

PROCEDIMIENTOS REGLAMENTARIOS DE ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS SISMORRESISTENTES CON SISTEMAS DE DISIPACIÓN PASIVA DE ENERGÍA

Gustavo L. Palazzo^a, Carlos A. Martínez^{a,b}, y Cristian O. Bay^b

^a*CEREDETEC, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Argentina,
gpalazzo@frm.utn.edu.ar, www.frm.utn.edu.ar/ceredetec*

^b*Grupo de Estudio de Estructuras Civiles, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San
Rafael, Urquiza 314 (5600), San Rafael, Mendoza, Argentina, cmartinez@frsr.utn.edu.ar,
cbay@frsr.utn.edu.ar, www.frsr.utn.edu.ar*

Palabras Clave: Ingeniería Sísmica, Sistemas de disipación, Análisis Estructural.

Resumen. En las últimas décadas se han investigado, desarrollado e implementados dispositivos de disipación pasiva de energía para incorporarse a estructuras sismorresistente nuevas o existentes. Estos dispositivos pueden tener comportamiento viscoso, viscoelástico o histerético. Definida la clase y propiedades del disipador a emplear en una estructura, es necesario realizar el análisis de la estructura con estos dispositivos, a los efectos de verificar las condiciones de aceptación de la misma. Normas internacionales como el ASCE/SEI 7 (2016), recientemente actualizado, especifican para esta clase de estructuras el análisis dinámico no lineal. Pero también aceptan como procedimientos alternativos, si se cumplen determinadas condiciones, el procedimiento de la carga lateral equivalente, y el de la superposición modal. Considerando esta temática, se plantea como objetivo de este trabajo la comparación de resultados de las tres metodologías de análisis mencionadas, para una estructura con disipadores viscosos sometida a acelerogramas de tipo vibratorio. Para ello se selecciona una estructura que cumple las condiciones para la aplicación de los tres procedimientos, y se especifican los disipadores a incorporar a la misma. Para la simulación numérica de la estructura y los disipadores se siguen las especificaciones de la norma americana mencionada. Luego se aplican los tres métodos de análisis señalados, siguiendo los requerimientos del ASCE/SEI 7 (2016), y se evalúan y comparan los parámetros de respuestas. En las conclusiones se destacan las implicancias de la aplicación de cada procedimiento y la valoración de los resultados obtenidos.

1 INTRODUCCIÓN

Las estructuras sismorresistentes pueden incorporar sistemas de disipación pasiva de energía para mejorar su desempeño ante la ocurrencia de sismos.

Un sistema de disipación (SD), que se define separadamente del sistema resistente a la acción sísmica (SRAS), es un conjunto de elementos estructurales que incluye: los dispositivos de disipación, todos los elementos estructurales y riostras requeridos para transferir las fuerzas desde los dispositivos a la base de la estructura, y todos los elementos estructurales y riostras requeridos para transferir las fuerzas desde los dispositivos de disipación al sistema resistente a la acción sísmica. En la Figura 1 se destacan los dos sistemas mencionados.

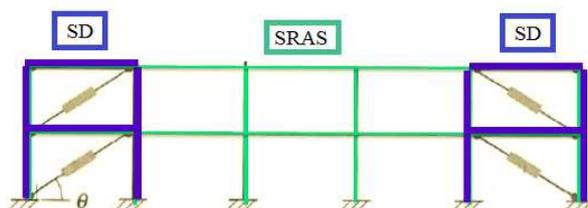


Figura 1: Sistema resistente a la acción sísmica vs. sistema de disipación.

Mientras que un dispositivo de disipación es un elemento estructural del sistema de disipación (diagonales en la Figura anterior), que tiene por objeto disipar la energía que ingresa al SRAS. Los elementos necesarios para su conexión a otros elementos de la estructura se consideran parte del dispositivo de disipación. Estos dispositivos se clasifican en: dependientes del desplazamiento, dependientes de la velocidad, o una combinación entre ambos; y pueden tener un comportamiento lineal o no lineal.

Tanto en la fase de pre diseño como en la de verificación del diseño final de una estructura que incorpora un SD, es necesario realizar un análisis estructural. En los últimos años, los reglamentos de países desarrollados han considerado requerimientos específicos para esta clase de análisis. En el caso de Estados Unidos, por ejemplo, el Capítulo 18 del ASCE/SEI 7 (2016) plantea los requerimientos de análisis para estructuras con sistemas de disipación (habiendo incorporado por primera vez prescripciones para estos sistemas en la versión de 2005). Este reglamento se modificó recientemente, y está disponible desde junio de este año. Se destaca además que los reglamentos nacionales argentinos no consideran la inclusión de sistemas de disipación en las estructuras sismorresistentes, aunque una comisión ad hoc trabaja actualmente en un documento preliminar, basado en la normativa americana.

Planteada esta problemática, este trabajo tiene por objeto evaluar las prescripciones para el análisis de estructuras con SD, según los 3 procedimientos indicados en la norma americana, considerando para el análisis dinámico solamente acelerogramas del tipo vibratorio.

Para este estudio fueron seleccionados amortiguadores viscosos lineales, que pertenecen al grupo de dispositivos de disipación dependientes de la velocidad. En estos dispositivos, la relación fuerza – desplazamiento es función de la velocidad relativa entre los extremos del dispositivo.

El análisis estructural se realiza en base a un modelo de estructura que se describe en la sección 2. Los requerimientos generales de análisis y diseño para estructuras con SD se describen en la sección 3; y en las secciones 4 y 5 se presentan tanto el procedimiento no lineal de historia de la respuesta, como los procedimientos alternativos considerados en el ASCE/SEI 7 (2016). Luego en la sección 6 se presentan los principales resultados del análisis según las tres metodologías consideradas; y en las conclusiones (sección 7) se destacan las particularidades de cada procedimiento, así como las consideraciones principales referidas a los

resultados obtenidos.

2 ESTRUCTURA ESTUDIADA

La estructura en estudio fue seleccionada de un ejemplo del curso “Control Estructural”, perteneciente a la carrera de doctorado en Ingeniería Civil de la Universidad de Buffalo, Estados Unidos. En ese ejemplo fue desarrollado solamente el procedimiento de la fuerza lateral equivalente.

Esta estructura está compuesta por un SRAS y un SD; los cuales se describen a continuación.

2.1 Sistema resistente a la acción sísmica

El SRAS está conformado por un edificio regular de acero de dos niveles, donde se consideran nulos los efectos torsionales. La estructura corresponde a pórticos de acero especiales, resistentes a momentos y con empotramiento en sus bases, según se especifica en el ASCE/SEI 7 (2016). Según este reglamento, se tiene un factor de reducción global $R = 8$, y un factor de amplificación de deformaciones $C_d = 5.5$.

En la Figura 2 se muestra la planta tipo, y una vista de la estructura considerada. En cada dirección principal se tienen 6 pórticos con vanos de 8.84 m; y cada nivel tiene una altura de 4.88 m.

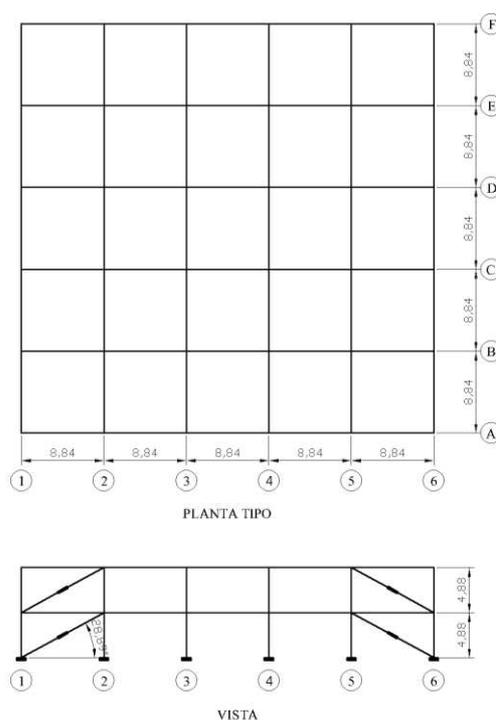


Figura 2: Planta tipo y vista de la estructura analizada.

Los diafragmas para la PB y el techo se consideran rígidos, compuestos por vigas y losa de hormigón alivianado sobre *steel decks*.

El peso sísmico es de 4448 kN para el primer nivel, y de 5338 kN para el segundo; obteniendo como matriz de masa, en $[\text{kN s}^2/\text{mm}]$, la indicada en la Ec. (1).

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4536 & 0 \\ 0 & 0.5443 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Mientras que la rigidez a desplazamientos horizontales para ambos niveles es de 65,5 kN/m; con lo que se obtiene la matriz de rigidez, en [kN/m], dada por la Ec. (2).

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 131.00 & -65.00 \\ -65.00 & 65.00 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Resolviendo el problema de autovalores y autovectores correspondiente, se obtiene para el SRAS un período fundamental elástico $T_1 = 0.906$ s, y de 0.325 s para el modo 2; con las formas modales V_I y V_{II} dados en la Ec. (3).

$$[V_I] = \begin{bmatrix} 0.596 \\ 1.000 \end{bmatrix} ; \quad [V_{II}] = \begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.475 \end{bmatrix} \quad (3)$$

El amortiguamiento viscoso equivalente de este sistema (amortiguamiento inherente) se consideró igual al 5% del crítico. Sin embargo, la norma americana establece que el amortiguamiento inherente no puede superar el 3% (excepto que se demuestre mediante ensayos que se tienen valores mayores).

2.2 Sistema de disipación

El SD para toda la estructura, según el ejemplo considerado, se implementó solo en los vanos extremos de uno de los planos estructurales, y en una de las direcciones principales de la estructura (dirección de estudio para este trabajo), tal como se muestra en Figura 3.

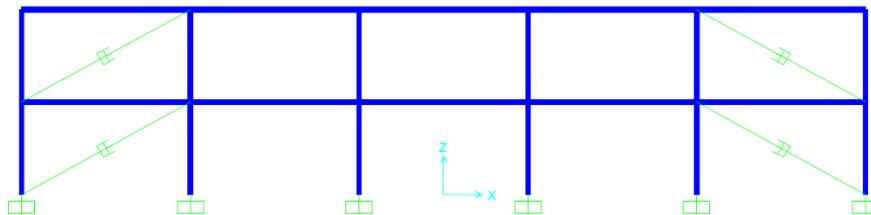


Figura 3: Disipadores viscoso lineales en uno de los pórticos de la estructura.

