

## ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE EDIFICIO APORTICADO REFORZADO CON DIFERENTES SISTEMAS DE DISIPACIÓN PASIVA DE ENERGÍA

### PERFORMANCE ANALYSIS OF FRAME BUILDING RETROFITTED WITH DIFFERENT PASSIVE ENERGY DISSIPATION SYSTEMS

**Gustavo Palazzo, Matías Carrizo, Gabriel Luna y Melina Campuzano**

*CeReDeTeC, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Rodríguez 273, 5500  
Mendoza, Argentina, [gpalazzo@frm.utn.edu.ar](mailto:gpalazzo@frm.utn.edu.ar), <http://www.frm.utn.edu.ar>*

**Palabras clave:** edificios flexibles, disipadores de energía, análisis dinámico.

**Resumen.** Muchos edificios escolares han sido diseñados con reglamentos sismorresistentes antiguos o sin ellos, y puede ser necesario su refuerzo estructural. Los sistemas de disipación pasiva de energía constituyen una estrategia de refuerzo, pero, dado que existen gran variedad de dispositivos dentro de este grupo, es necesario evaluar el desempeño de cada uno de ellos. Por eso en este trabajo, y con vistas a edificios escolares reales, se consideró una estructura regular y flexible con 5 clases de sistemas de disipación pasiva. Mediante análisis dinámico se analizaron las variaciones de los parámetros de respuesta, considerando 2 componentes horizontales de 9 registros de falla lejana, y cercana con y sin pulso. Presentando en las conclusiones los principales resultados del análisis de desempeño.

**Keywords:** flexible buildings, energy dissipation devices, dynamic analysis.

**Abstract.** Many school buildings have been designed with or without old seismic standard, and a structural retrofit could be necessary. Passive energy dissipation systems are a retrofit strategy, but, since there are many energy dissipation devices, it is necessary to evaluate the performance of them. Then, in this work, and as a first step to real school buildings, it was considered a numerical model of a regular and flexible structure with 5 kinds of passive dissipation systems. Through dynamic analysis, the variations of the response parameters were analyzed, considering 2 horizontal components of 9 far – fault and near – fault records, with and without pulse. In the conclusions, the main results of the performance analysis are presented.

## 1 INTRODUCCIÓN

En zonas de alta peligrosidad sísmica existen estructuras que pueden requerir un refuerzo estructural. Entre estas estructuras se tienen edificios de especial importancia como son los edificios escolares. Para estas construcciones son conveniente estrategias de refuerzo que demanden poco tiempo de materialización, para evitar que el edificio quede fuera de servicio por varios meses. Los sistemas de disipación pasiva de energía permiten cumplir con este requerimiento. Atento a la problemática planteada con los mismos, este trabajo evalúa mediante simulación numérica basada en análisis dinámico de historia en el tiempo, la clase de dispositivo más conveniente para cierta tipología estructural, y determinada demanda sísmica.

A los efectos de desarrollar un estudio inicial, este trabajo está basado en un edificio regular y flexible que se describe en la sección 2.

Como sistemas de disipación se consideraron amortiguadores de masa sintonizada (AMS), disipadores viscosos lineales y no lineales, y disipadores metálicos (de fricción y barras de pandeo restringido, BPR). Las características de los disipadores adoptados en cada caso se presentan en la sección 3.

Como excitación sísmica, tal como se presenta en la sección 4, se seleccionan dos componentes horizontales de 9 registros compatibles con la zona de mayor peligrosidad sísmica de Argentina, con registros de falla lejana y falla cercana con y sin pulso.

El análisis de desempeño en la sección 5 está basado en el estudio del corte basal y de la aceleración, la velocidad y el desplazamiento en el techo; comparando la respuesta de la estructura original y de ésta con sistemas de disipación pasiva de energía. Este análisis se completa con la consideración del input para cada variación en la estructura, y la energía disipada en cada caso.

En las conclusiones de la sección 6 se destaca la estrategia de refuerzo con la que se logra los mejores niveles de desempeño, y se plantean las investigaciones futuras.

## 2 ESTRUCTURA Y SU MODELO

Este trabajo se enmarca en un proyecto relativo a la evaluación sísmica y refuerzo de edificios escolares que, en el caso de la provincia de Mendoza, corresponden en general a construcciones de baja altura. Pero en este trabajo iniciamos es estudio de estrategias de refuerzo con sistemas de disipación en un edificio flexible de 6 niveles, donde estos sistemas tienen mejor desempeño. En trabajos futuros se ampliará el estudio a edificios escolares típicos de la provincia.

