

DISEÑO DE SISTEMAS DE DISIPACIÓN PASIVA DE ENERGÍA PARA REHABILITAR CONSTRUCCIONES ANTIGUAS EN ZONAS SÍSMICAS VALIDADO MEDIANTE ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

Carlos A. Martínez^{a,b}, Cristian O. Bay^c, Gustavo L. Palazzo^a, Marcelo Guzmán^a, Victor Roldán^{a,b}, Francisco Calderón^{a,b}, y Edén Bojórquez^d

^a*CEREDETEC, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Argentina, gpalazzo@frm.utn.edu.ar, mguzman@frm.utn.edu.ar, victor_rolan890@hotmail.com, panchocalderon1@hotmail.com, <http://www.frm.utn.edu.ar/ceredetec>*

^b*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Argentina, camartinez@conicet.gov.ar*

^c*Grupo de Estudio de Estructuras, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Rafael, Urquiza 314 (5600), San Rafael, Mendoza, Argentina, cbay@frsr.utn.edu.ar, <http://www.frsr.utn.edu.ar>*

^d*Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México, eden@uas.edu.mx*

Palabras Clave: Rehabilitación sísmica, Disipación de energía, Análisis no lineal.

Resumen. En zonas sísmicas se tienen construcciones diseñadas y construidas con requerimientos sísmicos básicos, que podrían resultar insuficientes de acuerdo al conocimiento actual de la ingeniería sismorresistente. Como técnica de rehabilitación pueden considerarse los sistemas de disipación pasiva de energía, que consisten en incorporar a la estructura dispositivos disipadores. Pero para valorar la efectividad de esos dispositivos es necesario evaluar la respuesta de la estructura rehabilitada mediante análisis estructural, lo que constituye el objetivo del presente trabajo. Para ello, se selecciona un edificio escolar antiguo, y se determinan sus parámetros geométricos y mecánicos. Posteriormente se realiza un modelo computacional, considerando el comportamiento no lineal del sector de la estructura con mayor demanda. También se selecciona y diseña un sistema de disipación pasiva de energía, eficiente para este edificio escolar; considerando igualmente la no linealidad de la respuesta de estos elementos estructurales. Finalmente se realiza el análisis dinámico no lineal tanto del edificio escolar inicial como del edificio con disipadores, y se comparan distintos parámetros de respuesta. Este análisis dinámico se ejecuta bajo la excitación de 28 registros sísmicos, divididos en 4 niveles de demanda sísmica. En las conclusiones se resaltan las ventajas obtenidas al rehabilitar una estructura antigua con sistemas de disipación pasiva.

1 INTRODUCCIÓN

En zonas sísmicas se tienen numerosas edificaciones diseñadas y construidas con reglamentos antiguos; es decir con prescripciones que no reflejan los conocimientos y experiencias que aporta la ingeniería sismorresistente actual. En el caso de la República Argentina, por ejemplo, con una peligrosidad sísmica de moderada a muy elevada en todo el oeste del país, los primeros reglamentos datan de 1970. Entonces, las construcciones realizadas antes de la vigencia de los nuevos reglamentos podrían ser vulnerables ante acciones sísmicas importantes, siendo necesaria su adecuación o rehabilitación (entendiendo por adecuación a las modificaciones que deben realizarse en una estructura existente, a los efectos de asegurar un comportamiento sin colapso ante un terremoto destructivo). Las edificaciones escolares en particular han demostrado reiteradamente ser especialmente vulnerables durante terremotos. Escuelas públicas en las cuales la asistencia de niños es obligatoria, colapsan frecuentemente durante terremotos de moderada a elevada intensidad en el mundo entero, causando numerosas y trágicas pérdidas de vidas.

A los efectos de cuantificar la magnitud del problema en el caso de la provincia de Mendoza, se destaca que posee aproximadamente 1500 escuelas, en las que se educan unos 500000 alumnos, y donde solo unos 400 edificios fueron diseñados luego de la aparición del Código de Construcciones Sismorresistentes de Mendoza de 1987. Así, en esta provincia sería necesario evaluar la vulnerabilidad de más de 1000 construcciones, muchas de las cuales podrían requerir adecuación.

Para concretar la readecuación o rehabilitación estructural existen diversos procedimientos. Tradicionalmente se han utilizado procedimientos basados en la incorporación de resistencia y rigidez en la estructura mediante elementos de hormigón armado o acero, incluso materiales compuestos. Estas metodologías, en general, son complicadas de aplicar y resultan invasivas desde el punto de vista funcional. Además, implican grandes tiempos de paralización de las actividades, con los problemas logísticos que esto acarrea. Otras metodologías están basadas en nuevas tecnologías, como sistemas de aislamiento sísmico, sistemas de disipación pasiva de energía o sistemas de control activo de la respuesta estructural (Wada *et al.*, 2004). En general a estos procedimientos se los conoce como protección de estructuras.

Los sistemas de disipación pasiva de energía consisten en distintas clases de dispositivos que pueden incorporarse a una estructura existente, a los efectos de disipar la mayor parte de la energía que ingresa a una construcción en el caso de un terremoto. De esta manera se protege a la estructura principal, reduciendo significativamente sus desplazamientos y, consecuentemente, el daño posible. Este tipo de sistemas ya se ha aplicado también a edificios escolares (Ou *et al.*, 2001; Antonucci *et al.*, 2009; Durucan *et al.*, 2010). Para este trabajo se ha elegido como sistema de disipación pasiva de energía, a las barras de pandeo restringido (BPR), (Black *et al.*, 2002). Estos disipadores tienen la ventaja de que pueden fabricarse a bajo costo, y con tecnología disponible en países emergentes.

Ante esta problemática, se propone estudiar la eficiencia en la respuesta estructural que puede lograrse en una construcción escolar antigua, cuando es rehabilitada mediante BPR.

Como el estudio se basa en simulaciones numéricas, en la sección 2 se describe el modelo computacional que fue construido para simular el comportamiento de una escuela particular, cuyas características son dadas al inicio de esa sección. En este modelo se ha considerado un comportamiento elástico lineal para los elementos estructurales de hormigón armado (HA) y ciertos muros de mampostería, y comportamiento no lineal para los muros de mampostería de planta baja (PB) más demandados sísmicamente, así como para las BPR. La excitación considerada durante la simulación numérica también se describe en esta sección. El dimensionamiento de los disipadores, mediante un estudio paramétrico, se describe en la

sección 3. Finalmente, en la sección 4 se presentan los resultados del análisis dinámico no lineal de la estructura en su estado original y rehabilitada, discutiendo las diferencias observadas en los parámetros de respuesta analizadas. En la sección 5 de conclusiones, se resaltan las ventajas logradas con el sistema de rehabilitación propuesto.