2.3 Dispositivo de disipación

Cuatro disipadores viscosos lineales conformaron los dispositivos de disipación instalados en el SD, tal como se muestra en la Figura 3.

La ley constitutiva del disipador viscoso lineal está dada por la Ec. (4).

$$F(t) = C_L \dot{x}(t) \quad (4)$$

Si a este disipador viscoso se le aplica una historia de desplazamientos sinusoidales de amplitud X_o , y frecuencia angular ω , la energía disipada por cada ciclo E_{vd} está dada por la Ec. (5).

$$E_{vd} = C_L \pi \omega X_o^2 \quad (5)$$

Esta energía E_{vd} corresponde al área de la elipse que se obtiene al graficar la relación fuerza – desplazamiento para esta clase de dispositivo de disipación.

Es condición para el edificio en estudio que la relación de amortiguamiento viscoso suplementario para el primer modo, β_{VI} , sea del 9% para el sistema de disipación agregado. Esta relación de amortiguamiento se expresa en la Ec. (6), en función la energía disipada por cada ciclo E_{vd} , y la energía total de deformación elástica recuperable E_{es} (Christopoulos y Filiatrault, 2006).

$$\beta_{V1} = \frac{E_{vd}}{4 \pi E_{es}} = 0.09 \quad (6)$$

Reemplazando en la Ec. (6) E_{vd} por la Ec. (5), y considerando la cantidad total de disipadores viscosos dispuestos en la estructura, así como la determinación de E_{es} en función de la rigidez y el desplazamiento de cada nivel, se determinó un coeficiente de amortiguamiento $C_L = 1.05$ kN s /mm para cada uno de los 4 dispositivos del sistema.

2.4 Espectro de respuesta de diseño y MCE_R

El espectro de respuesta de diseño considerado en el ejemplo tomado como base para este estudio, y que se muestra en la Figura 4, está caracterizado por los siguientes parámetros (según ASCE/SEI 7, 2016): $S_{DS} = 0.83$ y $S_{D1} = 0.58$ (ordenada espectral del plafón, y para el período $T = 1.0$ s, respectivamente). Las ordenadas del espectro máximo esperado MCE_R se obtienen, tal como indica el reglamento americano, multiplicando por 1.5 las ordenadas del espectro de diseño antes mencionado.

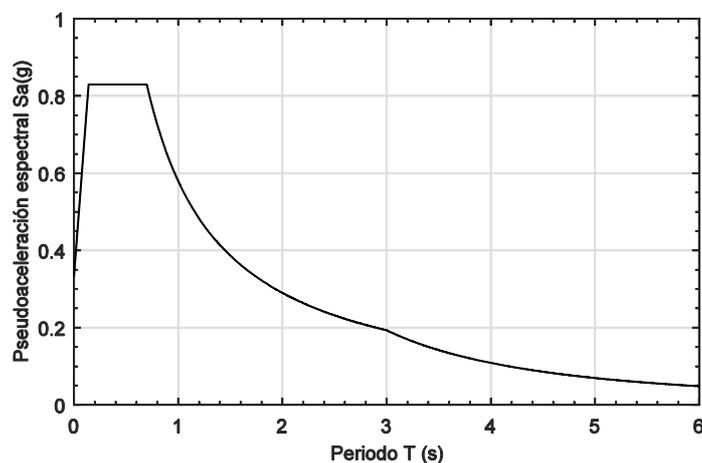


Figura 4: Espectro de respuesta de diseño para la estructura en estudio.

3 REQUERIMIENTOS GENERALES DE ANÁLISIS Y DISEÑO SEGÚN EL ASCE/SEI 7 (2016)

Para el análisis y el diseño se considera por separado, como se destacó en la Figura 1, el SRAS, como el SD.

El análisis debe realizarse para el terremoto de diseño, así como para el MCE_R.

Para alcanzar los requerimientos de deriva, se permite considerar la combinación del sistema resistente a la acción sísmica y el sistema de disipación. Como demanda debe considerarse el MCE_R; y debe incluirse además la excentricidad accidental.

3.1 Sistema resistente a la acción sísmica

El SRAS debe dimensionarse según las demandas del terremoto de diseño, donde no es necesario considerar la excentricidad accidental. Como en el diseño clásico, la resistencia de diseño de cada elemento de este sistema, debe ser mayor a la resistencia requerida por el terremoto de diseño.

Pero el corte basal empleado para el diseño de este sistema (sin el sistema de disipación) no debe ser menor que el V_{min} determinado según el mayor valor dado por la Ec. (7). Se deduce de esa Ec.: (i) que el SD reduce la respuesta del SRAS según un coeficiente de amortiguamiento

B_{V+I} ; y (ii) que el SRAS debe diseñarse para un corte basal no menor al 75 del corte basal de una estructura convencional.

$$V_{\min} = \frac{V}{B_{V+I}} \quad (7)$$

$$V_{\min} = 0.75 V$$

La Ec. anterior $V_{\min} = V$ si: (i) en la dirección de interés el SRAS tiene menos de dos disipadores en cada nivel, configurados para resistir torsión; y (ii) el sistema resistente a la acción sísmica tiene irregularidad torsional tipo 1b, o irregularidad vertical tipo 1b.

En la Ec. (7):

. V es el corte basal en la dirección de interés del sistema resistente a la acción sísmica, sin el sistema de disipación (calculado como $V = C_s W$, según el procedimiento de la fuerza lateral equivalente); y

. B_{V+I} es un coeficiente numérico, denominado coeficiente de amortiguamiento, dado en la Tabla 1 para períodos de la estructura mayor al período $T_0 = 0.2 S_{D1}/S_{DS}$ (con T_0 como período de inicio del plafón en el espectro). Este coeficiente es función del amortiguamiento efectivo β , definido por la Ec. (8), que es una combinación de 3 componentes.

$$\beta = \beta_I + \beta_V \sqrt{\mu} + \beta_H \quad (8)$$

Donde:

. β_I es la componente del amortiguamiento efectivo debido a la disipación inherente de los elementos de la estructura, en (o justo por debajo) el desplazamiento de plastificación efectivo del sistema resistente a la acción sísmica;

. β_V es la componente del amortiguamiento efectivo debido a la disipación de energía viscosa del sistema de disipación, en (o justo por debajo) el desplazamiento de plastificación efectivo del sistema resistente a la acción sísmica; con μ como demanda de ductilidad efectiva en el sistema resistente a la acción sísmica, determinada como la relación entre el desplazamiento del techo D_1 , y el desplazamiento de techo para el punto de plastificación efectiva del sistema resistente a la acción sísmica D_Y ; y,

. β_H es la componente del amortiguamiento efectivo de la estructura debido al comportamiento histerético post fluencia del sistema resistente a la acción sísmica y del sistema de disipación, para una demanda de ductilidad efectiva μ .

Las componentes del amortiguamiento efectivo β que hay que considerar para determinar B_{V+I} son solo β_I y β_V ; con valores según la Ec. (9).

$$\beta = \beta_I + \beta_V = 0.05 + 0.09 = 0.14 \quad (9)$$

Con este valor de β , se interpola en la Tabla 1, obteniendo $B_{V+I} = 1.32$, alcanzando finalmente un $V_{\min} = 1527$ kN.

El coeficiente de amortiguamiento B de la Tabla 1 que se especifica en la norma americana, se define para un sistema de un grado de libertad mediante la Ec. (9), donde $D(T, \beta = 5\%)$ es el desplazamiento del sistema con período T y relación de amortiguamiento β del 5%; y $D(T, \beta)$ es el desplazamiento del sistema con período T y relación de amortiguamiento β .

$$B = \frac{D(T, \beta = 5\%)}{D(T, \beta)} \quad (10)$$

| Amortiguamiento efectivo, β (como porcentaje del crítico) | Coefficiente de amortiguamiento (B_{V+I} , B_{ID} , B_{IE} , B_R , B_{IM} , B_{mD} , B_{mM}) |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ≤ 2 | 0.8 |
| 5 | 1.0 |
| 10 | 1.2 |
| 20 | 1.5 |
| 30 | 1.8 |
| 40 | 2.1 |
| 50 | 2.4 |
| 60 | 2.7 |
| 70 | 3.0 |
| 80 | 3.3 |
| 90 | 3.6 |
| ≥ 100 | 4.0 |

Tabla 1: Coeficiente de amortiguamiento para períodos de la estructura (Fuente: ASCE/SEI 7, 2010).

3.2 Sistema de disipación

El SD y sus conexiones se debe dimensionar para resistir las fuerzas, desplazamientos y velocidades que correspondan al terremoto MCE_R .

Las propiedades de rigidez y disipación de los disipadores de energía usadas en la modelación matemática se deben basar en ensayos. En el caso de los dispositivos dependientes de la velocidad, se debe evaluar la influencia en la respuesta del dispositivo de la frecuencia, amplitud, y duración de la acción sísmica.

Para los elementos del sistema de disipación que tengan un comportamiento inelástico, se deberá demostrar mediante análisis o ensayos, que esa respuesta inelástica no tendrá efectos adversos en el sistema en su conjunto.

Si menos de 4 disipadores se colocan en cada piso del edificio, en cada dirección principal, o menos de 2 disipadores se colocan a cada lado del centro de rigidez de cualquier piso en cada dirección principal, todos los disipadores deben ser capaz de soportar desplazamientos iguales al 130% del desplazamiento máximo calculado en cada dispositivo, para la demanda del terremoto MCE_R . Un dispositivo dependiente de la velocidad debe ser capaz de soportar fuerzas y desplazamientos asociados con una velocidad igual al 130% de la máxima velocidad calculada para el dispositivo bajo la demanda del terremoto MCE_R . Estas prescripciones intentan evitar que se use un sistema de disipación con baja redundancia en cada piso.

3.3 Procedimientos de análisis estructural

Las estructuras con SD deben analizarse y diseñarse según el procedimiento no lineal de historia de la respuesta, que es el procedimiento destacado en la norma americana.

