

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ESTRUCTURA METÁLICA CON SISTEMA DE DISIPACIÓN PASIVA DE ENERGÍA SOMETIDA A SISMOS DE FALLA CERCANA Y LEJANA

Gustavo L. Palazzo^a, Francisco López Almansa^b, Xavier Cahís^c, Pablo Martín^a y Francisco Calderón^a

^a*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Ceredetec, Rodríguez 273, 5500 Ciudad de Mendoza, Argentina, gpalazzo@frm.utn.edu.ar, pablo.martin@frm.utn.edu.ar, panchocalderon1@hotmail.com*

^b*Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Estructuras en la Arquitectura, Avda. Diagonal 649, 08028 Barcelona, España, francesc.lopez-almansa@upc.edu*

^c*Universidad de Girona, Departamento de Ingeniería Mecánica y de Construcción, Lluís Santaló s/n 17071 Girona, España, xavier.cahis@udg.edu*

Palabras claves: falla cercana, falla lejana, estructura con disipadores.

Resumen. En las últimas décadas se han desarrollado diferentes clases de sistemas de disipación pasiva de energía, destinados a mejorar la respuesta sismorresistente de estructuras nuevas y existentes. Pero son necesarias nuevas investigaciones para conocer la eficiencia de estos sistemas frente a terremotos tipo pulso (falla cercana) y tipo vibratorio (falla lejana). Para considerar esta situación desde el punto de vista numérico, en este trabajo se estudia la respuesta en el tiempo de un pórtico metálico con/sin disipadores de energía, mediante análisis dinámico no lineal. La estructura de acero es un pórtico resistente a momento, con 4 niveles, ensayado en la mesa vibradora del Laboratorio E-Defense (Japón). Las barras de pandeo restringido (BPR) fueron seleccionadas para este estudio como el sistema disipador de energía. Diez acelerogramas correspondientes a terremotos tipo pulso y vibratorio fueron seleccionados como excitación sísmica. Estos acelerogramas fueron escalados para resultar compatibles con el espectro de diseño del Reglamento Argentino INPRES – CIRSOC 103 vigente, correspondiente a la zona sísmica más elevada de ese país, y suelo tipo normal. El análisis estructural se realizó con el programa de elementos finitos SeismoStruct, capaz de predecir el comportamiento de pórticos espaciales bajo excitación sísmica, considerando no linealidades geométricas y del material. A los efectos de contrastar resultados, en la primera fase del estudio se compararon las respuestas en el tiempo de un pórtico de un nivel y un vano, con BPR, según los programas SeismoStruct y SAP2000. Posteriormente se compararon las respuestas en el tiempo de la estructura metálica con/sin BPR, sometida a los 10 acelerogramas seleccionados. En las conclusiones se resaltan las diferencias observadas entre las distintas respuestas consideradas.

1 INTRODUCCIÓN

Las construcciones sismorresistentes, diseñadas y construidas con códigos antiguos o de acuerdo a conocimientos de ingeniería sísmica iniciales, podrían tener un desempeño inadecuado frente a terremotos destructivos. Es necesario en ellas, y en especial en aquellas que tienen funciones especiales luego de ocurrido un terremoto, evaluar su estado y determinar si requieren medidas de rehabilitación estructural.

Estas medidas pueden concretarse a través de los métodos de rehabilitación estructural. Entre los principales métodos de rehabilitación convencionales que se han aplicado en distintos países y también en Argentina se tienen: refuerzo de sistemas estructurales con tabiques, riostras externas o con pórticos arriostrados; postesado de elementos estructurales; recrecido de columnas y vigas con hormigón armado ($H^{\circ} A^{\circ}$) o placas de acero; y refuerzo de elementos estructurales con fibras de carbono.

Además, durante las últimas décadas se han desarrollado sistemas innovadores que permiten un mejor desempeño de una estructura frente a terremotos destructivos; los cuales pueden aplicarse a construcciones nuevas, o como métodos de rehabilitación innovadores. La aplicación de los nuevos sistemas se materializa a través de la incorporación de distintos dispositivos en las construcciones. Se destaca además que entre las nuevas tecnologías los sistemas de aislamiento sísmico y de disipación pasiva de energía son los que han alcanzado mayor madurez.