2 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA CONSTRUCCIÓN ESCOLAR

2.1 Características generales de la construcción

La edificación que se evalúa en este trabajo es la escuela N° 1-473 “Pío XII” de la Ciudad de Mendoza, la cual fue construida durante el año 1974 (según plano de arquitectura conforme a obra). La construcción de dos niveles tiene una planta rectangular de 38,5 m de largo por 9,00 m de ancho. En la dirección longitudinal posee 3 planos estructurales conformados por pórticos de hormigón armado (HA), con mampostería en 2 de ellos (de ladrillos cerámicos macizos en el ingreso a aulas, y de bloques huecos cerámicos sobre la fachada principal). En la dirección transversal, en cambio, se tienen 7 planos estructurales conformados por mampostería de ladrillo cerámico macizo. La plata baja posee una losa alivianada de HA, mientras que la planta alta tiene una cubierta metálica liviana. En la Figura 1 se muestra una vista general del edificio escolar, y en la Figura 2 se presenta un sector de la fachada.



Figura 1: Vista general de la escuela Pío XII (sector galería, dirección longitudinal)

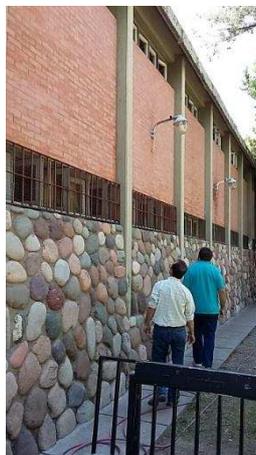


Figura 2: Vista parcial de la fachada de la escuela Pío XII (dirección longitudinal)

Como no se hallaron planos de estructuras, y a los efectos de caracterizar los materiales que componen la misma, se realizaron ensayos no destructivos y extracción de testigos de hormigón.

La principal deficiencia estructural detectada fue la capacidad insuficiente a corte de columnas cortas, y de los muros de mampostería en la dirección longitudinal, en la planta baja del edificio.

2.2 Características generales de la simulación computacional

A los efectos de estudiar numéricamente la respuesta estructural de la escuela, se realizó una simulación de su estructura en su condición previa a la rehabilitación, según se observa en la Figura 3. Esta simulación se realizó en un programa comercial de elementos finitos (ETABS, 2015). Si bien se contaba con los resultados del estudio de suelos, para esta etapa inicial de la investigación se adoptó un sistema de bases fijas. No se modelaron: (i) Las escaleras (ya que las mismas constituyen un sistema estructural separado, y vinculado a la estructura principal solo mediante una losa); (ii) La cubierta superior (por tratarse de un sistema liviano flexible); y (iii) La losa alivianada de PB. Las reacciones de la cubierta de PA y losa de PB (debido al peso propio, sobrecarga de uso y sobrecarga de nieve) se incorporaron a las vigas respectivas y se consideró a nivel de entrepiso un sistema de diafragma rígido. Se consideró además en la estructura, una relación de amortiguamiento del 2% para todos los modos de vibración en los casos de los sismos frecuente y ocasional; y del 5% para los casos de sismos raro y muy raro.

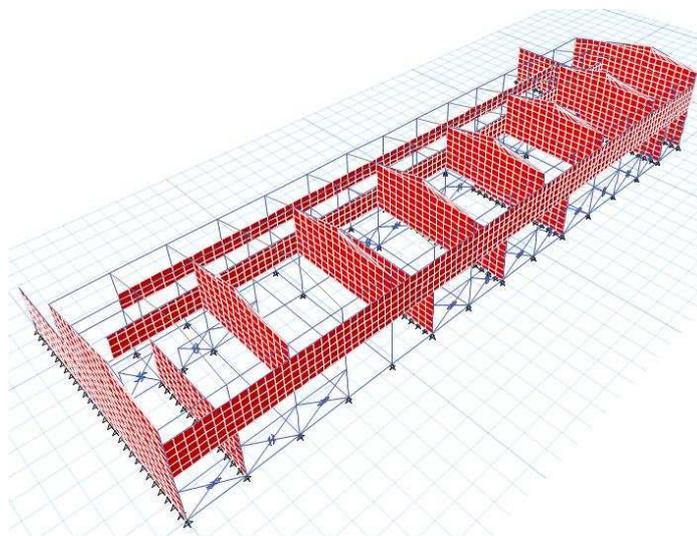


Figura 3: Simulación computacional de la escuela Pío XII (antes de su rehabilitación)

Las vigas y columnas de HA se modelaron con elementos tipo viga (*frames*), con comportamiento elástico lineal. Los parámetros mecánicos adoptados para este material fueron: módulo de elasticidad longitudinal E de 20000 MPa (que corresponde a un $f'c$ de 18 MPa, en concordancia con los resultados de resistencia a compresión de los testigos de hormigón ensayados), módulo de elasticidad transversal G de 8333 MPa, y peso específico de 24 kg/m^3 .

Los muros de mampostería fueron modelados de dos maneras: (i) Para los muros en la dirección transversal, y los muros en la dirección longitudinal de PA, se consideraron elementos tipo placa (*Shell*) de 4 nodos, con comportamiento elástico lineal, módulo E de 1700 MPa, módulo G de 708 MPa, y peso específico de $18,56 \text{ kg/m}^3$. (ii) Para los muros de

mampostería de PB en dirección longitudinal, que presentaban una capacidad a corte insuficiente, se consideró el modelo constitutivo no lineal que se explica en la sección siguiente (adoptando un ladrillo hueco clase B, módulo E de 1700 MPa, módulo G de 510 MPa, y tensión máxima de corte f_{mc} de 0,25 MPa).

Para la edificación rehabilitada se consideró el mismo modelo antes descrito, pero con el agregado de las BPR. Estos disipadores solo se incorporaron en la dirección longitudinal, en el sector de ventanas de la fachada y de entrada a aulas (ver Figura 4). El modelo constitutivo para estas barras se explica en la sección 2.4.; mientras que su diseño se presenta en la sección 3.

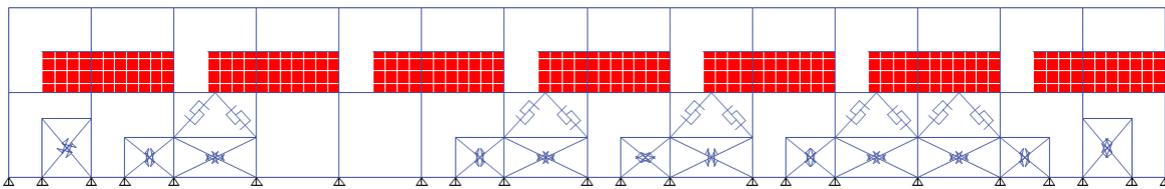


Figura 4 (a): Disposición de BPR en planos estructurales longitudinales (sector ingreso a aulas)

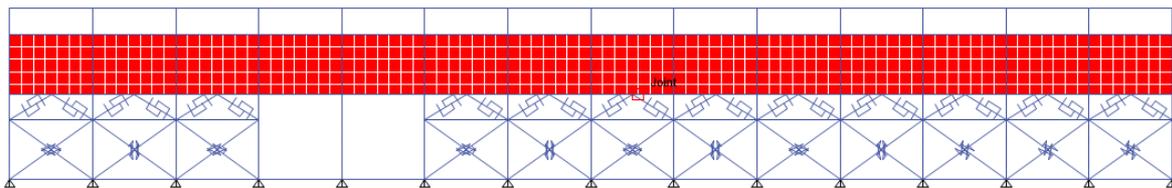


Figura 4 (b): Disposición de BPR en planos estructurales longitudinales (fachada)

2.3 Modelo constitutivo para la mampostería

Diferentes modelos han sido utilizados para representar el comportamiento no lineal de la mampostería a través de una biela equivalente. Sin embargo, no es fácil encontrar un método que permita representar correctamente el comportamiento cíclico no lineal del pórtico relleno con mampostería, a un bajo costo computacional. Para este trabajo se consideró el modelo histerético de Pivot, inicialmente propuesto por Dowel et al. (1998) como una forma de representar el comportamiento de columnas de hormigón sometidas a cargas cíclicas. Este modelo tiene la ventaja de reducir considerablemente el costo computacional frente a los modelos de fibras, además es definido solo por una cantidad acotada de parámetros. Como presenta la ventaja de poder aplicar asimetría en sus ramas, es perfectamente aplicable a los pórticos rellenos de mampostería.

