grupo. Después, se presentan la designación y la resistencia a la compresión de la sección seleccionada para el CVC

Tabla 11. Fuerzas de diseño y secciones de acero seleccionadas

Grupos de pisos	F_d (t) Seleccionada	CVC (HSS) Designación	CVC (HSS) Resistencia (t)
6	10	5 ½ x 3/16	24.1
4 y 5	70	9 x 3/8	147.8
1, 2 y 3	100	10 x 1/2	235.3

9.6. RIGIDEZ DE LOS DISIPADORES (PASO 7)

Para obtener la rigidez de los dissipadores Dampo 1505 se debe seleccionar un modelo específico definiendo un desplazamiento máximo. Para este propósito, se propone utilizar como referencia el desplazamiento lateral de la estructura asociado a la distorsión máxima de entrepiso.

Para este ejemplo se definió una distorsión máxima de entrepiso $\gamma_{max} = 0.01$ y una altura de piso constante $h = 3m$. Con estos datos se calcula el desplazamiento lateral con la ecuación (3) como sigue:

$$\Delta = \gamma_{max} * h = 0.01 * 300 \text{ cm} = 3.0 \text{ cm}$$

Con este resultado y la ecuación (1) se calcula el desplazamiento máximo en el dissipador como:

$$d_{max} = u = \Delta \cos \theta \quad ; \quad d_{max} = 3.0 \text{ (cm)} \cos(26.4^\circ) = 2.7 \text{ cm}$$

donde d_{max} es el desplazamiento máximo que se puede imponer al dissipador y corresponde a una ductilidad recomendada de $\mu = 6$, es decir $d_{max} = d_y * 6$, donde d_y es el desplazamiento de fluencia del dissipador.

Para evaluar el resultado de d_{max} se debe considerar que el dissipador se conecta con un CVC que se deforma elásticamente. Por ejemplo, la sección utilizada como CVC para el dispositivo



DAMPO

de 100 t se puede deformar hasta 6 mm en su intervalo elástico. Con estas consideraciones la demanda de desplazamiento disipador puede ser de hasta 2.1 cm. Se recomienda seleccionar un $d_{max} = 3.0 \text{ cm}$ para garantizar que no se supera el desplazamiento máximo del disipador.

En la Tabla 12 se presentan las características de los disipadores seleccionados, las cuales se obtienen de la Tabla A.1 del Apéndice A. Con estas características se complementa la información de la Tabla 11 agregando los desplazamientos máximos y la rigidez de los dispositivos. En las primeras columnas se presentan los grupos de pisos definidos, el modelo de disipador seleccionado, su fuerza de diseño, su desplazamiento máximo y la rigidez. Posteriormente se retoma la designación de las secciones utilizadas como CVC.

Tabla 12. Características de los modelos de disipador seleccionado y sus CVC

Grupos de pisos	Modelo Dampo 1505	F_d (t)	d_{max} (cm)	k_d (t/mm)	CVC (HSS) Designación
6	10/3	10	3	2460.0	5 ½ x 3/16
4 y 5	70/3	70	3	17220.0	9 x 3/8
1, 2 y 3	100/3	100	3	24600.0	10 x 1/2

Con la definición de disipadores y CVC se puede calcular la rigidez del sistema disipador – contraviento de conexión (S-DC) la cual se denomina rigidez total (k_t). También es posible determinar el peso total (W_t) y la masa total (M_t) requerida para modelar los disipadores.

Para ejemplificar el cálculo de los parámetros, se analizan los elementos definidos para el grupo de pisos 1, 2 y 3. Las características del disipador se obtienen de la Tabla A.1 del Apéndice A y los datos de la sección HSS se obtienen, por ejemplo, del Manual IMCA (2014).

Primero se presenta el cálculo de la rigidez total (k_t), la cual se obtiene en dos pasos: Paso 1. se calcula la rigidez del CVC con la ecuación (4):

$$k_{cvc} = \frac{A_{cvc} * E}{L_{cvc}} = \frac{111.0 \text{ cm}^2 * 2,040,000 \text{ kg/cm}^2}{670 \text{ cm}} * \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} = 33,797 \frac{\text{kg}}{\text{mm}}$$

donde k_{cvc} es la rigidez del contraviento de conexión, E es el módulo de elasticidad del acero y A_{cvc} es el área transversal de la sección de acero HSS 10x1/2.

Paso 2. se calcula la rigidez total del S-DC con el inverso de la suma de los inversos de las rigideces del CVC y del disipador modelo “100/3” cuya rigidez se obtiene de la Tabla A.1 del Apéndice A. El cálculo se realiza utilizando la ecuación (5):



DAMPO

$$k_t = \frac{1}{\frac{1}{k_d} + \frac{1}{k_{cvc}}} = \frac{1}{\frac{1}{24,600} + \frac{1}{33,797}} = 14,237 \frac{kg}{mm}$$

A continuación, se presenta el cálculo del peso total, la cual se obtiene igualmente en dos pasos: Paso 1. se calcula el peso del CVC con la ecuación (6) y el valor de peso por metro lineal de la sección HSS 10x1/2 obtenido de IMCA (2014).

$$W_{cvc} = W_{HSS} * L_{cvc} = 92.8 \text{ kg/m} * 6.7 \text{ m} = 622 \text{ kg}$$

donde W_{HSS} es el peso por metro lineal de la sección de acero HSS 10x1/2.

Paso 2. se calcula el peso total del S-DC con la suma del peso del CVC y el peso del dissipador modelo "100/3" obtenido de la Tabla A.1 del Apéndice A, utilizando la ecuación (7):

$$W_t = W_d + W_{cvc} = 364 \text{ kg} + 622 \text{ kg} = 986 \text{ kg}$$

donde W_t es el peso total del S-DC.

En la Tabla 13 se presentan las características de los dissipadores propuestos, sus contravientos de conexión y los parámetros del S-CD. En las primeras columnas se presenta la dirección y el piso analizado. Después, se muestran las características de los dissipadores seleccionados: la fuerza de diseño nominal; su desplazamiento máximo; la rigidez; y el peso del dissipador. Posteriormente, se presentan las características del contraviento de conexión: la designación; su peso; y su rigidez axial. Finalmente, se presenta la rigidez axial y el peso del S-CD.

Tabla 13. Características de los dissipadores y contravientos

Dirección	Piso	Dissipadores				Contravientos			S-CD	
		F_d (t)	d_{max} (cm)	k_d (kg/mm)	W_d (kg)	Sección	W_{cvc} (kg)	k_{cvc} (kg/mm)	k_t (kg/mm)	W_t (kg)
X	6	10	3	2460	57	5 ½ x 3/16	132	7125	1829	189
	5	70	3	17220	267	9 x 3/8	426	23171	9879	693
	4	70	3	17220	267	9 x 3/8	426	23171	9879	693
	3	100	3	24600	364	10 x 1/2	622	33797	14237	986
	2	100	3	24600	364	10 x 1/2	622	33797	14237	986
	1	100	3	24600	364	10 x 1/2	622	33797	14237	986
Y	6	10	3	2460	57	5 ½ x 3/16	132	7125	1829	189
	5	70	3	17220	267	9 x 3/8	426	23171	9879	693
	4	70	3	17220	267	9 x 3/8	426	23171	9879	693
	3	100	3	24600	364	10 x 1/2	622	33797	14237	986
	2	100	3	24600	364	10 x 1/2	622	33797	14237	986
	1	100	3	24600	364	10 x 1/2	622	33797	14237	986



9.7. MODELADO DE LOS DISIPADORES (PASO 8)

Los disipadores se modelan en el programa Etabs (2016) utilizando un elemento equivalente denominado “link”. El procedimiento para definir los “links” está descrito con detalle en la sección 7.5.1 y se reproduce parcialmente en esta sección.

Los parámetros necesarios para definir los elementos se obtuvieron en los pasos previos y se resumen en la Tabla 14, donde se presentan los datos que son específicos para cada disipador. Estos datos son: la denominación del elemento y corresponde con el modelo de disipador; la rigidez efectiva del elemento calculada en el Paso 7; la fuerza de fluencia esperada que se obtiene de la tabla A.1 del Apéndice A; el peso del elemento calculado en el Paso 7; y la masa que se calcula con la ecuación (8).

Tabla 14. Características específicas para modelado de los disipadores

Modelo	Rigidez efectiva k_t (kg/mm)	Fuerza de fluencia esperada F_{fe} (t)	Peso W_t (kgf)	Masa M_t (kgf*s ² /m)
10/3	1829	13	189	19.3
70/3	9879	91	693	65.2
100/3	14237	130	986	100.6

En la Tabla 15. se incluyen parámetros comunes para los tres disipadores que son necesarios para definir los elementos en Etabs (2016). Estos parámetros se explican en la sección 7.5.1 y son: el tipo de “link” a utilizar; la inercia rotacional del elemento; la dirección de análisis que corresponde a la dirección axial; el amortiguamiento adicional considerado; la relación de rigidez post fluencia; y el exponente de fluencia.

Tabla 15. Características comunes para modelar los disipadores

Tipo de “link”	Inercia rotacional	Dirección de propiedades	Amortiguamiento	Relación de rigidez post fluencia	Exponente de fluencia
Plastic Wen	$R_{1,2,3} = 0$	U_1	0	0.05	1.2



DAMPO

En la Figura 48 se presenta la primera ventana donde se capturan las características de los “links” en el programa Etabs (2016). En esta figura se indican, con un número consecutivo, las casillas que se capturan o modifican. Estos números corresponden con la información que se presenta en la siguiente lista:

- 1) Se asigna un nombre único al elemento. Para esto, se recomienda utilizar el modelo del disipador seleccionado como se presenta en la primera columna de la Tabla 14.
- 2) Se selecciona el tipo de “link”, para el disipador Dampo 1505 se recomienda “Plastic (Wen)” como se presenta en la primera columna de la Tabla 15.
- 3) Se captura el peso (W_t) y la masa (M_t) del S-DC. Esta información se presenta en las columnas 4 y 5 de la Tabla 14.
- 4) Se define la inercia rotacional del elemento. Se recomienda utilizar el valor de cero (0) en las tres direcciones como se presenta en la columna 2 de la Tabla 15.
- 5) Se selecciona la casilla para la dirección de análisis “U1” y la casilla que define al elemento como no lineal. Esto se indica en la columna 3 de la Tabla 15.
- 6) Se selecciona el botón “Modify/Show for U1” para activar la segunda ventana donde se definen el resto de los parámetros del elemento.

The screenshot shows the 'Link Property Data' dialog box with the following details:

- General:** Link Property Name: 100/3; Link Type: Plastic (Wen).
- Total Mass and Weight:** Mass: 100.6 kgf-m²/m; Weight: 986 kgf; Rotational Inertia 1, 2, and 3: 0 kgf-m-s².
- Directional Properties:** Direction U1 is checked, NonLinear is checked. The 'Modify/Show for U1...' button is highlighted.

Figura 48 Definición del elemento equivalente en Etabs (2016)



DAMPO

En la Figura 49 se presenta la segunda ventana para capturar las características de los “links”, las cuales ajustan el modelo numérico. En dicha figura se indican con números consecutivos las casillas que se capturan. Estos números corresponden con la información que se obtuvo previamente la cual se describe en la siguiente lista:

- 1) Se captura la rigidez lineal efectiva (k_t) del S-DC. Esta información se presenta en la columna 2 de la Tabla 14.
- 2) El amortiguamiento efectivo se recomienda que sea cero (0) como valor conservador. Esto se indica en la cuarta columna de la Tabla 15.
- 3) Se captura la rigidez no lineal efectiva cuyo valor es igual a la rigidez lineal efectiva (k_t).
- 4) Se define la fuerza de fluencia que corresponde a la fuerza de fluencia esperada (F_{fe}) en el dispositivo. Esta información se presenta en la columna 3 de la Tabla 14.
- 5) Se captura la relación de rigidez post fluencia con un valor de 0.05 como se indica en la quinta columna de la Tabla 15.
- 6) Se coloca el valor del exponente de fluencia que corresponde a 1.2 como se indica en la sexta columna de la Tabla 15.

Section	Property	Value	Unit
Identification	Property Name	100/3	
	Direction	U1	
	Type	Plastic (Wen)	
	NonLinear	Yes	
Linear Properties	Effective Stiffness (1)	14240	kgf/mm
	Effective Damping (2)	0	kgf-s/mm
Nonlinear Properties	Stiffness (3)	14240	kgf/mm
	Yield Strength (4)	130000	kgf
	Post Yield Stiffness Rat (5)	0.05	
	Yielding Exponent (6)	1.2	

Figura 49 Definición de parámetros para ajustar el modelo numérico



DAMPO

Una vez definidos los tres elementos equivalentes o “links” se incluyen a la estructura como diagonales. La ubicación de las diagonales corresponde con la propuesta realizada en el Paso 5. El tipo de elemento para cada piso corresponde con los grupos definidos en el Paso 6 y dependen de su fuerza de diseño.

En la Figura 50 se presenta una captura de pantalla en la cual se observa una de las cuatro fachadas de la estructura. Se puede apreciar que ya están incluidos los elementos equivalentes como diagonales. En cada elemento se observa la denominación que corresponde con el modelo de disipador utilizado. También, se puede corroborar que la ubicación y cantidad de los elementos corresponden con la propuesta realizada en el Paso 5.

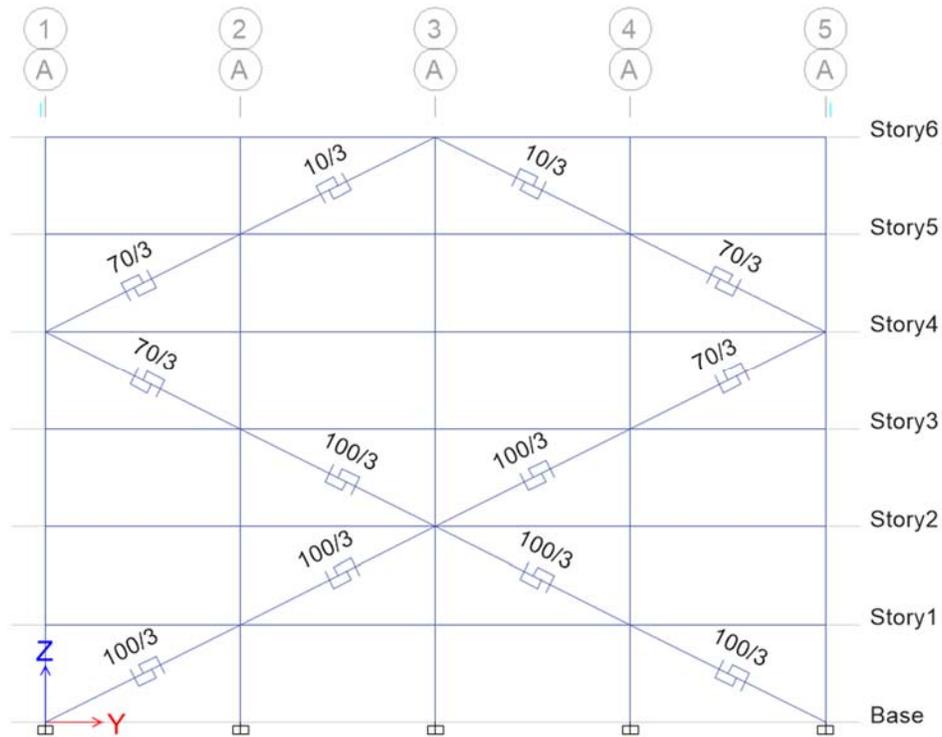


Figura 50 Elementos equivalentes agregados a la estructura.



9.8. ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL (PASO 9)

Con los disipadores modelados en la estructura se realiza nuevamente un análisis modal espectral. A diferencia del primer análisis ahora se puede utilizar un factor de comportamiento sísmico más favorable. De acuerdo con las NTC Sismo (2017), en la sección 4.2, los sistemas duales de marcos de acero con contravientos restringidos a pandeo pueden utilizar un factor de comportamiento sísmico $Q=4$. Adicionalmente el factor de corrección por hiperestaticidad (k_1) puede subir a 1.25.

Utilizando las opciones que proporcionan las NTC Sismo (2017) para el diseño de sistemas duales se presenta en la Tabla 16 los nuevos parámetros para diseño sísmico. Los cambios se muestran en las columnas 4 y 5. El resto de los parámetros se recuperan de la Tabla 4 de la Sección 9.1.

Tabla 16. Parámetros para diseño sísmico

Ubicación	Importancia	Factor de irregularidad	Factor de comportamiento	Factor de hiperestaticidad
19.39425, -99.147939	B	1.0	4.0	1.25

Para la determinación del nuevo espectro de diseño se utilizó nuevamente el SASID (2017) con los parámetros de la Tabla 16. En la Figura 51 se muestran los espectros del sitio, incluidos: el espectro elástico; el espectro de diseño con $Q=2$ utilizado en la estructura sin disipadores como referencia; y el espectro de diseño con $Q=4$ utilizado para la estructura con disipadores. En la figura también se muestran, con líneas verticales, los periodos fundamentales de vibración de la estructura con disipadores para cada dirección.

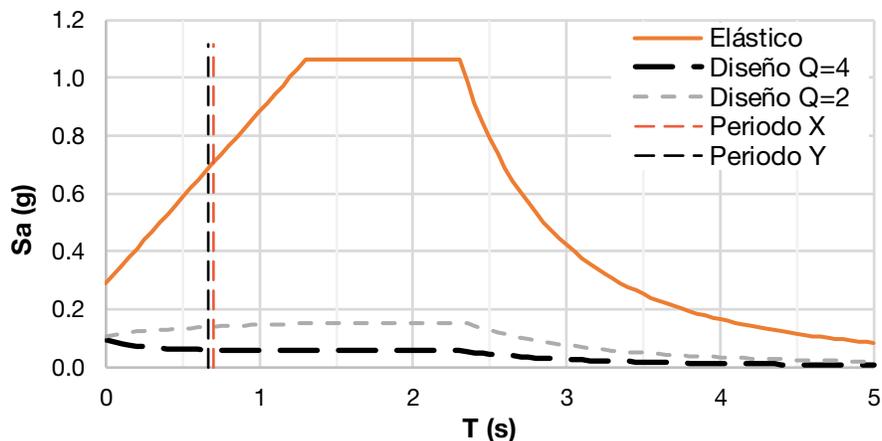


Figura 51 Espectro elástico y espectro de diseño



9.8.1. Resultados del análisis

La estructura con disipadores se revisó, al igual que la anterior, realizando un análisis modal espectral. Se tomaron los primeros 6 modos de vibrar para obtener una masa modal efectiva acumulada superior al 90%. Del análisis, se obtuvieron los resultados de fuerzas cortantes y distorsiones máximas de entrepiso para cada dirección.

En la Figura 52 se muestra el perfil de fuerzas cortantes de entrepiso, tanto para la estructura con disipadores como sin disipadores. Las líneas negras corresponden al cortante en dirección X y las líneas grises al cortante en dirección Y. La fuerza representada en todas las líneas está en toneladas.

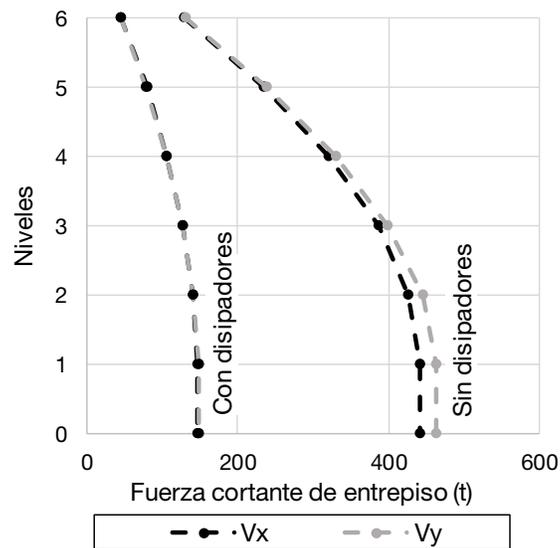


Figura 52 Perfil de fuerza cortante de entrepiso con disipadores

Analizando los perfiles de la Figura 52 es notoria la reducción de las fuerzas cortantes actuantes sobre la estructura. Esta reducción se debe a la actualización de los parámetros del factor de comportamiento sísmico y el factor de corrección por hiperestaticidad. Al contar con fuerzas cortantes reducidas se presenta la posibilidad de optimizar los elementos estructurales propuestos inicialmente.

Cabe destacar que de acuerdo con las NTC Sismo (2017), en los sistemas duales de marcos de acero con contravientos restringidos a pandeo, los marcos deben ser detallados para obtener el mismo nivel de ductilidad que los contravientos. Sin embargo, también se puede realizar el detallado de acuerdo con el nivel de distorsión demandado a la estructura, que para este ejemplo corresponde a ductilidad baja



DAMPO

En la Figura 53 se muestran los resultados de las distorsiones máximas de entrepiso en cada dirección para la estructura con y sin disipadores. Además, se indica el límite máximo de distorsión considerado. Analizando la gráfica, es clara la reducción de las distorsiones con la inclusión de disipadores. También, es posible observar que la distorsión es más uniforme en la altura del edificio. Con estos resultados se puede decir que la propuesta de disipadores es adecuada, ya que controla las distorsiones por debajo del nivel planteado. Adicionalmente, los marcos estarán sometidos a demandas muy bajas, lo que permite considerar un detallado correspondiente a ductilidad baja, pues las demandas de distorsión son menores al límite de marcos de ductilidad baja según el reglamento (NTC Sismo, 2017).

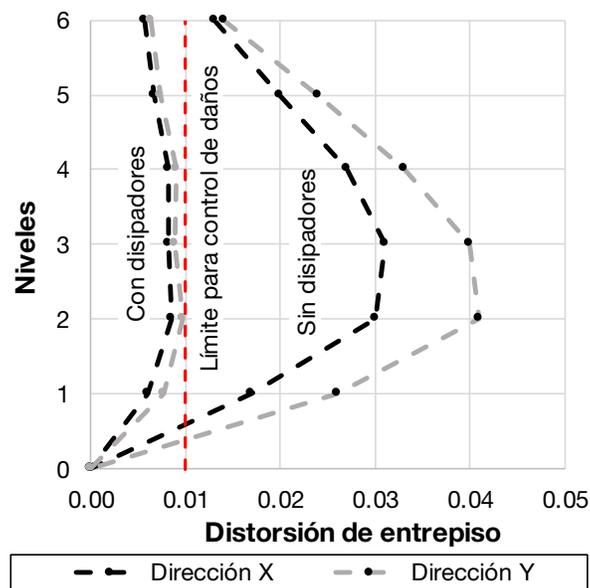


Figura 53 Distorsiones de entrepiso con disipadores

Se recomienda que los resultados obtenidos con este procedimiento se verifiquen con análisis no lineales en el tiempo, tipo paso a paso. Esto ayuda a confirmar que las distorsiones se mantienen en el nivel esperado. Además, se debe verificar que el comportamiento de los disipadores es adecuado y no sobrepasan su desplazamiento máximo de diseño. Adicional a la revisión de resultados, los análisis no lineales ayudan a optimizar tanto la propuesta de disipadores como de la estructura en general. En el Apéndice C se presentan análisis no lineales realizados a la estructura de este ejemplo.



DAMPO

CAPÍTULO 10. COMENTARIOS FINALES

Este manual busca dar una visión muy general de los SIPS y en específico de los disipadores histeréticos. De estos disipadores se resumieron los principios de su funcionamiento y caracterización. Se presentaron parámetros para su modelado y métodos de diseño que permiten llevar a resultados satisfactorios. Sin embargo, en la literatura existen otros métodos. Será criterio del estructurista seleccionar aquellos métodos que considere más adecuados.

Quizás, la reflexión más significativa de este manual es entender que utilizando amortiguadores histeréticos se puede lograr un comportamiento muy satisfactorio en las estructuras. Se puede decir que equipar estructuras con SIPS es una opción muy atractiva cuando consideramos los beneficios a corto y largo plazo. Por un lado, se incrementa la seguridad, la resiliencia y el confort de las edificaciones. Al mismo tiempo, se optimiza la estructura y el uso de materiales lo cual tiene beneficios económicos y ambientales. Además, se pueden reducir los tiempos de inactividad y reparación después de un sismo y proteger los contenidos de los edificios.

Dados los tiempos actuales por los que atraviesa la humanidad, en Dampo Systems consideramos que es tiempo de hacer un cambio muy profundo. Los ingenieros, arquitectos, desarrolladores, y todos los involucrados en la industria de la construcción, debemos dar a la sociedad los mejores sistemas constructivos a nuestro alcance. Los amortiguadores histeréticos ofrecen ese cambio, pues las ventajas económicas y estructurales son muchas. Esperamos que este manual sea de utilidad para lograr una sociedad más resiliente ante el fenómeno sísmico.