Dentro de los sistemas anteriormente mencionados, se han desarrollado una gran variedad de dispositivos, muchos de los cuales se encuentran patentados y son marcas comerciales. En este trabajo se considera una clase de dispositivo denominado barra de pandeo restringido (BPR), incluido dentro de los sistemas de disipación pasiva de energía. Estos dispositivos (Wada y Nakashima, 2004) pueden disipar energía por comportamiento plástico de una barra de acero que se dispone como riostras en pórticos de acero o de $H^{\circ} A^{\circ}$. Para evitar el pandeo de la barra se dispone en su periferia de un sistema que impide la inestabilidad lateral de la misma. Los pórticos metálicos que incorporan este tipo de riostras están incluidos en las tipologías admisibles de la norma americana AISC 341, 2005. Una fotografía de un disipador de energía tipo BPR se presenta en la Figura 1.



Figura 1: Disipador de energía tipo barra de pandeo restringido.

Los disipadores mencionados pueden incluirse en estructuras existentes de $H^{\circ} A^{\circ}$ o de acero. Así, en la Figura 2 se muestra el sistema de disipación aplicado como refuerzo de una estructura existente.



Figura 2: Estructura existente rehabilitada con BPR.

En la bibliografía se presentan numerosos estudios experimentales y numéricos sobre la eficiencia de estos sistemas de disipación pasiva de energía (Black et al., 2004). Pero no se cuenta con investigaciones suficientes sobre el comportamiento de estos dispositivos frente a una acción sísmica de tipo pulso, donde la capacidad de disipación de energía es muy inferior al caso de una excitación sísmica de tipo vibratorio.

Atendiendo a esta vacancia, en este trabajo se propuso como objetivo el estudio numérico de la respuesta en el tiempo de una estructura con BPR sometida a los dos tipos de acción sísmica mencionada.

La estructura base del estudio, tal como se describe en la sección 2, corresponde a un pódico metálico de 4 niveles ya ensayado en la mesa vibradora del Laboratorio de Japón E-Defense. En la misma se consideran para este trabajo la incorporación de BPR.

Como acción sísmica fueron elegidos 5 acelerogramas de tipo pulso y otros 5 de tipo vibratorio. También en la sección 2 se detallan las características de estos acelerogramas.

La respuesta en el tiempo de la estructura con/sin BPR se determinó, tal como se describe en la sección 3, mediante una simulación numérica con el programa de elementos finitos SeismoStruct, 2010.

Los desplazamientos en el tiempo y sus valores máximos, las derivas de piso, los momentos flectores máximos en la base de las columnas, y las curvas histeréticas fuerza – desplazamiento en las BPR fueron considerados como los parámetros de respuesta a evaluar. Las comparaciones se realizaron tanto para la estructura con BPR sometida a sismos tipo pulso y vibratorio, como para el caso de la estructura libre, cuyos resultados se muestran en la sección 4.

Luego de discutir los resultados de las respuestas en el tiempo en la sección 4, se presentan en la sección 5 las conclusiones del estudio realizado.

2 CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA EN ESTUDIO Y DE LA EXCITACIÓN SÍSMICA

La estructura seleccionada como base del estudio numérico es un pódico metálico de 4 niveles que se muestra en la Figura 3 sobre la mesa vibradora del Laboratorio E-Defense de Japón.



Figura 3: Pórtico metálico ensayado en el Laboratorio E-Defense de Japón.

En la dirección longitudinal este pórtico espacial posee dos vanos de 5.00 m, mientras que en la dirección transversal tiene un vano de 6.00 m. La altura del primer nivel es de 3.86 m, y de 3.50 m para los niveles 2 a 4. Los demás datos de los parámetros geométricos y mecánicos de esta estructura se encuentran en el trabajo de Yamada et al., 2008.