En la Figura 5 se muestra un esquema del modelo. Los puntos pivotantes P_1 , P_2 , P_3 y P_4 , se determinan por la intersección de: las líneas horizontales de los valores $\alpha_1 F_{y1}$ y $\alpha_2 F_{y2}$ con las de las ramas elásticas de la curva. $\beta_1 F_{y1}$ y $\beta_2 F_{y2}$ determinan líneas horizontales que, al interceptar a las ramas elásticas, definen PP_2 y PP_4 . También resultan cuatro cuadrantes definidos como Q_1 , Q_2 , Q_3 y Q_4 .

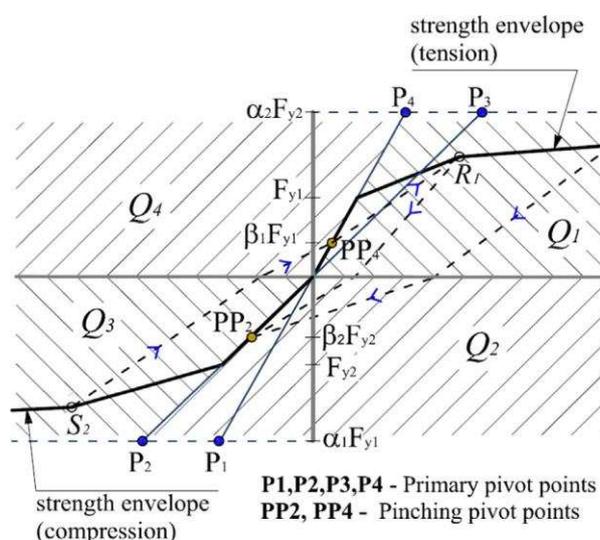


Figura 5: Modelo de Pivot general (Dowel et al., 1998)

Para ilustrar el comportamiento, se considera un ciclo que comienza en el cuadrante Q_1 (tracción). Una vez que el valor de fluencia es alcanzado, la descarga se produce siguiendo una recta hacia el punto P_1 , en el cuadrante Q_1 . Luego al ingresar al cuadrante Q_2 , lo hace siguiendo una recta hacia el punto PP_2 , hasta que la rigidez elástica es alcanzada. El ciclo continúa por esta rama (compresión), en dirección a P_2 . Cuando se alcanza la fluencia, la descarga se produce siguiendo una recta hacia el punto P_3 en el cuadrante Q_3 . Al ingresar al cuadrante Q_4 , cambia la dirección hacia el punto PP_4 , donde el ciclo comienza nuevamente en el cuadrante Q_1 . Los parámetros α_1 , α_2 , β_1 y β_2 son fijos para el modelo y deben ser definidos por datos experimentales.

Cuando el modelo es utilizado para representar el comportamiento de paneles de mampostería, el ciclo se reduce, y los parámetros α_1 y β_1 son cero (se desprecia la resistencia a tracción de las bielas). Además, ensayos experimentales han mostrado que los rellenos de mampostería no ganan rigidez hasta que toda la deformación plástica haya sido recuperada. Utilizando esta hipótesis se determinó que el parámetro β_2 es igual a cero.

Por lo anterior expuesto, se deduce que el ciclo de histéresis de Pivot queda definido por el parámetro α_2 . Estudios recientes realizados por Cavalieri y Di Trapani (2014), determinaron para mampuestos de arcilla un valor de α_2 igual a 0,25.

En la Figura 6 se muestra el modelo reducido aplicado a paneles de mampostería. Los puntos S_1 , S_2 y S_3 , determinan la envolvente de la resistencia de la mampostería. Estos puntos son definidos según distintos procedimientos que se encuentran en la literatura. Para este estudio se consideró una envolvente tri-lineal en compresión según Panagiotakos y Fardis (1994).

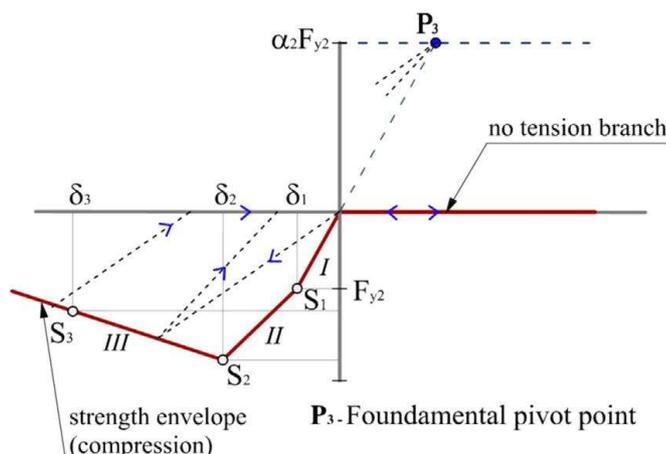


Figura 6: Modelo de Pivot aplicado a muros de mampostería (Panagiotakos y Fardis, 1994)

La rigidez inicial, K_I , la resistencia, S_I , y la deformación máxima, δ_I , quedan definidas por las Ecs. (1), donde G_m es el módulo transversal de la mampostería, t_m es el espesor promedio de la mampostería, l y h son el largo y ancho del panel de mampostería, y f_{mc} representa la resistencia al corte.

$$K_I = \frac{G_m t_m l}{h} \quad S_I = f_{mc} t_m l \quad \delta_I = \frac{S_I}{K_I} \quad (1)$$

La segunda rama queda definida por la rigidez, K_{II} , la resistencia S_{II} y la deformación δ_2 , según las Ecs. (2), donde E_m es el módulo de elasticidad de la mampostería y d_m es la longitud de la diagonal de la mampostería y b_m el ancho de la biela equivalente determinado según Mainstone (1974), FEMA 274 (1997) y FEMA 306 (1998):

$$K_{II} = \frac{E_m t_m b_m}{d_m} \quad S_{II} = 1.3 S_I \quad \delta_{I2} = \delta_I + \frac{S_{II} - S_I}{K_{II}} \quad (2)$$

Por último, se utiliza para $S_{III} = 0,15 S_{II}$, y para $K_{III} = 0,10 K_{II}$; esto en función de la fragilidad de la mampostería utilizada.