CAPÍTULO 11. REFERENCIAS

Chopra, A. K., 2012. *Dynamics of structures*. 4 th ed. New Jersey: Prentice Hall.

Christopoulos, C., Filiatrault, A. & Bertero, V. V., 2006. *Principles of passive supplemental damping and seismic isolation*. s.l.:luss press.

Etabs, 2016. *Computers and Structures Inc.*, United States: CSI.

García Mora Pinto, J. E., Guerrero Bobadilla, H., Cueto Jimenez, F. & Viramontes Heredia, C., 2020. *Recomendaciones de modelado de un disipador histerético mexicano*. Aguascalientes, En edición, SMIE.

Instituto Mexicano de la Construcción en Acero IMCA, 2014. *Manual de Construcción en Acero*. 5a ed. México: LIMUSA.

NTC Acciones, 2017. *Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño de estructural de las edificaciones*. México, Gobierno de la Ciudad de México.

NTC Acero, 2017. *Normas técnicas complementarias para diseño y consrucción de estructuras de acero*. México, Gobierno de la Ciudad de México.

NTC Sismo, 2017. *Normas técnicas complementarias para diseño por sismo*. México, Gobierno de la Ciudad de México.

Teran-Glimore, A. & Virto, N., 2009. Preliminary design of low-rise buildings stiffened with buckling restrained braces by a displacement-based approach. *Earthquake Spectra*, 25(1), pp. 185-211.



DAMPO

APÉNDICE A. PROPIEDADES DEL DISIPADOR DAMPO 1505.

La Tabla A.1, que se presenta a continuación, detalla las características típicas de los disipadores Dampo 1505. En la primera columna se presenta el modelo del disipador. Después, se muestran las fuerzas de diseño, de fluencia esperada y máxima esperada en toneladas. Continúan los desplazamientos de fluencia y máximo, en milímetros. En las siguientes cinco columnas se presentan la rigidez axial, las dimensiones y el peso del disipador. El peso está dado en kilogramos y no considera el contraviento de conexión.

Tabla A.1. Propiedades de disipadores Dampo 1505.

Modelo	Fuerza de diseño	Fuerza de fluencia esperada	Fuerza máxima esperada	Despl. de fluencia	Despl. máximo	Rigidez axial	Características del disipador			
	F_d (t)	F_{fe} (t)	F_{max} (t)	d_y (mm)	d_{max} (mm)	k_d (kg/mm)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	W_d (kg)
10/1	10	13	17.6	1.7	10	7380	29	20	49	32
10/2	10	13	17.6	3.3	20	3690	38	20	58	45
10/3	10	13	17.6	5.0	30	2460	44	25	64	57
10/4	10	13	17.6	6.7	40	1850	50	25	70	68
10/5	10	13	17.6	8.3	50	1480	55	25	80	78
10/6	10	13	17.6	10.0	60	1230	60	25	84	88
10/7	10	13	17.6	11.7	70	1050	64	25	88	98
10/8	10	13	17.6	13.3	80	920	68	30	92	109
20/1	20	26	35.2	1.7	10	14760	32	20	54	49
20/2	20	26	35.2	3.3	20	7380	43	25	64	74
20/3	20	26	35.2	5.0	30	4920	50	25	72	94
20/4	20	26	35.2	6.7	40	3690	57	30	78	116
20/5	20	26	35.2	8.3	50	2950	63	30	89	134
20/6	20	26	35.2	10.0	60	2460	68	30	94	152
20/7	20	26	35.2	11.7	70	2110	64	30	108	171
20/8	20	26	35.2	13.3	80	1840	68	30	117	186
30/1	30	39	52.8	1.7	10	22140	34	15	59	55
30/2	30	39	52.8	3.3	20	11070	45	20	70	86
30/3	30	39	52.8	5.0	30	7380	54	20	79	112
30/4	30	39	52.8	6.7	40	5540	62	25	86	140
30/5	30	39	52.8	8.3	50	4430	62	30	89	183
30/6	30	39	52.8	10.0	60	3690	67	30	99	208
30/7	30	39	52.8	11.7	70	3160	63	30	113	267
30/8	30	39	52.8	13.3	80	2770	67	30	122	292



DAMPO

Modelo	Fuerza de diseño	Fuerza de fluencia esperada	Fuerza máxima esperada	Despl. de fluencia	Despl. máximo	Rigidez axial	Características del disipador			
	F_d (t)	F_{fe} (t)	F_{max} (t)	d_y (mm)	d_{max} (mm)	k_d (kg/mm)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	W_d (kg)
40/1	40	52	70.4	1.7	10	29520	39	20	63	81
40/2	40	52	70.4	3.3	20	14760	51	25	76	126
40/3	40	52	70.4	5.0	30	9840	61	30	85	167
40/4	40	52	70.4	6.7	40	7380	69	30	93	203
40/5	40	52	70.4	8.3	50	5900	76	35	100	244
40/6	40	52	70.4	10.0	60	4920	76	45	98	310
40/7	40	52	70.4	11.7	70	4220	74	45	109	369
40/8	40	52	70.4	13.3	80	3690	78	40	119	396
50/1	50	65	88.0	1.7	10	36900	39	25	63	97
50/2	50	65	88.0	3.3	20	18450	51	30	76	151
50/3	50	65	88.0	5.0	30	12300	61	35	85	202
50/4	50	65	88.0	6.7	40	9230	69	35	93	244
50/5	50	65	88.0	8.3	50	7380	76	40	100	295
50/6	50	65	88.0	10.0	60	6150	82	40	106	337
50/7	50	65	88.0	11.7	70	5270	81	45	109	406
50/8	50	65	88.0	13.3	80	4610	86	45	119	440
60/1	60	78	105.6	1.7	10	44280	41	25	68	113
60/2	60	78	105.6	3.3	20	22140	55	30	81	177
60/3	60	78	105.6	5.0	30	14760	65	30	91	231
60/4	60	78	105.6	6.7	40	11070	74	35	99	290
60/5	60	78	105.6	8.3	50	8860	82	35	107	341
60/6	60	78	105.6	10.0	60	7380	83	45	106	428
60/7	60	78	105.6	11.7	70	6330	89	45	118	473
60/8	60	78	105.6	13.3	80	5530	87	45	125	549
70/1	70	91	123.2	1.7	10	51660	42	25	68	136
70/2	70	91	123.2	3.3	20	25830	58	25	86	198
70/3	70	91	123.2	5.0	30	17220	69	30	97	267
70/4	70	91	123.2	6.7	40	12910	79	35	106	334
70/5	70	91	123.2	8.3	50	10330	87	35	114	393
70/6	70	91	123.2	10.0	60	8610	94	40	121	460
70/7	70	91	123.2	11.7	70	7380	101	40	127	516
70/8	70	91	123.2	13.3	80	6460	108	40	134	572
80/1	80	104	140.8	1.7	10	59040	44	25	72	142
80/2	80	104	140.8	3.3	20	29520	58	30	86	224
80/3	80	104	140.8	5.0	30	19680	69	35	97	302
80/4	80	104	140.8	6.7	40	14760	79	35	106	33
80/5	80	104	140.8	8.3	50	11810	87	40	114	444
80/6	80	104	140.8	10.0	60	9840	94	40	121	510
80/7	80	104	140.8	11.7	70	8430	101	45	127	583
80/8	80	104	140.8	13.3	80	7380	108	45	134	647



DAMPO

Modelo	Fuerza de diseño	Fuerza de fluencia esperada	Fuerza máxima esperada	Despl. de fluencia	Despl. máximo	Rigidez axial	Características del disipador			
	F_d (t)	F_{fe} (t)	F_{max} (t)	d_y (mm)	d_{max} (mm)	k_d (kg/mm)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	W_d (kg)
90/1	90	117	158.4	1.7	10	66420	44	25	72	153
90/2	90	117	158.4	3.3	20	33210	58	30	86	244
90/3	90	117	158.4	5.0	30	22140	69	35	97	329
90/4	90	117	158.4	6.7	40	16610	79	40	106	413
90/5	90	117	158.4	8.3	50	13280	87	45	114	496
90/6	90	117	158.4	10.0	60	11070	94	45	121	569
90/7	90	117	158.4	11.7	70	9490	101	50	127	650
90/8	90	117	158.4	13.3	80	8300	108	50	134	722
100/1	100	130	176.0	1.7	10	73800	44	30	72	169
100/2	100	130	176.0	3.3	20	36900	58	35	86	270
100/3	100	130	176.0	5.0	30	24600	69	40	97	364
100/4	100	130	176.0	6.7	40	18450	79	45	106	456
100/5	100	130	176.0	8.3	50	14760	87	45	114	538
100/6	100	130	176.0	10.0	60	12300	94	50	121	628
100/7	100	130	176.0	11.7	70	10540	101	55	127	717
100/8	100	130	176.0	13.3	80	9230	108	55	134	797
110/1	110	143	193.6	1.7	10	81180	44	30	72	181
110/2	110	143	193.6	3.3	20	40590	58	35	86	290
110/3	110	143	193.6	5.0	30	27060	69	40	97	392
110/4	110	143	193.6	6.7	40	20290	79	45	106	491
110/5	110	143	193.6	8.3	50	16240	87	50	114	589
110/6	110	143	193.6	10.0	60	13530	94	55	121	688
110/7	110	143	193.6	11.7	70	11600	101	55	127	774
110/8	110	143	193.6	13.3	80	10150	108	60	134	871
120/1	120	156	211.2	1.7	10	88560	44	30	72	192
120/2	120	156	211.2	3.3	20	44280	58	40	86	315
120/3	120	156	211.2	5.0	30	29520	69	45	97	426
120/4	120	156	211.2	6.7	40	22140	79	50	106	534
120/5	120	156	211.2	8.3	50	17710	87	55	114	640
120/6	120	156	211.2	10.0	60	14760	94	55	121	738
120/7	120	156	211.2	11.7	70	12650	101	60	127	841
120/8	120	156	211.2	13.3	80	11070	108	55	140	909
130/1	130	169	228.8	1.7	10	95940	44	30	72	204
130/2	130	169	228.8	3.3	20	47970	58	40	86	335
130/3	130	169	228.8	5.0	30	31980	69	45	97	454
130/4	130	169	228.8	6.7	40	23990	79	50	106	569
130/5	130	169	228.8	8.3	50	19190	87	55	114	683
130/6	130	169	228.8	10.0	60	15990	94	60	121	797
130/7	130	169	228.8	11.7	70	13710	101	55	134	874
130/8	130	169	228.8	13.3	80	11990	108	60	140	982



DAMPO

APÉNDICE B. PROPIEDADES DEL DISIPADOR DAMPO DUAL PROTECT.

La Tabla B.1 muestra las características típicas de los disipadores Dampo Dual Protect. En la primera columna se presenta el modelo del disipador, en las siguientes cuatro columnas se presentan la longitud en metros y las fuerzas de diseño, de fluencia esperada y máxima en toneladas. Después, se muestra el desplazamiento de fluencia y el desplazamiento máximo en milímetros. En las siguientes dos columnas se muestran el factor de rigidez equivalente (que considera la contribución de las conexiones) y la rigidez axial. En las últimas dos columnas se presenta el perfil HSS que conforma la camisa exterior y el peso total del disipador. Es importante aclarar que las propiedades de disipadores no enlistados en la Tabla B-1 pueden obtenerse mediante interpolación lineal entre dos disipadores similares.

Tabla B.1. Propiedades de disipadores Dampo Dual Protect.

	Long.	Fuerza de diseño	Fuerza de fluencia esperada	Fuerza máxima esperada	Despl. de fluencia	Despl. máximo	Factor de rigidez	Rigidez axial	Camisa	Peso
Modelo	L (m)	F_d (t)	F_{fe} (t)	F_{max} (t)	d_y (mm)	d_{max} (mm)	f_k	k_d (kg/mm)	Sección	W_d (kg)
40/4	4.0	40	44	56	5.0	30.0	1.26	8174	6 x 1/4	308
60/4	4.0	60	67	83	5.0	30.0	1.26	12261	7 x 1/4	417
80/4	4.0	80	89	111	5.0	30.3	1.25	16186	7 x 3/16	420
100/4	4.0	100	111	139	5.0	30.3	1.25	20220	8 x 1/4	543
120/4	4.0	120	133	167	5.0	30.0	1.26	24476	9 x 1/4	682
140/4	4.0	140	156	194	5.0	30.0	1.26	28585	10 x 1/4	823
160/4	4.0	160	178	222	4.8	29.0	1.31	33807	10 x 1/4	842
180/4	4.0	180	200	250	4.8	28.8	1.31	38275	12 x 1/4	1130
200/4	4.0	200	222	278	4.6	27.7	1.37	44219	12 x 1/4	1131
220/4	4.0	220	244	306	4.6	27.7	1.37	48696	12 x 1/4	1165
240/4	4.0	240	267	333	4.7	28.0	1.35	52467	12 x 1/4	1179
260/4	4.0	260	289	361	4.4	26.4	1.43	60249	14 x 5/16	1528
40/6	6.0	40.0	44.4	55.6	7.5	44.9	1.26	5452	6 x 5/16	480
60/6	6.0	60.0	66.7	83.3	7.5	44.9	1.26	8179	7 x 5/16	649
80/6	6.0	80.0	88.9	111.1	7.5	44.9	1.26	10902	8 x 1/4	805
100/6	6.0	100.0	111.1	138.9	7.6	45.4	1.25	13488	8 x 5/16	853
120/6	6.0	120.0	133.3	166.7	7.5	45.0	1.26	16332	9 x 1/4	1039
140/6	6.0	140.0	155.6	194.4	7.5	44.9	1.26	19077	10 x 1/4	1255
160/6	6.0	160.0	177.8	222.2	7.5	45.2	1.26	21686	10 x 1/4	1282
180/6	6.0	180.0	200.0	250.0	7.5	44.9	1.26	24528	12 x 1/4	1723
200/6	6.0	200.0	222.2	277.8	7.5	45.0	1.26	27188	12 x 1/4	1730
220/6	6.0	220.0	244.4	305.6	7.5	45.0	1.26	29931	12 x 1/4	1775
240/6	6.0	240.0	266.7	333.3	7.6	45.4	1.25	32370	12 x 1/4	1798
260/6	6.0	260.0	288.9	361.1	7.2	43.2	1.31	36886	14 x 5/16	2348



DAMPO

	Long.	Fuerza de diseño	Fuerza de fluencia esperada	Fuerza máxima esperada	Despl. de fluencia	Despl. máximo	Factor de rigidez	Rigidez axial	Camisa	Peso
Modelo	L (m)	F_d (t)	F_{fe} (t)	F_{max} (t)	d_y (mm)	d_{max} (mm)	f_k	k_d (kg/mm)	Sección	W_d (kg)
40/8	8.0	40.0	44.4	55.6	10.0	59.9	1.26	4090	7 x 5/16	813
60/8	8.0	60.0	66.7	83.3	10.0	59.9	1.26	6137	8 x 5/16	1062
80/8	8.0	80.0	88.9	111.1	10.1	60.5	1.25	8100	9 x 5/16	1316
100/8	8.0	100.0	111.1	138.9	10.1	60.5	1.25	10119	9 x 3/8	1392
120/8	8.0	120.0	133.3	166.7	10.1	60.5	1.25	12135	9 x 1/2	1513
140/8	8.0	140.0	155.6	194.4	10.1	60.5	1.25	14179	10 x 3/8	1748
160/8	8.0	160.0	177.8	222.2	10.1	60.8	1.24	16103	10 x 1/2	1856
180/8	8.0	180.0	200.0	250.0	10.0	59.9	1.26	18407	12 x 5/16	2371
200/8	8.0	200.0	222.2	277.8	10.0	60.0	1.26	20403	12 x 5/16	2391
220/8	8.0	220.0	244.4	305.6	10.0	60.0	1.26	22463	12 x 5/16	2450
240/8	8.0	240.0	266.7	333.3	10.1	60.5	1.25	24290	12 x 3/8	2528
260/8	8.0	260.0	288.9	361.1	10.0	59.9	1.26	26579	14 x 5/16	3167
280/8	8.0	280.0	311.1	388.9	10.1	60.4	1.25	28373	14 x 5/16	3193
300/8	8.0	300.0	333.3	416.7	10.0	60.0	1.26	30622	14 x 5/16	3274
320/8	8.0	320.0	355.6	444.4	10.1	60.5	1.25	32372	14 x 5/16	3296
340/8	8.0	340.0	377.8	472.2	9.6	57.7	1.31	36070	14 x 5/16	3362
360/8	8.0	360.0	400.0	500.0	9.7	58.4	1.30	37767	14 x 3/8	3429
380/8	8.0	380.0	422.2	527.8	9.7	58.4	1.30	39843	14 x 3/8	3483
400/8	8.0	400.0	444.4	555.6	9.6	57.6	1.31	42510	16 x 5/16	4230
40/10	10.0	40.0	44.4	55.6	12.5	74.8	1.26	3273	8 x 3/8	1297
60/10	10.0	60.0	66.7	83.3	12.5	74.8	1.26	4910	9 x 3/8	1644
80/10	10.0	80.0	88.9	111.1	12.5	74.8	1.26	6545	10 x 3/8	2008
100/10	10.0	100.0	111.1	138.9	12.5	74.9	1.26	8177	12 x 1/4	2636
120/10	10.0	120.0	133.3	166.7	12.5	74.9	1.26	9807	12 x 5/16	2774
140/10	10.0	140.0	155.6	194.4	12.5	74.8	1.26	11456	12 x 5/16	2848
160/10	10.0	160.0	177.8	222.2	12.5	74.9	1.26	13083	12 x 3/8	2965
180/10	10.0	180.0	200.0	250.0	12.5	74.8	1.26	14731	14 x 5/16	3770
200/10	10.0	200.0	222.2	277.8	12.5	75.0	1.26	16328	14 x 5/16	3791
220/10	10.0	220.0	244.4	305.6	12.5	74.9	1.26	17977	14 x 5/16	3866
240/10	10.0	240.0	266.7	333.3	12.5	74.9	1.26	19625	14 x 3/8	4009
260/10	10.0	260.0	288.9	361.1	12.5	74.8	1.26	21273	14 x 3/8	4068
280/10	10.0	280.0	311.1	388.9	12.5	74.8	1.26	22920	16 x 5/16	4956
300/10	10.0	300.0	333.3	416.7	12.5	74.9	1.26	24508	16 x 5/16	5016
320/10	10.0	320.0	355.6	444.4	12.5	74.9	1.26	26156	16 x 5/16	5089
340/10	10.0	340.0	377.8	472.2	12.5	75.1	1.26	27733	16 x 5/16	5092
360/10	10.0	360.0	400.0	500.0	12.5	75.0	1.26	29381	16 x 3/8	5249
380/10	10.0	380.0	422.2	527.8	12.5	75.0	1.26	31028	16 x 3/8	5322
400/10	10.0	400.0	444.4	555.6	12.5	74.9	1.26	32675	16 x 3/8	5396



APÉNDICE C. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL, TIPO PASO A PASO, DE UN EDIFICIO DE 6 NIVELES

En esta sección se presenta el procedimiento para realizar un análisis estático no lineal tipo “Empujón” o “Pushover” y un análisis dinámico no lineal, tipo paso a paso, de la estructura analizada en el Capítulo 9. Los pasos que se desarrollan se enfocan en revisar la propuesta con disipadores sísmicos. A continuación, se presentan una serie de pasos que describen el procedimiento.

Paso 1. Obtener la información sísmica del sitio donde se desplanta la estructura, la cual consiste en: espectros de peligro uniforme del sitio; acelerogramas sintéticos y sus respectivos espectros de pseudo aceleración. Para el caso de la Ciudad de México la información se puede obtener del Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID, 2017).

Paso 2. Filtrar y procesar los acelerogramas sintéticos. El filtrado corrige el ruido de los acelerogramas. Por otra parte, es recomendable reducir la duración de las señales, eliminando datos que no sean útiles para el análisis. Estos procesos se pueden realizar con el programa Prism (2011).

Paso 3. Escalar los acelerogramas sintéticos. El objetivo es conseguir que el promedio de los espectros de pseudo aceleración de los acelerogramas sea mayor o igual que el espectro de peligro uniforme normativo. Este procedimiento se realiza por separado para los sismos de subducción y para los de profundidad intermedia. El factor de escala obtenido será el mismo que se aplicará a los acelerogramas sintéticos en el análisis dinámico no lineal paso a paso.

Paso 4. Asignar articulaciones plásticas a la estructura. Estas permiten evaluar la capacidad ante carga lateral. Se definen por cada tipo de elemento estructural y depende de la interacción de fuerzas. Por ejemplo, para columnas se debe considerar, al menos, la interacción de dos momentos flexionantes y carga axial. La definición de articulaciones y su asignación depende del programa de análisis utilizado.

Paso 5. Definir análisis de cargas gravitacionales. Antes de realizar el análisis estático no lineal tipo “Empujón” o “Pushover” y el análisis dinámico no lineal paso a paso es necesario aplicar cargas gravitacionales a la estructura, lo que incluye las cargas muertas y las cargas vivas correspondientes.



DAMPO

Paso 6. Definir y realizar el análisis estático no lineal tipo “Empujón” o “*Pushover*”. Para poder realizarlo es necesario tomar como condiciones iniciales los resultados del caso de carga gravitacional. Así mismo, es necesario asignar una distribución de cargas laterales en el centro de masa de cada piso en dirección del análisis deseado. Se recomienda que sea una distribución modal. Es decir, que el perfil de fuerzas laterales sea proporcional al perfil de desplazamiento del primer modo de vibrar de la estructura en dirección del análisis a realizar. El análisis incrementa las fuerzas laterales en iteraciones hasta agotar la capacidad de la estructura. Se recomienda que las iteraciones se controlen por desplazamiento y se defina un desplazamiento objetivo, así como un nodo de control en donde se controlarán las deformaciones laterales.

Paso 7. Definir y realizar el análisis dinámico no lineal tipo paso a paso. Para poder realizarlo es necesario tomar como condiciones iniciales los resultados del caso de carga gravitacional. Posteriormente, se debe someter la estructura a los pares de acelerogramas sintéticos procesados en el Paso 2. Dichos acelerogramas deberán ser escalados con el factor obtenido en el Paso 3. Los programas calculan valores de fuerzas y desplazamientos para cada instante de tiempo. Se recomienda que se guarden solo la mitad de los resultados.

Paso 8. Análisis de resultados. Se revisan los perfiles de distorsiones, aceleraciones y velocidades máximas de entrepiso. Además, se revisa el comportamiento de los elementos estructurales y los disipadores sísmicos. Se comparan las curvas de capacidad contra desplazamientos y fuerzas máximas calculadas para verificar niveles de desempeño de la estructura.



C.1. INFORMACIÓN SÍSMICA DEL SITIO (PASO 1)

En la Ciudad de México, la información necesaria para realizar el análisis dinámico no lineal paso a paso se puede obtener del Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID, 2017).

En la Figura 54 se muestra la interfaz principal del sistema. Se destacan las casillas que se deben capturar, las cuales se enumeran conforme a la siguiente lista:

- 1) Se selecciona un factor de hiperestaticidad. Para un sistema dual se puede utilizar el valor $k_1 = 1.25$ como se indica en las NTC Sismo (2017). Este dato también se incluye en la Tabla 16 de la Sección 9.8.
- 2) Se selecciona el grupo al que pertenece la estructura. En el ejemplo se selecciona el Grupo B por ser un edificio de oficinas.
- 3) Se selecciona un factor de irregularidad para la estructura de acuerdo con las condiciones incluidas en las NTC Sismo (2017). Para el ejemplo se utiliza un valor de 1.
- 4) Se selecciona la opción de generar acelerogramas sintéticos pulsando sobre la opción “Si” como se muestra en la imagen.
- 5) Seleccionar si la estructura es de mampostería. En el ejemplo, el edificio es de marcos de acero, por lo tanto, se selecciona la opción “No”.
- 6) Es requisito proporcionar una dirección del predio. En el ejemplo se proporciona únicamente la calle por ser una estructura ficticia.
- 7) Se capturan las coordenadas del predio. Los datos del ejemplo se muestran en la Tabla 16 de la Sección 9.8. Estas coordenadas se pueden obtener directamente de sistemas de geolocalización, por ejemplo: el sistema de Seduvi-Sig o Google Maps.
- 8) Presionar el botón “Ir a las Coordenadas escritas” para indicar la ubicación al sistema y actualizar el mapa que se muestra en la Figura 55.