El pórtico ensayado no contemplaba la incorporación de disipadores de energía. Pero para este estudio fueron consideradas BPR dispuestas como diagonales en los vanos del pórtico. Las mismas fueron diseñadas según el procedimiento propuesto por Palazzo, 2009, basado en una distribución de disipadores en altura según el primer modo de vibrar de la estructura. Así, y considerando que la barra central de los disipadores tienen un módulo de elasticidad longitudinal E de 200000 MPa, y una tensión de fluencia de 240 MPa, se dispuso para la misma un sección transversal circular de diámetro 3.0; 2.0 y 1.0 cm para los niveles 1 - 2, 3 y 4 respectivamente. En SismoStruct, 2010 se dispuso una ley constitutiva elasto plástica perfecta para el material de la barra central.

Como se indicara en la introducción, la acción sísmica fue representada mediante 5 acelerogramas de tipo pulso y otros 5 de tipo vibratorio. A los efectos de considerar como variable solo el tipo de acción sísmica, los acelerogramas fueron escalados según el espectro del INPRES-CIRSOC 103, 1991. El escalamiento se realizó en función del espectro para la zona sísmica tipo 4 y suelo normal del Reglamento mencionado, y del período elástico de la estructura en consideración (en la dirección de análisis seleccionada). En la Tabla 1 se presentan los parámetros de estos acelerogramas, cuyos espectros pueden observarse en la Figura 4.

Grupo	Terremoto	Designación	Escala	Fecha	Estación	Comp.	Mag.	PGA [g]
Terremotos Tipo Pulso	Cape Mendocino	1p	1.00	25/04/92	Cape Mendocino	N-S	7.10	1.50
	Northridge-01	2p	0.60	17/01/94	Pacoima Dam (upper left)	194	6.69	1.29
	Northridge-01	3p	0.65	17/01/94	LA -Sepulveda VA Hospital	270	6.69	0.75
	Kobe,	4p	1.00	16/01/95	Takarazuka	90	6.90	0.69
	Kobe	5p	0.80	16/01/95	Takarazuka	00	6.90	0.69

Tabla 1-a: Parámetros de los acelerogramas seleccionados (tipo pulso).

Grupo	Terremoto	Designación	Escala	Fecha	Estación	Comp.	Mag.	PGA [g]
Terremotos Tipo Vibratorio	JAPON	1v	1.00	11/03/11	MYG004	E-W	9.0	1.29
	JAPON	2v	1.00	11/03/11	FKS016	E-W	9.0	0.96
	Chile 1985	3v	1.00	03/03/85	Llolleo	N10E	7.80	0.71
	Maule-2	4v	1.00	27/02/10	ETNA S/N 6493	E-W	8.80	0.64
	Maule-1	5v	0.70	27/02/10	ETNA S/N 6493	N-S	8.80	0.60

Tabla 1-b: Parámetros de los acelerogramas seleccionados (tipo vibratorio).

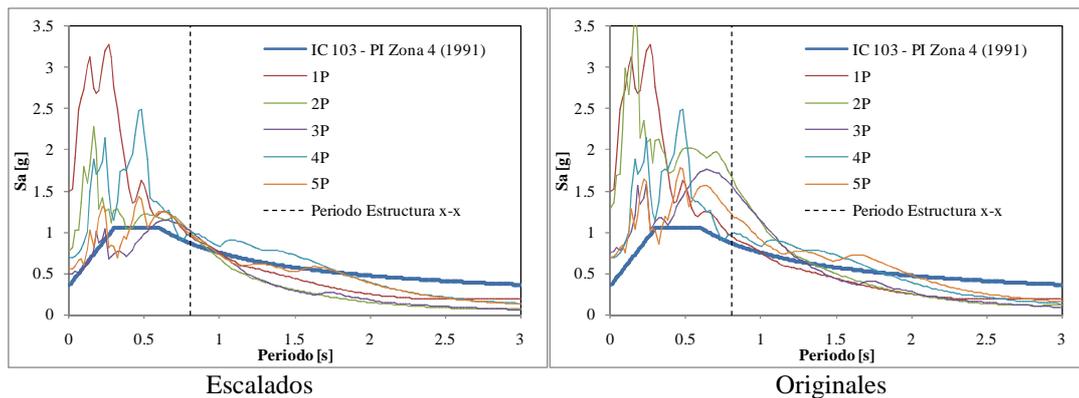


Figura 4-a: Espectros de respuesta para los acelerogramas seleccionados (tipo pulso, sin escalar).