Este presente modelo histerético está incluido en ETABS (2015) con el nombre *Pivot Hysteresis Model*, y su representación gráfica está dada en la Figura 7 (con los parámetros considerados para el ladrillo hueco indicado en la sección 2.1.).

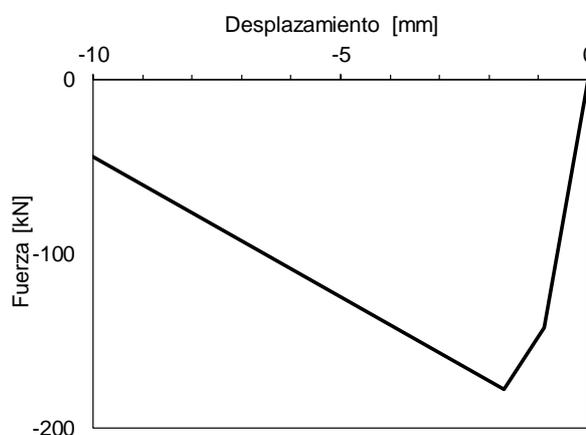


Figura 7: Modelo de Pivot considerado en este trabajo

2.4 Modelo constitutivo para las barras de pandeo restringido

En este trabajo se adoptó el modelo histerético de Bouc-Wen para representar el comportamiento de los disipadores. Este modelo se usa para describir gran variedad de sistemas no lineales histeréticos. Fue introducido por Bouc (Bouc, 1967 y 1971) y extendido por Wen (Wen, 1976).

También esta ley constitutiva ha sido empleada para representar el comportamiento de BPR (Black et al., 2002), aunque hay autores que han indicado sus limitaciones (Ikhouane y Rodellar, 2005). En ETABS (2015), este modelo se encuentra disponible en un elemento *link*, denominado *Plastic (Wen)*.

Se ha considerado en este estudio que los disipadores a incorporar en la estructura de la escuela están conformados por un acero con comportamiento elástico – perfectamente plástico, según se observa en la Figura 8. La determinación de la fuerza de inicio de fluencia en 75 kN, y desplazamiento para el inicio de la plastificación de 0,50 mm, se explican en la sección 3.

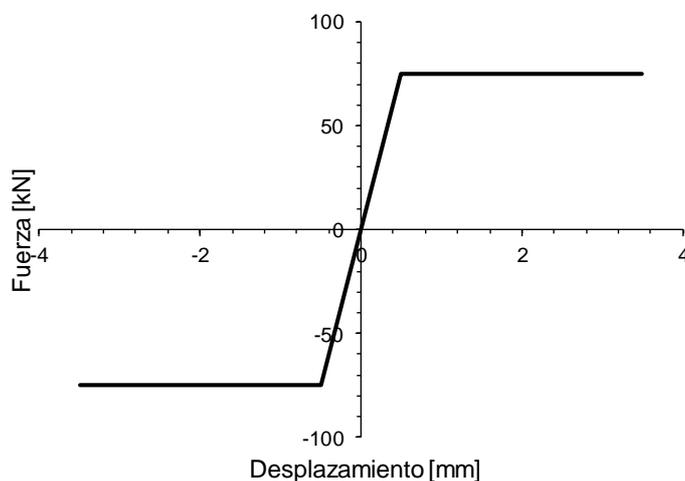


Figura 8: Modelo de plasticidad de Bouc Wen para las BPR

2.5 Excitación sísmica

Para obtener la respuesta de la estructura ante distintos escenarios sísmicos posibles, se utilizaron 28 registros sísmicos compatibles con espectros de diseño (Shinozuka y Deodatis, 1991).

Siete de esos registros corresponden a sismo frecuente, con 50% de probabilidad de excedencia en 30 años; 7 para sismo ocasional, con 50% de probabilidad de excedencia en 50 años; 7 para sismo raro, con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años; y 7 para sismo muy raro, con 10% de probabilidad de excedencia en 100 años. Se ha considerado como sismo raro el dado por la norma INPRES CIRSOC 103 Parte I (2013) para zona 4 y tipo espectral 1. El espectro de sismo frecuente se obtiene según la propuesta de Aguiar (2004), a partir del espectro elástico dado por la norma, ajustado para un valor de la relación de amortiguamiento del 2% y dividido por 3. Para el Sismo Ocasional, se utilizó la recomendación de Guendelman (2002), que consiste en multiplicar el espectro del sismo frecuente por 1.4. Finalmente para el evento muy raro se adopta la recomendación de Aguiar (2004) quien propone multiplicar el espectro elástico por 1.3.

En la Figura 9 se muestran los correspondientes espectros de respuesta de cada uno de los registros junto con los espectros de diseño para cada nivel de excitación.

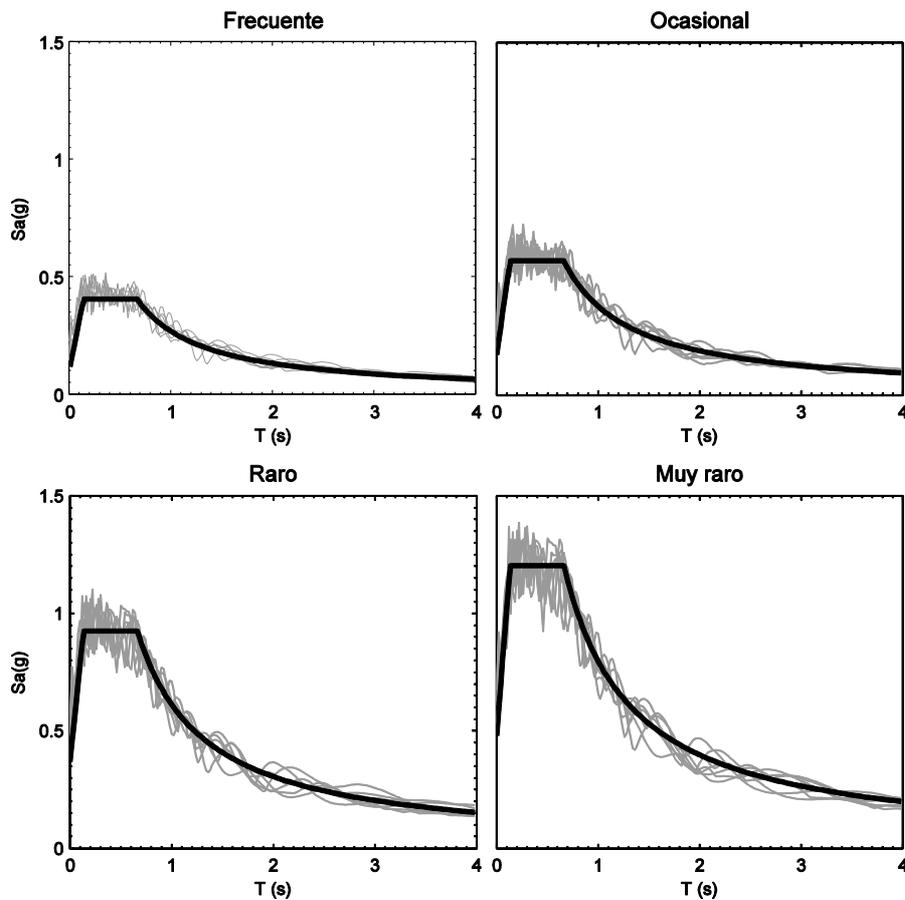


Figura 9: Espectros de respuesta de los 28 sismos seleccionados.