DAMPO

Seleccione los parámetros para la obtención de información:

Factor de hiperestaticidad (k1): 1.25 (1)

Factor de Importancia (Grupo): B (2)

Factor de Irregularidad: 1.0 (3)

¿Desea generar Acelerogramas Sintéticos? No Si (4)

¿La estructura es de mampostería? No Si (5)

* Proporcione una dirección del predio: (máximo 500 caracteres)

Avenida Xola (6)

Seleccione en el mapa el punto de interés. Si usted conoce las coordenadas del punto, por favor escribalas y presione el botón "Ir a las Coordenadas escritas"

Latitud: 19.39425 (7)

Longitud: -99.147939 (7)

Ir a las Coordenadas escritas (8)

Figura 54 Primera parte de la interfaz del SASID (2017)

En la Figura 55 se presenta la segunda parte de la interfaz del SASID (2017) y se numeran 3 zonas de interés que se describen en la siguiente lista:

- 1) Se muestran las coordenadas capturadas y un recuadro que permite buscar el predio por dirección si no se cuenta con las coordenadas.
- 2) Esta sección muestra un mapa donde se indica la ubicación del predio. Es importante verificar que la ubicación sea la correcta.
- 3) Una vez verificada la ubicación, se presiona el botón "Procesar" para generar los espectros de diseño, tal como se observa en la Figura 56.

Mapa de la Ciudad de México

1) Coordenadas: (lat:19.39425, lng: -99.147939)

Búsqueda de predio por dirección

2) Mapa Satélite

Espectros

- Básico sin reducir
- Diseño, Q=1
- Diseño, Q=1.5
- Diseño, Q=2
- Diseño, Q=3
- Diseño, Q=4
- Peligro uniforme

3) Procesar Generar documento

PARA INICIAR EL PROCESO

- 1 Seleccione en el mapa el punto de interés
- 2 Con la ubicación seleccionada presione el boton PROCESAR
- 3 Se generarán los espectros

Figura 55 Segunda parte de la interfaz del SASID (2017)



DAMPO

En la Figura 56 se muestra la interfaz del sistema después de presionar el botón “Procesar”. Se indican tres áreas actualizadas que se describen en la siguiente lista:

- 1) Se muestran los espectros del sitio solicitado. Los cuales incluyen el espectro elástico, los espectros de diseño (ED) correspondientes a 5 factores de comportamiento sísmico y el espectro de peligro uniforme (EPU)
- 2) Se activa el botón “Generar documento”. Al presionarlo se descarga una carpeta comprimida que incluye tres archivos que son: un reporte en formato “PDF” con la información que se muestra en la interfaz y los datos tanto de los ED como de los EPU por familia y época; un archivo de texto (EspectrosDis.txt) con los datos de los ED y el EPU total; y un archivo de texto (Epu.txt) con los datos de los EPU por familia y época.
- 3) Se muestra una sección que permite solicitar los acelerogramas sintéticos. Se debe presionar el botón “Generar y enviar por correo” para recibir una carpeta comprimida que incluye: 8 o 12 archivos de texto con parejas de acelerogramas sintéticos; y 8 o 12 archivos con los espectros de pseudo aceleración correspondientes a cada acelerograma.

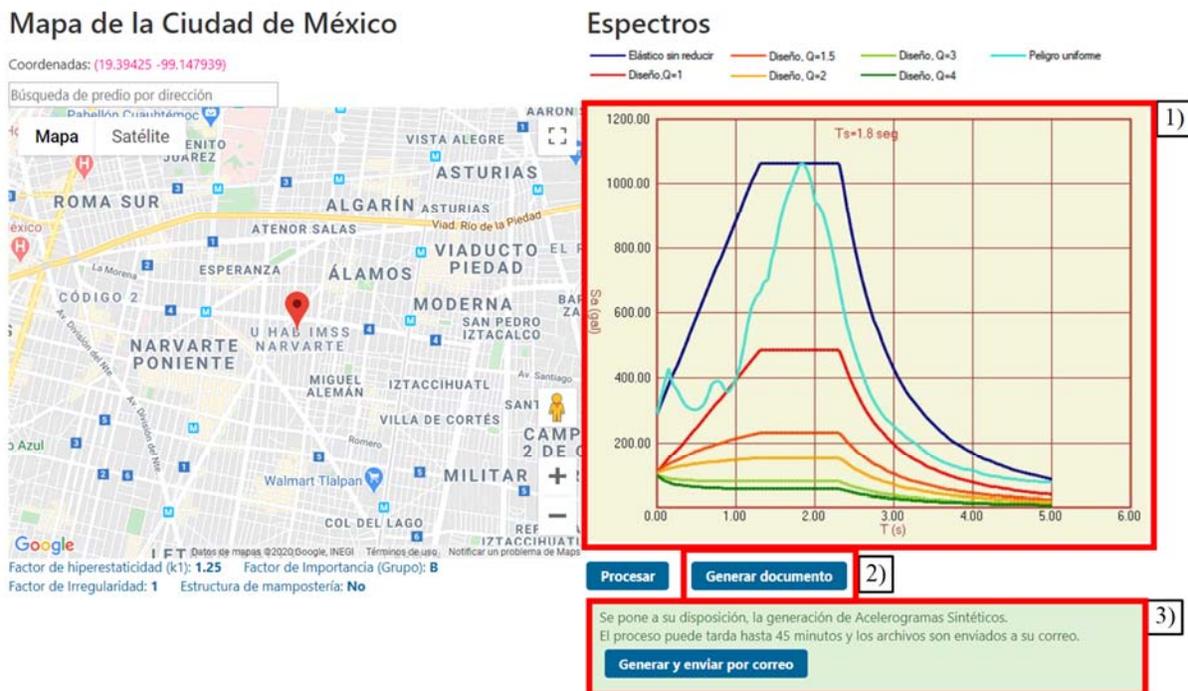


Figura 56 Segunda parte de la interfaz del SASID (2017) actualizada



DAMPO

Para mostrar la información contenida en la primera carpeta descargada, en la Figura 57 se grafican los ED y el EPU para el sitio seleccionado. Estos espectros se graficaron con los datos contenidos en el archivo “EspectrosDis.txt”. Se puede comprobar que las gráficas son iguales a las mostrada en la interfaz del SASID.

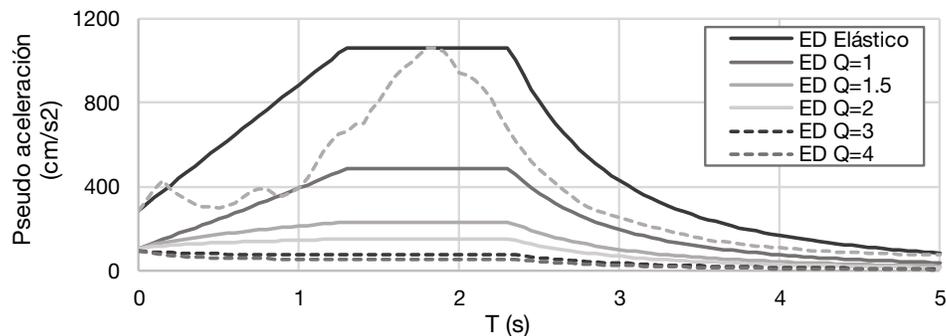


Figura 57 Espectros de diseño y espectro de peligro uniforme del sitio

En la Figura 58 se muestran las curvas correspondientes a los EPU del sitio. Los datos se encuentran en el archivo “Epu.txt”. Las curvas E1, E2 y E3 corresponden a proyecciones de los EPU en las próximas décadas. Siendo la curva E3 la más lejana en el tiempo. El cambio de la curva toma en cuenta el fenómeno de consolidación regional en la Ciudad de México. La curva denominada “Actual” corresponde al EPU en el presente.

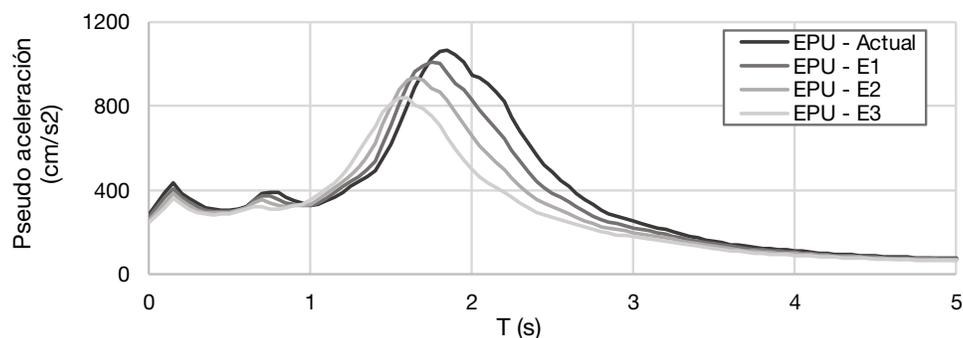


Figura 58 Espectros de peligro uniforme totales por época

Cabe destacar, que también se incluyen los EPU por época y fuente sísmica. Es decir, un grupo de datos representa los sismos de subducción y otro los de profundidad intermedia.

A continuación, se muestran ejemplos de los datos que se incluyen en la carpeta comprimida que se envía por correo. En ella se incluye un archivo por cada par de acelerogramas sintéticos y un archivo por cada par de espectros de respuesta. Para el ejemplo que se estudia en esta



DAMPO

guía, se incluyen ocho sismos de subducción, cuatro de profundidad intermedia, y sus correspondientes espectros de pseudo-aceleración.

En la Figura 59 se muestran dos acelerogramas, la línea en color gris corresponde a una de las componentes de un movimiento sísmico de profundidad intermedia. Por su parte, con la línea color negro se muestra una de las componentes de un movimiento sísmico de subducción. Cabe destacar que la diferencia más notoria entre las señales es la duración de la excitación. Se aprecia que la fase intensa de un movimiento de subducción tiene una mayor duración que uno de profundidad intermedia.

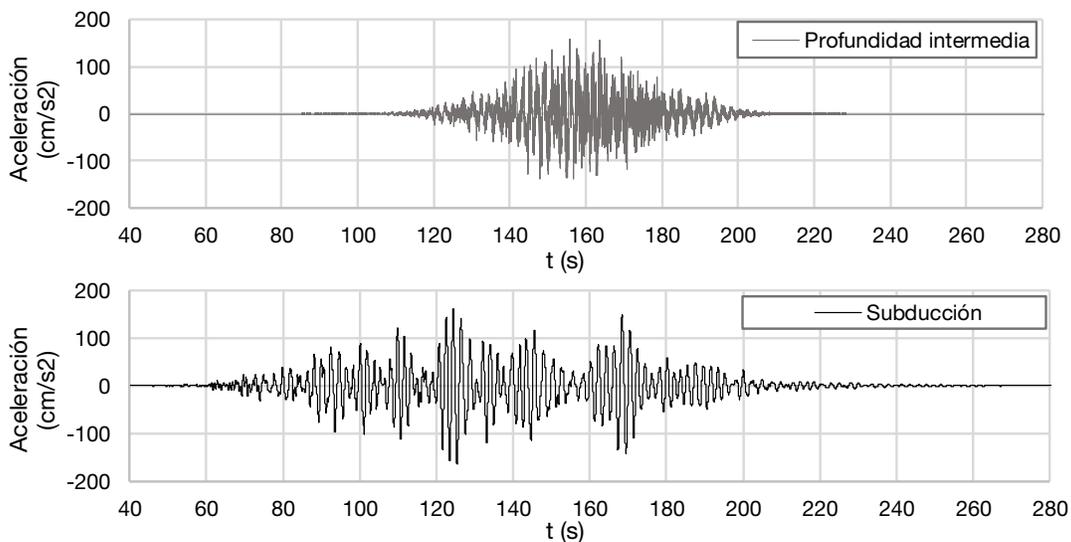


Figura 59 Acelerogramas sintéticos de subducción y profundidad intermedia

En la Figura 60 se muestran los espectros de respuesta de las señales sísmicas de la Figura 59. Se observa una clara diferencia en la forma de los espectros para cada tipo de fuente. Esto se debe a que la forma de espectro está relacionada con las características del acelerograma.

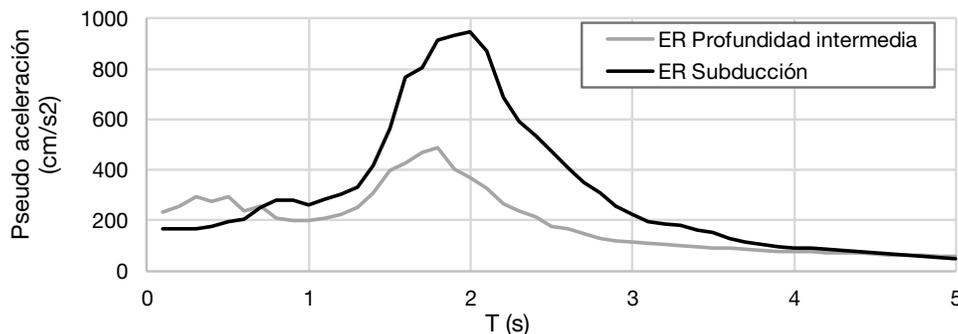


Figura 60 Espectro de respuesta para sismos de subducción y profundidad intermedia



C.2. FILTRADO Y PROCESADO DE ACELEROGRAMAS (PASO 2)

El procesamiento de los acelerogramas, ya sean sintéticos o registrados, es de gran utilidad. Por un lado, elimina el ruido en la señal sísmica, lo cual se logra con un proceso de filtrado que elimina intervalos de frecuencias que no son de interés en el análisis estructural. También, se eliminan los datos extremos que son poco relevantes para la respuesta global de la estructura.

Para procesar los acelerogramas se recomienda utilizar el programa Prism (2011). Este programa es de distribución libre. Para descargarlo se debe acceder a la siguiente dirección electrónica:

<http://sem.inha.ac.kr/program/index.htm>

Para ejemplificar el filtrado y procesamiento de acelerogramas utilizaremos la información de un sismo sintético de subducción proporcionado por el SASID (2017). En la Figura 61 se muestra un ejemplo de la información incluida en los archivos de los acelerogramas y se identifican zonas de interés que se describen en la siguiente lista:

- 1) Nombre de archivo que identifica el tipo de fuente sísmica y un número consecutivo.
- 2) Información general sobre las condiciones del sitio y los supuestos utilizados para generar el acelerograma.
- 3) El número total de datos de aceleración o puntos que tiene el acelerograma.
- 4) El paso de tiempo del acelerograma, es decir, el tiempo que transcurre entre dos valores de aceleración. En este ejemplo el valor es 0.01 s.
- 5) Columna de datos de aceleración en cm/s^2 de la primera componente del acelerograma.
- 6) Columna de datos de aceleración en cm/s^2 de la segunda componente del acelerograma.

```
1) Acelerograma_Subducción_1_txt.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
2) 3/19/2020 4:07:22 PM
   Latitud=19.394 Longitud=-99.148
   Acelerogramas considerando Q=1 y sin reducción por sobrerresistencia
   TsActual=1.8 s
   Acelerogramas compatibles con un periodo de retorno de 250 años
3) Npuntos acelerogramas=32768
4) Dt=0.01 s
5) a(t)_h1 [cm/s2]
   3.27E-07
   3.31E-07
   3.28E-07
6) a(t)_h2 [cm/s2]
   -2.33E-06
   -2.60E-06
   -2.99E-06
```

Figura 61 Ejemplo de archivo de texto con información de acelerograma



DAMPO

Para procesar los acelerogramas es necesario separar las componentes del sismo y generar un archivo independiente por cada una. Se recomienda nombrar los archivos incluyendo: la fuente sísmica, un número consecutivo y la dirección de la componente, por ejemplo: “Subducción_1_X.txt”. También se recomienda incluir únicamente los datos de aceleración sin ninguna información adicional como se muestra en la Figura 62.

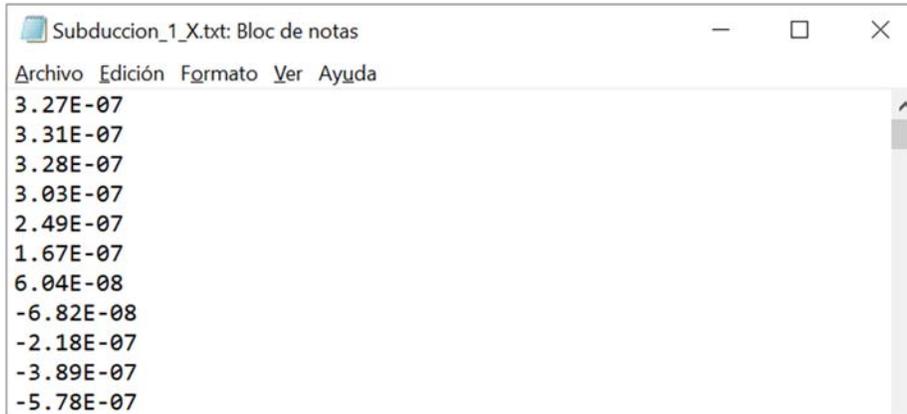


Figura 62 Ejemplo de archivo de texto para una sola componente

Con los archivos generados para cada componente se puede iniciar el procesado de los acelerogramas en el programa Prism (2011). En la Figura 63 se muestra la interfaz inicial del programa y se indica el icono que se debe presionar para cargar un acelerograma nuevo.

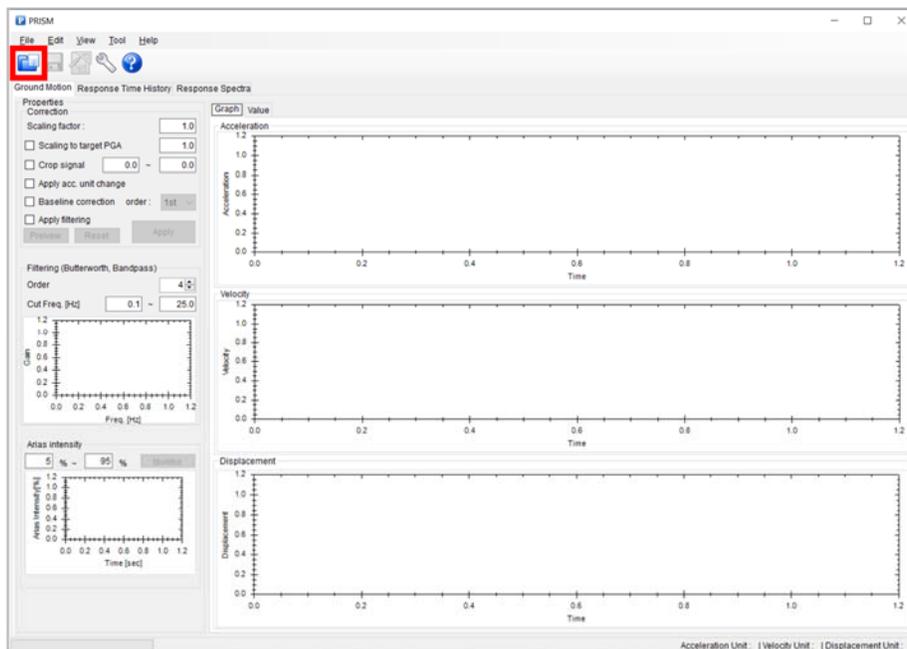


Figura 63 Interfaz inicial del programa Prism (2011)



DAMPO

Una vez localizado y abierto el archivo de la componente, se activa la ventana que se muestra en la Figura 64. Para cargar correctamente el acelerograma se deben capturar las casillas que se indican en la figura. Las casillas se encuentran numeradas y su descripción se presenta en la siguiente lista:

- 1) Se seleccionan las unidades de los datos de aceleración, esto depende de la información original y para este ejemplo corresponden a cm/s^2 .
- 2) Se debe indicar la primera línea del archivo que tiene datos de aceleración. Siguiendo la recomendación para crear los archivos de las componentes, en el ejemplo es la línea 1 donde inician los valores de aceleración.
- 3) Se debe indicar la última línea del archivo que tiene datos de aceleración. Para el ejemplo el valor corresponde con el número total de datos del archivo, es decir 32768.
- 4) Se captura el valor del paso de tiempo con el que se tomaron los datos del acelerograma. Para los datos del ejemplo el valor es 0.01. Para poderlo capturar primero se debe desactivar la opción “*auto detect*”

1) Units of Raw Data File

g cm/sec²

mm/sec² m/sec²

in/sec² ft/sec²

2) First Line to read 1

3) Max. Line to read 32768

4) Time Step (auto detect) 0.01

OK

CANCEL

Data Setting

NGDC/NGA Format

First Line to read 1

Time Step 0.01

Num. of data each line 6

Delimiters

default delimiters ([space],[tab],[,],[.],[/],[']) use custom delimiter

Raw File Data

1	3.27E-07
2	3.31E-07
3	3.28E-07
4	3.03E-07
5	2.49E-07
6	1.67E-07
7	6.04E-08
8	-6.82E-08
9	-2.18E-07
10	-3.89E-07
11	-5.78E-07
12	-7.77E-07
13	-9.77E-07
14	-1.17E-06
15	-1.35E-06

Line number

Figura 64 Ventana de selección de atributos del archivo de texto



DAMPO

Concluida la captura de datos se presionar el botón “OK” y el programa regresa a la interfaz inicial. En la Figura 65 se muestra el resultado de cargar correctamente la componente del primer sismo de subducción. Se indican en la figura cuatro zonas de interés para procesar el acelerograma. La descripción de las zonas indicadas se presenta en la siguiente lista:

- 1) Se presenta una imagen del acelerograma cargado, en la cual se pueden analizar los tiempos donde la intensidad se reduce casi a cero. En la figura se indican estos tiempos con líneas rojas y corresponde a 60 y 220 segundos.
- 2) En estas casillas se indica el ajuste al tiempo del acelerograma. Se debe marcar la casilla “Crop signal” y después capturar los valores identificados en la zona 1
- 3) Se debe marcar la casilla “Apply filtering” para poder eliminar el ruido en la señal
- 4) En esta zona se seleccionan los parámetros para el filtrado de la señal. Se recomienda utilizar los siguientes valores: para la casilla “Order” mantener el valor de 4; para las casillas de “Cut Freq. [Hz]” se recomienda utilizar el intervalo de 0.1 a 20 Hz, que es equivalente a un intervalo de periodos de 0.05 a 10.0 s

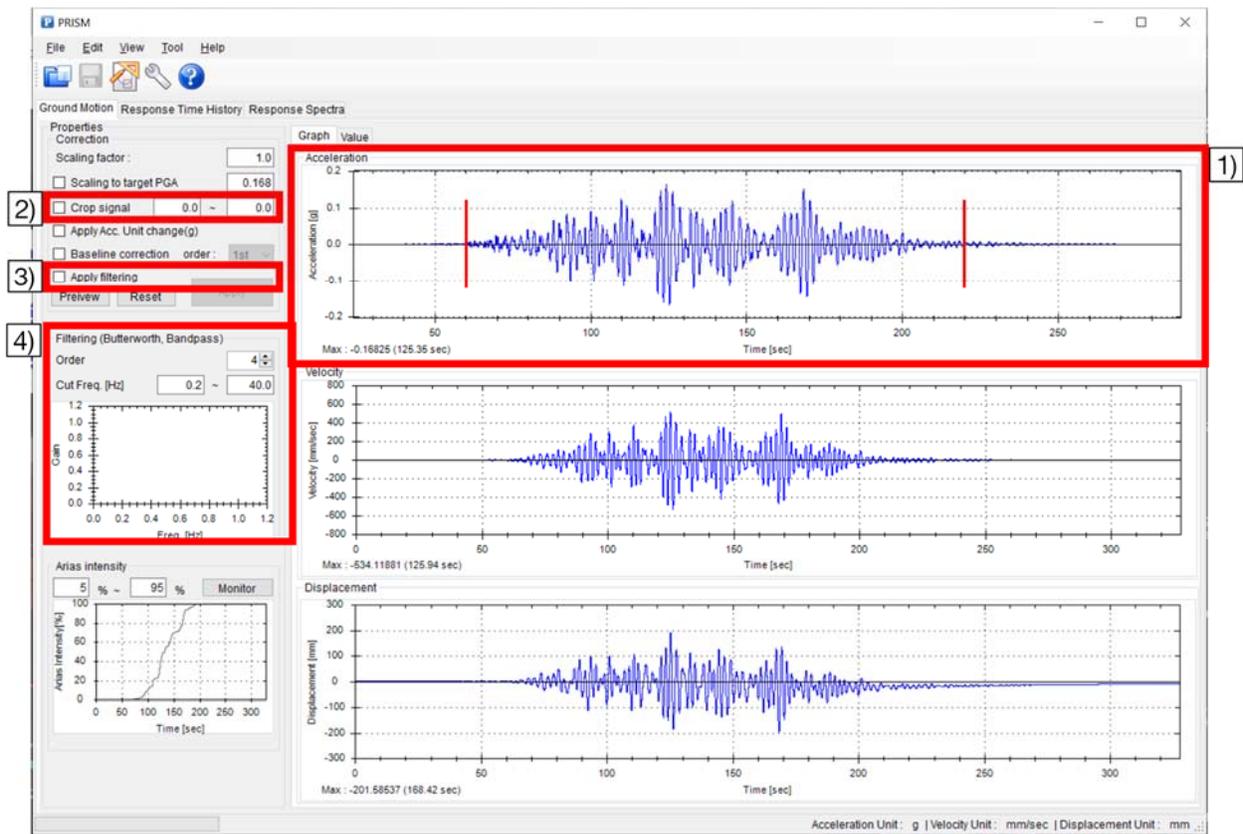


Figura 65 Interfaz inicial del programa Prism (2011) con el acelerograma cargado



DAMPO

Una vez capturados los valores recomendados, se presiona el botón “*Preview*” y la interfaz se actualiza como se muestra en la Figura 66. Se pueden observar enlistadas las gráficas de aceleración (1), velocidad (2) y desplazamiento (3), las cuales se modifican de acuerdo con el filtrado aplicado.