Se permite también usar métodos alternativos (espectro de respuesta y fuerza lateral equivalente) si se verifican las siguientes limitaciones:

a) Para el método de espectro de respuesta

- . En cada dirección principal, el sistema de disipación debe tener al menos dos disipadores en cada piso, configurados para resistir torsión.
- . El amortiguamiento total efectivo en el modo fundamental (β_{mD} , para $m = 1$) de la estructura en la dirección de interés no debe ser mayor al 35% del crítico.
- . El valor S_{D1} (ordenada espectral para el sismo de diseño, en el período de 1.0 s) para el sitio debe ser menor a 0.6.

b) Para el método de la fuerza lateral equivalente

Además de las limitaciones indicadas para el método de espectro de respuesta se agregan:

- . El sistema resistente a la acción sísmica no debe tener irregularidad torsional tipo 1a o 1b, o irregularidad vertical tipo 1a, 1b, 2 o 3.
- . Los diafragmas de piso deben ser rígidos.
- . La altura de la estructura desde su base, no debe exceder los 30 m.

4 PROCEDIMIENTO NO LINEAL DE HISTORIA DE LA RESPUESTA

4.1 Consideraciones generales

El ASCE/SEI 7 (2016) indica que el análisis no lineal de historia de la respuesta debe basarse en un modelo matemático del SRAS, y el SD. Este modelo debe considerar el comportamiento histerético no lineal de todos los miembros y conexiones que integran ambos sistemas, de manera consistente con los resultados de ensayos.

Además, establece que si la fuerza calculada para un elemento del SRAS, o del SD, no excede 1.5 veces la resistencia esperada, se puede modelar ese elemento como lineal.

El modelo matemático para los SD dependientes de la velocidad, debe incluir el coeficiente de velocidad consistente con los resultados de ensayo. Si las propiedades del dispositivo de disipación cambian en el tiempo, y/o con la temperatura, debe considerarse en el modelo.

4.2 Acelerogramas considerados

Según la norma americana en consideración, tanto para el terremoto de diseño como para el MCE_R , deben seleccionarse al menos 7 acelerogramas (con sus 2 componentes horizontales cada uno). Estos registros deben ser consistentes en magnitud, distancia a la falla y fuente sismogénica, con los eventos relacionados al sismo de diseño y al MCE_R . Los registros se deben escalar usando el procedimiento de amplitud o “matching”.

Con cada par de componentes horizontales de cada registro hay que obtener el espectro SRSS, que se determina como la raíz cuadrada de la suma al cuadrado del espectro (con 5% de amortiguamiento) de cada componente horizontal.

Cada espectro SRSS hay que escalarlo según el terremoto de diseño, y el terremoto MCE_R . Este escalamiento se hace en el rango de períodos 0.2 T_{1D} a 1.25 T_{1M} (período efectivo del modo fundamental de vibración de la estructura para el desplazamiento de diseño y el desplazamiento MCE_R , respectivamente; calculado según se indica en el ASCE/SEI 7, 2016).

El promedio de los 7 o más espectros SRSS, en el rango de períodos mencionados, no debe caer por debajo del espectro de diseño (o el espectro MCE_R , según sea el caso de estudio).

Si se emplea el escalamiento por amplitud, se debe considerar el mismo factor de escala para las dos componentes horizontales. Para acelerogramas que son “matched”, tanto para el terremoto de diseño como para el MCE_R , cada par de acelerogramas debe ser escalado tal que, en el rango de períodos especificados, el espectro de respuesta de una de las componentes horizontales del par sea al menos 90% de la ordenada espectral correspondiente del espectro de diseño (o del MCE_R , según se considere).

Para el presente estudio, y como no se tenían datos de la magnitud, distancia a la falla y la fuente sismogénica, relativos al sismo de diseño y al MCE_R , para la zona de emplazamiento del edificio, se seleccionaron acelerogramas según el FEMA P695 (2009). En ese documento se consideraron el conjunto de acelerogramas del Anexo A, Tabla A-4A, correspondiente a eventos de falla lejana.

En la Tabla 2 se indican las características principales de cada evento sísmico considerado.

Para cada uno de los siete registros indicados en esta Tabla, se obtuvieron las 2 componentes horizontales (señaladas con a y b en la 4ta columna), según la base de datos del *Pacific Earthquake Engineering Research Center* – PEER (<http://ngawest2.berkeley.edu/site>).

Se ha ordenado la Tabla en base a un orden creciente de la aceleración pico (PGA), para los acelerogramas escalados según el terremoto de diseño y según el terremoto MCE_R .

| Nº | Terremoto | | | Estación Nombre | PGA [g] | |
|----|-----------|------|---------------------|---------------------------|---------|---------|
| | Mag. | Año | Nombre | | Diseño | MCE_R |
| 1 | 7.3 | 1992 | Landers (b) | Yermo Fire Station | 0.26 | 0.39 |
| 2 | 6.5 | 1979 | Imperial Valley (a) | Delta | 0.26 | 0.39 |
| 3 | 6.9 | 1989 | Loma Prieta (b) | Capitola | 0.31 | 0.46 |
| 4 | 7.1 | 1999 | Hector Mine (b) | Hector | 0.35 | 0.52 |
| 5 | 6.9 | 1989 | Loma Prieta (a) | Capitola | 0.36 | 0.54 |
| 6 | 6.5 | 1979 | Imperial Valley (b) | Delta | 0.38 | 0.58 |
| 7 | 6.6 | 1971 | San Fernando (b) | LA - Hollywood Stor | 0.39 | 0.59 |
| 8 | 7.3 | 1992 | Landers (a) | Yermo Fire Station | 0.42 | 0.62 |
| 9 | 7.1 | 1999 | Hector Mine (a) | Hector | 0.43 | 0.64 |
| 10 | 6.6 | 1971 | San Fernando (a) | LA - Hollywood Stor | 0.45 | 0.67 |
| 11 | 6.7 | 1994 | Northridge (b) | Beverly Hills - Mulhol | 0.45 | 0.68 |
| 12 | 7.1 | 1999 | Duzce, Turkey (a) | Bolu | 0.52 | 0.78 |
| 13 | 7.1 | 1999 | Duzce, Turkey (b) | Bolu | 0.56 | 0.85 |
| 14 | 6.7 | 1994 | Northridge (a) | Beverly Hills - Mulhol | 0.62 | 0.93 |

Tabla 2: Características de los terremotos considerados en el estudio (Fuente: FEMA P695, 2009).

En la Figura 5 se grafican los valores de PGA para cada componente horizontal de cada registro MCE_R , el valor promedio (línea naranja), y el valor promedio \pm un desvío estándar (línea negra de trazos).

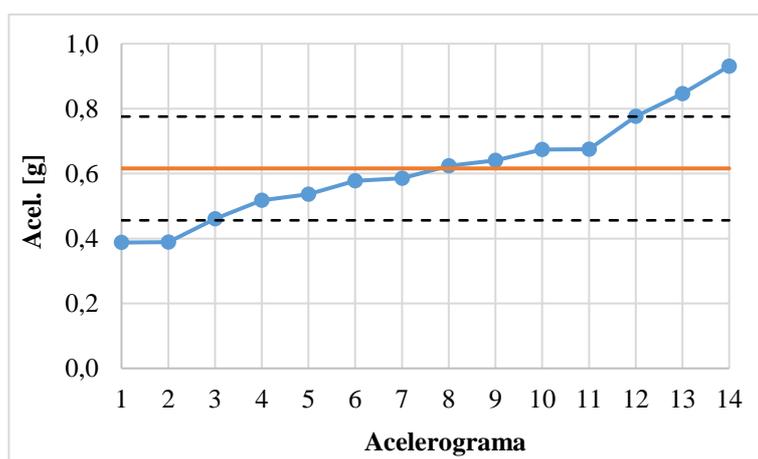


Figura 5: Valores de PGA para cada componente horizontal de cada registro MCE_R .

Como rango de período de escalamiento, y al no haber determinado el T_{1D} y el T_{1M} en esta parte, se consideró el $0.2 T_1 = 0.18$ s, y $1.25 T_1 = 1.13$ s (para $T_1 = 0.906$ s, como período fundamental de la estructura en la dirección de estudio).

El espectro SRSS promedio, escalado mediante el procedimiento de amplitud, se compara con el terremoto de diseño en la Figura 6, y con el espectro del terremoto MCE_R en la Figura 7 (se agrega también en esta Figura, en línea de trazos negra, los límites correspondientes a $0.2 T_1$ y $1.25 T_1$).

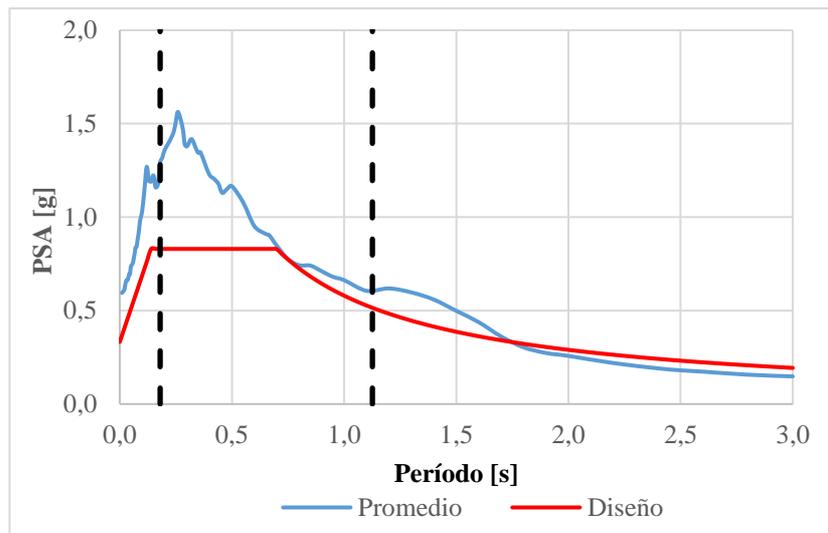


Figura 6: Espectro SRSS promedio vs. espectro del terremoto de diseño.