3 PARÁMETROS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE DISIPACIÓN PASIVA DE ENERGÍA

Los parámetros principales que define el modelo del disipador en [ETABS \(2015\)](#) son la rigidez elástica y la fuerza de inicio de plastificación. A los efectos de lograr valores de rigidez y fuerza óptimos para la estructura en consideración, bajo la excitación de los registros definidos en la sección 2.5, se realizó un estudio paramétrico.

Para reducir los tiempos computacionales se trabajó con un vano de uno de los planos estructurales conformado por un pórtico de HA con mampostería incorporada en el antepecho (ver Figura 10).

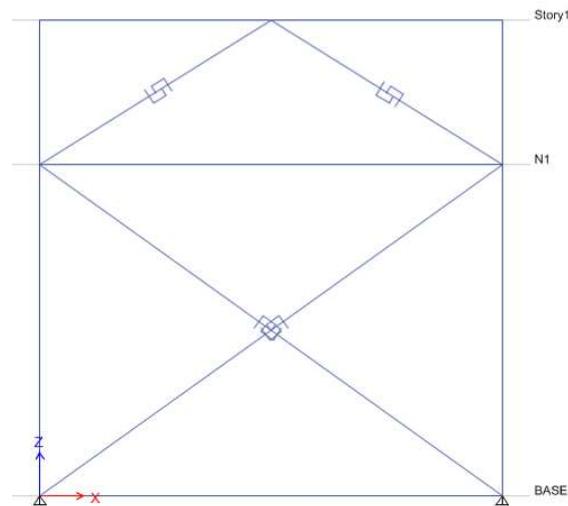


Figura 10: Vano de un plano estructural longitudinal de la escuela para estudio paramétrico de las BPR.

Esta estructura simplificada fue sometida a los 28 registros sísmicos antes mencionados, variando en el modelo de la BPR la rigidez inicial elástica, y el desplazamiento de inicio de la plastificación. Para la estructura con y sin BPR, en cada análisis se determinó la distorsión de piso máxima, y el corte máximo en columnas. Con estos parámetros de respuesta se calculó un índice de desempeño I según la Ec. (3).

$$I = \frac{d_{\max}}{d_{\max_0}} + \frac{v_{\max}}{v_{\max_0}} \quad (3)$$

Donde:

d_{\max} : distorsión de piso máxima;

d_{\max_0} : distorsión de piso máxima de la estructura sin disipadores;

v_{\max} : corte máximo en columnas;

v_{\max_0} : corte máximo en columnas de la estructura sin disipadores.

Los resultados del índice de desempeño vs. el desplazamiento de inicio de plastificación se muestran en la Figura 11 para las distintas rigideces de las barras elegidas y para los 4 niveles de excitación.

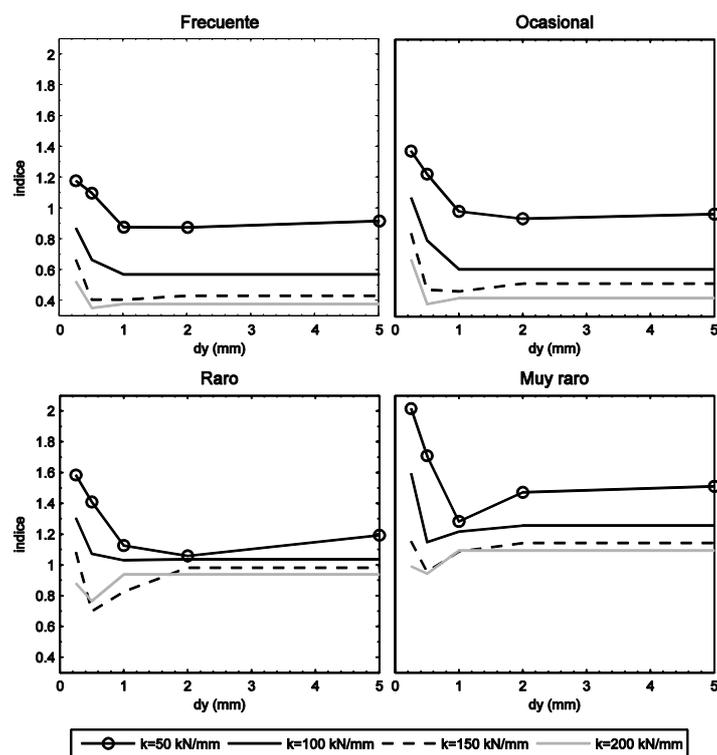


Figura 11: Índice de desempeño vs. desplazamiento de plastificación

Se agregan a continuación, en las Figuras 12 y 13, la variación del índice I, la distorsión máxima de piso y el corte máximo en columnas según el PGA (aceleración máxima del suelo).