El modelo de la estructura en estudio fue seleccionado del tutorial para amortiguadores de masa sintonizada (*tuned-mass damper*) en <https://wiki.csiamerica.com>., y se muestra en la Figura 1.



Figura 1: Modelo de la estructura considerada.

Este modelo tiene 6 niveles, de 3,0 m de altura cada uno, con un sistema aporticado de dos vanos en cada dirección, de 6,0 m de luz. Las columnas se modelaron con perfiles metálicos W14x193, y las vigas con perfiles W27x102.

La estructura sismorresistente fue modelada como elástica lineal, a los efectos de concentrar el estudio en la influencia del sistema de disipación, con un módulo de elasticidad longitudinal  $E$  de 200.000 MPa.

La simulación computacional se realizó (también para el modelo con el sistema de disipación) con el programa comercial de elementos finitos [SAP2000 \(2011\)](#), mediante un análisis de historia en el tiempo modal no lineal, con una relación de amortiguamiento constante para todos los modos del 5%.

### 3 SISTEMAS DE DISIPACIÓN SELECCIONADOS

Se describen a continuación los parámetros de diseño de los distintos sistemas de disipación considerados, y los criterios adoptados para determinar los mismos.

#### 3.1 Amortiguadores de masa sintonizada

En el baricentro del techo se ubicó el AMS, con una masa  $m$  igual a la considerada en el tutorial mencionado en la sección 2, de 10 kN s<sup>2</sup>/m (peso de 98,1 kN), que corresponde a una relación  $\mu$  de 0,03 respecto de la masa modal para el modo 1.

Considerando una sintonización del AMS respecto del período fundamental del modelo original, con  $T$  igual a 0,63 s, se obtuvo la longitud  $L$  del péndulo de 0,10 m (en base a  $T = 2\pi(L/g)^{0,5}$ , con  $g$  como aceleración de la gravedad). Luego se calculó la rigidez  $k$  del AMS, de 1.000 kN/m en el plano horizontal, en base a  $m/g/L$ . De [Christopoulos y Filiatrault \(2007\)](#) se adoptó la expresión para suponer la relación de amortiguamiento  $\xi$  de 0,10 (con  $\xi = \{3\mu/[8(1+\mu)^3]\}^{0,5}$ ).

Se realizó luego un estudio paramétrico, variando  $k$ , para obtener los menores valores de corte basal y desplazamiento en el techo. Se llegó así a un valor de  $k$  de 1.250 kN/m.

Así, en el programa se modeló el AMS con un elemento *link* lineal, con masa  $m = 10$  kN s<sup>2</sup>/m, rigidez en el plano horizontal  $k$  de 1.250 kN/m (y rigidez axial de 1.000.000 kN/m), y  $\xi$  de 0,10 también en el plano horizontal.

### 3.2 Disipadores viscosos lineales y no lineales

Se dispusieron 24 disipadores viscosos, distribuidos en los planos frontales del modelo, solo en la dirección de análisis, con la disposición que se muestra en la Figura 2. Esta disposición también se mantuvo para los otros disipadores de energía.

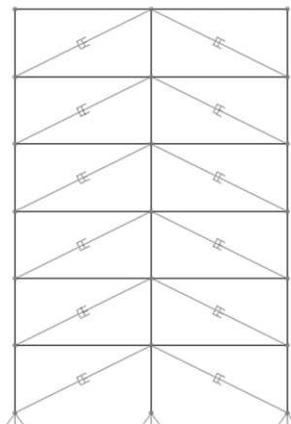


Figura 2: Modelo de la estructura considerada.

Como en el resto de los disipadores, y a los efectos de acelerar el estudio paramétrico realizado en cada caso, se adoptaron las mismas propiedades para los disipadores en los 6 niveles.

En el caso de los disipadores viscosos lineales se adoptó para cada dispositivo un coeficiente de amortiguamiento  $C$  de 450 kN s/m. Este valor resultó de un proceso iterativo, buscando que el corte basal en promedio fuera del 75% del corte basal promedio en la estructura original. Este valor límite, corresponde a la prescripción dada en el [ASCE/SEI 7 \(2016\)](#).