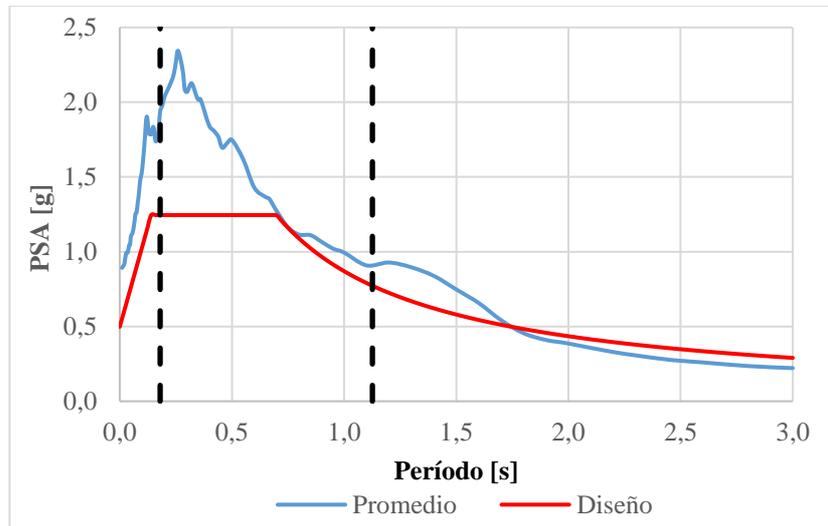


Figura 7: Espectro SRSS promedio vs. espectro del terremoto MCE_R .

El factor de escala aplicado a cada registro (en sus dos componentes horizontales) para lograr los espectros SRSS promedio antes mostrados, fue el que se aplicó a cada acelerograma para el análisis no lineal de historia de la respuesta.

4.3 Modelo matemático y análisis estructural

Con los datos indicados en la sección 2.1, que corresponden a valores indicados en el ejemplo tomado como referencia, se realizó la simulación computacional que se muestra en la Figura 8.

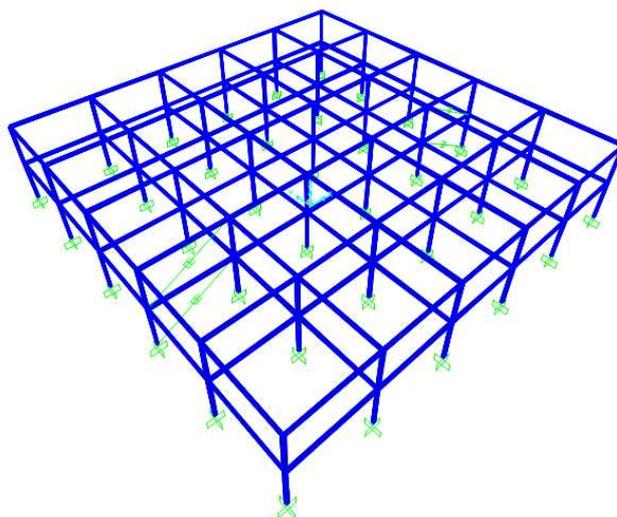


Figura 8: Modelo computacional de la estructura en estudio.

. Sistema resistente a la acción sísmica

La masa de cada nivel se discretizó en cada uno de sus 36 nodos, donde se consideró una restricción para simular la acción del diafragma rígido.

Para lograr las propiedades dinámicas especificadas en la sección 2.1, se adoptaron las secciones transversales en vigas y columnas que se muestran en la Figura 9. Las vigas, tienen una sección rectangular de 300 mm de alto y 200 mm de ancho, con espesor de 10 mm; mientras que las columnas, de sección cuadrada, tienen 250 mm de lado y también un espesor de 10 mm. Para el material constituyente de las columnas se dispuso un módulo de elasticidad longitudinal $E = 200\,000$ MPa. Para las vigas en cambio, y a los efectos de lograr en el modelo los parámetros dinámicos dados, se consideró un material ficticio con $E = 20\,000\,000$ MPa.

Este modelo fue implementado en el programa comercial de elementos finitos SAP2000.

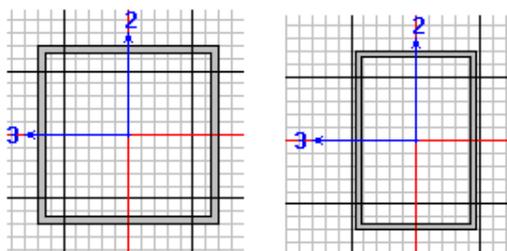


Figura 9: Sección transversal de los elementos estructurales (columna a la izquierda y viga a la derecha).

Basado en la excepción descrita en la sección 4.1, y teniendo en cuenta que en el ejemplo en consideración no se indicaron datos de materiales ni de secciones transversales, se consideró en el SRAS un comportamiento elástico lineal. Como estudio complementario, se realizaron también análisis del sistema con comportamiento no lineal, a los efectos de efectuar comparaciones entre ambos modelos.

El análisis de la estructura se realizó considerando las dos componentes horizontales de los 7 registros escalados, según el factor de escala aplicado al espectro respectivo. Por lo tanto, en la dirección de estudio, se aplicaron 14 acelerogramas escalados según el espectro de diseño, y 14 acelerogramas escalados según el espectro MCE_R .

Para el análisis en SAP2000 del SRAS lineal y disipadores de energía no lineales, se

seleccionó la metodología de historia en el tiempo, modal no lineal.

Se evaluó, además, el SRAS lineal y sin los disipadores de energía, mediante la misma metodología que para el caso anterior.

Mientras que, para el análisis en el mismo software considerando tanto al SRAS como los disipadores de energía no lineales, se seleccionó la metodología de integración directa, no lineal. En el modelo se dispusieron rótulas plásticas en los extremos de todas las columnas. Las propiedades de las rótulas, fueron seleccionadas desde las opciones pre definidas que posee el programa (rótulas con consideración de la carga axial, y con posibilidad de lograr la plastificación según las dos direcciones principales de la sección transversal).

. Disipadores de energía

Los disipadores viscosos fueron modelados como elementos *link* no lineales tipo *dampers* (elementos representados por su relación fuerza $F(t)$ – velocidad $\dot{x}(t)$), con un coeficiente de amortiguamiento $C_L = 1.05 \text{ kN s/mm}$, según el valor indicado en la sección 2.1.

Como no se consideró la influencia de la rigidez de la riostra que vincula cada disipador con los nudos del vano donde se ubica, se adoptó para el elemento *dampers* un valor de rigidez suficientemente alto de 1000 kN/mm (este elemento se simula como un resorte y un disipador viscoso en serie para el análisis no lineal).

Finalmente, el exponente que afecta a la velocidad $\dot{x}(t)$ en la ley constitutiva del disipador, toma un valor unitario para simular el comportamiento lineal del dispositivo.

4.4 Parámetros de respuesta

Según el ASCE/SEI 7 (2016), se debe calcular el valor máximo de cada parámetro de respuesta de interés, para cada terremoto considerado en el análisis de la historia de la respuesta.

En cada dispositivo, los parámetros de respuesta deben incluir la fuerza, el desplazamiento y la velocidad (para el caso de los dispositivos dependientes de la velocidad).

Para el diseño se pueden emplear los valores promedio de los parámetros de respuesta de interés, en base al conjunto de terremotos seleccionados de diseño o MCE_R .

. Sistema resistente a la acción sísmica (SRAS lineal – disipadores no lineales)

La reducción en los valores pico de desplazamiento, velocidad, aceleración y corte basal que se alcanza en la estructura cuando se incorpora el sistema de disipación es, en promedio, del 34% (tanto para el sismo de diseño como para el MCE_R). En la Figura 10 se muestra la historia de desplazamientos para el techo de la estructura con/sin disipadores, para el caso de los acelerogramas MCE_R , donde se registra la mayor y la menor reducción de desplazamientos.

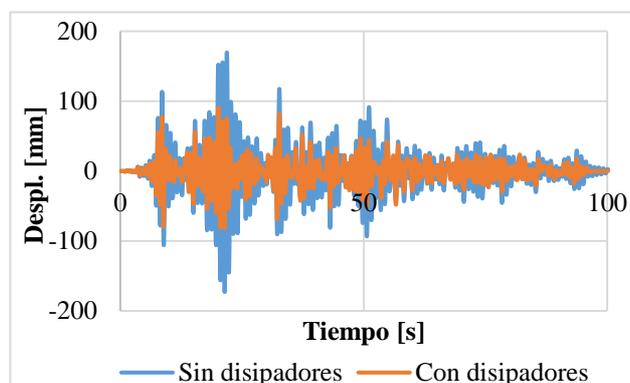


Figura 10 (a): Historia de la respuesta en el techo de la estructura con/sin disipadores (registro 2, MCE_R).

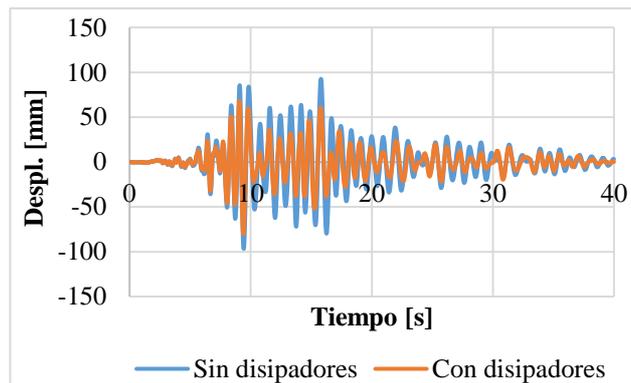


Figura 10 (b): Historia de la respuesta en el techo de la estructura con/sin disipadores (registro 3, MCE_R).

La relación entre la energía disipada por el sistema de disipación y el *input* de energía se mantiene aproximadamente constante en los 14 registros escalados según el MCE_R , e igual al 64%, tal como se aprecia en la Figura 11 (se indican también en ese gráfico el valor promedio, y ese valor +/- un desvío estándar). La Figura 12 muestra la energía disipada total por este sistema, en cada registro sísmico.