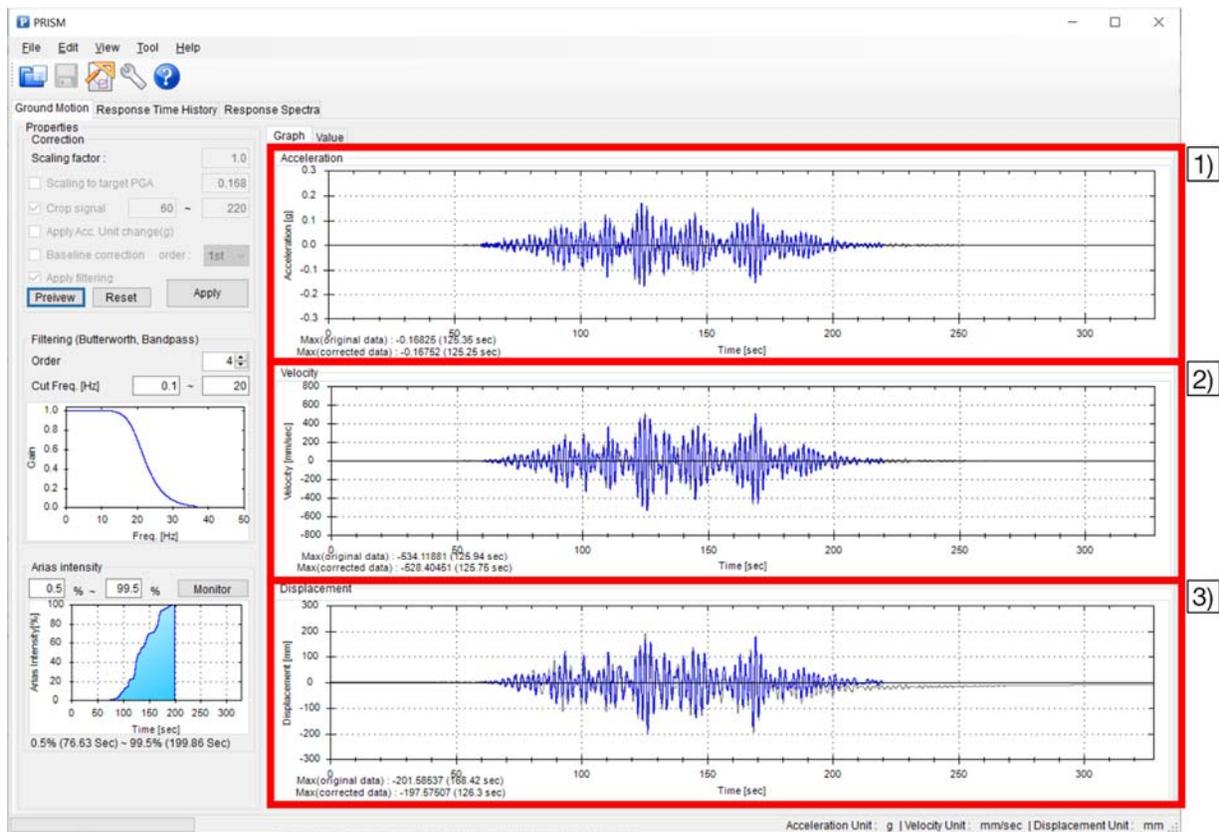


Figura 66 Interfaz del programa Prism (2011) con el acelerograma procesado

Cabe destacar que en todas las gráficas se indica con una línea color gris la señal original y en color azul la señal procesada. La diferencia entre estas líneas es más evidente para la gráfica de desplazamiento. Se puede observar que después del procesamiento esta señal oscila alrededor del eje horizontal, lo cual es un comportamiento deseable.

Una vez verificados y aceptados los resultados del procesamiento de datos se procede a presionar el botón “*Apply*”. De esta forma el resultado se mantiene como definitivo y es posible guardarlo. Se recomienda guardar el resultado en un archivo nuevo accediendo al menú “*File – Save Corrected Acelerogram As*”, en la ventana nueva seleccionar una ubicación y nombre de archivo similar al utilizado en el acelerograma, pero que indique que ya fue procesado.



C.3. ESCALADO DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS (PASO 3)

En esta sección se presenta un procedimiento para determinar factores de escalamiento para los acelerogramas sintéticos. El objetivo es incrementar la intensidad de las aceleraciones sísmicas tal que las demandas sobre la estructura sean compatibles con las demandas de sismos máximos esperados en el sitio.

El método recomendado consiste, en términos generales, en escalar sus espectros de pseudo aceleración, promediarlos y compararlos con los espectros de peligro uniforme (EPU) normativos. Para ejemplificar el procedimiento detallado se analizan los acelerogramas sintéticos de los sismos de subducción.

Se recomienda iniciar el proceso combinando los espectros de pseudo-aceleración de las componentes de cada sismo. Se pueden calcular los valores del espectro combinado por medio de la media cuadrática de los valores de los espectros de las componentes del sismo. En este ejemplo, la combinación de los valores de aceleración se puede hacer con la ecuación (17).

$$a_T = \sqrt{\frac{a_{1T}^2 + a_{2T}^2}{2}} \quad (17)$$

donde a_T es el valor de pseudo aceleración del espectro combinado para un periodo T y a_{1T} , a_{2T} son los valores de pseudo aceleración del espectro de la primera y segunda componente respectivamente, para el mismo periodo T .

Utilizando la ecuación (17) con todos los valores de pseudo-aceleración de los espectros se obtiene el espectro combinado.

En la Figura 67 se presenta un ejemplo del proceso aplicado en los espectros del primer sismo de subducción. En la figura se muestra con líneas grises los espectros de cada componente y con línea negra punteada se muestra el espectro combinado. Se puede apreciar que el espectro combinado es muy similar a los espectros de los componentes. Esto es consecuencia de que los acelerogramas sintéticos para cada componente también son similares.

Los espectros que se muestran en la Figura 67 para cada componente se obtienen directamente de los archivos generados por el SASID (2017), sin embargo, es posible calcular los espectros a partir de los acelerogramas utilizando programas como Prism (2011).



DAMPO

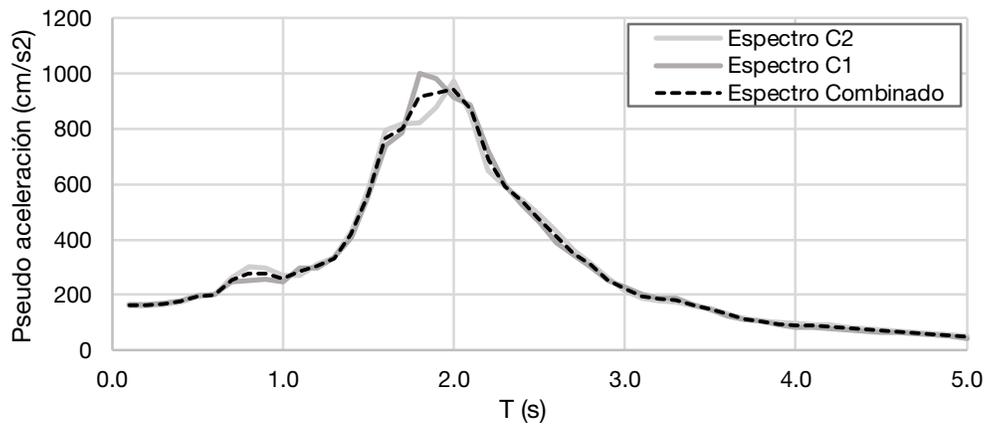


Figura 67 Combinación de espectros de cada componente

Una vez calculados los espectros combinados para los 8 acelerogramas de subducción, se aplica un factor de escala a cada uno de ellos. Es decir, se multiplican todos sus valores de pseudo aceleración por una constante. Se recomienda iniciar el escalado usando la misma constante en todos los sismos. Después, se promedian los espectros de los 8 sismos para obtener el espectro que se compara con los EPU normativos.

En la Figura 68 se muestran los espectros de pseudo-aceleración de todos los acelerogramas sintéticos de subducción con líneas en escala de grises. También, se muestra el espectro que corresponde al promedio con línea discontinua en color negro. Se puede apreciar en la figura la variabilidad de formas en los espectros de cada acelerograma, principalmente en el intervalo de mayor magnitud de aceleración.

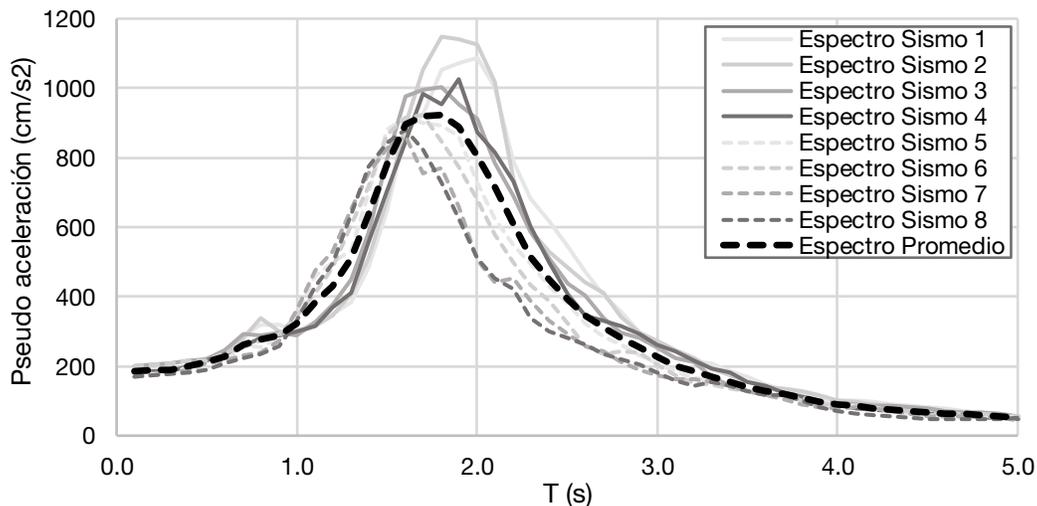


Figura 68 Espectros combinados por sismo y promedio



DAMPO

A continuación, se debe comparar el espectro promedio de los acelerogramas con los espectros de peligro uniforme proporcionados por el SASID (2017). Los EPU requeridos para este ejemplo son aquellos que corresponden a la fuente sísmica de subducción y para las cuatro épocas que se incluyen. En la Figura 69 se muestran los EPU para las cuatro épocas consideradas en escala de grises y el espectro promedio con línea discontinua color negro. Se aprecia que el espectro promedio es muy similar a la envolvente de los EPU, especialmente en el intervalo de periodos cercanos al periodo dominante de la estructura ($\approx 0.7s$).

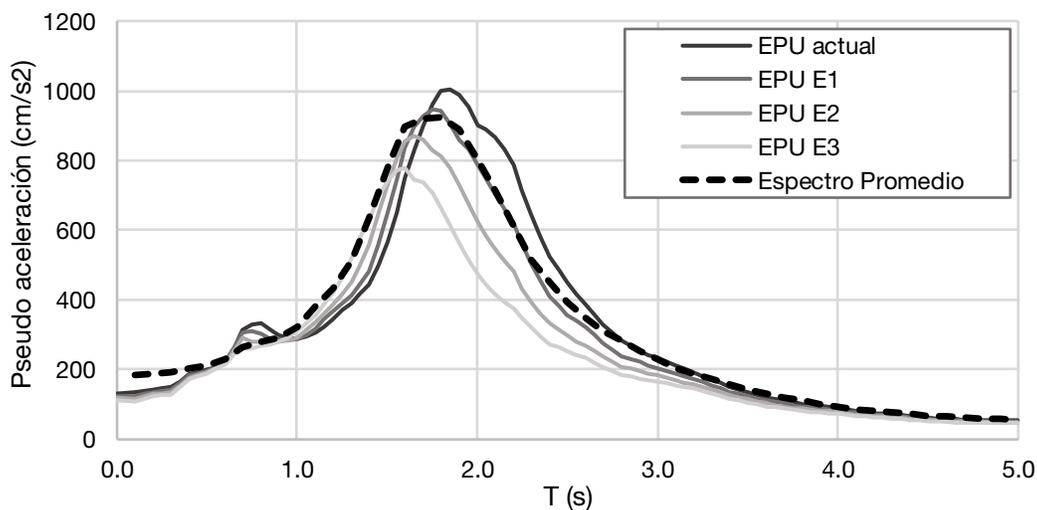


Figura 69 Comparación entre EPU y el espectro promedio para sismos de subducción

Cabe aclarar que el espectro promedio que se muestra en la Figura 69 ya considera factores de escala, los cuales se determinan con un proceso iterativo. Inicialmente, se incrementan los espectros en la misma proporción hasta lograr un espectro promedio que supere los EPU. Posteriormente, si es necesario, se pueden modificar factores de escala específicos, inspeccionando la forma de los espectros y observando su influencia en el promedio.

En la Figura 70 se muestra el resultado final del mismo procedimiento aplicado ahora a los acelerogramas de profundidad intermedia. En escala de grises se muestran los EPU correspondientes y en línea discontinua color negro se muestra el espectro promedio. Se aprecia que el espectro promedio es muy similar a la envolvente de los EPU, especialmente en el intervalo de periodos cercanos al periodo dominante de la estructura ($\approx 0.7s$).



DAMPO

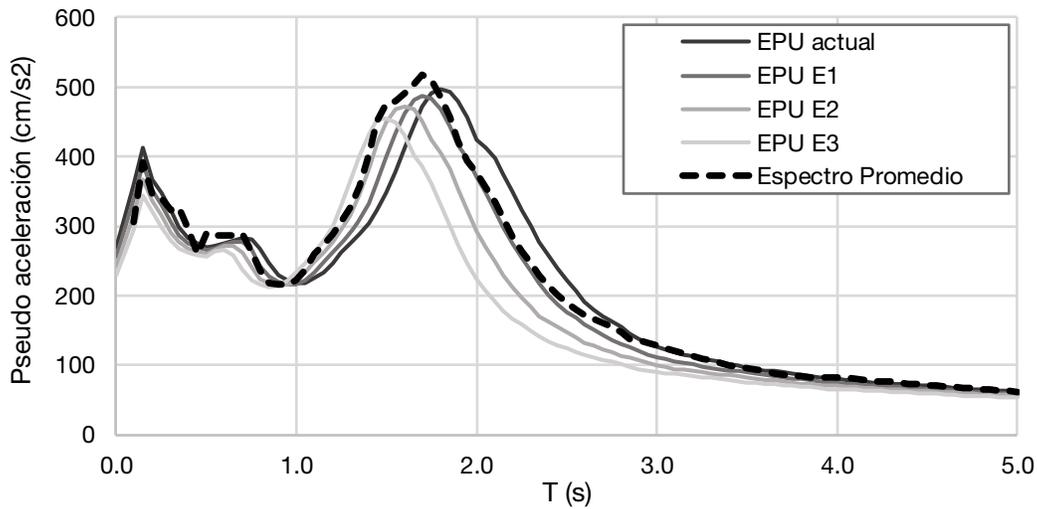


Figura 70 Comparación entre EPU y el espectro promedio para profundidad intermedia

En la Tabla 17 se muestran los factores de escala determinados para todos los acelerogramas que se utilizan en el ejemplo. En la primera columna se indica el tipo de fuente, después un número consecutivo que identifica cada acelerograma y en la última columna se muestra el factor de escala que les corresponde. Cabe aclarar que con este procedimiento el factor de escala es igual para ambas componentes del acelerograma.

Tabla 17. Factores de escala para los acelerogramas sintéticos

Fuente sísmica	Consecutivo	Factor de escala
Subducción	1	1.15
	2	1.15
	3	1.15
	4	1.15
	5	1.15
	6	1.15
	7	1.15
	8	1.15
Profundidad intermedia	1	1.15
	2	1.15
	3	1.15
	4	1.15



C.4. DEFINICIÓN Y ASIGNACIÓN DE ARTICULACIONES PLÁSTICAS (PASO 5)

Los programas de análisis no lineal, como Etabs (2016), requieren definir la ubicación de articulaciones en los elementos estructurales que se considera, que presentarán comportamiento no lineal. Dicho comportamiento se puede definir utilizando modelos de plasticidad distribuida o de plasticidad concentrada.

Para el ejemplo se utilizaron modelos de plasticidad concentrada, es decir, que el comportamiento no lineal se concentra en puntos específicos, mientras que el resto permanece elástico lineal. Con este modelo se asume que los elementos tienen suficiente capacidad a fuerza cortante. Por lo cual, es importante revisar dicha capacidad en ambas direcciones al final del análisis. Para los elementos tipo columna se asigna una articulación que considere la interacción entre carga axial y momento, mientras que para los elementos tipo trabe la articulación que se asignará será la debida a momento.

A continuación, se muestra el proceso para asignar articulaciones plásticas en Etabs (2016) en columnas. Para esto, es necesario tener el modelo completamente dibujado y las columnas seleccionadas. Un método práctico de selección es utilizar el menú “Select” – “Select” – “Object Type” como se muestra en la Figura 71a. Con esta acción se muestra una ventana emergente, en la cual, se debe seleccionar el objeto “Columns” y después presionar los botones “Select” y “Close”, como se indica en la Figura 71b.

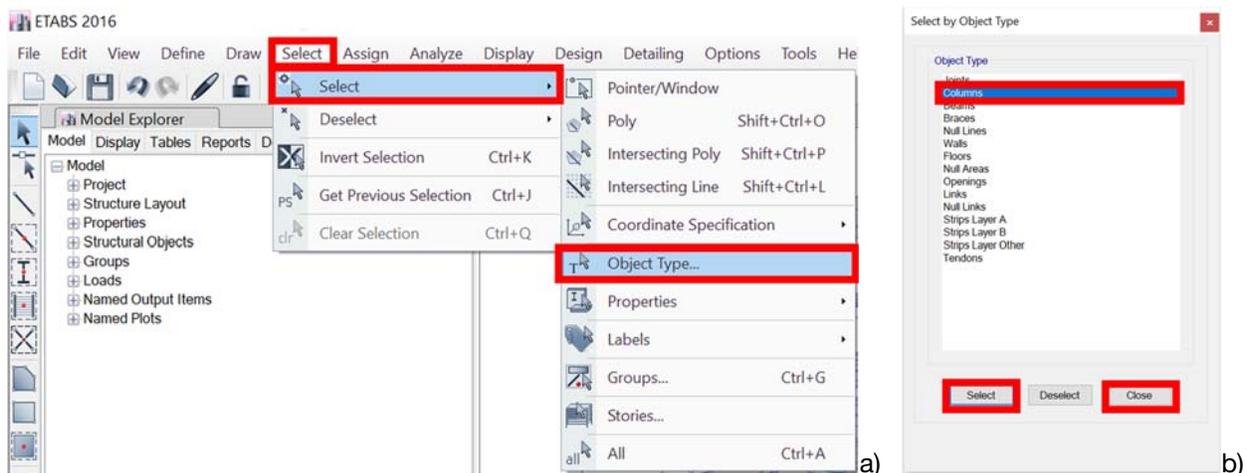


Figura 71 Método de selección de columnas



DAMPO

Con las columnas seleccionadas se debe acceder al menú “Assign” – “Frame” – “Hinges...” y seleccionarlo como se muestra en la Figura 72.

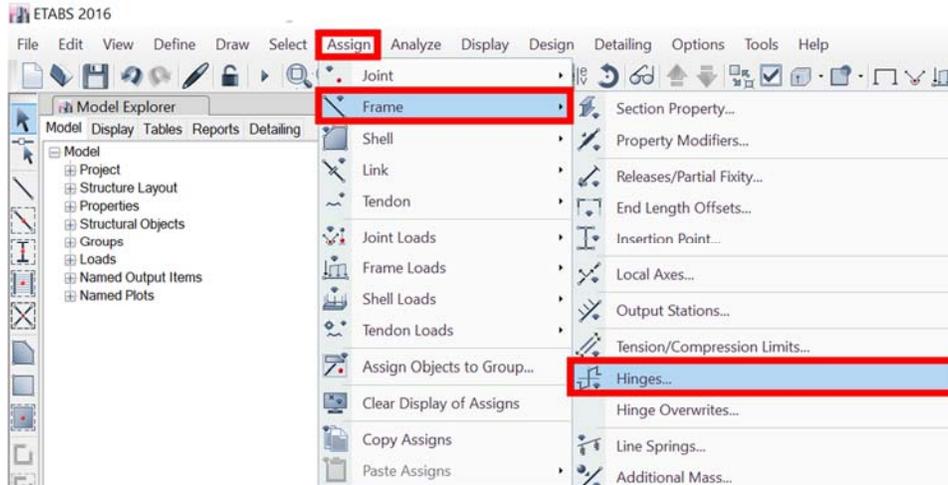


Figura 72 Menú para asignar articulaciones plásticas

A continuación, se activa la ventana que se muestra en la Figura 73 en la cual se indica una casilla de captura denominada “Relative Distance”. En esta casilla se recomienda colocar primero el valor 0.05 y presionar el botón “Add”. Esta acción define una articulación plástica sobre el elemento que se ubica, a partir de su origen, a una distancia igual a 0.05 veces la longitud de la barra. Por ejemplo, para una barra de 300 cm de alto la articulación se ubica a una distancia $d_{ap} = 300 * 0.05 = 15 \text{ cm}$ a partir de su base.

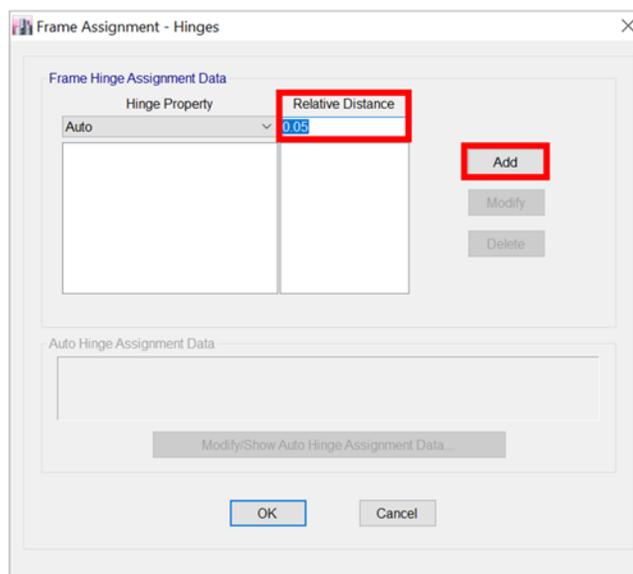


Figura 73 Ventana de asignación de articulaciones plásticas



DAMPO

Una vez presionado el botón “Add” aparece la ventana que se muestra en la Figura 74 donde indican tres zonas que se deben seleccionar y cuyos valores se definen en la siguiente lista:

- 1) En esta lista desplegable se muestran los códigos de diseño que se pueden seleccionar para definir articulaciones plásticas. En los códigos se incluyen criterios para definir articulaciones, los cuales dependen del tipo de elemento y material. Para el ejemplo se recomienda seleccionar la opción “*From Tables in ASCE 41-13*”
- 2) En esta lista desplegable se muestran las tablas disponibles para el código elegido. Cada una incluye una descripción del tipo de elemento y material para el que son aplicables las tablas. Para las columnas del ejemplo se debe seleccionar la opción “*Table 9-6 (Steel Columns – Flexure)*”
- 3) En esta zona se seleccionan los elementos mecánicos que se deben monitorear para definir el comportamiento de la articulación plástica. Para las columnas del ejemplo son relevantes los momentos en las dos direcciones y la carga axial. Por lo tanto, se recomienda seleccionar la opción “P-M2-M3” indicada en la figura

Figura 74 Asignación del tipo de articulación para columnas

Una vez concluida la selección de características de las articulaciones plásticas se presiona el botón “OK” y el programa regresa a la ventana previa (Figura 73). Se recomienda definir otra articulación con una distancia relativa igual a 0.95 utilizando el mismo procedimiento.