La respuesta lograda con estos parámetros es equivalente al análisis del modelo original con una relación de amortiguamiento constante para todos los modos del 10,5%.

Para los disipadores viscosos no lineales se adoptó el mismo  $C$ , pero con un exponente de no linealidad  $\alpha$  de 0,2 (que es el menor valor con el que una empresa latinoamericana comercializa estos dispositivos).

En el programa comercial ambas clases de disipadores se simularon con un elemento *link "damper"*, con ley constitutiva  $F = C v^\alpha$ , con  $F$  como fuerza, y  $v$  como velocidad.

### 3.3 Disipadores BPR

El diseño de las BPR se realizó considerando una barra central de sección circular, de acero con módulo  $E$  de 200.000 MPa, y tensión de plastificación  $f_y$  de 240 MPa. Luego se consideraron los diámetros comerciales de barras laminadas en caliente, que van entre los 6,35 y los 25 mm de diámetro. Con estos valores se realizó un estudio paramétrico, para determinar los parámetros de rigidez axial  $k$  de la barra central ( $k = E A/L$ , con  $A$  como área de la zona de plastificación y  $L$  la longitud de esa zona) y fuerza de inicio de plastificación  $F_y$  ( $F_y = f_y A$ ), tal que el corte basal promedio y el desplazamiento de techo fueran similares al modelo con disipadores viscosos lineales.

En base a este análisis se llegó a un diámetro de barra central en su zona de plastificación de 16,4 mm, longitud de zona de plastificación  $L$  de 3,0 m, rigidez  $k$  de 14.083 kN/m, y fuerza de inicio de plastificación  $F_y$  de 50 kN.

Estos disipadores fueron modelados como elementos *link* “*Plastic(Wen)*”, basado en [Wen \(1976\)](#), en base al valor  $k$  y  $F_y$  mencionado, con una relación módulo post plastificación / módulo elástico de 0,10, y un factor de curvatura de 2.

### 3.4 Disipadores de fricción

Para los disipadores de fricción se tomó de referencia el diseño de los disipadores BPR, teniendo en cuenta que, en el caso de los primeros, el comportamiento histerético fuerza – desplazamiento tiene forma rectangular.

Así, también en el programa se adoptaron elementos *link* “*Plastic(Wen)*”, con  $k$  de 14.083 kN/m (rigidez de la barra que conecta el disipador a la estructura), fuerza de inicio de deslizamiento  $F_y$  de 50 kN, con una relación módulo post plastificación / módulo elástico de 0, y un factor de curvatura de 10.

## 4 EXCITACIÓN SÍSMICA

Se supone que la estructura analizada se encuentra en la provincia de Mendoza, Argentina, donde se pueden presentar terremotos corticales (intraplaca) superficiales, con fallas inversas. Como para este sitio no se cuenta con mapas de falla detallado, ni con registros con aceleraciones mayores a 0,52 g (condición del reglamento argentino), se seleccionaron 9 registros de la base de datos de [FEMA P695 \(2009\)](#). En el apéndice A de este documento, se tiene una selección de registros para evaluar colapso mediante análisis dinámico de historia en el tiempo. De ese conjunto se seleccionaron los 9 registros (con sus dos componentes horizontales) correspondientes a sitios clase C o D, con magnitud mayor a 6, PGA mayor a 0,3 g y PGV mayor a 30 cm/s. Así, de la Tabla A-4 de este documento fueron seleccionados los registros corticales de falla lejana (que se numeran entre corchetes): [1 y 2] L1 (Northridge, Beverly Hills – Mulhol), [3 y 4] L2 (Northridge, Canyon Country-WLC), y [5 y 6] L19 (Chi-Chi, Taiwan, CHY101); de la Tabla A-6: se eligieron los registros corticales de falla cercana (sin pulso): [7 y 8] SP15 (TCU065, Karakyr), [9 y 10] SP23 (Northridge-01, LA - Sepulveda VA), y [11 y 12] SP24 (Northridge-01, Northridge - Saticoy); y también de esa misma tabla fueron seleccionados los registros corticales de falla cercana (con pulso): [13 y 14] CP7 (Cape Mendocino, Petrolia), [15 y 16] CP9 (Northridge-01, Rinaldi Receiving Sta), y [17 y 18] CP12 (Chi-Chi, Taiwan, TCU065). Con las 2 componentes horizontales de cada registro se construyeron los espectros SRSS según se indica en el [ASCE/SEI 7 \(2016\)](#), que luego se escalaron en base al espectro de diseño del reglamento argentino [INPRES-CIRSOC 103 \(2013\)](#), considerando un factor de ocupación de 1,3 (construcción del grupo A, en zona 4, y en sitio tipo 2). Como este estudio está focalizado en el desempeño estructural del edificio escolar, y no en el comportamiento específico de los disipadores, no se consideró el espectro máximo esperado. El promedio de los espectros escalados, se muestran en la Figura 3 (izquierda), indicando en línea de trazos los períodos correspondientes al 0,2 y 1,5 del período fundamental de la estructura en la dirección de estudio, y con línea roja el espectro de reglamento argentino. También en la Figura 3 (derecha) se muestran los valores máximos de aceleración PGA para cada registro, con un promedio de 0,53 g para los 18 registros, de 0,46 g para los registros de falla lejana, de 0,48 g para los de falla cercana sin pulso, y de 0,64 g para los registros de falla lejana con pulso.