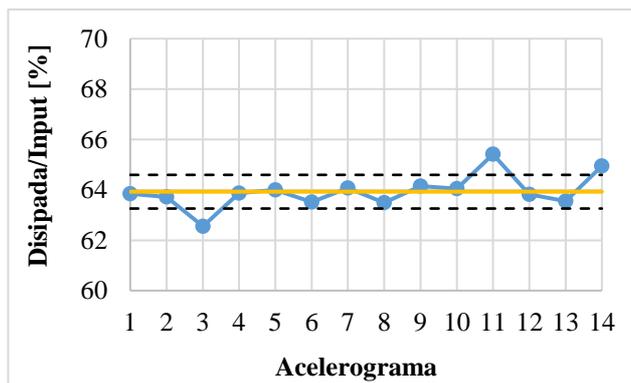


Figura 11: Relación energía disipada en el sistema de disipación / input de energía (registros MCE_R).

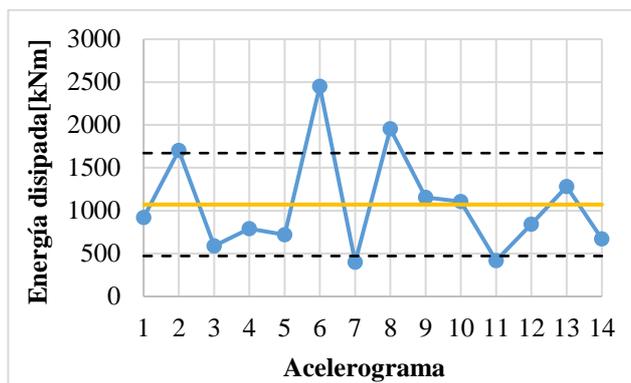
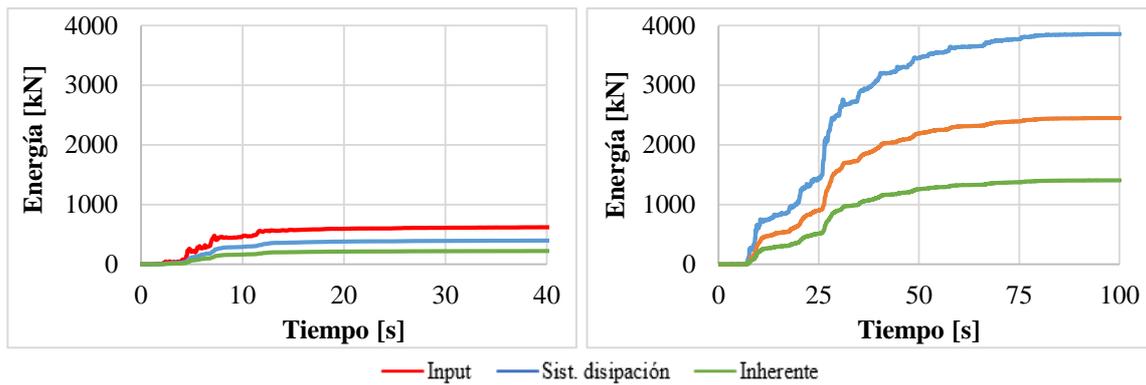


Figura 12: Energía disipada en el sistema de disipación para cada registro MCE_R .

La historia de energía *input*, energía disipada en el sistema de disipación, y energía inherente, se muestra en la Figura 11 para los registros MCE_R que producen la menor y la mayor disipación de energía en el sistema de disipación (corresponde a los registros 7 y 6 respectivamente).



a) Registro que produce menor disipación b) Registro que produce mayor disipación

Figura 13: Historia de energías (en base a registros MCE_R).

Puede calcularse el factor de amortiguamiento B según la Ec. 10, en función de los desplazamientos en el techo para la estructura con/sin el sistema de disipación. Los valores de B obtenidos para cada registro MCE_R se observan en la Figura 14; el valor promedio es de 1.50 y se representa en la figura con una línea negra continua (los valores de promedio +/- un desvío estándar se muestran en línea negra de trazos). También se indica en ese gráfico el valor de B = 1.56 obtenido de Tabla 1, para el amortiguamiento efectivo β (cuyo cálculo se especifica al considerar el procedimiento de la fuerza lateral equivalente). Los registros están ordenados según la primera columna de la Tabla 2.

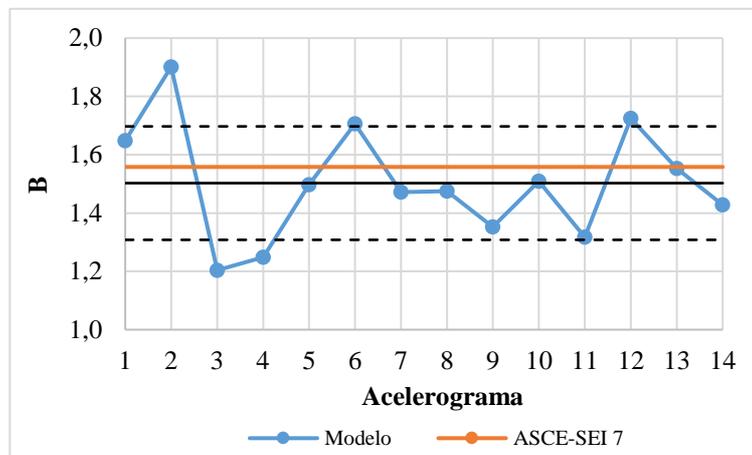


Figura 14: Factor de amortiguamiento B para los distintos acelerogramas MCE_R.

En la Figura 15, y a los efectos de observar las variaciones en la respuesta para cada registro, se muestran los desplazamientos máximos de techo (se agrega el valor promedio y, en línea negra de trazos, el promedio +/- un desvío estándar).

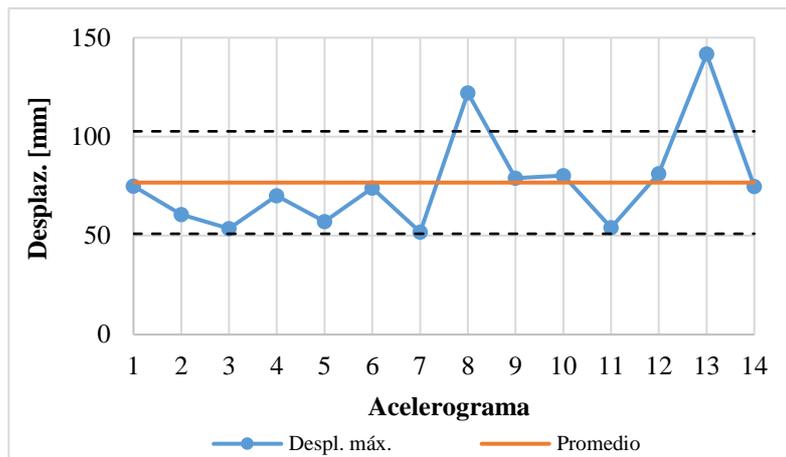


Figura 15: Desplazamientos máximos en el techo.

. Sistema resistente a la acción sísmica (SRAS y disipadores no lineales)

Para el SRAS sin disipadores, y bajo todos los registros considerados en el estudio, se producen rótulas plásticas en pie y cabeza de columnas, tal como se presenta en la Figura 16.

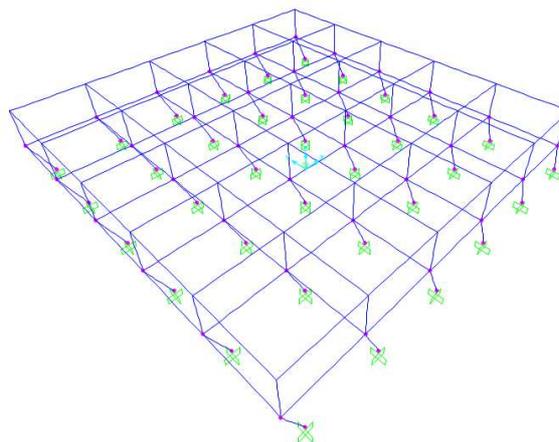


Figura 16-a: Modelo de SRAS sin disipadores, excitado con uno de los registros sísmicos (registro 14, MCE_R).

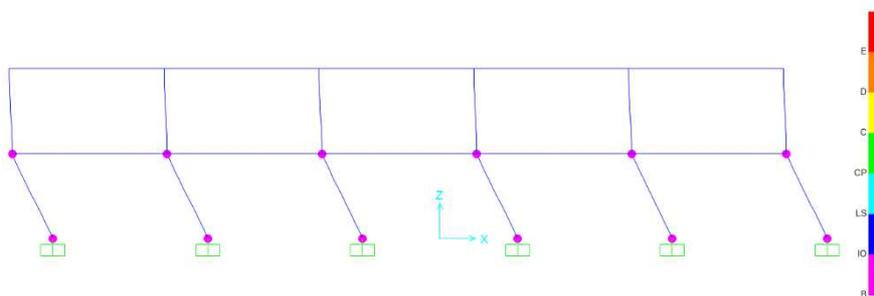


Figura 16-b: Modelo de SRAS sin disipadores, excitado con uno de los registros sísmicos (registro 14, MCE_R).

Para la estructura con los disipadores de energía, en mitad de los registros sísmicos considerados, el SRAS permanece en rango elástico, como se muestra en la Figura 17.

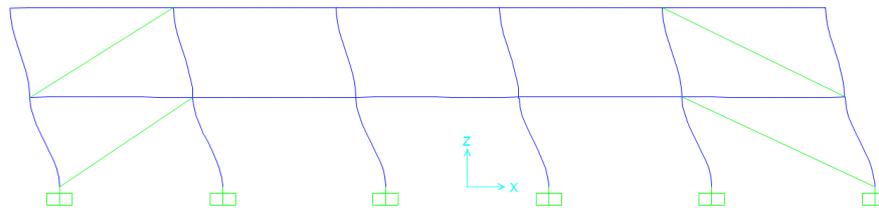


Figura 17: Modelo de SRAS con disipadores, excitado con uno de los registros sísmicos (registro 14, MCE_R).

También puede observarse este comportamiento en la Figura 18, donde se compara la historia de desplazamientos de la estructura con/sin disipadores.