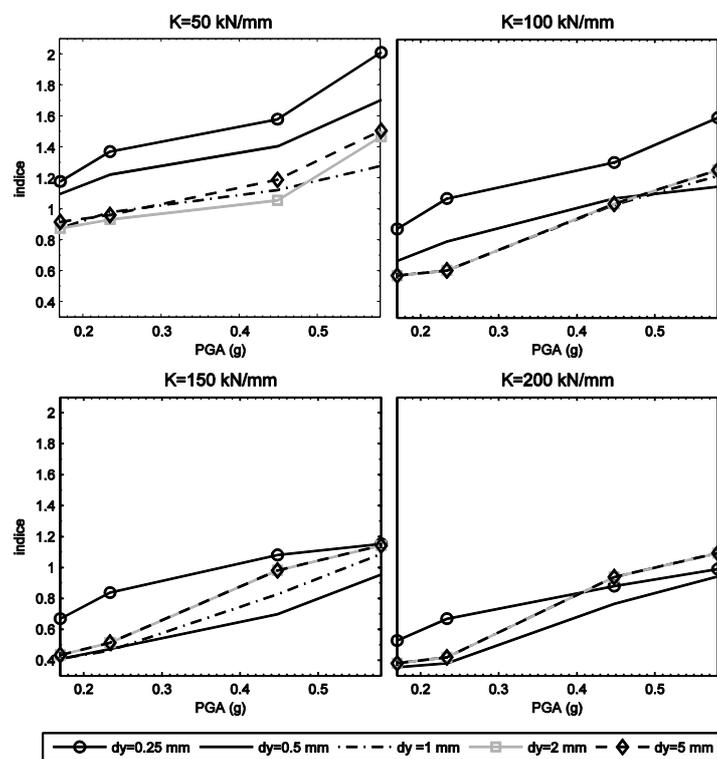


Figura 12: Índice de desempeño vs. PGA

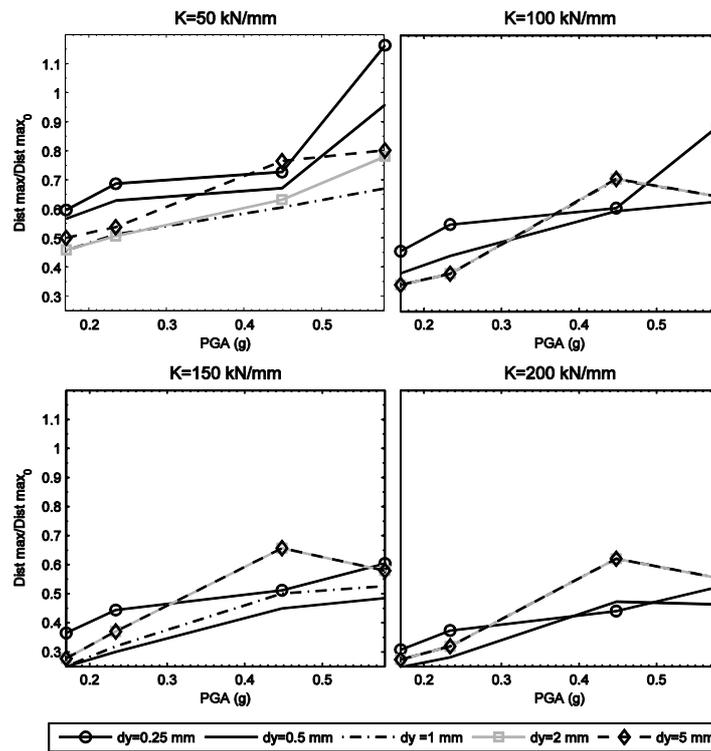


Figura 13: Distorsión máxima de piso relativa vs. PGA

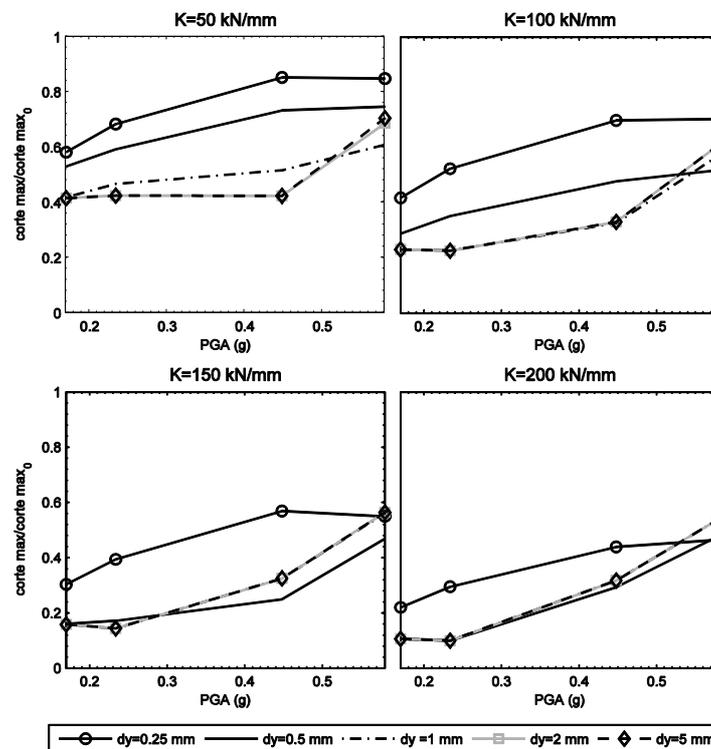


Figura 14: Corte máximo en columnas relativo vs. PGA

En la Figura 11 se observa que el índice I es menor para valores de rigidez elástica elevados, y desplazamiento de inicio de plastificación más bajo. Es decir que se tiene una mejor respuesta a medida que antes se inicie la plastificación en el disipador.

Se arriba a la misma conclusión al considerar la variación del índice I, la distorsión de piso y del corte en columnas para la estructura, respecto a la variación del PGA.

Considerando los resultados de este estudio paramétrico, se concluye que los parámetros más convenientes a adoptar para las BPR a incorporar al edificio escolar son: rigidez elástica del dissipador de 150 kN/mm y desplazamiento de inicio de plastificación de 0,5 mm. Con estos valores, se alcanza una fuerza de plastificación de 75 kN.

4 ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DE LA CONSTRUCCIÓN CON/SIN BPR

En la etapa final del estudio se realizó en **ETABS (2015)** el análisis dinámico no lineal del modelo de la escuela Pío XII, con y sin BRP, bajo la excitación de los 28 registros sísmicos, separados en 4 niveles de excitación sísmica.

Como resultado de este estudio numérico se obtuvieron en las columnas de planta baja, los valores promedios para cada nivel de demanda sísmica de:

- . Desplazamiento (Figura 15).
- . Esfuerzo de corte (Figura 16)
- . Esfuerzo axial (Figura 17)