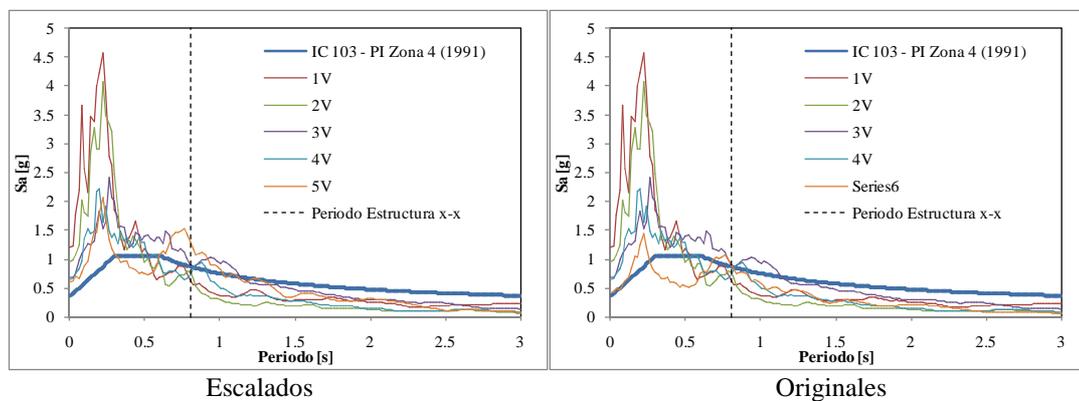


Figura 4-b: Espectros de respuesta para los acelerogramas seleccionados (tipo vibratorio, sin escalar).

3 CONSIDERACIONES SOBRE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA REALIZADA

La geometría de los modelos numéricos considerados para el pórtico metálico con/sin BPR, basada en los parámetros dados por Yamada et al., 2008, se presenta en Figura 5.

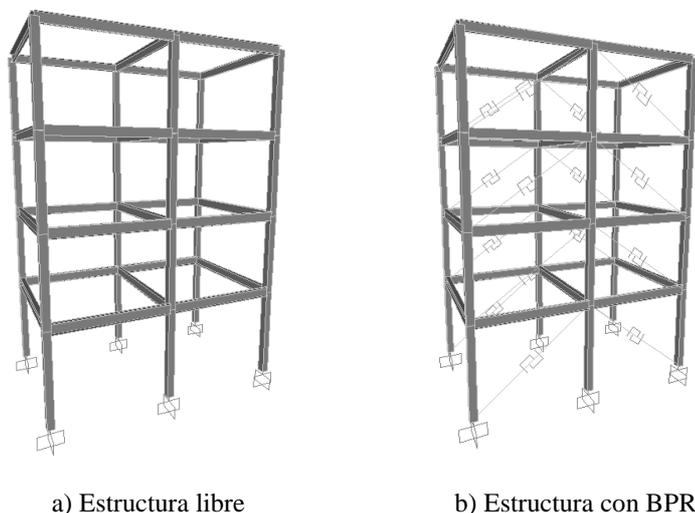


Figura 5: Geometría del modelo numérico para el pórtico metálico.

Como antes se señalara, la simulación numérica se realizó con el programa de elementos finitos SesimoStruct, 2010. Este *software* permite predecir el comportamiento para grandes desplazamientos de pórticos espaciales bajo excitación sísmica, considerando no linealidades geométricas y del material. El programa usa la aproximación por fibra para representar el comportamiento de la sección transversal; así, cada fibra se asocia con una ley constitutiva tensión – deformación uniaxial. El estado tensión – deformación de la sección transversal se obtiene luego a través de la integración de la respuesta no lineal uniaxial de cada fibra individual que integran la sección.