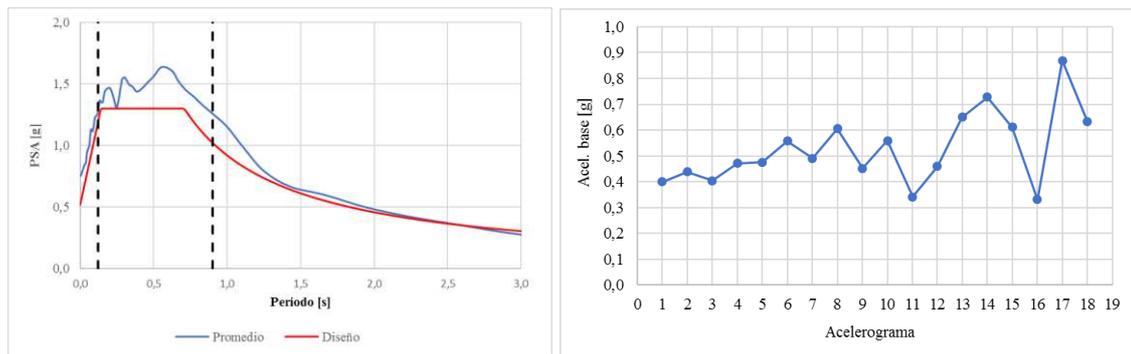


Figura 3: Registros seleccionados.

## 5 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO

Como análisis de desempeño se evalúa a continuación, para la estructura original y reforzada con sistemas de disipación, la energía disipada, el corte basal, y los parámetros de respuesta en el techo (aceleración absoluta, velocidad y desplazamiento relativo). Se analiza también a continuación, el input de energía calculado en cada caso de estudio.

Los valores de input de energía para cada registro se muestran en la Figura 4 (izquierda), registrándose valores picos, para todos los casos analizados, bajo el registro 2 de falla lejana y el 12 de falla cercana son pulso. Los valores promedio de inputs se presentan también en la Figura 4 (derecha), donde se aprecia que la estructura con sistemas de disipación (a excepción del sistema AMS) presenta inputs similares, e inferiores a la estructura original (menos en el caso de registros de falla lejana sin pulso). La mayor reducción de input respecto a la estructura original se presenta en el caso de registros de falla lejana con pulso.

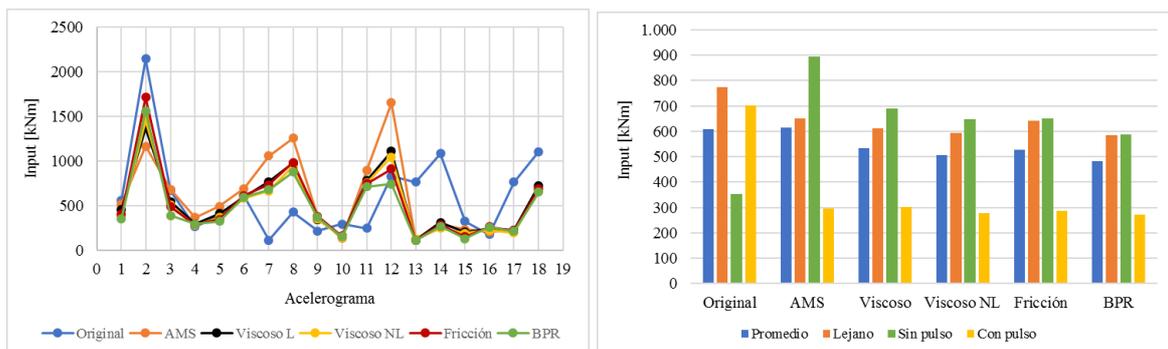


Figura 4: Input de energía.