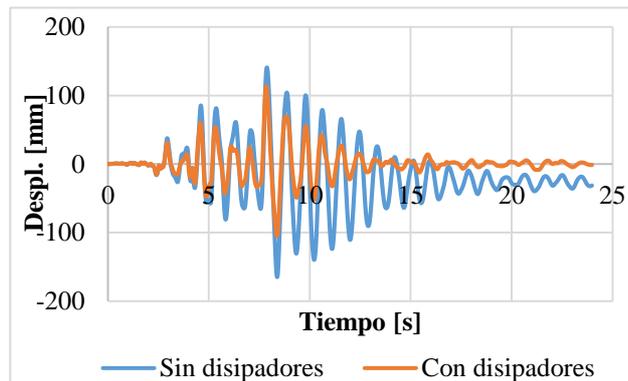


Figura 18: Historia de los desplazamientos en el techo de la estructura sometida al registro 14, MCE_R.

Uno de los casos de la estructura con SD donde se originaron rótulas plásticas en el SRAS, según se aprecia en Figura 19. Se observa menor cantidad de rótulas que para la estructura sin disipadores, y con menor rotación plástica (si se comparan las deformadas de las columnas). Se destaca que, por estar ubicado el SD en un plano estructural que no es simétrico, se produjeron en la estructura efectos torsionales. Por otra parte, esta clase de análisis demandó un elevado tiempo computacional (variable entre 30 min a 12 horas según el registro y la cantidad de rótulas producidas en la estructura).

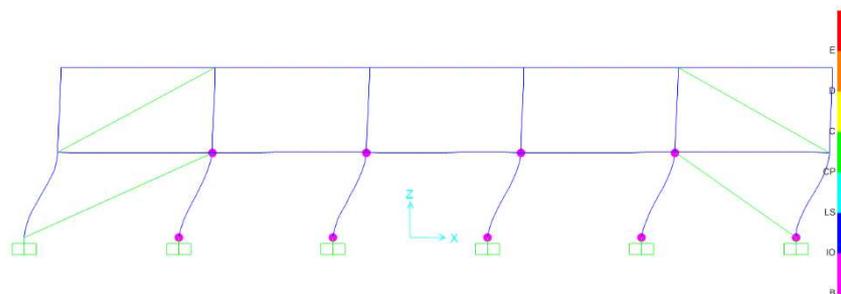
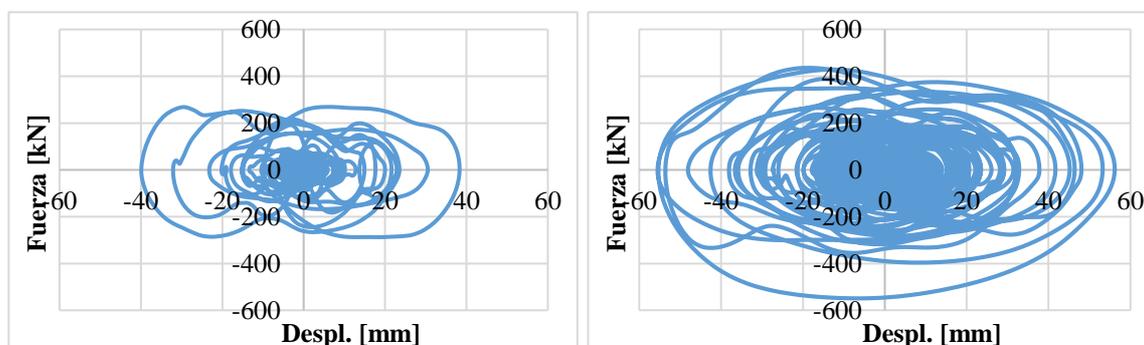


Figura 19: Modelo de SRAS con disipadores, excitado con uno de los registros sísmicos (Duzce 2a).

En valores promedio: los desplazamientos (considerando no linealidad en el SRAS + SD respecto a la no linealidad solo en el SD) aumentaron un 5%, mientras que el corte basal se redujo en un 4%.

. *Disipadores de energía no lineales (en el SRAS lineal)*

La relación fuerza – desplazamiento en uno de los disipadores de la estructura en planta baja, considerando los registros MCE_R donde se tiene la menor y la mayor disipación de energía, se presenta en la Figura 20 (corresponde a los registros 7 y 6 respectivamente).



a) Registro que produce menor disipación b) Registro que produce mayor disipación

Figura 20: Relación fuerza - desplazamiento en un disipador viscoso de planta baja (estructura bajo acelerogramas MCE_R).

También para uno de los disipadores de planta baja y otro del primer piso, de la estructura bajo los registros MCE_R , se presentan en la Tabla 3 los valores promedio de fuerza, desplazamiento y velocidad (en el caso de la velocidad se ha considerado la componente horizontal).

| Disipador | Fuerza [kN] | Desplaz. [mm] | Velocidad [cm/s] |
|-------------|-------------|---------------|------------------|
| Planta baja | 507,85 | 59,50 | 52,68 |
| Planta alta | 360,39 | 41,86 | 87,03 |

Tabla 3: Parámetros de respuesta promedios para un disipador en planta baja y planta alta (estructura bajo acelerograma con mayor disipación de energía).

La empresa Taylor (<http://taylordevices.com/dampers-seismic-protection.html>), por ejemplo, vende dispositivos para estructuras bajo acción sísmica, con capacidad de fuerza desde los 250 a 8000 kN, con carrera admisible de +/- 76 a 127 mm. La longitud media de estos dispositivos varía de los 0.90 a los 2.0 m; mientras que su peso va desde 40 a 2495 kg(f). Para este ejemplo, podrían adoptarse el dispositivo N° 17140, con capacidad de fuerza de 750 kN, carrera admisible de +/- 100 mm, longitud media de 1.20 m, peso 136 kg(f), diámetro del cilindro de 184 mm.

5 PROCEDIMIENTOS ALTERNATIVOS DE ANÁLISIS

Los procedimientos alternativos que pueden emplearse para el análisis de estructuras con sistemas de disipación, según el ASCE7SEI 7 (2016), son el procedimiento modal espectral y el procedimiento de la fuerza lateral equivalente; los cuales se describen en las secciones siguientes.

5.1 Procedimiento de la fuerza lateral equivalente

5.1.1 Consideraciones generales

En procedimiento de la fuerza lateral equivalente se basa fundamentalmente en reducir el espectro de pseudo aceleraciones, mediante el coeficiente de amortiguamiento B. En la Figura 21 se muestra el espectro de desplazamiento vs. el espectro de aceleración. Se destaca en ella que el SRAS bajo el espectro de diseño (con 5% de amortiguamiento) tiene un período T_1 con un desplazamiento para comportamiento elástico S_{DE} . Si se considera el SD, el espectro se reduce según el coeficiente de amortiguamiento B_{V+I} (de Tabla 1 en función del amortiguamiento viscoso e inherente $\beta_v + \beta_i$). El período de la estructura será T_{1D} , con desplazamiento S_{D1D} , y la demanda sobre la misma se reduce también según el B_{1D} (de Tabla 1 en función del amortiguamiento inherente, viscoso e histerético β_i, β_v y β_{HD}).

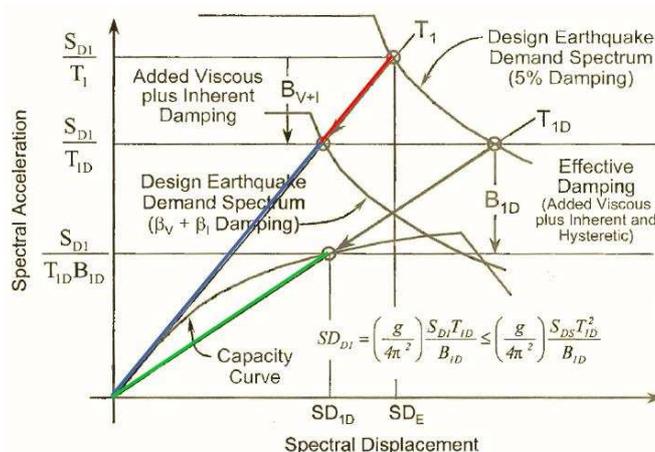


Figura 21: Espectro de desplazamiento vs. espectro de aceleraciones (Fuente: ASCE/SEI 7, 2016).

La determinación de T_{1D} es función de la ductilidad efectiva μ_D , que es la relación entre el desplazamiento de diseño en el techo D_{1D} y el desplazamiento de plastificación D_Y , como se muestra en la Figura 22.

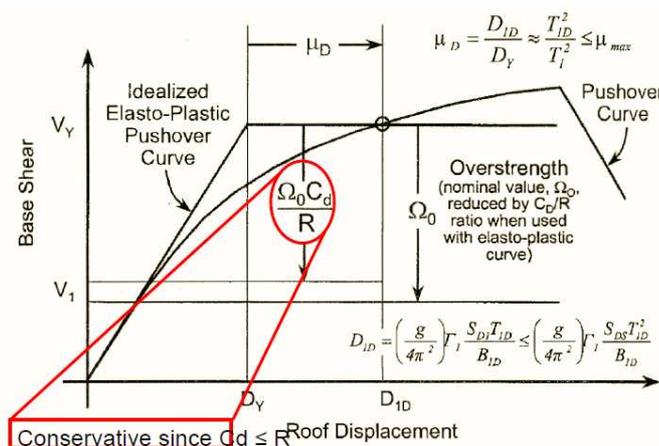


Figura 22: Curva pushover idealizada empleada en el análisis lineal (Fuente: ASCE/SEI 7, 2010).

Inicialmente no se conocen los desplazamientos D_{1D} y D_Y , por lo que debe realizarse un procedimiento iterativo suponiendo una μ_D inicial.

Al finalizar el proceso iterativo se tendrá el período T_{1D} y el coeficiente sísmico C_s , con el que se calculará el corte basal. Se debe determinar tanto el corte basal para el modo fundamental

de vibración de la estructura V_1 , como el corte basal en un modo definido como residual V_R . En base a ellos, se determinando el corte basal V_D , que constituye la demanda bajo el sismo de diseño para el SRAS.

En la sección siguiente se presenta el algoritmo de diseño para aplicar este procedimiento.