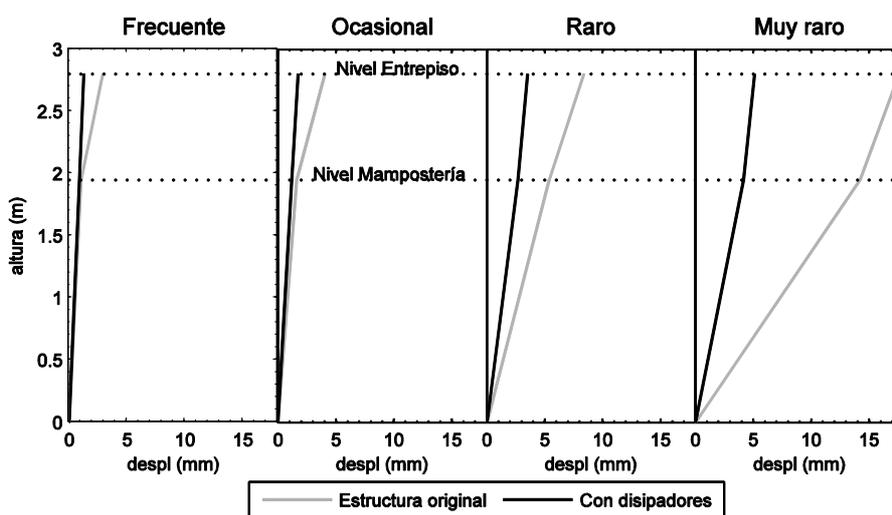


Figura 15: Desplazamientos promedios en columnas de planta baja

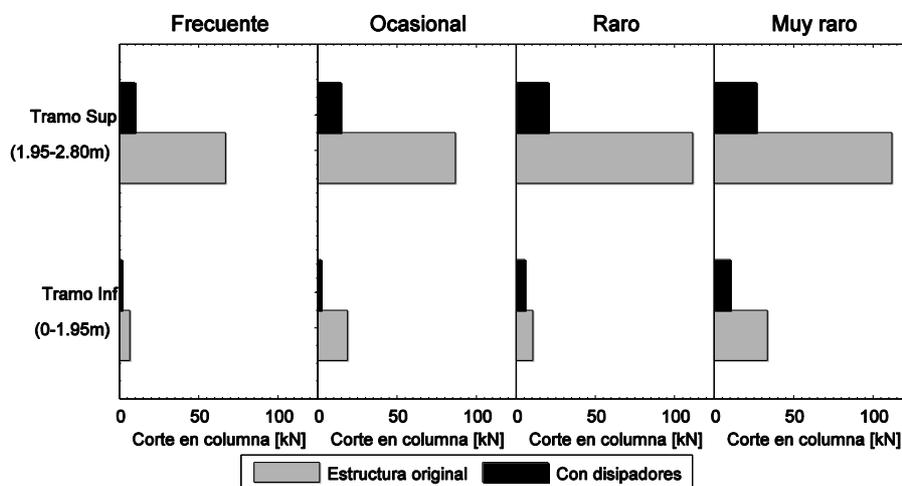


Figura 16: Esfuerzo de corte en columnas de planta baja

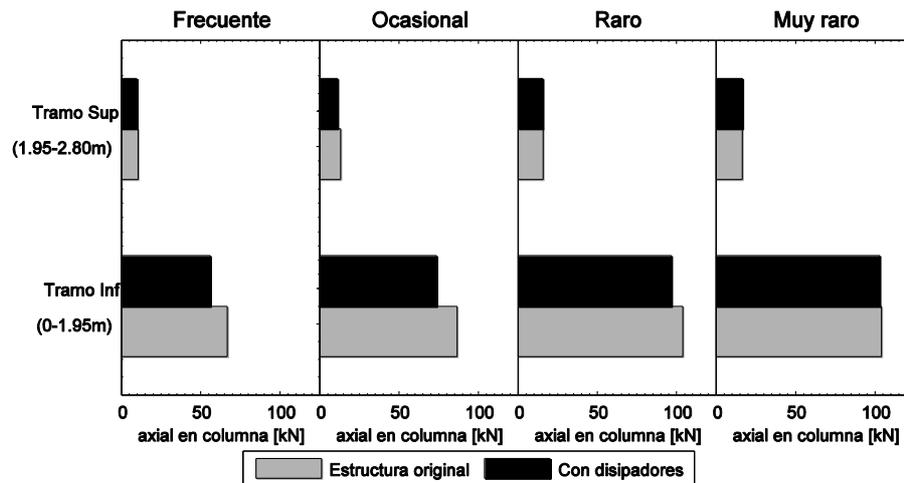


Figura 17: Esfuerzo axial en columnas de planta baja

Los valores obtenidos para cada registro, en cuanto a distorsión máxima de piso y corte máximo en columna, se muestran en la Tabla 1. Como se puede observar, el mismo patrón se obtiene para todos los registros, observándose reducciones de la distorsión máxima superiores al 44%, con promedios que superan el 60%, mientras que para el corte en la columna, las reducciones superan el 75% en todos los casos.

| Nivel excitación | Registro | Distorsión máxima (%) | | | | Corte máximo en columna (kN) | | | |
|------------------|----------|-----------------------|-----------------|---------------|--------------------|------------------------------|-----------------|---------------|--------------------|
| | | Estruct. Original | Con disipadores | Dif. Rel. (%) | Dif. Rel. Promedio | Estruct. Original | Con disipadores | Dif. Rel. (%) | Dif. Rel. Promedio |
| Frecuente | 1 | 0.220% | 0.041% | -81.26% | -78.36% | 68.135 | 9.606 | -85.90% | -85.37% |
| | 2 | 0.212% | 0.049% | -77.07% | | | | | |
| | 3 | 0.266% | 0.058% | -78.11% | | | | | |
| | 4 | 0.169% | 0.044% | -73.82% | | | | | |
| | 5 | 0.209% | 0.038% | -81.69% | | | | | |
| | 6 | 0.207% | 0.049% | -76.22% | | | | | |
| | 7 | 0.243% | 0.048% | -80.39% | | | | | |
| Ocasional | 1 | 0.289% | 0.060% | -79.10% | -76.53% | 88.056 | 15.484 | -82.42% | -83.12% |
| | 2 | 0.274% | 0.063% | -77.17% | | | | | |
| | 3 | 0.339% | 0.083% | -75.65% | | | | | |
| | 4 | 0.245% | 0.073% | -70.18% | | | | | |
| | 5 | 0.275% | 0.053% | -80.74% | | | | | |
| | 6 | 0.265% | 0.068% | -74.50% | | | | | |
| | 7 | 0.306% | 0.066% | -78.34% | | | | | |
| Raro | 1 | 0.340% | 0.119% | -64.97% | -60.57% | 112.568 | 25.333 | -77.50% | -81.84% |
| | 2 | 0.338% | 0.142% | -58.09% | | | | | |
| | 3 | 0.373% | 0.208% | -44.22% | | | | | |
| | 4 | 0.350% | 0.127% | -63.77% | | | | | |
| | 5 | 0.332% | 0.110% | -66.76% | | | | | |
| | 6 | 0.373% | 0.146% | -60.78% | | | | | |
| | 7 | 0.341% | 0.118% | -65.43% | | | | | |
| Muy raro | 1 | 0.616% | 0.155% | -74.76% | -69.22% | 110.440 | 25.821 | -76.62% | -76.27% |
| | 2 | 0.552% | 0.218% | -60.60% | | | | | |
| | 3 | 1.000% | 0.324% | -67.59% | | | | | |
| | 4 | 0.451% | 0.218% | -51.82% | | | | | |
| | 5 | 0.728% | 0.155% | -78.74% | | | | | |
| | 6 | 0.872% | 0.256% | -70.60% | | | | | |
| | 7 | 0.878% | 0.172% | -80.40% | | | | | |

Tabla 1: Distorsión máxima de piso y corte máximo en columnas para cada registro.

El análisis de las Figuras 15 a 17, y de la Tabla 1, permite concluir que la incorporación de las BPR siempre implica una amplia reducción de los parámetros de respuesta considerados.

También se compararon los ciclos histeréticos para la mampostería de PB en la estructura con/sin disipadores, tal como se muestra en la Figura 18.