El material de la estructura, acero, fue simulado con un modelo bilineal denominado *stl_bl*. Los parámetros que caracterizan a este modelo son: el módulo de elasticidad longitudinal de 200000 MPa; la tensión de fluencia de 330 MPa, el parámetro de endurecimiento (razón entre la rigidez post fluencia y la rigidez elástica del material) de 0.005; la deformación fractura/pandeo (deformación donde ocurre la fractura) de 0.06; y el peso específico de 78500 N/m³.

Para simular las vigas y columnas se consideraron elementos 3D *frame* con inelasticidad distribuida, denominados *infrmDB*; implementados en una formulación de elementos finitos clásica basada en desplazamiento.

Para simular el efecto de rigidez de las losas, se consideraron diafragmas rígidos en cada nivel.

Se adoptó un amortiguamiento tipo Rayleigh, con parámetro proporcional a la masa de 0.3142 y parámetro proporcional a la rigidez de 0.005.

Los parámetros de respuesta se obtuvieron mediante un análisis dinámico no lineal de historia en el tiempo. La integración de la ecuación de movimiento se realiza empleando el esquema de Newmark, con ajuste automático del paso del tiempo.

La simulación de la acción sísmica es lograda por la introducción de curvas tiempo – aceleración en las bases de las columnas del pórtico de planta baja.

El período para el modo 1 en la dirección longitudinal del modelo en SeismoStruct es de

0.94 s, y de 0.86 s (mientras que los valores reportados por Yamada et al., 2008 fueron de 0.77 s y de 0.69 s, respectivamente).

4 RESPUESTA NUMÉRICA DEL PÓRTICO METÁLICO

En esta sección se presentan los parámetros de respuesta del pórtico metálico con/sin BPR bajo la excitación de acelerogramas tipo pulso y vibratorio. Dada la gran cantidad de datos que se obtuvieron del análisis estructural, se destacan en esta parte solo parte de esos resultados.

Así, en la Figura 6 se compara la historia de desplazamiento en el techo del pórtico con/sin BPR, para un acelerograma tipo pulso y vibratorio. Para ambos tipos de acelerogramas se tiene una reducción importante del desplazamiento cuando la estructura tiene BPR.