5.1.2 Algoritmo de diseño

- *Corte basal mínimo V_{min}* : Se calcula tal como se explicó en la sección 3.1.; donde se obtuvo $V_{min} = 1527$ kN.
- *Diseño de los elementos del sistema resistente a la acción sísmica*
 1. Se verifica (o diseña) el SRAS para el V_{min} ; sino se cumple esta condición, se debe redimensionar la estructura.
 2. Se determinan las propiedades modales para el modo fundamental de este sistema: amplitud de desplazamiento para cada nivel i , normalizado a la unidad en el nivel de techo; factor de participación modal; peso sísmico $\bar{W}_1 = 8866$ kN.
 3. Se elige el amortiguamiento viscoso suplementario que aporta el SD en el primer modo; en este caso $\beta_{V1} = 0.09$
 4. Se estima una demanda de ductilidad del SRAS bajo el terremoto de diseño, adoptando para en este caso $\mu_D = 1.3$.
 5. Con las Ecs. (11) y (12) se calcula el período efectivo del modo fundamental de vibración de la estructura en el desplazamiento de diseño T_{1D} (período del SRAS modificado por el SD), y el período donde finaliza el plafón del espectro de diseño T_s .

$$T_{1D} = T_1 \sqrt{\mu_D} = 0.906 \sqrt{1.3} = 1.032s \quad (11)$$

$$T_s = \frac{S_{DI}}{S_{DS}} = \frac{0.58}{0.83} = 0.669s \quad (12)$$

6. Se determina el coeficiente de amortiguamiento $B_{1D} = 1.569$ de Tabla 1, en función del amortiguamiento efectivo total para el modo 1 para el desplazamiento de diseño, $\beta_{1D} = 0.223$, dado por la Ec. (13).

$$\beta_{1D} = \beta_I + \beta_{V1} \sqrt{\mu_D} + \beta_{HD} = 0.05 + 0.09 \sqrt{1.3} + 0.07 = 0.223 \quad (13)$$

El amortiguamiento histerético para el SRAS en el desplazamiento de diseño $\beta_{HD} = 0.07$, se calcula con la Ec. (14).

$$\beta_{HD} = q_H (0.64 - \beta_I) \left(1 - \frac{1}{\mu_D} \right) \quad (14)$$

$$0.5 < q_H = 0.67 \frac{T_s}{T_1} \leq 1$$

7. Se calcula, para el modo fundamental, el coeficiente sísmico $C_{S1} = 0.174$ con la Ec. (15) o (16), y el corte basal de diseño $V_1 = 1542.68$ kN con la Ec. (17).

$$C_{S1} = \left(\frac{R}{C_d} \right) \frac{S_{DS}}{\Omega_0 B_{1D}} \quad \text{para } T_{1D} < T_s \quad (15)$$

$$C_{SI} = \left(\frac{R}{C_d} \right) \frac{S_{DI}}{T_{1D} (\Omega_0 B_{1D})} \text{ para } T_{1D} \geq T_s \quad (16)$$

$$V_I = C_{SI} \bar{W}_I \quad (17)$$

8. Si $V_I = 1542.68$ kN no fuera aproximadamente igual al $V_{min} = 1556$ kN, habría que volver al paso 4 para adoptar un nuevo valor de μ_D , y repetir los pasos 5 a 7.
9. Con las Ecs. (18) a (20) se calcula para el modo fundamental: el desplazamiento de diseño en el techo $D_{1D} = 115.82$ mm el desplazamiento de plastificación $D_Y = 85.85$ mm.

$$D_{1D} = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_1 \frac{S_{DS} T_{1D}^2}{B_{1D}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_1 \frac{S_{DS} T_1^2}{B_{1E}} \text{ para } T_{1D} < T_s \quad (18)$$

$$D_{1D} = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_1 \frac{S_{DI} T_{1D}}{B_{1D}} \geq \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_1 \frac{S_{DI} T_1}{B_{1E}} \text{ para } T_{1D} \geq T_s \quad (19)$$

$$D_Y = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \left(\frac{\Omega_0 C_d}{R} \right) \Gamma_1 C_{s1} T_1^2 \quad (20)$$

Se destaca que el segundo término de las Ecs. (18) y (19) aparece el coeficiente de amortiguamiento B_{1E} , que es igual a $B_{V+I} = 1.32$, obtenido en función del amortiguamiento efectivo β de Ec. (9).

10. La demanda de ductilidad efectiva μ_D está dada ahora por la Ec. (21).

$$\mu_D = \frac{D_{1D}}{D_Y} = \frac{115.82}{85.85} = 1.349 \quad (21)$$

Como el valor obtenido con la Ec. (21) difiere en menos del 5% respecto al valor μ_D adoptado, no es necesario iterar.

11. Se determinan las propiedades modales para el modo residual: amplitud de desplazamiento para cada nivel i ; factor de participación modal; peso sísmico $\bar{W}_R = 920$ kN.
12. Para este modo se calcula: el amortiguamiento viscoso equivalente $\beta_{VR} = 0.255$, Ec. (22); el coeficiente de amortiguamiento respectivo $B_R = 1.815$ (de Tabla 1); el coeficiente sísmico $C_{SR} = 0.222$, Ec. (23); y el corte basal de diseño $V_R = 204$ kN, Ec. (24).

$$\beta_{VR} = \frac{E_{vd}}{4\pi E_{es}} = \frac{\pi \sum_{i=1}^{N_d} C_{Li} \phi_{iR}^2 \cos^2 \gamma_i}{T_R \sum_{i=1}^{N_f} k_i \phi_{iR}^2} \quad (22)$$

$$C_{SR} = \left(\frac{R}{C_d} \right) \frac{S_{DS}}{\Omega_0 B_R} \quad (23)$$

$$V_R = C_{SR} \bar{W}_R \quad (24)$$

13. Con la Ec. (25) se calcula el corte basal de diseño V_D , y se lo compara con el V_{min} ya calculado.

$$V_D = \sqrt{V_I^2 + V_R^2} = 1556 \text{ kN} > V_{min} = 1527 \text{ kN} \quad (25)$$

En la Figura 23 se esquematiza la demanda para el SRAS.

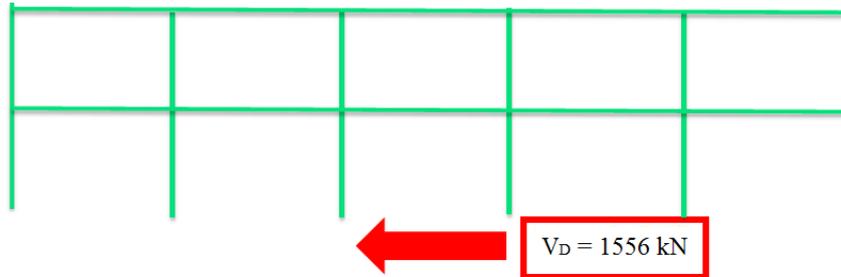


Figura 23: Corte basal de diseño en el SRAS.

14. Las fuerzas de diseño laterales para cada nivel, obtenidas con la Ec. (26) son: $F_1 = 609$ kN, y $F_2 = 1107$ kN, determinadas con la Ec. (26).

$$F_i = \sqrt{F_{iL}^2 + F_{iR}^2}$$

$$F_{iL} = w_i \phi_{iL} \frac{\Gamma_L}{W_L} V_L$$

$$F_{iR} = w_i \phi_{iR} \frac{\Gamma_R}{W_R} V_R \quad (26)$$

15. Finalmente, se verifican las condiciones de aplicabilidad del procedimiento, mencionadas en la sección 3.3.

- *Diseño de los elementos del sistema de disipación (excepto para los disipadores)*
Los elementos que integran el sistema de disipación se debe diseñar para las máximas fuerzas generadas por los disipadores, y por el SRAS, bajo el terremoto de diseño. Estas fuerzas se calculan para tres condiciones: máximos desplazamientos, máximas velocidades y máximas aceleraciones. Para calcularlas, hay que determinar previamente la deriva de desplazamiento Δ_D , y la deriva de velocidades ∇_D , causada por el terremoto de diseño.

1. Deriva de desplazamiento Δ_D causada por el terremoto de diseño
La deriva de desplazamiento Δ_D para cada nivel se calcula con la Ec. (27) en función de la deriva para el modo fundamental Δ_{1D} y para el modo residual Δ_{RD} .

$$\Delta_D = \sqrt{\Delta_{1D}^2 + \Delta_{RD}^2} \quad (27)$$

Las derivas Δ_{1D} y Δ_{RD} , se determinan en función de D_{1D} y D_{RD} , y de los vectores para las formas modales correspondientes.

2. Deriva de velocidades ∇_D causada por el terremoto de diseño
La deriva de velocidades ∇_D para cada nivel se calcula con la Ec. (27), en función de la deriva para el modo fundamental ∇_{1D} y para el modo residual ∇_{RD} .

$$\nabla_D = \sqrt{\nabla_{1D}^2 + \nabla_{RD}^2} \quad (28)$$

Las derivas ∇_{ID} y ∇_{RD} , se determinan en base a las velocidades para el modo fundamental y el modo residual V_{ID} y V_{RD} , las cuales se calculan como $2\pi \Delta_{ID} / T_{ID}$ y $2\pi \Delta_{RD} / T_{RD}$, respectivamente.

3. Fuerzas sísmicas de diseño para los elementos del sistema de disipación Q_E

Para cada nivel del SRAS se deben calcular las fuerzas Q_E , según la condición de máximos desplazamientos, máximas velocidades, y máximas aceleraciones. Los valores máximos corresponderán a la demanda sobre los elementos de disipación.