DAMPO

Con la segunda articulación se debe obtener la ventana que se muestra en la Figura 75. Ahí se observan las dos articulaciones con distancias relativas de 0.05 y 0.95. Ahora se presiona el botón “OK” y se concluye la asignación de articulaciones en columnas.

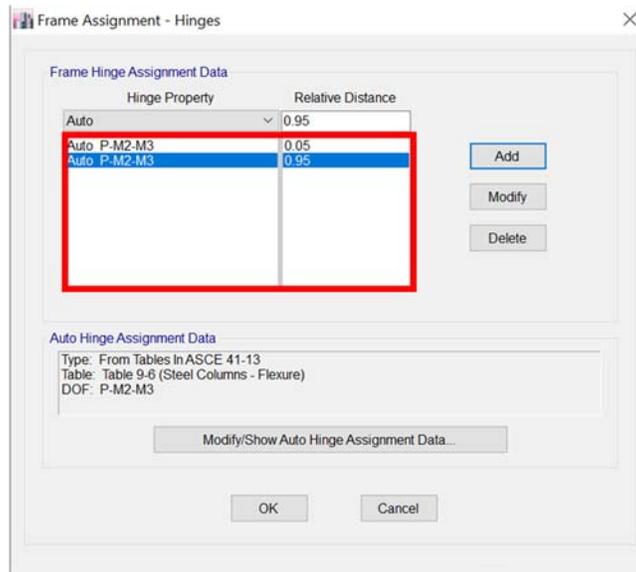


Figura 75 Ventana de asignación de articulaciones plásticas

El siguiente proceso es definir las articulaciones plásticas en vigas. Se recomienda que únicamente se asignen articulaciones en las vigas con conexión a momento para que el análisis sea más eficiente, pues en trabes con conexión flexible no se espera que se formen articulaciones. Para seleccionar las vigas se puede utilizar nuevamente el menú “Select” como se muestra en la Figura 76, seleccionado el tipo “Beams”.

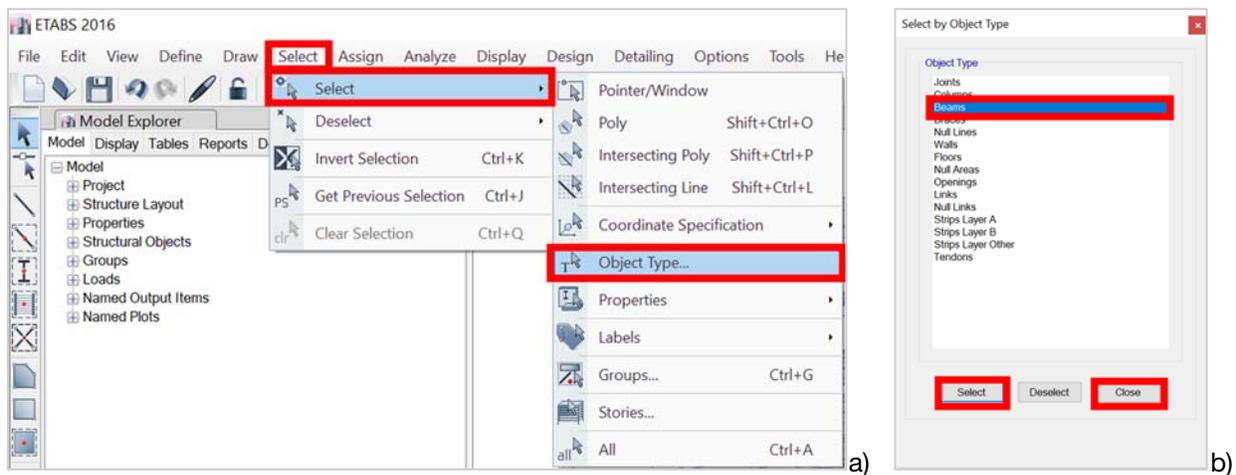


Figura 76 Método de selección de columnas



DAMPO

Una vez seleccionadas todas las vigas se pueden remover de la selección a las vigas secundarias. Posteriormente, se realiza el mismo procedimiento general utilizado para columnas, con la diferencia en el tipo de articulación. En la Figura 77 se muestra la ventana donde se define el tipo de articulación, donde indican las tres zonas que se deben seleccionar y los valores para vigas se definen en la siguiente lista:

- 1) En esta lista desplegable se recomienda seleccionar el mismo código utilizado para las columnas. Es decir, la opción *“From Tables in ASCE 41-13”*
- 2) En esta lista desplegable se debe seleccionar la tabla correspondiente a vigas, es decir *“Table 9-6 (Steel Beams – Flexure)”*
- 3) En esta zona se selecciona el elemento mecánico que se debe monitorear en las vigas para definir el comportamiento de la articulación plástica. Para el ejemplo, se recomienda seleccionar la opción *“M3”* indicada en la figura.

Auto Hinge Assignment Data

1) Auto Hinge Type
From Tables In ASCE 41-13

2) Select a Hinge Table
Table 9-6 (Steel Beams - Flexure)

3) Degree of Freedom
 M2
 M3

Deformation Controlled Hinge Load Carrying Capacity
 Drops Load After Point E
 Is Extrapolated After Point E

OK Cancel

Figura 77 Asignación del tipo de articulación para vigas

Nota importante. Se recomienda ampliamente leer los capítulos 9 y 10 del estándar ASCE 41-13 (2013) para tener una mejor comprensión de las articulaciones en elementos estructurales.



DAMPO

C.5. DEFINICIÓN DE CASO DE CARGA ESTÁTICO NO LINEAL GRAVITACIONAL (PASO 5)

Para los análisis no lineales (estáticos y dinámicos), que se describen en este ejemplo, se toman como condiciones iniciales un estado de carga que considera el peso gravitacional en el edificio. Este estado de carga considera: el peso propio, las cargas muertas y las cargas vivas instantáneas. En el programa Etabs (2016) las cargas gravitacionales se deben incluir en un caso de carga estático no lineal para considerarse como estado de carga inicial.

A continuación, se muestra el proceso para definir el caso de carga gravitacional en Etabs (2016). Cabe mencionar que la magnitud de las cargas y la denominación de cada grupo se definieron en el Capítulo 9.

Primero, se debe acceder al menú “Define” – “Load Cases” como se muestra en la Figura 78 del lado izquierdo. Al seleccionar el menú indicado, se activa una ventana donde se administran los casos de carga. Esta ventana se muestra en la Figura 78 del lado derecho y se puede observar que incluye todos los casos de carga definidos previamente. Para agregar un nuevo caso de carga debemos presionar el botón “Add New Case” indicado en la figura y se activa una nueva ventana que se describe a continuación.

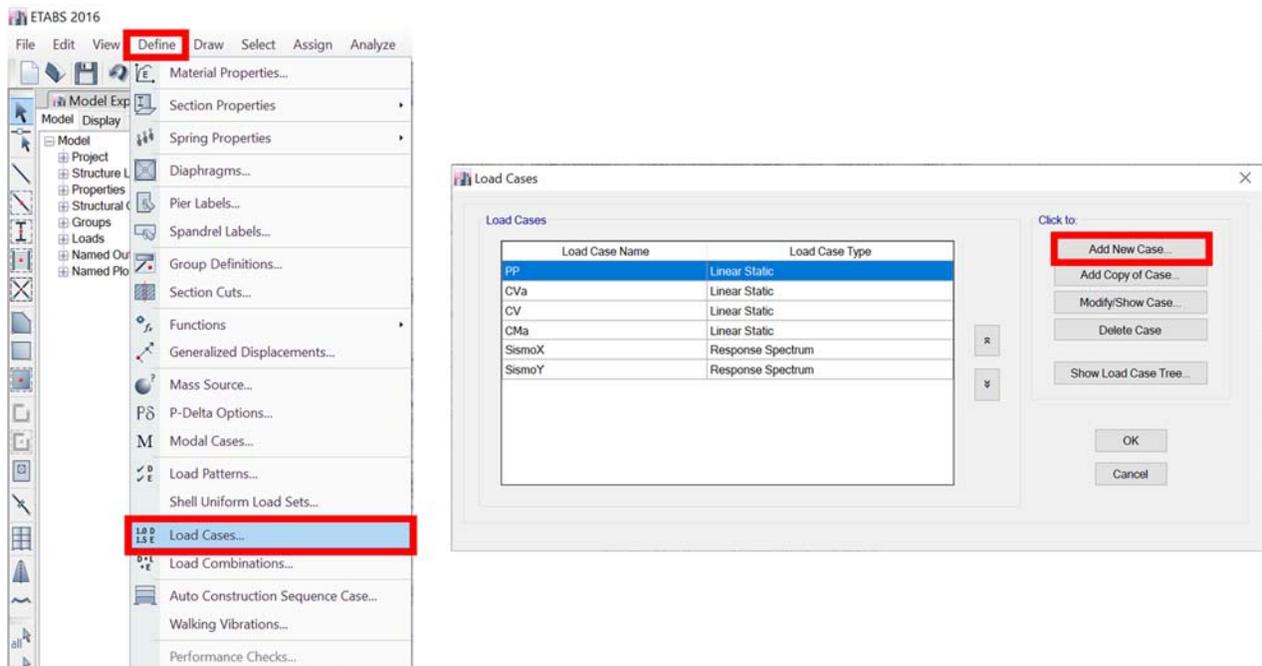


Figura 78 Menú para definir un caso de carga y ventana para administrarlos



DAMPO

La ventana para definir los casos de carga se muestra en la Figura 79, en la cual y se numeran varias casillas que se deben capturar o modificar. La numeración corresponde con las descripciones que se presentan en la siguiente lista:

- 1) Nombre del caso de carga definido por el usuario, se recomienda hacer referencia a la condición de no linealidad por ejemplo “Grav_NL”.
- 2) Tipo de caso de carga. Se debe seleccionar de la lista la opción “*Nonlinear Static*” que corresponde a un caso estático no lineal.
- 3) Origen de masa para el análisis. Se recomienda seleccionar la opción “*MsSrc1*” que es una masa predefinida por el programa, la cual se puede ajustar de acuerdo con las necesidades del análisis.
- 4) Condiciones previas para el análisis. Para este caso de carga se debe seleccionar “*Zero initial conditions*” como se muestra en la imagen. Esta opción corresponde a una estructura sin ninguna carga aplicada.
- 5) Botón para agregar un patrón de carga a la combinación. Se debe presionar una vez por cada patrón de carga que se desea agregar. Para el ejemplo se presiona en tres ocasiones para incluir todas las cargas gravitacionales (peso propio, carga muerta adicional y carga viva accidental).
- 6) Sección donde se visualizan los patrones de carga que se combinan. Se agrega una fila por cada origen de carga a combinar, en este ejemplo se observan tres filas.
- 7) Columna donde se ubica el tipo de carga a utilizar. En este caso de carga se selecciona en las listas desplegables “*Load Pattern*”, ya que cada carga gravitacional se incluye como un patrón de carga
- 8) Columna donde se selecciona el nombre de los patrones de carga. Para este ejemplo se selecciona en las listas desplegables los patrones definidos en el Capítulo 9. Es decir, los patrones de carga: peso propio (PP), carga muerta adicional (CMA) y carga viva accidental (CV).
- 9) Columna donde se aplican factores de incremento de carga a los patrones definidos. Para los análisis no lineales tipo paso a paso se debe utilizar factores unitarios como se indica en las NTC Sismo (2017) sección 6.2.3.
- 10) Area donde se precisan condiciones que debe aplicar el programa para realizar el análisis. Para el caso de análisis que se desarrolla se recomienda no modificar las opciones predeterminadas.



DAMPO

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	PP	1
Load Pattern	CMA	1
Load Pattern	CVa	1

Figura 79 Ventana para definir un caso de carga

Una vez concluida la captura de todas las casillas se presiona el botón “OK” y queda definido el caso de carga y se incluye a la lista. En la siguiente ventana también se presiona el botón “OK” para guardar los cambios.

También, se recomienda definir la fuente de masa que se utiliza para los análisis no lineales en función de patrones de carga. Para realizar esta modificación se debe acceder al menú “Define” – “Mass Source...” como se muestra en la parte izquierda de la Figura 80.

Al seleccionar el menú se activa una ventana que se muestra en la parte derecha de la Figura 80. En esta ventana se pueden agregar o modificar las fuentes de masa. Para este ejemplo se recomienda modificar la fuente de masa predefinida que se denomina “MsSrc1”. Primero se selecciona con el ratón la fuente de masa como se indica en la figura. Posteriormente se presiona el botón “Modify/Show Mass Source...” también indicado.



DAMPO

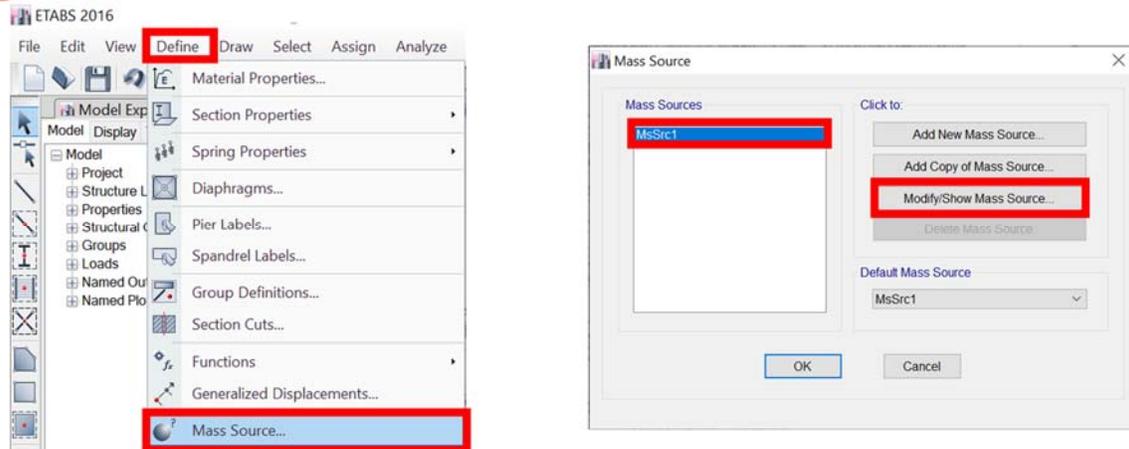


Figura 80 Menú para definir la fuente de masa

Una vez presionado el botón se activa la ventana que se muestra en la Figura 81 en la cual se indican dos zonas de interés. Estas zonas se pueden modificar de acuerdo con las recomendaciones descritas en la siguiente lista:

- 1) En esta zona se recomienda eliminar las selecciones predeterminadas y solo marcar la casilla correspondiente a “*Specified Load Patterns*” como se indica en la figura.
- 2) En esta zona definen los patrones de carga que conforman la masa. Para incluir patrones, primero se selecciona de la lista desplegable, encabezada como “*Load Pattern*”, un patrón de cargas gravitacionales, por ejemplo “PP”. Después se captura un factor de modificación en la casilla encabezada como “*Multiplier*”, para el ejemplo se recomienda utilizar factores unitarios. Finalmente, se presiona el botón “Add” y se repite el proceso para cada carga gravitacional. Al terminar se presiona el botón “OK” en las ventanas.

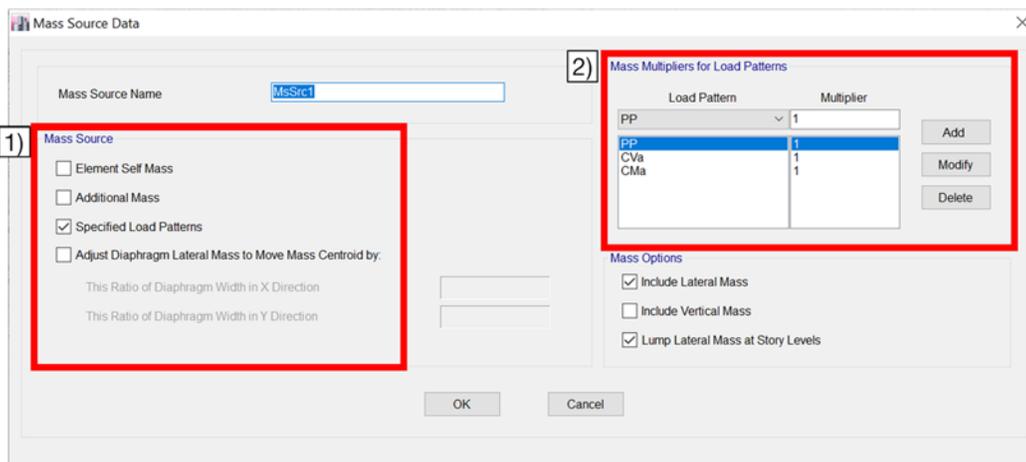


Figura 81 Definición de fuente de masa



C.6. DEFINICIÓN DE CASO DE CARGA ESTÁTICO NO LINEAL TIPO “EMPUJÓN” O “PUSHOVER” (PASO 6)

El análisis estático no lineal tipo “Empujón” o “*Pushover*” es una herramienta útil para evaluar la resistencia lateral de una estructura. El objetivo es obtener una curva que relaciona la fuerza lateral resistente y el desplazamiento en la azotea la cual se denomina curva de capacidad. Una de las ventajas del método es que incluye hipótesis de comportamiento no lineal en los elementos estructurales, con lo cual, se puede tener una mejor aproximación de la capacidad de la estructura. Además, permite identificar mecanismos de falla probables ante acciones sísmicas, esto mediante la evaluación de las articulaciones plásticas de los elementos estructurales.

En general el análisis consiste en realizar un proceso iterativo en el cual se incrementa un patrón de cargas laterales, deformando lateralmente la estructura para que incurra en su intervalo inelástico. El proceso se continúa hasta agotar la capacidad de la estructura.

Se recomienda que el proceso iterativo se controle monitoreando el desplazamiento en la azotea y se establezca un valor objetivo para dicho desplazamiento. Para el monitoreo se define un nodo de control donde el programa evalúa el resultado de los incrementos de carga.

Para realizar el análisis se deben aplicar cargas laterales que actúan sobre cada uno de los pisos. Se recomienda que la proporción de fuerzas con respecto a la altura se determine utilizando una distribución modal, es decir, que el perfil de fuerzas sea proporcional al perfil de desplazamiento del primer modo de vibrar para cada dirección. Este patrón de carga se puede aplicar de forma automática al definir el caso de carga.

Para realizar un análisis estático no lineal en Etabs (2016), primero, se debe acceder al menú “*Define*” – “*Load Cases*” como se muestra en la Figura 82 del lado izquierdo. Al seleccionar el menú indicado, se activa una ventana donde se administran los casos de carga. Esta ventana se muestra en la Figura 82 del lado derecho y se puede observar que incluye todos los casos de carga definidos previamente. Para agregar un nuevo caso de carga debemos presionar el botón “*Add New Case*” indicado en la figura y se activa una nueva ventana que se describe más adelante.



DAMPO

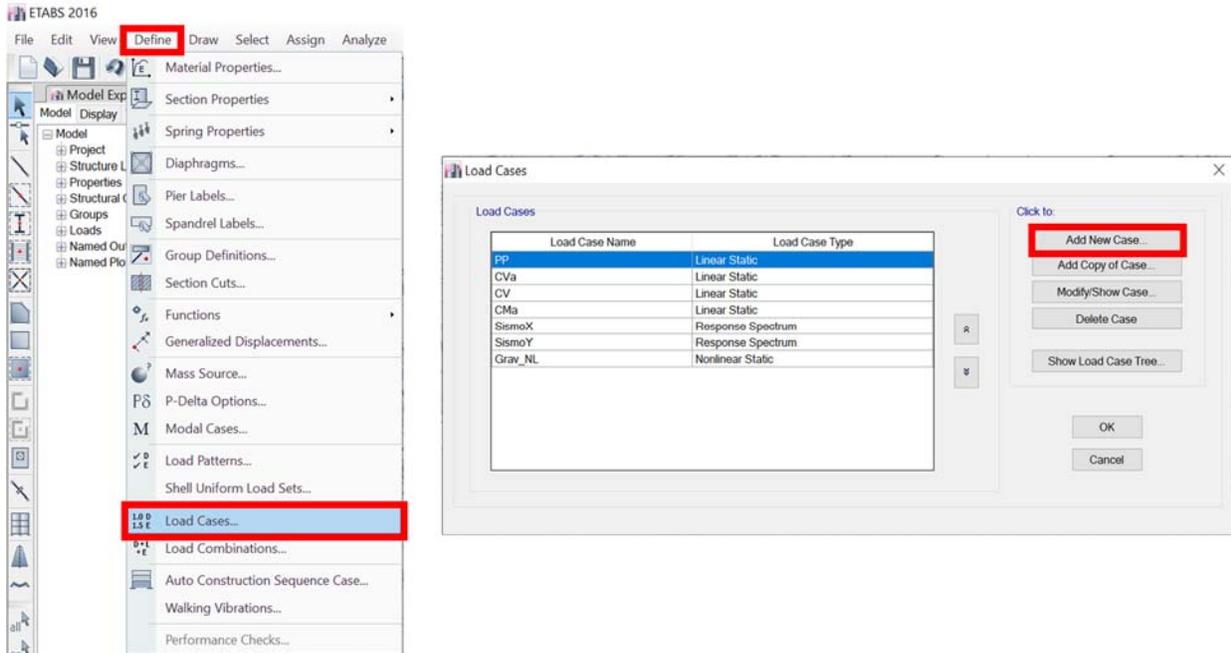


Figura 82 Menú para definir un caso de carga y ventana para administrarlos

La ventana para definir los casos de carga se muestra en la Figura 83, en esta se numeran varias casillas que se deben capturar o modificar. La numeración corresponde con las descripciones que se presentan en la siguiente lista:

- 1) Nombre del caso de carga definido por el usuario, se recomienda hacer referencia a la condición de no linealidad y el tipo de análisis, por ejemplo "PushNL_X"
- 2) Tipo de caso de carga. Se debe seleccionar de la lista la opción "Nonlinear Static" que corresponde a un caso estático no lineal
- 3) Origen de masa para el análisis. Se recomienda seleccionar la opción "MsSrc1" que es la masa predefinida por el programa y que se modificó en la sección C.5
- 4) Condiciones previas para el análisis. Para este caso de carga se debe seleccionar la opción "Continue from State at End of Nonlinear Case" como se muestra en la imagen. Al seleccionar la opción se activa la lista desplegable donde debemos seleccionar el caso definido en la sección C.5 y que se denominó "Grav_NL".
- 5) Botón para agregar un patrón de carga a la combinación. Se debe presionar solo una vez para agregar el patrón de carga que corresponde a la dirección de análisis
- 6) Sección donde se visualizan los tipos de carga. Para este caso de carga solo se selecciona el modo de vibrar que esté orientado en la dirección del análisis (por ejemplo: X). En las listas despegables se debe seleccionar: en la primera "Modal"; y en



DAMPO

la segunda el modo que corresponde a la dirección de análisis, que para este ejemplo es el modo 2. En la casilla de “Scale Factor” se coloca un factor unitario.

- 7) Los valores de esta sección se deben modificar presionando el botón “Modify/Show”.
- Esto activa una nueva ventana que se describe en la Figura 84
- 8) Los valores de esta sección se deben modificar presionando el botón “Modify/Show”.
- Esto activa una nueva ventana que se describe en la Figura 85

Load Case Data

General

1) Load Case Name PushNL_X Design...

2) Load Case Type Nonlinear Static Notes...

Exclude Objects in this Group Not Applicable

3) Mass Source MsSrc1

4) Initial Conditions

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Nonlinear Case (Loads at End of Case ARE Included)

Nonlinear Case Grav_NL

6) Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Mode	2	1

5) Add Delete

Other Parameters

Modal Load Case Modal

Geometric Nonlinearity Option None

7) Load Application Displacement Control Modify/Show...

8) Results Saved Multiple States Modify/Show...

Nonlinear Parameters Default Modify/Show...