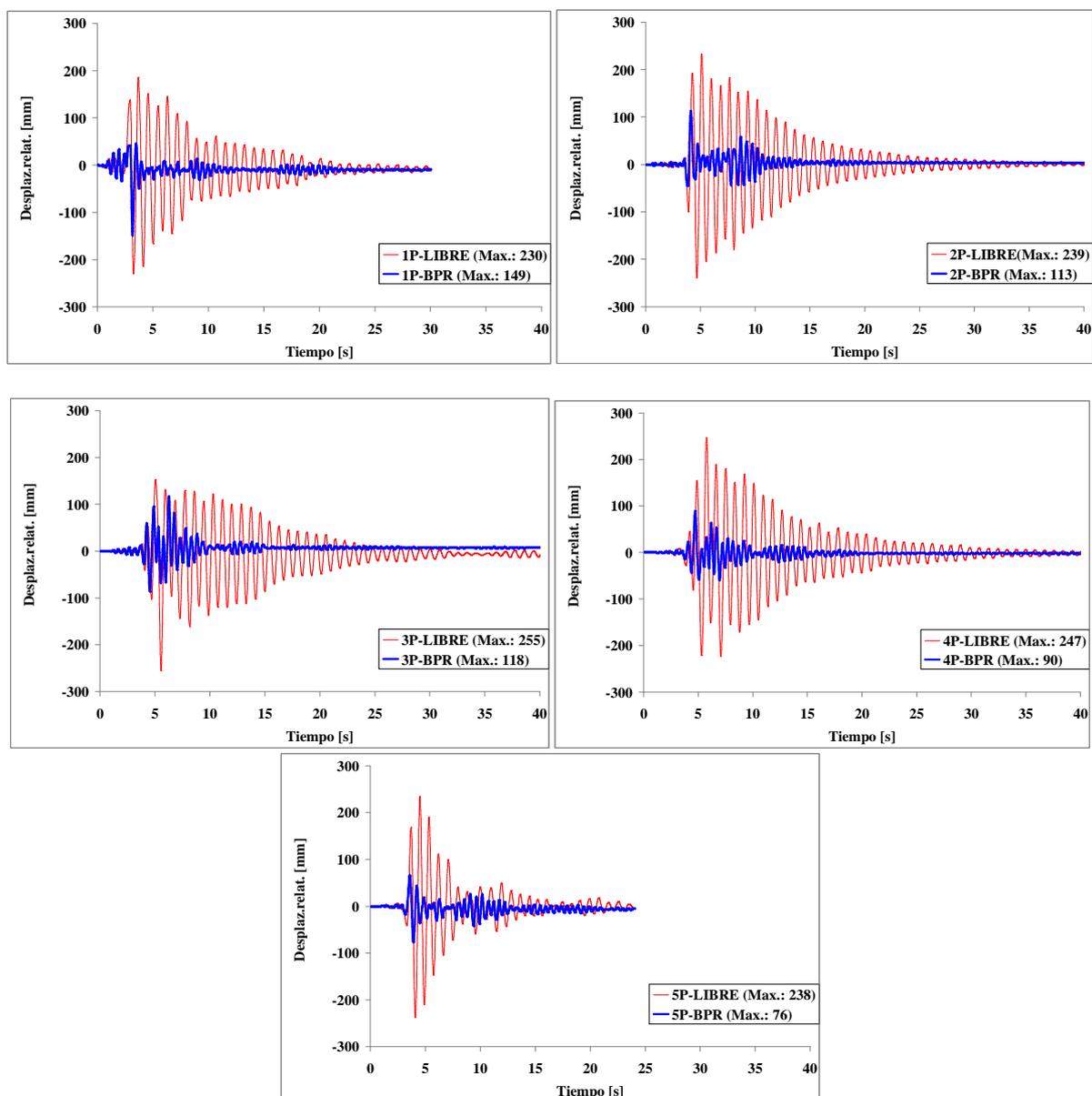


Figura 6-a: Desplazamiento en el tiempo para el techo del pórtico, con/sin BPR (excitación según acelerograma 1p, 2p, 3p, 4p y 5p).