La energía disipada para la estructura con disipadores viscosos lineales, respecto al input, se mantienen aproximadamente constante para todos los registros, como se muestra en la Figura 5 (izquierda). Para los otros sistemas de disipación, en general, esta relación es mayor y, en especial, para el caso de los disipadores viscosos no lineales. Se observa también esta consideración en la Figura 5 (derecha) al analizar los valores promedios para cada clase de registro.

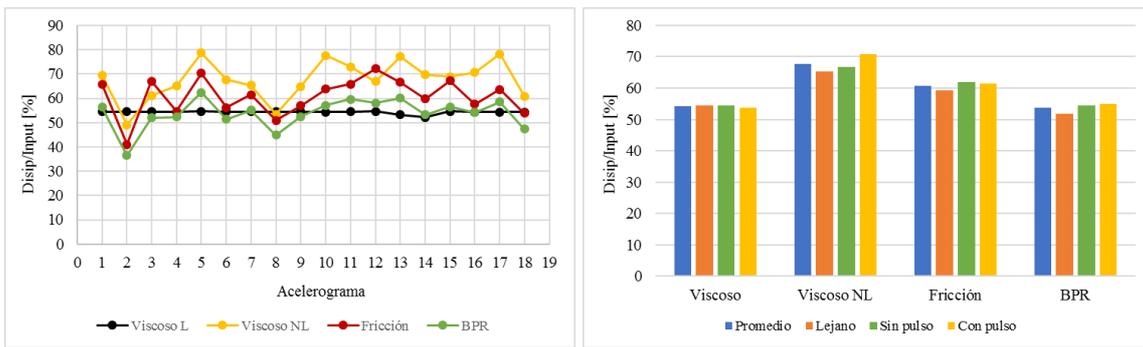
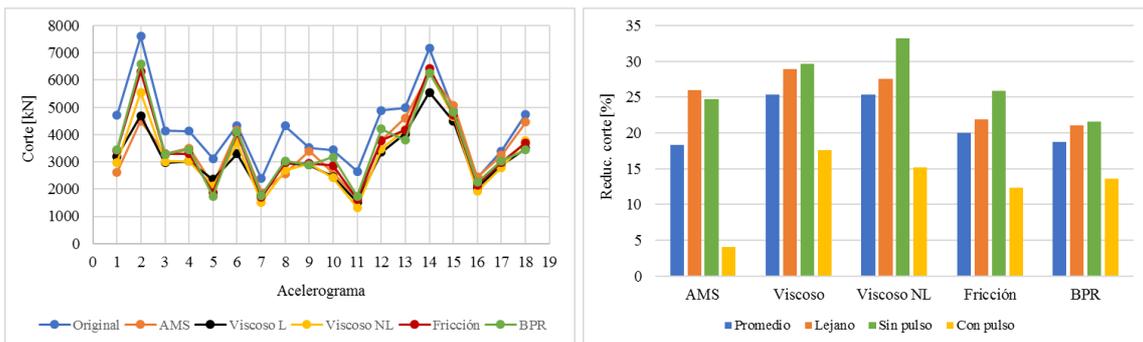


Figura 5: Relación % de la energía disipada en el sistema de disipación respecto al input.

Los valores máximos de corte basal en la estructura con sistema de disipación son siempre menores al de la estructura original, según se muestra en la Figura 6 (izquierda). Esta reducción es del 20% en el caso de los sistemas de disipación de fricción, BPR y AMS, y llega al 25% para los sistemas viscosos (lineales y no lineales). La reducción en el corte basal siempre es menor en la estructura bajo sismo de falla cercana con pulso. Para la estructura con AMS, se tienen 3 registros donde el corte basal aumenta respecto la estructura original.