OK Cancel

Figura 83 Ventana para definir un caso de carga



DAMPO

Al presionar el botón “*Modify/Show*” de la zona indicada con el número 7) en la Figura 83 se activa una ventana nueva, la cual se muestra en la Figura 84 y se indican tres zonas numeradas. La numeración corresponde con las descripciones de la siguiente lista:

- 1) Control de aplicación de la carga. En esta zona se debe seleccionar la opción “*Displacement Control*” para que el análisis se controle por desplazamiento.
- 2) Control del desplazamiento. En esta zona se debe seleccionar la opción “*Use Monitored Displacement*” para que el programa controle con un desplazamiento objetivo. En la misma zona se activa una casilla donde se debe capturar el desplazamiento objetivo. El programa de forma predeterminada coloca un valor recomendado que, en general, es muy grande para definir la curva de capacidad (equivale al 4% de la altura). Se recomienda considerar un valor más bajo (es decir, 2.5% de la altura total del edificio).
- 3) Monitoreo de desplazamiento. En esta zona se define el nodo que se utiliza para monitorear la aplicación de la carga. En la primera lista desplegable se debe seleccionar el grado de libertad que corresponde a la dirección que se analiza. Para la dirección X es “*U1*” y para la dirección Y es “*U2*”. En la siguiente lista se selecciona el piso que corresponde a la azotea. En la casilla se captura el nodo del piso que se monitorea.

Load Application Control for Nonlinear Static Analysis

1) Load Application Control

Full Load

Displacement Control

Quasi-Static (run as time history)

2) Control Displacement

Use Conjugate Displacement

Use Monitored Displacement

Load to a Monitored Displacement Magnitude of mm

3) Monitored Displacement

DOF/Joint

Generalized Displacement

Quasi-static Parameters

Time History Type

Output Time Step Size sec

Mass Proportional Damping 1/sec

Hilber-Hughes-Taylor Time Integration Parameter, Alpha

OK Cancel

Figura 84 Ventana para ajustar el método de aplicación de la carga



Al presionar el botón “*Modify/Show*” de la zona indicada con el número 8) en la Figura 83 se activa una ventana nueva. Esta ventana se muestra en la Figura 85, donde se indican tres zonas que se deben capturar o modificar. La numeración corresponde con las descripciones que se presentan en la siguiente lista:

- 1) Resultados que se guardan. Se debe seleccionar la opción “Multiple States” para guardar los resultados de varios puntos de la curva de capacidad.
- 2) Estados de carga que se guardan. En la primera casilla se captura el número mínimo de estados de carga que se guardan se recomienda que sean 20. En la segunda se captura el número máximo, se recomienda que sean máximo 100.
- 3) Se recomienda desactivar la selección, de esta forma se guardan incrementos positivos y negativos, pues la forma modal podría ser negativa.

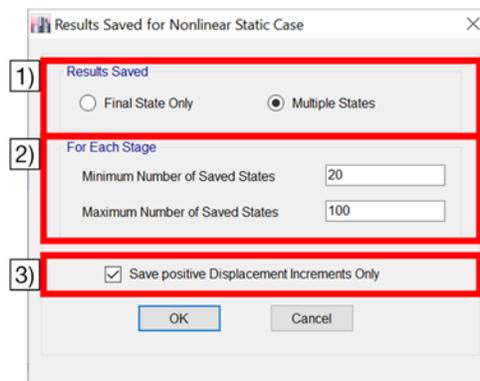


Figura 85 Ventana para ajustar los resultados que se guardan

Una vez concluida la captura de todas las opciones descritas se presiona el botón “OK” en la ventana de la Figura 83 y queda definido el caso de carga. Ahora se repite todo el proceso para capturar el caso de carga en la dirección Y. Finalmente se presiona el botón “OK” en todas las ventanas para guardar los cambios.

Con los casos de carga definidos y guardados se procede a ejecutar el análisis, este puede tardar un par de minutos en concluir debido a las iteraciones de los casos no lineales. Al finalizar, se pueden obtener las curvas de capacidad. El proceso para mostrar las curvas y recuperar los datos, se muestra a continuación.



DAMPO

Primero, se debe acceder al menú “Display” – “Static Pushover Curve...” como se muestra en la Figura 86. Al seleccionar esta opción se genera una nueva pantalla en la interfaz principal del programa donde se muestra la curva de capacidad.

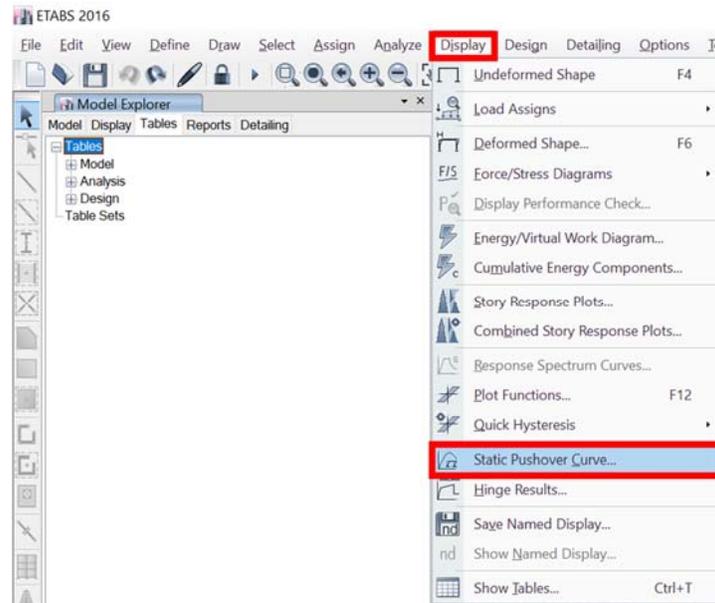


Figura 86 Menú para mostrar la curva de capacidad

En la Figura 87 se muestra un detalle de la parte superior de la primera pantalla que incluye a la curva de capacidad. En esa figura se observa una lista desplegable denominada “Plot Type” en la cual se debe seleccionar la opción “ASCE 41-13 NSP” como se indica en la figura.

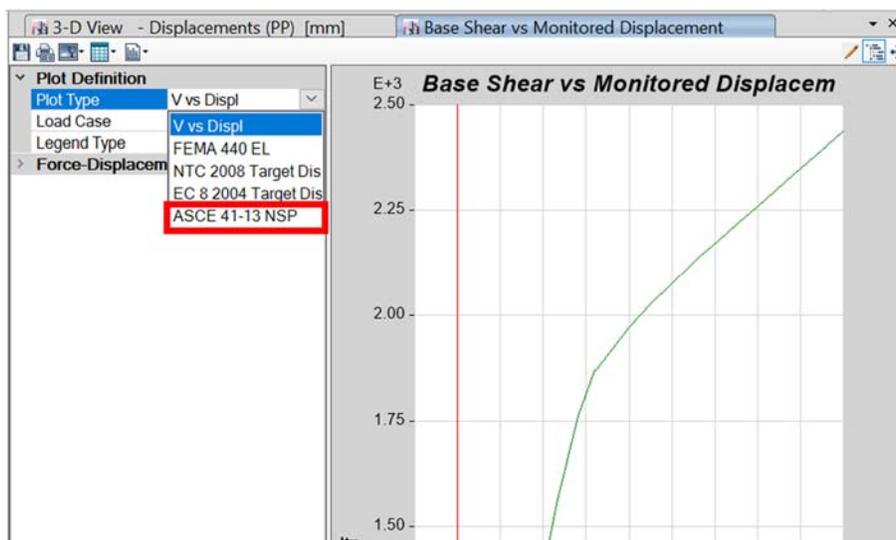


Figura 87 Detalle de la pantalla inicial que muestra la curva de capacidad



DAMPO

Una vez seleccionada la opción se modifica la interfaz quedando como se muestra en la Figura 88. En esta figura se indican tres secciones las cuales se describen en la lista que se muestra a continuación:

- 1) Casillas que definen las características de la curva bilineal. Se recomienda modificar los valores predeterminados, hasta obtener una curva como la mostrada. Para este ejemplo se recomienda el valor 2.2.
- 2) Celdas con los valores de desplazamiento y fuerza del punto final de la curva bilineal.
- 3) Celdas con los valores de desplazamiento y fuerza del primer punto de la curva bilineal.

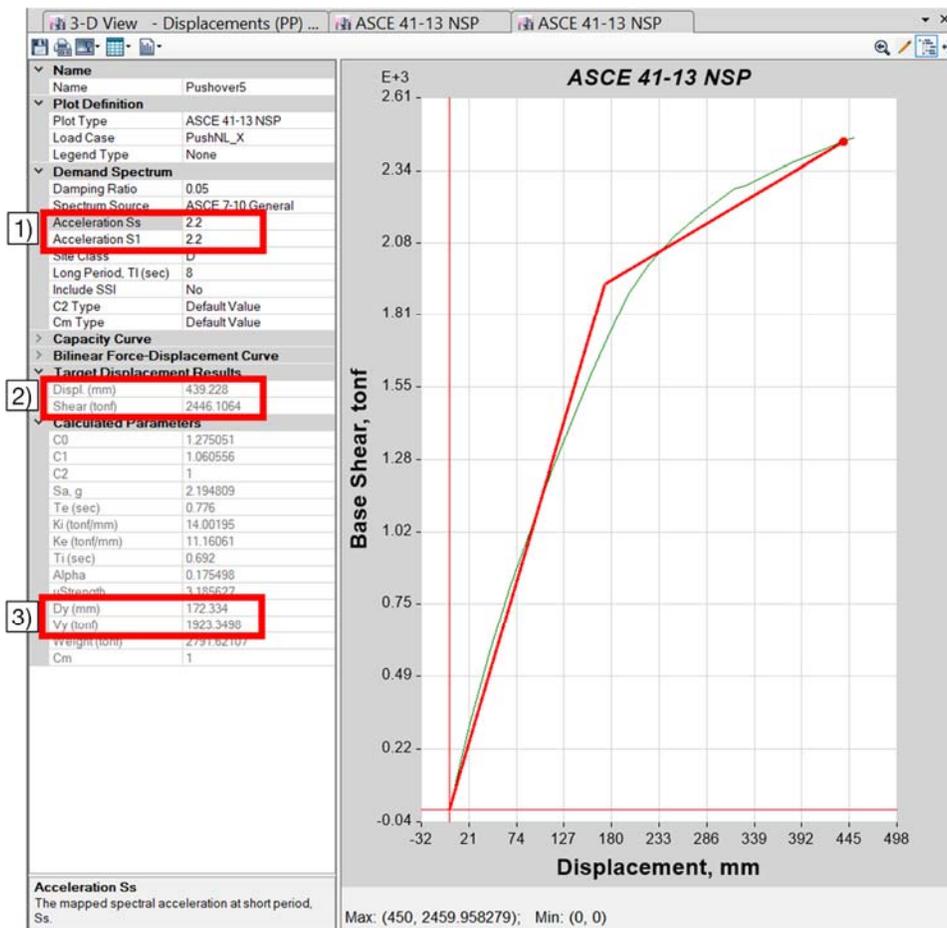


Figura 88 Pantalla que muestra la curva de capacidad

Para obtener los valores de la curva de capacidad se debe presionar el icono que se muestra en la Figura 89 para que aparezca el menú emergente indicado. Se selecciona la opción "Formatted" y con esto aparece una ventana nueva. En esta ventana están los datos de cortante y desplazamiento lateral, los cuales se pueden seleccionar y copiar a una hoja de cálculo.



DAMPO

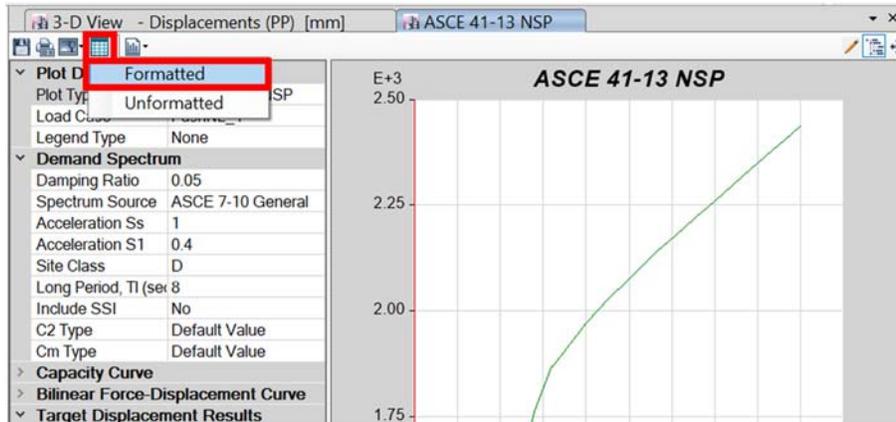


Figura 89 Icono para obtener los datos de la curva de capacidad

Las curvas de capacidad se pueden obtener para la estructura con y sin disipadores. En la Figura 90 se muestran las curvas de capacidad para una estructura con disipadores (CD) y sin disipadores (SD). Las gráficas relacionan el cortante resistente normalizado entre el peso total de la estructura contra el desplazamiento lateral en la azotea. Se observa el incremento tanto en la resistencia lateral como en la rigidez inicial y post fluencia para la estructura con disipadores. También se aprecia la diferencia de resistencia en cada dirección, siendo la dirección X la de mayor capacidad. Finalmente, se puede destacar que la zona donde inicia el cambio de pendiente más significativo se mantiene aproximadamente en el mismo intervalo de desplazamientos.

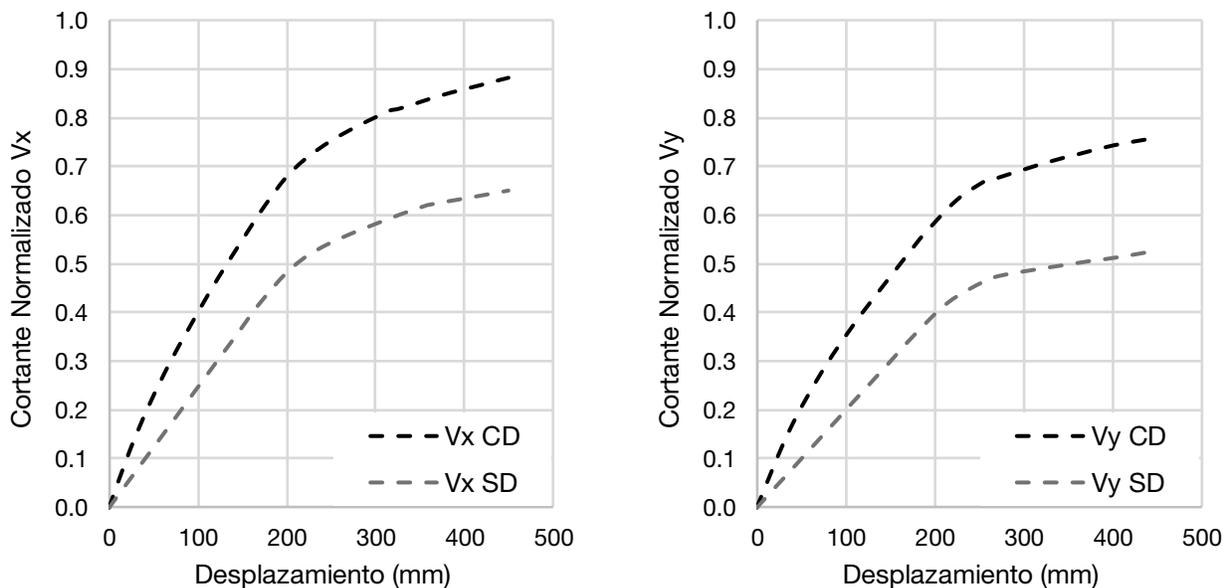


Figura 90 Curvas de capacidad para la estructura con y sin disipadores



C.7. DEFINICIÓN DE CASO DE CARGA DINÁMICO NO LINEAL TIPO PASO A PASO (PASO 7)

El análisis dinámico no lineal tipo paso a paso considera explícitamente que las aceleraciones producidas por un sismo son variables con el tiempo. Es decir, que las fuerzas de inercia que actúan sobre la estructura pueden cambiar de intensidad y dirección de un momento a otro. Por lo tanto, la respuesta de la estructura se debe calcular en cada instante de tiempo. Para realizar el cálculo se toma en cuenta que la respuesta para cada variación de aceleración depende del estado previo de fuerzas y deformaciones. Es decir que la respuesta depende de la historia de fuerzas aplicadas antes del instante que se analiza. Por este motivo también se conocen como análisis en la historia del tiempo o tiempo-historia.

Para obtener la respuesta de la estructura a partir de una señal de aceleración, es necesario resolver en cada paso de tiempo la ecuación de movimiento para sistemas estructurales. Esto se logra a través de la aplicación de métodos numéricos. Adicionalmente, se debe considerar que los elementos de la estructura podrían presentar comportamiento no lineal. Por lo tanto, también es necesario aplicar métodos iterativos para obtener un estado de deformación que satisfaga el equilibrio.

A continuación, se muestra el proceso para generar un análisis dinámico no lineal tipo paso a paso en Etabs (2016). El primer requisito es cargar en el programa los acelerogramas que se van a utilizar. Para esto se debe acceder al menú “Define” – “Functions” – “Time History” como se muestra en la Figura 91 del lado izquierdo. Al seleccionar el menú indicado, se activa una ventana donde se administran las funciones de tiempo historia como se muestra en la Figura 91 del lado derecho. En dicha ventana se indican tres zonas de interés que se describen a continuación.

- 1) En esta zona se incluyen todas las funciones definidas previamente. En un inicio se muestran dos funciones que están predeterminadas por el programa.
- 2) En esta sección se muestra una lista desplegable con varias opciones de funciones que se pueden agregar. Para el ejemplo se utiliza la opción “From File” como se indica en la figura y la cual se encuentra al inicio de la lista.
- 3) En esta zona se muestran los botones que sirven para administrar funciones o agregar nuevas. Se debe presionar el botón “Add New Function” para cargar el acelerograma. Esta acción activa una nueva ventana que se describe más adelante.



DAMPO

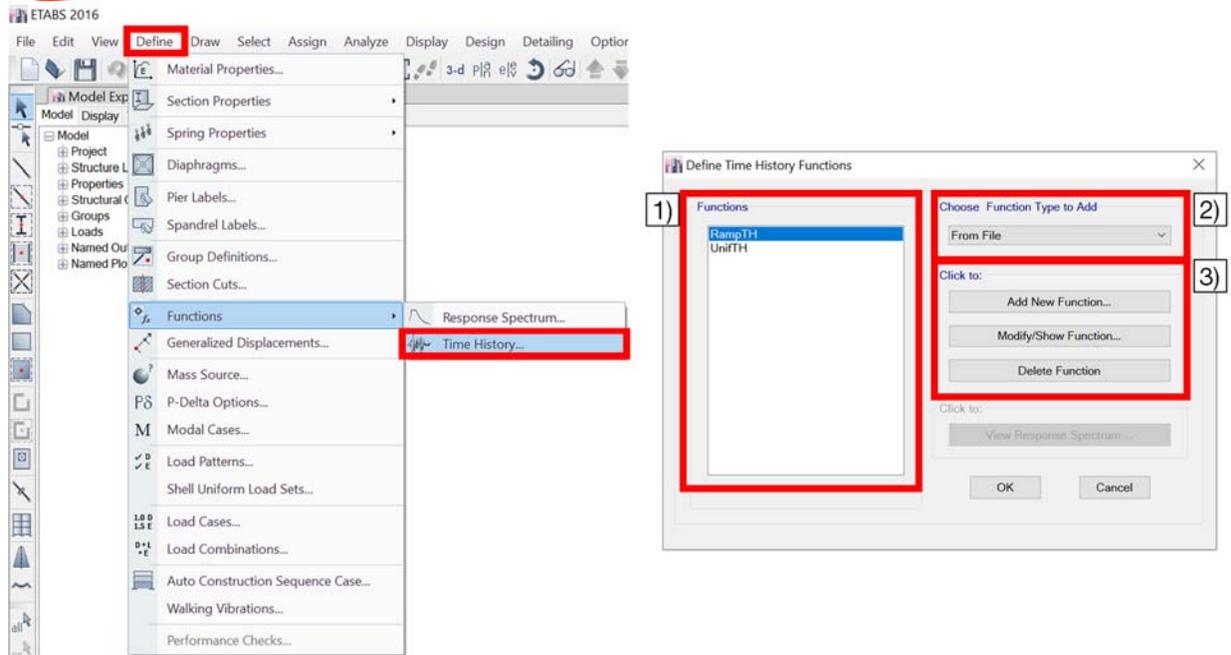


Figura 91 Menú para definir una función tiempo historia y ventana para administrarlas

La ventana para definir una nueva función a partir de un archivo se muestra en la Figura 92, en esta se numeran varias casillas que se deben capturar o modificar. La numeración corresponde con las descripciones que se presentan en la siguiente lista:

- 1) Nombre de la función definido por el usuario, se recomienda hacer referencia a la fuente sísmica, un número consecutivo y la dirección, por ejemplo “Sub1_X”
- 2) Se debe seleccionar la opción “*Time and Function Values*” debido a que el programa Prism (2011) guarda los acelerogramas filtrados en dos columnas, donde una contiene valores de tiempo y la otra la aceleración.
- 3) Opciones para el archivo del acelerograma. Los valores que se capturan en las casillas dependen de la estructura del archivo con el acelerograma. De acuerdo con el formato que entrega el programa Prism (2011) los valores que se deben capturar son: “*Headers lines to skip*” = 0; “*Prefix Chars. Per Line to Skip*” = 0; y “*Number of Points Per Line*” = 1
- 4) Se presiona el botón “Browse...” y se abre una ventana para buscar el archivo de texto que contiene el acelerograma que se desea cargar. Dicho acelerograma es el que se filtró de acuerdo con las recomendaciones de la sección C.2.
- 5) En esta zona se debe observar la gráfica del acelerograma, si la imagen es adecuada el acelerograma se cargó correctamente.



DAMPO

- 6) Se recomienda presionar el botón “Convert to User Defined” para que el acelerograma forme parte integral del archivo con el modelo de la estructura. Esta acción cambia la interfaz de la ventana, en la cual se presiona el botón “OK” para guardar la función.

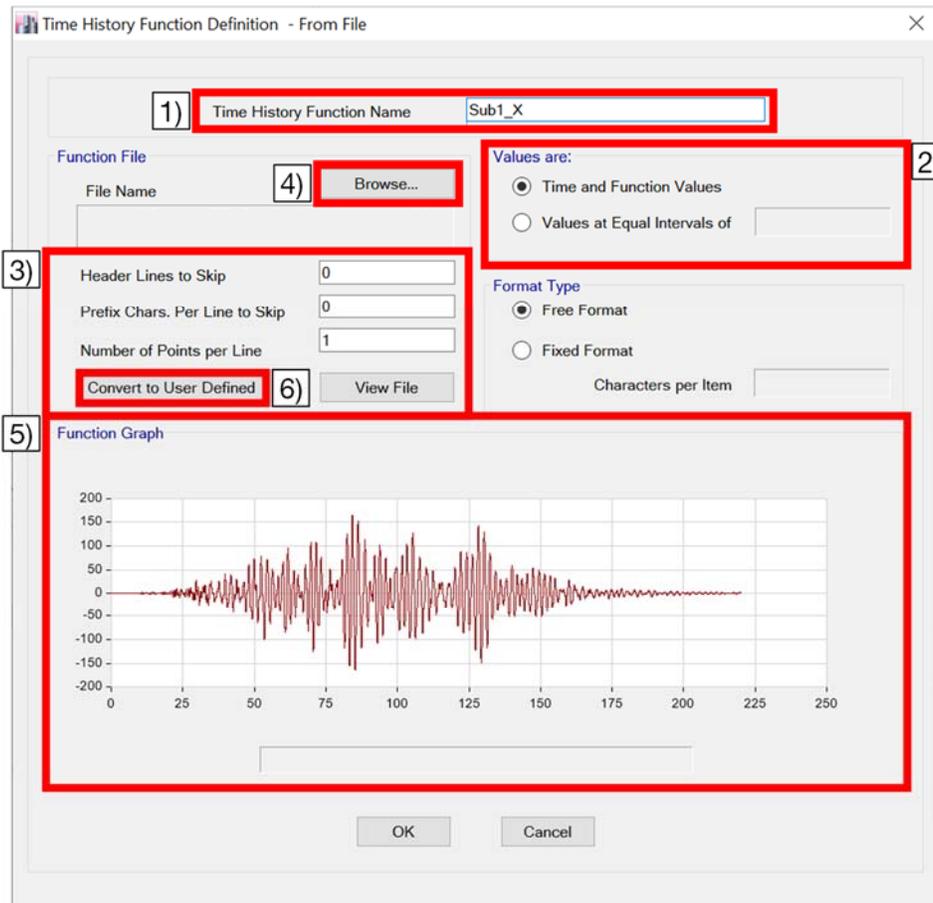


Figura 92 Ventana para definir una función de historia en el tiempo desde un archivo

Ahora se debe repetir todo el proceso para cargar la segunda componente del sismo que se va a utilizar en el análisis. Finalmente, se presiona el botón “OK” en todas las ventanas para guardar la información.