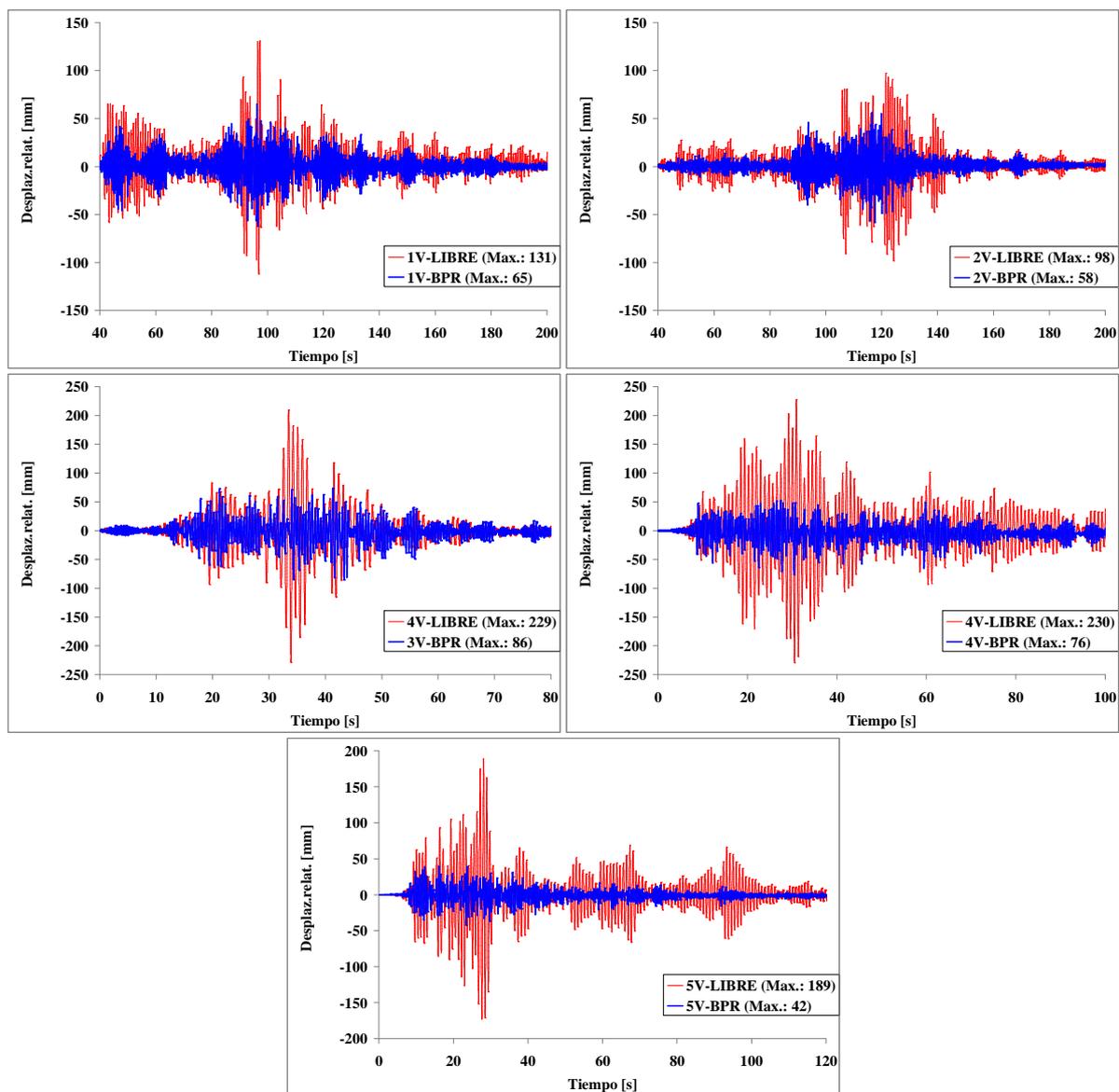


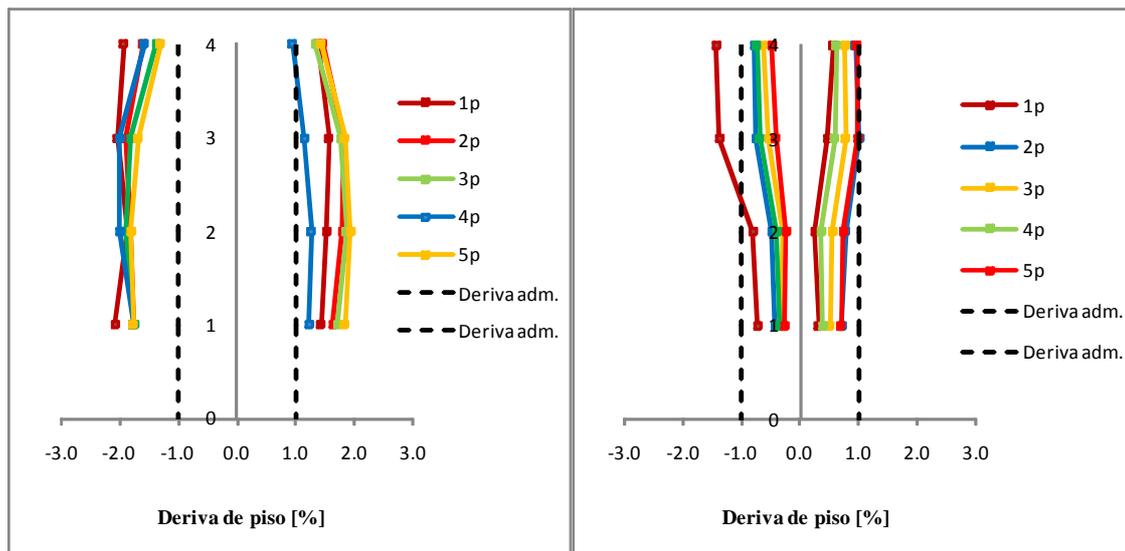
Figura 6-b: Desplazamiento en el tiempo para el techo del pórtico, con/sin BPR (excitación según acelerograma 1v, 2v, 3v, 4v y 5v).