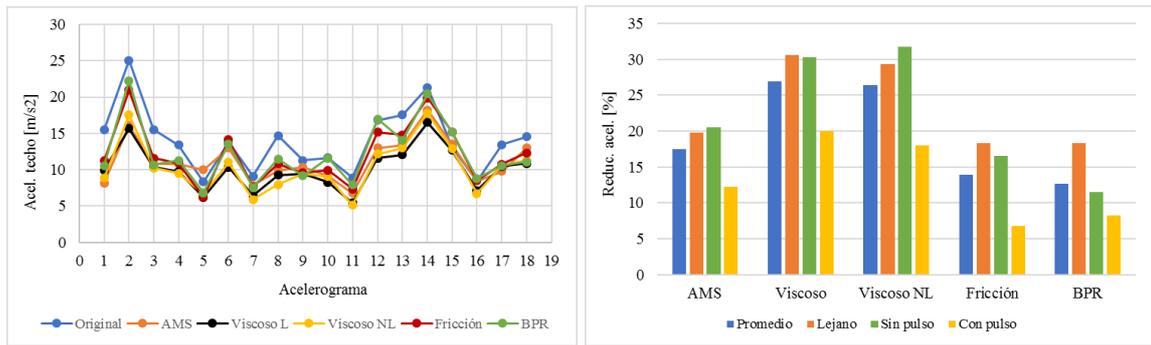


a) Valores máximos

b) Reducción % entre la estructura con/sin disipadores

Figura 6: Corte basal.

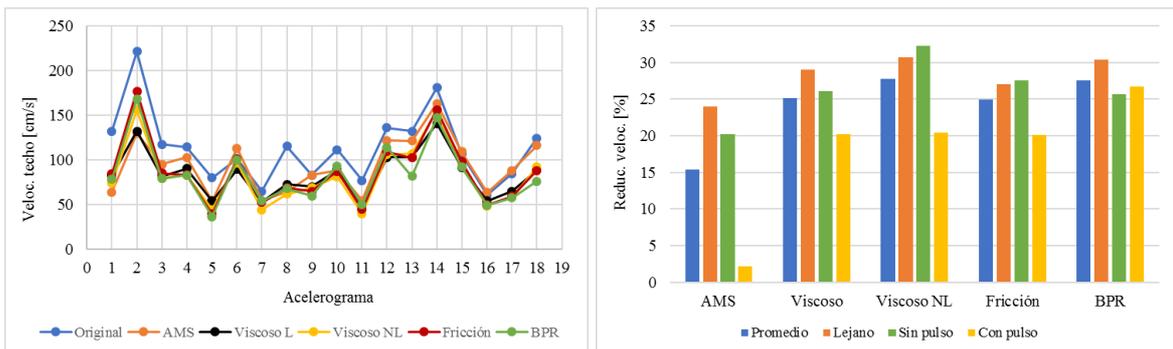
También los valores máximos de aceleración en el techo en la estructura con sistema de disipación, según se presentan en Figura 7 (izquierda), son menores al de la estructura original. En general, se presentan valores pico de aceleración mayores para la estructura bajo registros de falla cercana con pulso. La mayor reducción en aceleraciones de techo (del 27%) se logra con los disipadores viscosos (lineales y no lineales), siendo cercana al 15% para el resto de los sistemas considerados (Figura 7, derecha). Como en el caso del corte basal, en la estructura con AMS se tienen 3 registros donde la aceleración del techo aumenta respecto la estructura original. Pero para este parámetro, esta respuesta también aumenta en 3 registros para la estructura con disipadores de fricción y BPR.



a) Valores máximos                      b) Reducción % entre la estructura con/sin disipadores

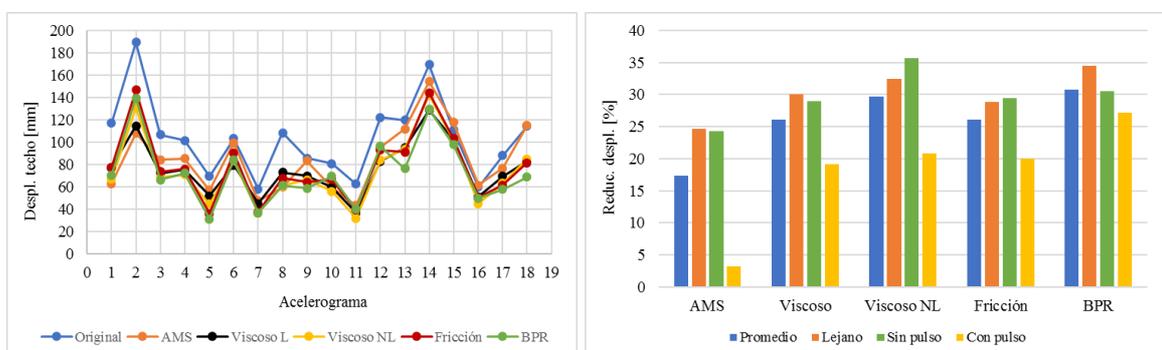
Figura 7: Aceleración en el techo.