Posteriormente, se debe definir el caso de carga no lineal accediendo al menú “Define” – “Load Cases” como se muestra en la Figura 93 del lado izquierdo. Al seleccionar el menú indicado, se activa una ventana donde se administran los casos de carga. Esta ventana se muestra en la Figura 93 del lado derecho y se puede observar que incluye todos los casos de carga definidos previamente. Para agregar un nuevo caso de carga debemos presionar el botón “Add New Case” indicado en la figura y se activa una nueva ventana que se describe más adelante.



DAMPO

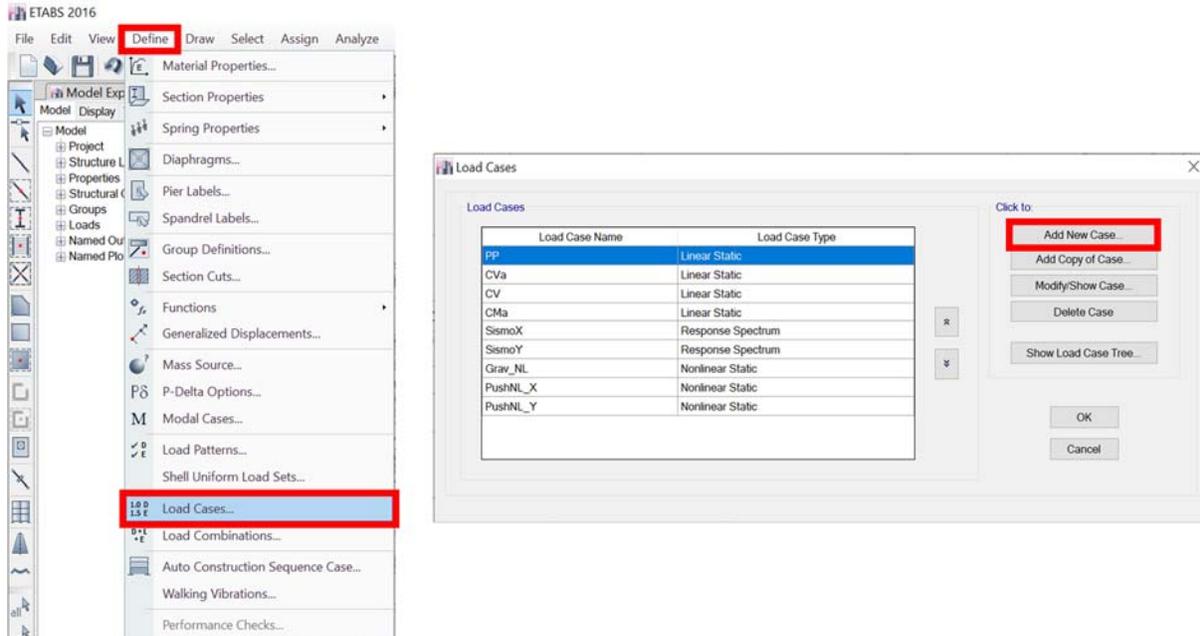


Figura 93 Menú para definir un caso de carga y ventana para administrarlos

La ventana para definir el caso de carga del Análisis Dinámico No Lineal se muestra en la Figura 94, en esta se numeran varias casillas que se deben capturar o modificar. La numeración corresponde con las descripciones que se presentan en la siguiente lista:

- 1) Nombre del caso de carga definido por el usuario, se recomienda hacer referencia que el análisis es: tipo tiempo historia y no lineal, por ejemplo “A_THNL”.
- 2) Tipo de caso de carga. Se debe seleccionar de la lista la opción “*Time History*” y en la segunda lista que aparece se selecciona “*Nonlinear Direct Integration*” que corresponde a un caso dinámico no lineal tipo tiempo historia.
- 3) Se recomienda seleccionar la opción “*MsSrc1*” que es la masa predefinida por el programa y que se modificó en la sección C.5
- 4) Para considerar las condiciones previas del análisis se debe seleccionar la opción “*Continue from State at End of Nonlinear Case*” como se muestra en la imagen. Al seleccionar la opción se activa la lista desplegable donde debemos seleccionar el caso definido en la sección C.5 y que se denominó “Grav_NL”
- 5) Botón para agregar los acelerogramas al caso de carga. Se debe presionar dos ocasiones, una por cada componente
- 6) Sección donde se visualizan los acelerogramas. Se observa una fila por cada componente de los sismos sintéticos



DAMPO

- 7) Columna donde se ubica el tipo de carga a utilizar. En este caso de carga se selecciona en las listas desplegables “*Acceleration*”, ya que se utilizan acelerogramas para determinar las fuerzas
- 8) Columna donde se selecciona la dirección en la que actúa el acelerograma. Para la dirección X se utiliza el valor “*U1*” y para la dirección Y el valor “*U2*”
- 9) Columna donde se selecciona la función a asignar. Se debe seleccionar el acelerograma de acuerdo con la dirección de análisis, por ejemplo “*Sub1_X*” para la dirección “*U1*”
- 10) En esta sección se captura el factor de escala correspondiente a la pareja de acelerogramas de acuerdo con la Tabla 19. Además, se debe utilizar un factor para ajustar las unidades que toma el programa para la aceleración con respecto a las unidades del acelerograma. Generalmente el programa utiliza mm/s^2 , esto se puede comprobar colocando el ratón sobre el icono indicado con una flecha. El acelerograma del ejemplo tiene unidades de cm/s^2 por lo tanto se debe usar un factor de 10 para ajustar las unidades, en conjunto con el factor obtenido para la pareja de acelerogramas que es igual a 1.15. Por lo tanto el valor final de escala será igual a 11.5.
- 11) En esta casilla se definen el número de pasos de tiempo que durará el análisis, se recomienda colocar un número que corresponda a la mitad de los datos del acelerograma. Esto ayuda a reducir el tamaño de los archivos en disco. Por ejemplo, el acelerograma del ejemplo redujo su tiempo total a 160 segundos en la sección C.2, y cuenta con 100 datos por segundo, por lo tanto tiene 16000 puntos en total, se recomienda capturar el valor 8000. Nótese que si se guarda sólo la mitad de los pasos se pierde la mitad de la información, pero eso no genera errores considerables ya que los pasos están muy cerca uno de otro.
- 12) En esta casilla se define el intervalo de tiempo entre cada paso. En concordancia con la recomendación de la casilla anterior, se debe capturar un paso de tiempo del doble del original, es decir 0.02.
- 13) Los valores de esta sección modifican el amortiguamiento usado en el análisis, se recomienda modificarlos presionando el botón “*Modify/Show*”. Esto activa una nueva ventana que se describe en la Figura 95
- 14) Los valores de esta sección modifican el método de integración numérica para resolver las ecuaciones, se recomienda modificarlos presionando el botón “*Modify/Show*”. Esto activa una nueva ventana que se describe en la Figura 96



DAMPO

General

1) Load Case Name: A_THNL

2) Load Case Type/Subtype: Time History | Nonlinear Direct Integrator

3) Mass Source: MsSrc1

Initial Conditions

4) Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 Continue from State at End of Nonlinear Case (Loads at End of Case ARE Included)
Nonlinear Case: Grav_NL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	Sub1_X	1.4
Acceleration	U2	Sub1_Y	1.4

5) Add button

Other Parameters

Geometric Nonlinearity Option: None

11) Number of Output Time Steps: 11000

12) Output Time Step Size: 0.02 sec

13) Damping: Mass: 0.2277; Stiff: 0.0027; Modal: No | Modify/Show...

14) Time Integration: Newmark | Modify/Show...

Nonlinear Parameters: Default | Modify/Show...

OK Cancel

Figura 94 Ventana para definir un caso de carga no lineal de tiempo historia

Al presionar el botón “*Modify/Show*” de la zona indicada con el número 13) en la Figura 94 se activa una ventana nueva, misma que se muestra en la Figura 95. En dicha figura se indican tres zonas numeradas correspondientes con las descripciones de la siguiente lista:

- 1) Selección del método para calcular el amortiguamiento. Se recomienda seleccionar la opción “By period”, con esto se determina la matriz de amortiguamiento de Rayleigh como proporción de las matrices de masa y de rigidez, y se ajusta usando los primeros dos periodos de vibración.
- 2) En estas casillas se capturan los valores del primer periodo de vibrar y último periodo significativo. Para el ejemplo los valores son 0.71 y 0.24.
- 3) En estas casillas se captura un valor del porcentaje de amortiguamiento crítico para cada periodo. De acuerdo con las NTC Sismo (2017) este valor debe ser igual a 2.5%



DAMPO

Figura 95 Ventana para definir el cálculo del amortiguamiento

Al presionar el botón “*Modify/Show*” de la zona indicada con el número 14) en la Figura 94 se activa una ventana nueva. Esta ventana se muestra en la Figura 96 y se observan los métodos de integración directa para calcular la respuesta de la estructura. Se recomienda utilizar el método de Newmark y mantener los factores de Gamma y Beta predeterminados, que corresponden a aceleración constante. Para más información se recomienda leer el libro de Chopra (2012).

Figura 96 Ventana para ajustar el método de integración numérica



DAMPO

Una vez concluida la captura de todas las opciones descritas se presiona el botón “OK” en la ventana de la Figura 94 quedando definido el caso de carga. Finalmente se presiona el botón “OK” en todas las ventanas para guardar los cambios.

Con los casos de carga definidos y guardados se procede a ejecutar el análisis del modelo. El análisis puede tardar 50 minutos o más en concluir dependiendo del equipo de cómputo. Además, puede generar carpetas con hasta 34 Gb por cada modelo. Una vez concluido el análisis se pueden obtener los resultados por varios métodos. El proceso recomendado para recuperar los datos se muestra a continuación.

Primero, se debe acceder al menú “Display” – “Plot functions” como se muestra en la Figura 97. Al seleccionar esta opción se genera una nueva pantalla en la interfaz principal del programa donde se muestra una curva preliminar.

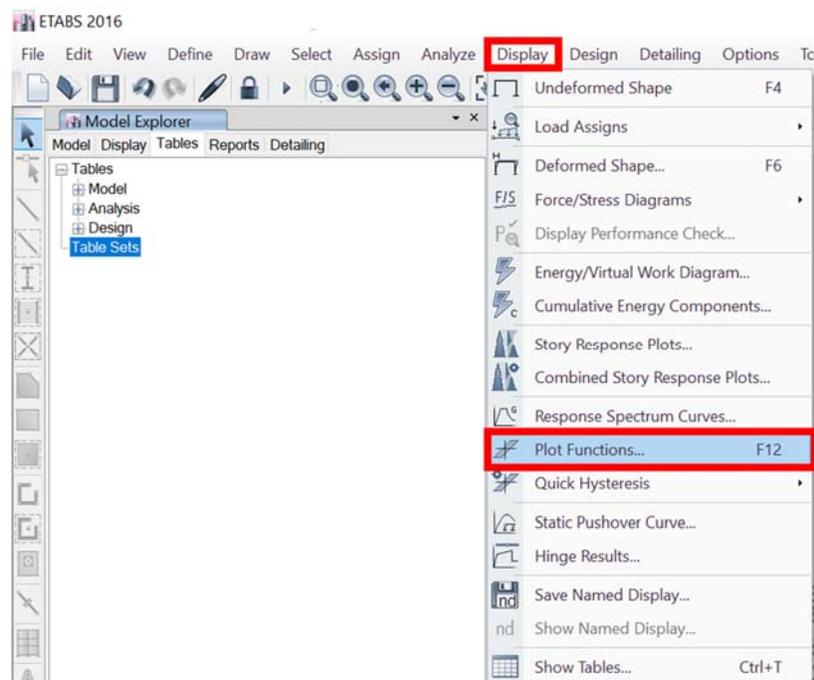


Figura 97 Tablas de información del modelo

En la Figura 98 se muestra un detalle de la parte superior de la pantalla que se genera al seleccionar la opción de la Figura 97. En esta pantalla se muestra de forma predeterminada una curva de la fuerza en la base. En la figura se indica un icono que se debe presionar para definir la información que se desea recuperar.



DAMPO

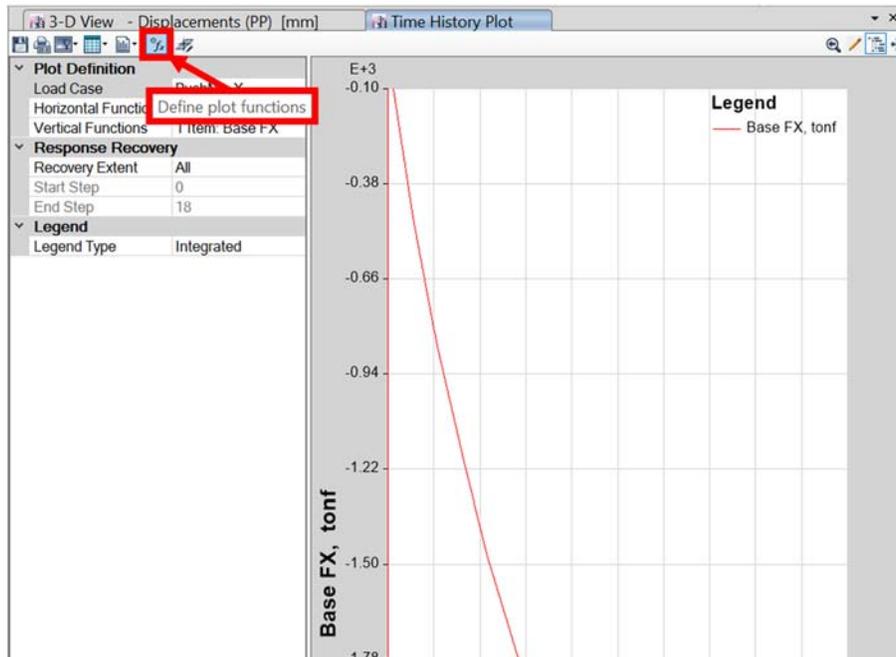


Figura 98 Detalle de la pantalla inicial para graficar funciones

Una vez seleccionado el icono se abre una ventana nueva donde se definen funciones que son necesarias para recuperar información. La ventana se muestra en la Figura 99 y en ella se debe presionar el icono que se indica para que aparezca un menú donde se debe seleccionar la opción “Joint Displacement”.

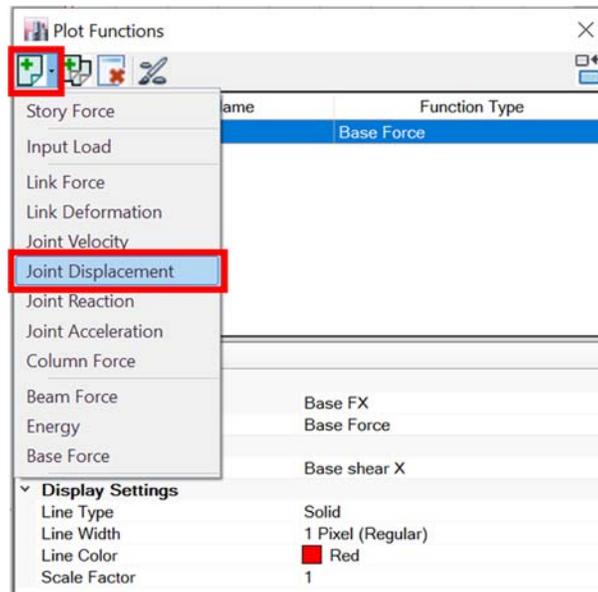


Figura 99 Menú para definir funciones de desplazamiento



DAMPO

Al seleccionar la opción indicada se actualiza la interfaz como se muestra en la Figura 100, se puede observar que se selecciona una nueva función con un nombre genérico “PF1”. En la parte inferior de la ventana se indican varias secciones que se pueden modificar según la información requerida. Dichas zonas están numeradas y la descripción se presenta a continuación.

- 1) Función creada al seleccionar la opción “*Joint Displacement*” como se muestra en la Figura 99.
- 2) Casilla donde se denomina la función que se va a definir.
- 3) Piso en el cual se quiere conocer el valor de desplazamiento.
- 4) Nodo del que se desea conocer su desplazamiento. Se recomienda seleccionar un nodo al centro del marco y perpendicular a la dirección de análisis. Para el ejemplo el nodo seleccionado es el 3, este nodo se encuentra en el cruce del eje A y el eje 3.
- 5) Dirección en la que busca conocer el desplazamiento del nodo.

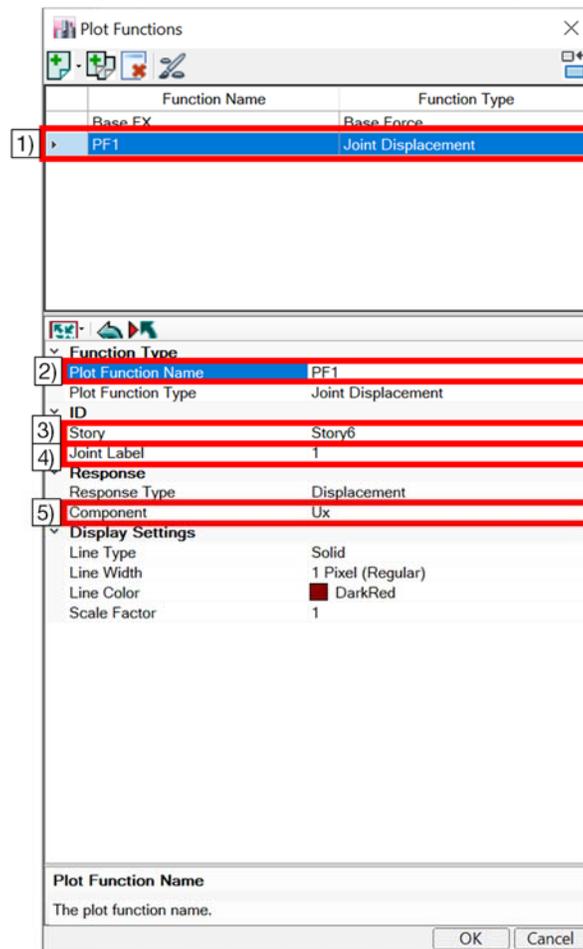


Figura 100 Interfaz para definir las funciones



DAMPO

Una vez definida la función se presiona el botón “OK” y se regresa a la interfaz donde se grafican las funciones definidas. En la Figura 101 se muestra un detalle de la interfaz y se indican dos casillas que se deben editar y se describen a continuación:

- 1) Casilla donde se selecciona el caso de carga que se quiere mostrar. En este ejemplo el caso de análisis tiempo historia no lineal es el denominado “A_THNL”
- 2) Casilla donde se selecciona la función vertical. Se debe seleccionar el icono con tres puntos y se habilita una ventana nueva que se muestra más adelante.

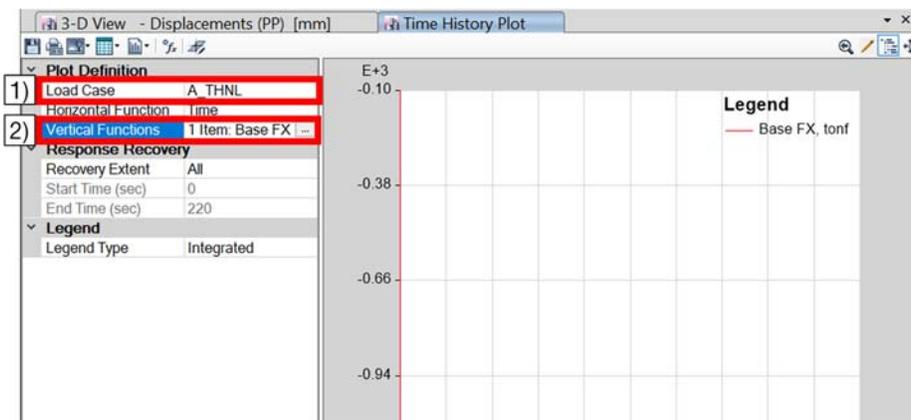


Figura 101 Casillas por modificar para graficar funciones

En la Figura 102 se muestra la ventana que se activa, en la cual se seleccionan las funciones que se quiere graficar. Usando las flechas indicadas se deben mover al lado derecho las funciones a graficar y al lado izquierdo el resto. Para el ejemplo se selecciona la función recién definida y se quita el cortante en la base. Finalmente se presiona el botón “OK”.

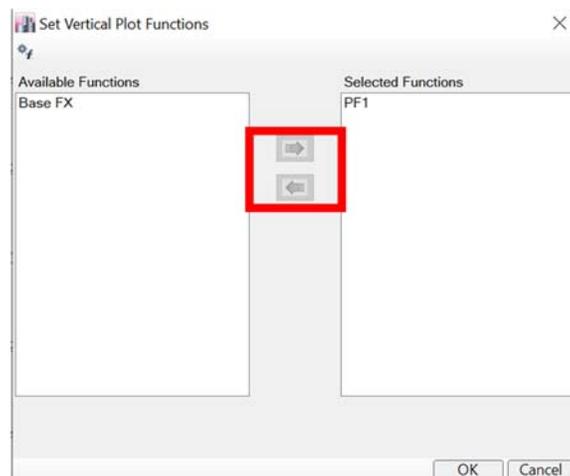


Figura 102 Ventana de selección de funciones verticales



DAMPO

Con la función definida como se ejemplifica, se debe obtener una gráfica similar a la que se muestra en la Figura 103 con el desplazamiento en el eje vertical y el tiempo en el eje horizontal.

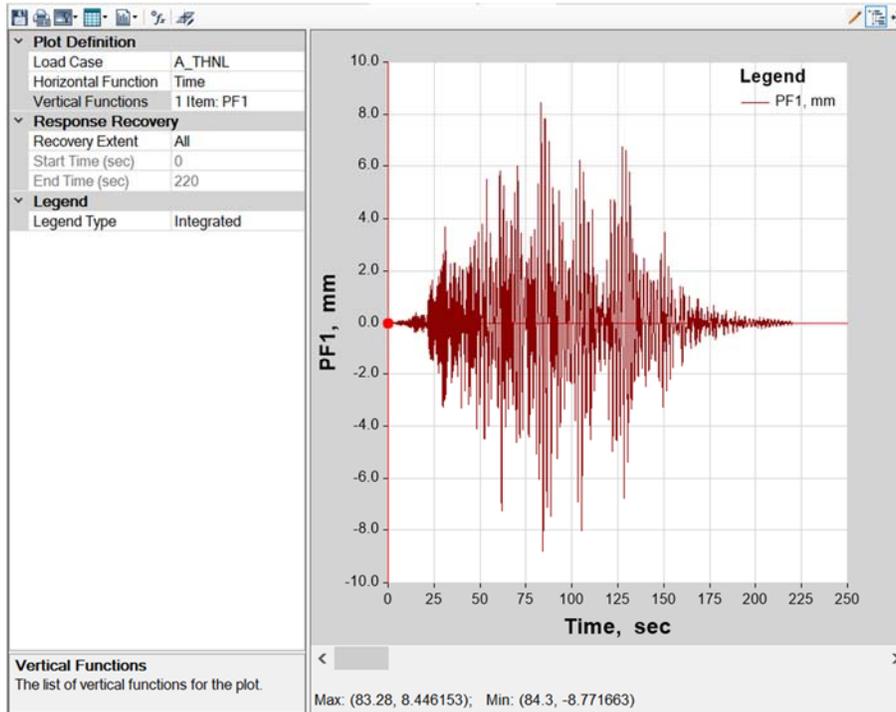


Figura 103 Pantalla con la información de desplazamiento graficada con respecto al tiempo

Para obtener los valores de la gráfica se debe presionar el icono que se muestra en la Figura 104 para que aparezca el menú emergente indicado. Se selecciona la opción “Formatted” y con esto aparece una ventana nueva. En esta ventana están los datos de desplazamiento y tiempo, los cuales se pueden seleccionar y copiar a una hoja de cálculo.