3.1. Condición de máximos desplazamientos

La fuerza sísmica de diseño Q_E para para la condición de máximo desplazamiento, se calcula según la Ec. (29), en función del factor de: la sobrerresistencia Ω_0 ; la fuerza en un elemento del SD requerida para resistir las fuerzas sísmicas de diseño de los disipadores dependientes de la velocidad, debido al modo m de vibración del SRAS Q_{mSFRS} ; y de la fuerza en un elemento del SD requerida para resistir la fuerza sísmica de diseño de los disipadores dependientes del desplazamiento Q_{DSD} (en este ejemplo igual a 0).

$$Q_E = \Omega_0 \sqrt{\sum_m (Q_{mSFRS})^2} \pm Q_{DSD} \quad (29)$$

3.2. Condición de máximas velocidades

La fuerza sísmica de diseño Q_E para la condición de máxima velocidad, se calcula según la Ec. (30), en función del factor de la fuerza en un elemento del SD requerida para resistir las fuerzas sísmicas de diseño debido al modo de vibración m de la estructura Q_{mDSV} (fuerza de amortiguamiento obtenida por el producto del coeficiente de amortiguamiento y la velocidad).

$$Q_E = \sqrt{\sum_m (Q_{mDSV})^2} \quad (30)$$

3.3. Condición de máximas aceleraciones

La fuerza sísmica de diseño Q_E para la condición de máxima aceleración, se calcula según la Ec. (31), en función de: los valores de fuerza antes mencionado Q_{mSFRS} , Q_{mDSV} , y Q_{DSD} ; así como del coeficiente de fuerza C_{mFD} (de la Tabla 18.7-1 del ASCE/SEI 7 2016, en función del amortiguamiento efectivo $\beta_{eff} = \beta_{ID} - \beta_{HD} = 0.223 - 0.07 = 0.153$) y del coeficiente de fuerza C_{mFV} (de la Tabla 18.7-2 del ASCE/SEI 7 2016, en función del amortiguamiento efectivo $\beta_R = \beta_I + \beta_{VR} = 0.05 + 0.255 = 0.305$).

$$Q_E = \sqrt{\sum_m (C_{mFD} \Omega_0 Q_{mSFRS} + C_{mFV} Q_{mDSV})^2} \pm Q_{DSD} \quad (31)$$

La Figura 24 muestra las fuerzas Q_E para el diseño de los elementos del sistema de disipación, cuyos valores máximos en este ejemplo corresponden a la condición de máximas aceleraciones.



Figura 24: Fuerza lateral equivalente para los elementos del sistema de disipación.

- *Diseño de los disipadores*

Los disipadores agregados al SRAS, se deben dimensionarse para las fuerzas, derivas de piso y derivas de velocidades según las demandas correspondientes al terremoto MCE_R . Para determinar estos parámetros se aplica el mismo procedimiento anterior, pero reemplazando:

- . S_{DS} por S_{MS} y S_{D1} por S_{M1}
- . T_{1D} por T_{1M} y B_{1D} por B_{1M} .

5.2 Procedimiento modal espectral

El procedimiento modal espectral es análogo al procedimiento de la fuerza lateral equivalente descrito en la sección anterior. La diferencia en el procedimiento modal espectral radica en que se calcula no solo los parámetros para el modo fundamental, sino también los parámetros para los modos superiores. El valor resultante para cada parámetro se obtiene mediante la combinación según el método de la raíz cuadrada de la suma de los valores al cuadrado (SRSS), o el método de la combinación cuadrática completa (CQC).

5.2.1 Algoritmo de diseño

- *Corte basal mínimo V_{min}* : Se calcula tal como se explicó en la sección 3.1.; donde se obtuvo $V_{min} = 1527$ kN.

- *Diseño de los elementos del sistema resistente a la acción sísmica*

Se calcula:

1. El peso sísmico efectivo \bar{W}_m de cada modo de vibración m de la estructura.
2. El factor de participación modal Γ_m para cada modo m .
3. El coeficiente sísmico del modo fundamental C_{S1} (según sea T_{1D} mayor o menor a T_S ; y en función del factor de amortiguamiento B_{1D} que se obtiene de la Tabla 1 a partir del amortiguamiento efectivo β_{1D}).
4. El período efectivo del modo fundamental para el terremoto de diseño T_{1D} , y para el terremoto MCE_R , T_{1M} .
5. El coeficiente sísmico para los modos superiores ($m > 1$) C_{Sm} . (según sea T_m mayor o menor a T_S ; y en función del factor de amortiguamiento B_{mD} que se obtiene de la Tabla 18.7-1 a partir del amortiguamiento efectivo β_{mD}).
6. El corte basal para el modo de vibración m de la estructura: $V_m = C_{Sm} \bar{W}_m$
7. El corte basal $V > V_{min}$, que se determina como combinación de las componentes modales V_m . Para esta combinación se debe usar el método SRSS, o el método CQC.
8. Las fuerzas laterales de diseño en cada nivel i , para cada modo de vibración m , F_{im} .
9. Las fuerzas de diseño en los elementos del SRAS, obtenidas al aplicar los procedimientos SRSS o CQC a las F_{im} .

- *Diseño de los elementos del sistema de disipación (excepto para los disipadores)*

Como en el procedimiento de la fuerza lateral equivalente se calcula:

1. Desplazamiento de techo para el terremoto de diseño, en el modo fundamental D_{1D} , y en los modos superiores ($m > 1$) D_{mD} .
2. Deriva de desplazamientos para el terremoto de diseño, en el modo fundamental Δ_{1D} , y en los modos superiores ($m > 1$) Δ_{mD} . La deriva de desplazamiento de diseño total Δ_D , se determina mediante el procedimiento SRSS o CQC.
3. Deriva de velocidades para el terremoto de diseño, en el modo fundamental ∇_{1D} , y en los modos superiores ($m > 1$) ∇_{mD} . La deriva de velocidades de diseño total ∇_D , se determina

mediante el procedimiento SRSS o CQC.

4. Fuerzas sísmicas de diseño para los elementos del sistema de disipación Q_E
Para cada nivel del SRAS se deben calcular las fuerzas Q_E , según la condición de máximos desplazamientos, máximas velocidades, y máximas aceleraciones, tal como se indicara en el procedimiento de la fuerza lateral equivalente.

- *Diseño de disipadores*

Los disipadores agregados al SRAS, tal como se detallare en el procedimiento antes mencionado, se deben dimensionarse para las fuerzas, derivas de piso y derivas de velocidades según las demandas correspondientes al terremoto MCE_R .

6 RESULTADOS

En base a las consideraciones efectuadas en las secciones anteriores, se aplicaron los 3 procedimientos de análisis dados en el ASCE/SEI 7 (2016): historia de la respuesta no lineal, de la fuerza lateral equivalente, y de superposición modal. Los resultados alcanzados en estas 3 metodologías se muestran en Tabla 4.

Se recuerda que el SRAS debe dimensionarse según las demandas del terremoto de diseño, y que debe considerarse la demanda según el terremoto MCE_R para los requerimientos de deriva. Por lo tanto, en la Tabla 4, los resultados para el caso “No lineal” se refieren al terremoto MCE_R , mientras que el corte basal se especifica para el terremoto de diseño. Los valores que se muestran en la Tabla para el caso en consideración, corresponden a los valores promedios de los 14 registros escalados.

| Parámetro de respuesta | | No lineal | Fuerza lateral equivalente | Superposición modal |
|------------------------|-------|-----------|----------------------------|---------------------|
| Desplaz. [mm] | Techo | 113.00 | 115.21 | 117.90 |
| | PB | 68.10 | 68.02 | 58.94 |
| Deriva [%] | Techo | 0.95 | 0.97 | 1.24 |
| | PB | 1.40 | 1.39 | 1.22 |
| Corte basal [kN] | | 3099.50 | 1562.18 | 1607.00 |

Tabla 4: Parámetros de respuesta para la estructura con sistema de disipación.

Se observan valores cercanos con los 3 procedimientos de análisis para las magnitudes de desplazamiento y deriva de piso, tanto en PB como en el techo. Pero el corte basal según el análisis dinámico, duplica al corte basal obtenido con los métodos alternativos.

7 CONCLUSIONES

Los reglamentos internacionales proponen distintos procedimientos de análisis para estructuras que incorporan sistemas de disipación. En el caso de la norma americana, se recomienda especialmente el análisis dinámico no lineal. Si bien los procedimientos alternativos (análisis modal espectral y análisis de la fuerza lateral equivalente) pueden tener limitaciones mayores, son útiles en la fase de diseño, ya que permiten obtener parámetros de respuesta con mucho menos tiempo computacional.

En este trabajo se compararon los procedimientos de historia de la respuesta no lineal, modal espectral y de la fuerza lateral equivalente, según los requerimientos del ASCE/SEI 7 (2016), recientemente actualizado.

Se establecieron los requerimientos de la norma para los 3 procedimientos de análisis

mencionados, y se realizó la aplicación en una estructura regular.

Mediante simulación numérica con un programa comercial de elementos finitos se obtuvieron distintos parámetros de respuesta; con resultados similares en los 3 procedimientos, excepto en la consideración del corte basal.

En particular se destaca respecto al análisis de la respuesta no lineal:

. Para el SD propuesto, se logró una reducción promedio de los parámetros de respuesta de 34% (tanto para el terremoto de diseño como para el MCER).

. La relación energía disipada/input de energía se mantuvo aproximadamente constante, e igual al 64%, para todos los registros.

. El valor promedio del coeficiente de amortiguamiento B, obtenido a partir de la respuesta de la estructura con/sin disipadores fue de 1.50; mientras que ese valor obtenido del reglamento (en función del amortiguamiento efectivo) fue de 1.56.

. Al considerar el análisis con no linealidad en el SRAS (mediante rótulas plásticas), los tiempos computacionales se elevaron considerablemente. Además, los parámetros de respuesta obtenidos no tuvieron una variación apreciable respecto de la consideración de la no linealidad solo en los disipadores.

Son necesarias nuevas investigaciones para:

. Determinar las causas de las diferencias obtenidas en el corte basal, según el procedimiento no lineal y los procedimientos alternativos.

. Debería considerarse en la comparación de resultados, la influencia del procedimiento de escalamiento (amplitud o “matching”).

. Considerar ejemplos con otras tipologías estructurales, para conocer de manera más amplia las ventajas y limitaciones de las distintas metodologías de análisis disponibles.

8 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico de la Universidad Tecnológica Nacional. El Ing. Cristian Bay agradece también al Programa de Becas Doctorales de la Universidad Tecnológica Nacional.

REFERENCIAS

- ASCE/SEI 7 (2016). *Minimum design loads for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers.
- Christopoulos, C. and Filiatrault, A. (2006). *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*. IUSS Press - Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia.
- FEMA P695 (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. NEHRP - National Earthquake Hazards Reduction Program, USA.
- SAP2000 (v. 15.1.0). *Structural Analysis Program*. Computers and Structures, Inc.