Como se observa en la Figura 8 y 9, y al igual que con las magnitudes anteriores, los valores máximos de velocidad y desplazamiento en el techo en la estructura con sistema de disipación son siempre menores al de la estructura original, registrándose una reducción promedio aprox. del 25% en todos los sistemas de disipación, con excepción del sistema AMS, que presenta menores valores de reducción (registrándose además casos donde la velocidad y desplazamiento del techo aumenta respecto a la estructura original).



a) Valores máximos                      b) Reducción % entre la estructura con/sin disipadores

Figura 8: Velocidad en el techo.



a) Valores máximos                      b) Reducción % entre la estructura con/sin disipadores

Figura 9: Desplazamiento en el techo.

Como análisis general, y considerando los valores promedios para todos los registros, se observa que con los sistemas de disipación pasiva considerados (a excepción del AMS) se ha

logrado disipar en ellos entre el 50 y el 70% del input de energía. Habiéndose reducido en la estructura con sistema de disipación:

- . el corte basal entre un 18 y 25% (con mayor reducción en los disipadores viscosos);
- . la aceleración en el techo entre un 13 y 27% (con mayor reducción en los disipadores viscosos y menor en los metálicos (fricción y BPR));
- . la velocidad en el techo entre un 15 y 27% (con menor reducción en AMS); y
- . el desplazamiento en el techo entre un 17 y 27% (con menor reducción en AMS).

## 6 CONCLUSIONES

Se ha analizado en este trabajo, en base a simulaciones numéricas de un modelo de estructura con comportamiento elástico lineal, su desempeño para el refuerzo con distintos sistemas de disipación pasiva de energía. La estructura, regular y flexible, fue sometida a 9 registros (con sus dos componentes horizontales) compatibles con la provincia de Mendoza y con el espectro de la zona de mayor peligrosidad sísmica según el reglamento argentino. Estos registros corresponden a terremotos de falla lejana y cercana (con y sin pulso).

Para el caso analizado, se concluye que, si se alcanza el corte mínimo admitido en la norma americana, se pueden lograr (en promedio) una reducción en los parámetros de respuesta del orden del 25%. Esta reducción se mantiene aún (aunque con menor magnitud) para la estructura bajo acelerogramas de falla cercana con pulso. Se ha observado un desempeño menos eficiente en el modelo con AMS, y una respuesta similar para los otros sistemas de disipación. Teniendo en cuenta los costos de estos dispositivos, el análisis indicaría la mayor conveniencia de usar dispositivos metálicos (de fricción y BPR). Aunque es necesario analizar también las demandas de esfuerzos internos en la parte de la estructura, donde reaccionan los disipadores, para la demanda del máximo terremoto esperado.

La investigación debe continuar para edificios más rígidos, y considerando tipologías estructurales propias de edificios escolares de Argentina, incluyendo el comportamiento no lineal del sistema sismorresistente.

## REFERENCIAS

- ASCE/SEI 7, Minimum design loads for buildings and other structures. *American Society of Civil Engineers*, 2016.
- Christopoulos C., y Filiatrault A., Principles of passive supplemental damping and seismic isolation. *IUSS Press, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia, Italy*, 2007.
- FEMA P695, Quantification of building seismic performance factors. *Federal Emergency Management Agency*, 2009.
- INPRES-CIRSOC 103 (2013), Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes, Parte I: Construcciones en general. *Instituto Nacional de Tecnología Industrial*, 2013.
- SAP2000 v15.1.0, Integrated finite element analysis and design of structures. *CSI, Computers and Structures Inc.*, 2011.
- Wen, Y., Method for random vibration of hysteretic systems. *J. Eng. Mech. Div. ASCE*, EM2:249–63, 1976.