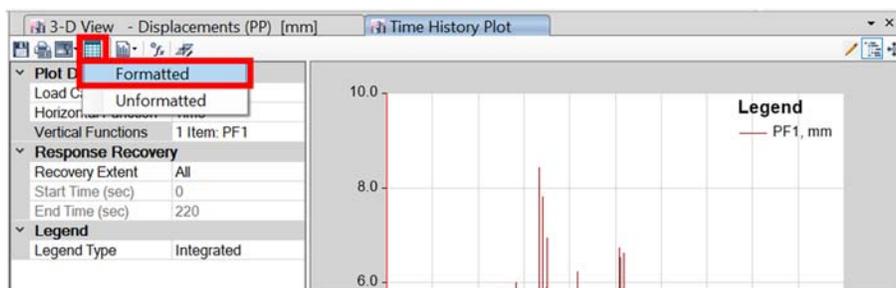


Figura 104 Icono para obtener los datos de la curva de capacidad

Con los datos de desplazamiento recuperados, se pueden procesar en hojas de cálculo para obtener historias de desplazamiento, distorsiones y desplazamientos máximos de entrepiso. En la Figura 106 se muestra la gráfica de desplazamiento en la azotea contra tiempo, para la



DAMPO

dirección X. Se puede observar la variación del movimiento de la estructura durante toda la duración del sismo sintético, con desplazamientos máximos cercanos a 60 mm.

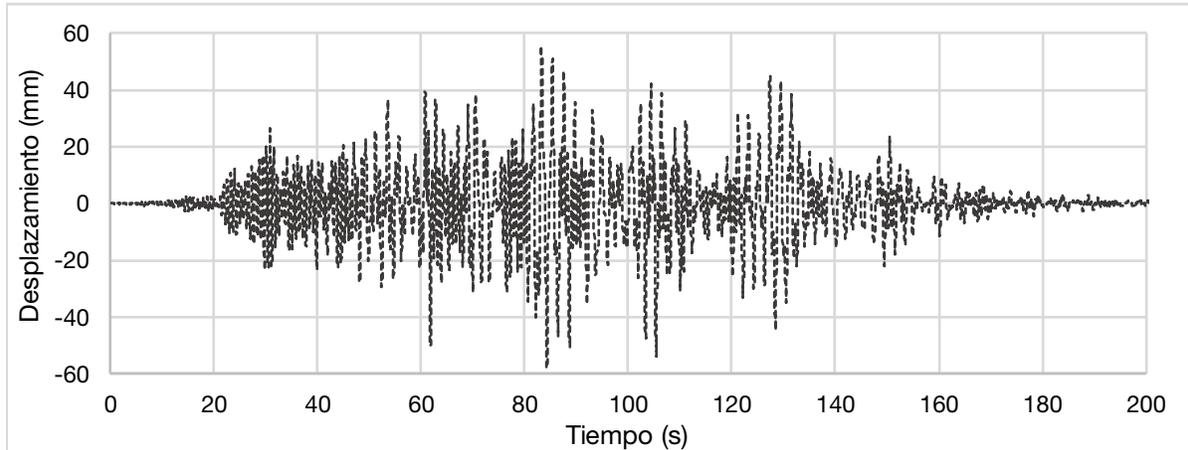


Figura 105 Gráfica de desplazamiento para un sismo sintético en dirección X

Se pueden obtener las gráficas de desplazamiento contra tiempo para todos los pisos y en ambas direcciones. Con estos datos es posible calcular las distorsiones de entrepiso en cada instante de tiempo y obtener las máximas. En la Figura 106 se comparan las distorsiones calculadas con el sismo del ejemplo con las distorsiones del análisis modal espectral. Se puede observar que para este sismo los valores de distorsión son menores para el análisis no lineal. Cabe aclarar que la comparación final se debe realizar con el promedio de todos los sismos.

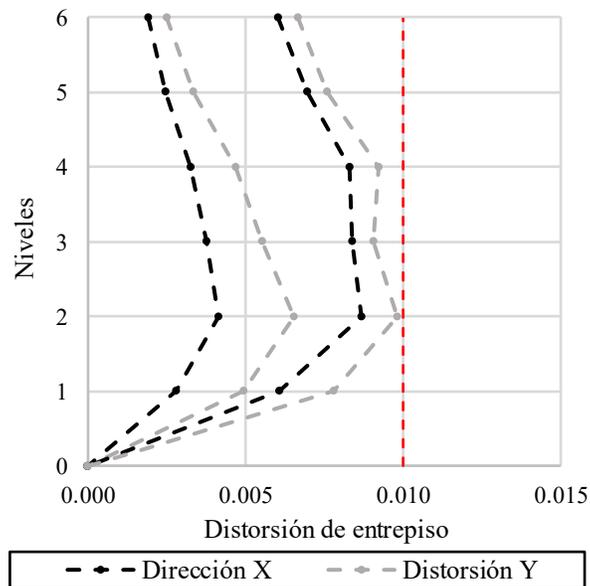


Figura 106 Curvas de distorsiones de entrepiso para la estructura con y sin disipadores



C.8. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS (PASO 8)

En esta sección se presentan los resultados de los análisis estáticos no lineales tipo “Pushover” y dinámicos no lineales tipo paso a paso o de historia en el tiempo. El objetivo principal es comprobar el desempeño de la estructura y verificar desplazamientos máximos en los disipadores. Se incluye además: comparaciones entre los resultados del análisis modal espectral y los métodos no lineales; y comparaciones entre la respuesta no lineal de la estructura obtenida con disipadores y sin ellos.

Primero se revisan los desplazamientos y distorsiones laterales de la estructura en cada nivel. Para calcularlos se debe obtener la historia de desplazamientos, por nivel y dirección de análisis de todos los movimientos sísmicos. Con estos datos se calcula la distorsión de entrepiso para cada paso de tiempo y posteriormente se obtiene el valor máximo. Con los resultados de todos los movimientos sísmicos se calcula la distorsión promedio y esta se compara con los límites de distorsión que corresponde.

En la Figura 107 se presentan dos gráficas, una por cada dirección de análisis, donde se muestran las distorsiones. Con líneas grises se muestran las distorsiones de entrepiso por cada uno de los 12 movimientos sísmicos analizados. Con línea negra discontinua se muestra el valor promedio y con una línea roja discontinua se muestra la distorsión límite para control de daños con valor igual a 0.01. En ambas gráficas se puede apreciar que la estructura mantiene distorsiones por debajo de la mitad del límite de distorsión para la mayoría de los sismos analizados. Para las distorsiones promedio el valor es menor a 0.004 en todos los niveles.

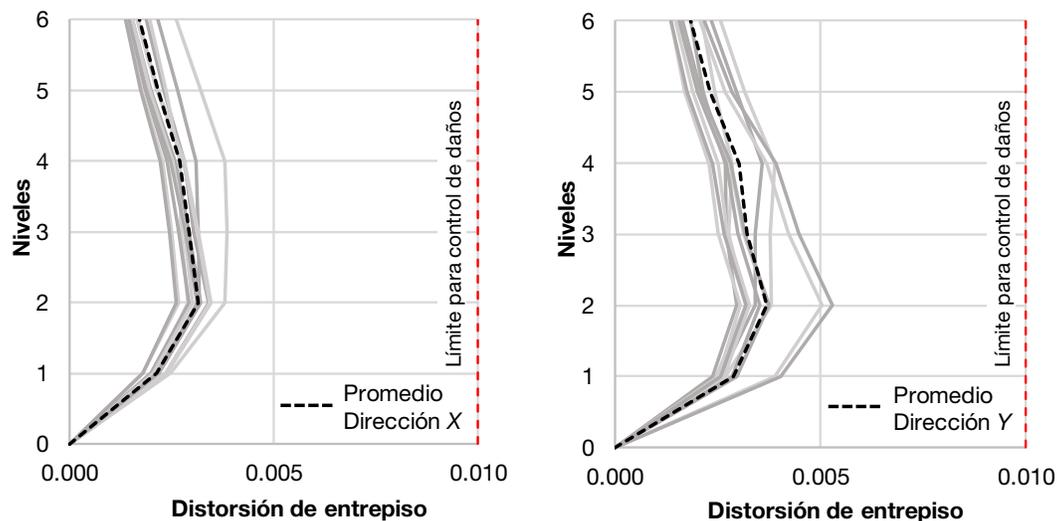


Figura 107 Distorsiones de entrepiso promedio para el análisis dinámico no lineal



DAMPO

El desplazamiento promedio se obtiene promediando los valores máximos de desplazamiento para cada nivel de todos los movimientos sísmicos. En la Figura 108 se muestra el perfil de desplazamientos para cada dirección de análisis, con líneas griseas se muestran los perfiles de todos los movimientos sísmicos y con línea negra discontinua el perfil de desplazamiento promedio. En la figura se puede apreciar que la dirección X, en general, se desplaza menos que la dirección Y. Sin embargo, los perfiles de desplazamiento promedio son similares y se encuentra por debajo de 60 mm en la azotea.

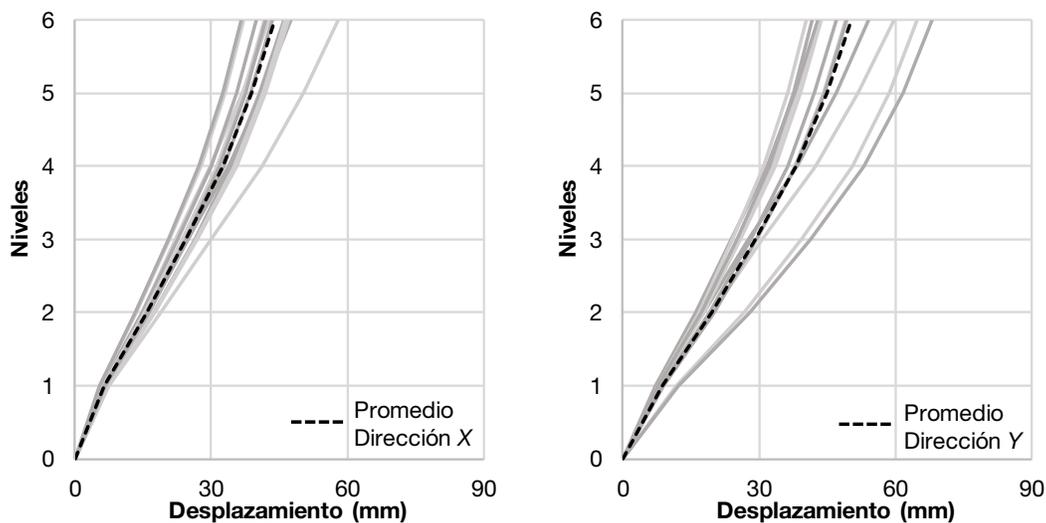


Figura 108 Desplazamientos de piso promedio para el análisis dinámico no lineal

Con los valores promedio, se pueden comparar los perfiles de distorsión y de desplazamiento con la estructura sin disipadores. Con este propósito se realizó un modelo de la estructura sin disipadores y se sometió a un movimiento sísmico de subducción, cuyo espectro es similar al espectro promedio.

Los resultados del análisis se muestran en la Figura 109, en la cual se muestra con líneas discontinuas los perfiles de distorsiones de entrepiso. En color negro se muestra la dirección X y en color gris la dirección Y. También se incluye una línea que indica el límite de distorsión para control de daños de 0.01, y se indican los perfiles que corresponden a cada tipo de estructura. En la figura se puede observar claramente la reducción de distorsiones que aportan los disipadores. También se aprecia que las distorsiones para la estructura sin disipadores son entre dos y tres veces superiores con respecto a las distorsiones de la estructura equipada con disipadores.



DAMPO

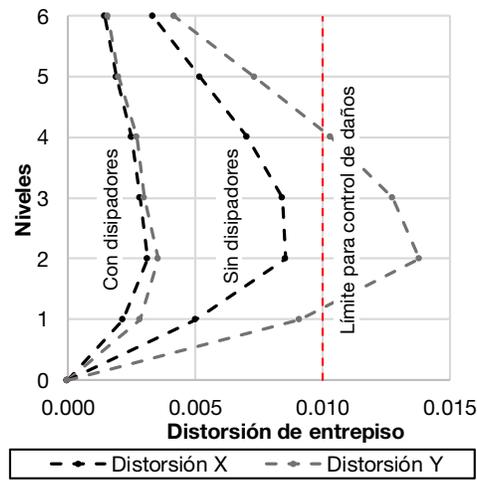


Figura 109 Distorsiones de entrepiso entre estructuras con y sin disipadores.

A continuación se muestra la diferencia de resultados entre el análisis dinámico no lineal y el modal espectral. En la Figura 110 se muestran dos juegos de gráficas, del lado izquierdo se muestran los perfiles de distorsión para la estructura con disipadores y del lado derecho los perfiles para la estructura sin disipadores. En ambos casos se indica con líneas negras las distorsiones en dirección X y con líneas grises las distorsiones en dirección Y. Además se indica en cada par de curvas a qué tipo de análisis pertenecen. Se destaca de las gráficas la gran diferencia entre los resultados del análisis modal espectral y el dinámico no lineal. En este ejemplo el modal espectral estima distorsiones de 2.5 veces o más, con respecto a las calculadas con los análisis no lineales. Sin embargo, incluso con esta reducción, la estructura sin disipadores con cumple con el límite establecido.

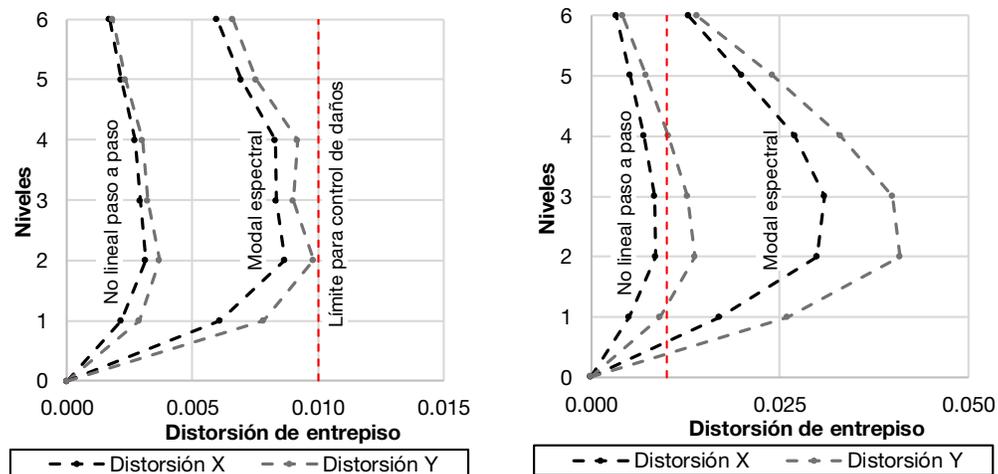


Figura 110 Perfiles de distorsión de entrepiso para casos lineal y no lineal.



DAMPO

Ahora se comparan los perfiles de desplazamiento para cada tipo de análisis. En la Figura 110 se muestran dos juegos de gráficas, del lado izquierdo se muestran los perfiles de desplazamiento para la estructura con disipadores y del lado derecho para la estructura sin disipadores. En ambos casos se observa claramente la sobreestimación que realiza el análisis modal espectral para este ejemplo. También, se observa que la estructura con disipadores tiene un mejor desempeño en su respuesta máxima.

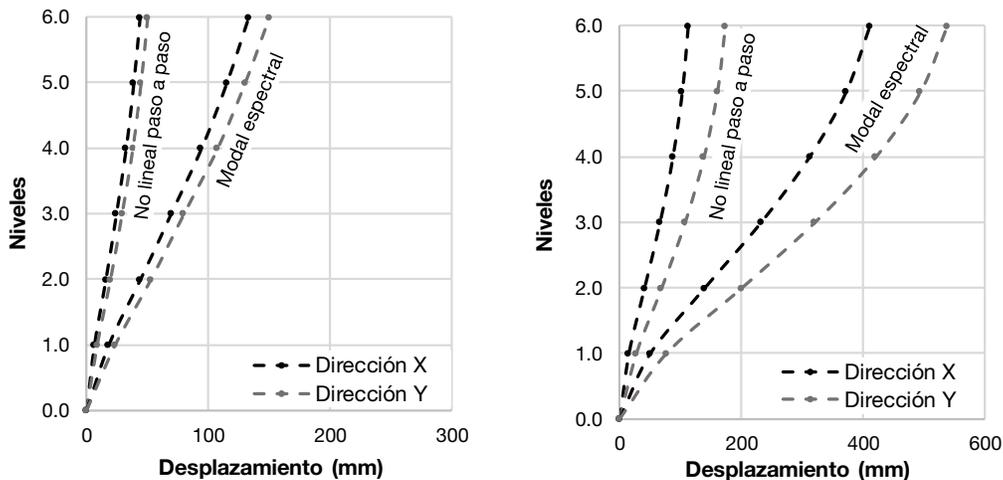


Figura 111 Perfiles de desplazamiento de piso para casos lineal y no lineal.

En la Figura 112 se muestran dos gráficas que corresponden a la respuesta de desplazamiento en la azotea. La línea gris muestra la respuesta de la estructura sin disipadores y la negra con disipadores. En esta figura se puede apreciar la reducción de los desplazamientos durante todo el movimiento sísmico. Este desempeño mejorado, además de reducir los daños provocados por la distorsión, también reduce los procesos de fatiga en la estructura derivados de la acumulación de ciclos de desplazamiento de gran magnitud.

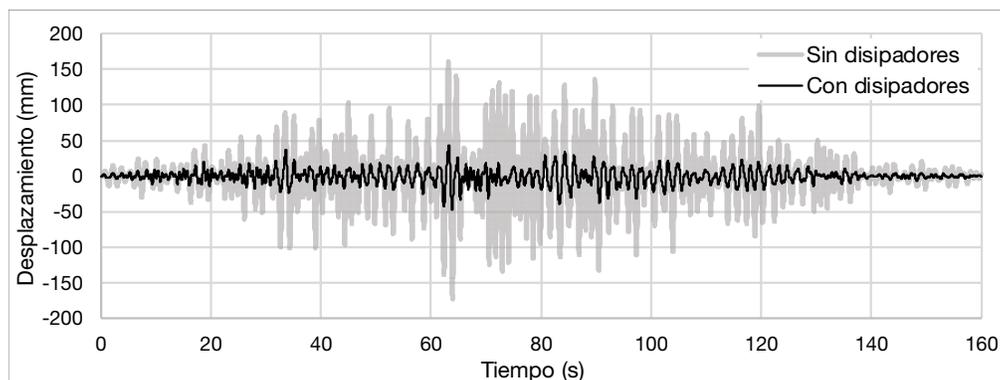


Figura 112 Respuesta de desplazamiento de la estructura con y sin disipadores.



DAMPO

A continuación, se muestran los resultados de fuerza y desplazamiento registrado en un “link” que se utiliza para modelar los disipadores en Etabs (2016). Con esta información se pueden evaluar los desplazamientos y ductilidades máximas desarrolladas en los disipadores durante el movimiento sísmico. Para ejemplificar los resultados se selecciona el disipador modelado en el nivel que tiene la mayor distorsión de entrepiso.

En la Figura 113 se muestran las curvas de histéresis de un disipador modelo 100/3 colocado en el segundo nivel. En la figura se pueden observar ciclos con transiciones curvas, lo cual indica que se desarrolla comportamiento inelástico. Además, se observa que se desarrollan fuerzas superiores a la de diseño, lo cual es consecuencia de la sobre resistencia que desarrollan los disipadores y que se reproduce en el modelo. Finalmente se observan muchos ciclos donde el disipador se mantiene en el intervalo elástico, es decir que el movimiento sísmico no demanda en exceso al disipador. Esto es coincidente con las distorsiones de entrepiso y puede ser deseable para incrementar la durabilidad de los disipadores.

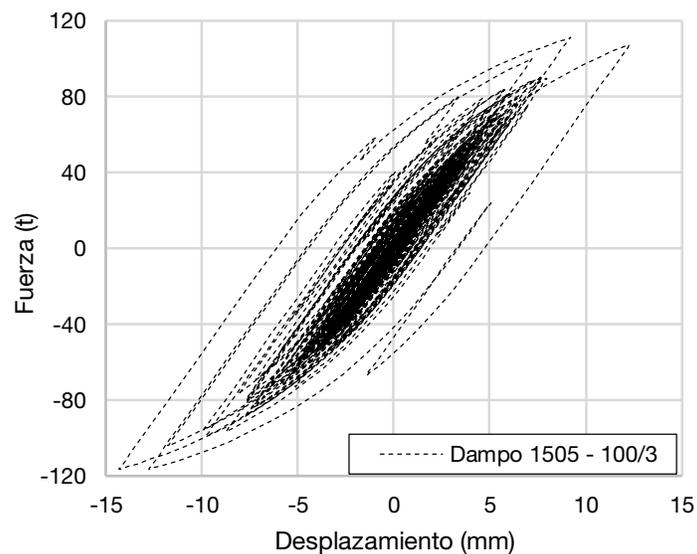


Figura 113 Curvas de histéresis en el disipador con la mayor demanda

De acuerdo con datos de Etabs (2016) el disipador se deforma 14.3 mm. Este valor está por debajo de la capacidad máxima de deformación de 30 mm, y con esto se verifica que el disipador no se demanda en exceso en este ejemplo. Para calcular la ductilidad máxima desarrollada se divide el desplazamiento registrado entre la fluencia es decir $\mu = \frac{d (mm)}{d_y (mm)} = \frac{14.3}{5} = 2.86$, este valor de ductilidad es bajo, e incluso satisface la condición de ocupación inmediata de acuerdo con ASCE/SEI 41-17



DAMPO

Finalmente se revisa el nivel de desempeño de la estructura para las demandas impuestas por los acelerogramas. Para esto, se utilizan las curvas de capacidad obtenidas con el análisis “Pushover” y los desplazamientos máximos obtenidos del análisis no lineal tipo paso a paso.

En la Figura 114 se muestran las curvas de capacidad de la estructura, la línea gris discontinua corresponde a la estructura sin disipadores y la línea negra discontinua a la estructura con disipadores. En la figura se muestran líneas verticales que corresponden con los desplazamientos máximos en la azotea para cada caso. El cruce entre la línea recta y la curva de capacidad nos indica, de forma indirecta, el nivel de demanda sobre la estructura y si se mantiene en el intervalo elástico lineal.

Como se puede ver en ambas graficas los desplazamientos, indicados con líneas verticales, son menores para el edificio con disipadores. Esta reducción en el desplazamiento, para este ejemplo, se traduce también en una reducción de las demandas sobre la estructura. En la figura se puede observar esta reducción de las demandas identificando los puntos donde se cortan las curvas de capacidad.

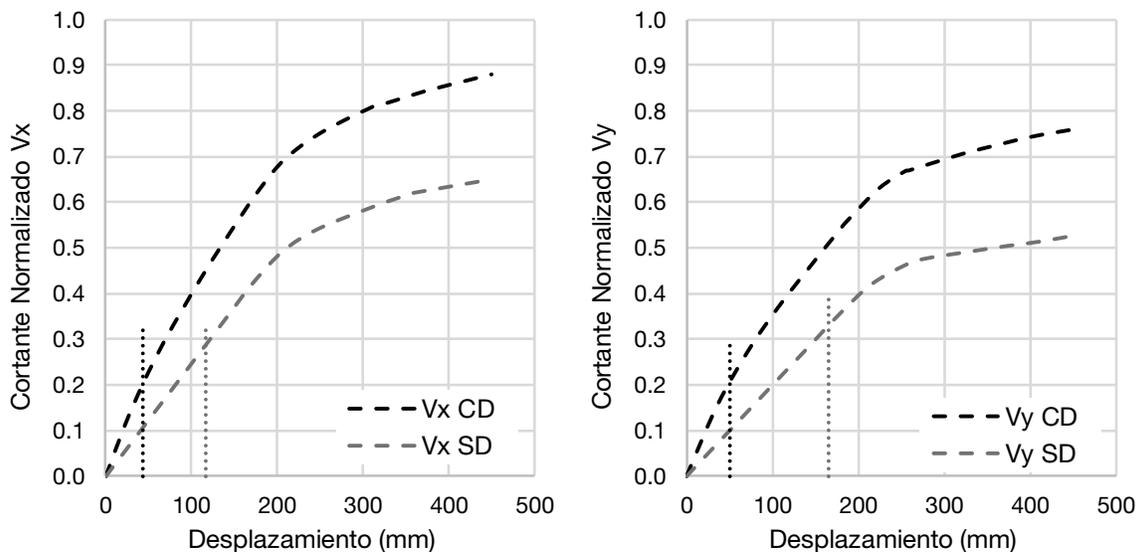


Figura 114 Curvas de capacidad con niveles de demanda

Cabe destacar que para ambas estructuras, el desplazamiento máximo en la azotea se mantiene por debajo del punto donde cambia la pendiente de la curva de capacidad. Es decir, que todos los elementos se mantienen en su intervalo elástico lineal. Esta observación se corrobora con las articulaciones plásticas ya que en el modelo de Etabs (2016) las articulaciones no reportan comportamiento no lineal.