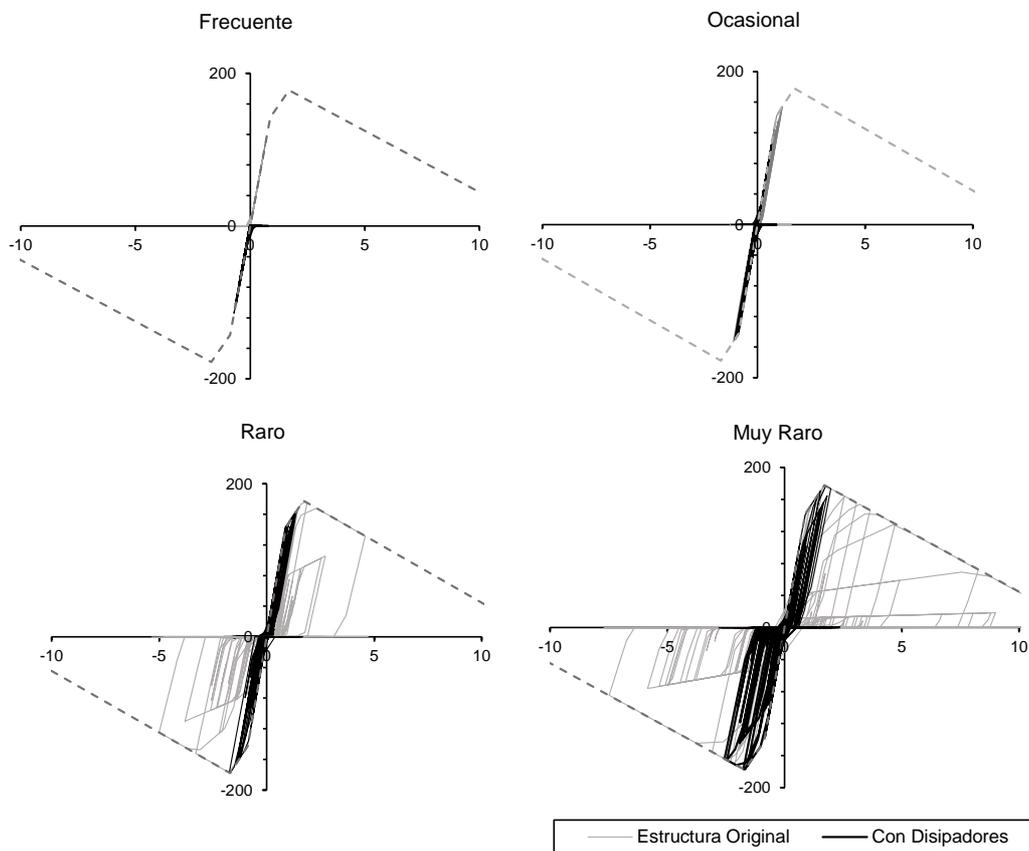


Figura 18: Ciclos histeréticos de la mampostería

Como se puede observar, para el caso de sismo frecuente, la mampostería permanece en estado elástico tanto en estructura original como en la estructura con disipadores. En el caso del sismo ocasional, en la estructura original hay una pequeña incursión en el rango inelástico, mientras que con la incorporación del sistema de disipación de energía propuesto se logra que la mampostería se mantenga en rango elástico.

Para el caso del sismo raro se observa un gran nivel de daño en la mampostería para el caso de la estructura original, mientras que para la estructura controlada solo hay una pequeña incursión en rango no lineal.

Para el mayor nivel de excitación, correspondiente al evento muy raro, se observa una degradación total de la mampostería de la estructura original y algo de daño, pero sin ser total en el caso de la estructura con disipadores.

Esto demuestra el buen desempeño de los disipadores para mantener sin fisurar la mampostería para niveles bajos de excitación y resguardar la integridad para niveles elevados de excitación sísmica.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado, mediante simulación computacional, la respuesta estructural de un edificio escolar antiguo, el cual presentaba patología de columna corta,

excitado con 28 registros escalados según 4 niveles de demanda sísmica. Esa respuesta fue comparada con la del edificio rehabilitado mediante la incorporación de disipadores de energía histeréticos.

En el modelo de la escuela se consideró el comportamiento no lineal de la mampostería de PB en la dirección longitudinal (sector de la estructura con mayor demanda), y de los disipadores incorporados en la estructura rehabilitada.

Mediante un estudio paramétrico en un vano de un pórtico con mampostería, se pudieron obtener los parámetros óptimos de los disipadores a incorporar en la estructura.

Con el análisis dinámico no lineal del modelo completo del edificio escolar, se pudo demostrar que la respuesta de la estructura es ampliamente menor en el caso de la estructura rehabilitada con BPR para los distintos niveles de demanda sísmica analizados, respecto de la estructura sin rehabilitar.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte económico de CONICET y al Programa de Becas Doctorales de la Universidad Tecnológica Nacional. Gustavo Palazzo agradece también al Ministerio de Educación de la Nación y la Comisión Fulbright.

REFERENCIAS

- Aguiar R (2004) Espectros sísmicos de riesgo uniforme para verificar desempeño estructural en países sudamericanos. Boletín Técnico IMME 42(1):2004. Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2004000100002 (visitada 20 de setiembre de 2016).
- Antonucci R., Balducci F, Cappanera F, Castellano MG (2009). Strutture prefabbricate con controventi dissipativi: l'empio del nuovo polo didattico della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona. *Progettazione Sismica 1*: 2009. Disponible en: http://www.progettazioneismica.it/media/sommari/Sommari_2009_1/PS_A_2009_01_05_Antonucci_S.pdf (visitada 20 de setiembre de 2016).
- Black, C., Makris, N. and Aiken, I. (2002). *Component Testing, Stability Analysis and Characterization of Buckling- Restrained Unbonded Braces*. PEER Report No. 2002/08, University of California, Berkeley, California.
- Bouc, R., Forced vibration of mechanical systems with hysteresis. *Proceedings of the Fourth Conference on Nonlinear Oscillation, Prague, Czechoslovakia*, p. 315, 1967.
- Bouc, R., Modèle mathématique d'hystérésis: application aux systèmes à un degré de liberté". *Acustica*, 24: 16–25, 1971.
- Cavaleri L, Di Trapani, F. Cyclic response of masonry infilled RC frames: Experimental results and simplified modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineerings*, 65:224–242, 2014.
- Dowell RK, Seible F, Wilson EL. Pivot Hysteresis model for reinforced concrete members. *Struct J (ACI)*,95(5):607-617, 1998.
- Durucan C y Dicleli M. Analytical study on seismic retrofitting of reinforced concrete buildings using steel braces with shear link, *Engineering Structures* 32: 2995-3010, 2010
- ETABS, 2015. CSi Analysis Reference Manual, Computers & Structures, Inc, 2015.
- FEMA 274. *Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. Federal Emergency Management Agency, 1997.
- FEMA 306. *Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry buildings*. Federal Emergency Management Agency, 1998.
- Guendelman T, "Análisis y Diseño Sísmico de Edificios de Hormigón Armado", Memorias

- de Seminario dictado en Universidad de La Serena”, compilado en CD, La Serena, 2002.
- Ikhouane, F. and Rodellar, J. On the hysteretic Bouc–Wen model. *Nonlinear Dynamics*, 42: 63–78, 2005.
- INPRES-CIRSOC 103. *Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes, Parte I: Construcciones en general*, INTI, 2013.
- Mainstone, R. Supplementary note on the stiffness and strength on infilled frame. current paper CP 13/74 , UK: *Building Research Station*, 1974.
- Ou JP, Zou XY, Long X, Wu B, Pan KY, Wang FX, Zhang JM. Seismic analysis and design for dining-room structure of Zhenrong middle school with energy dissipaters, Part I: Response spectra method. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 21(1): 109-114, 2010.
- Panagiotakos, T., Fardis, M. Proposed nonlinear strut models for infill panels. 1st Year Progress Report of HCM-PREC8 Projetc, University of Patras, 1994.
- Shinozuka M y Deodatis G. Simulation of stochastic processes by spectral representation. *Applied Mechanics Reviews* 44(4):191-205, 1991.
- Wada, A y Nakashima, M. From infancy to maturity of bucking restrained braces research. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthwuate Engineering*, paper N°1732, Vancouver, Canadá, 2004.
- Wen, YK. Method for Random Vibration of Hysteretic Systems. *J Eng Mech Div ASCE*, EM2:249–63, 1976.