Para cada nivel y para cada acelerograma se determinaron los desplazamientos máximos positivos y negativos. Luego pudo calcularse la reducción porcentual de cada desplazamiento máximo registrado para la estructura con BPR respecto de la estructura libre. Ese porcentaje de reducción se muestra en la Tabla 2. No se observan variaciones significativas según se trate de acelerogramas tipo pulso o tipo vibratorio.

Nivel	Acelerograma			
	Tipo Pulso		Tipo vibratorio	
	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo
4	57,09	64,70	58,06	62,64
3	61,93	70,09	67,27	71,15
2	66,70	76,74	71,72	77,51
1	65,97	76,70	68,12	72,96

Tabla 2: Reducción promedio de desplazamiento para el pórtico con BPR respecto a la estructura libre, en [%].

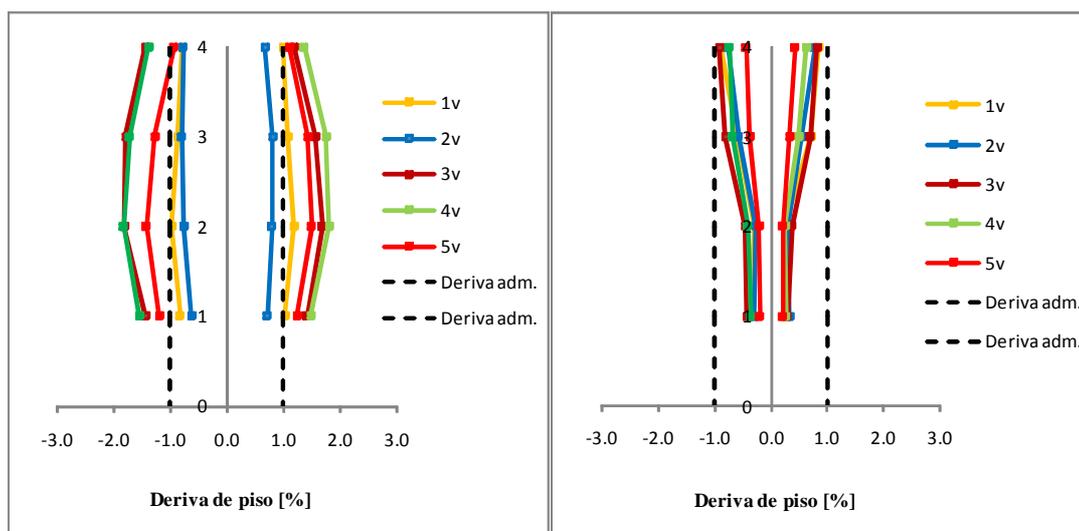
También con los máximos desplazamientos registrados pudo calcularse la deriva de piso, según se presenta en Figura 7. Se observa en esa Figura que las derivas de piso alcanzan valores del 2.0% para la estructura sin BPR, tanto para el caso de terremotos tipo pulso como para los de tipo vibratorio. Para el pórtico con BPR los valores máximos de la deriva de piso no superan el 1.0% con ambos tipos de acelerogramas (excepto en un caso del pórtico bajo terremoto tipo pulso). No se observan tampoco en este caso diferencias significativas según sea el tipo de acelerograma considerado.



i) Estructura libre

ii) Estructura con BPR

Figura 7-a: Deriva de piso para el pórtico sometido a terremoto tipo pulso.



i) Estructura libre

ii) Estructura con BPR

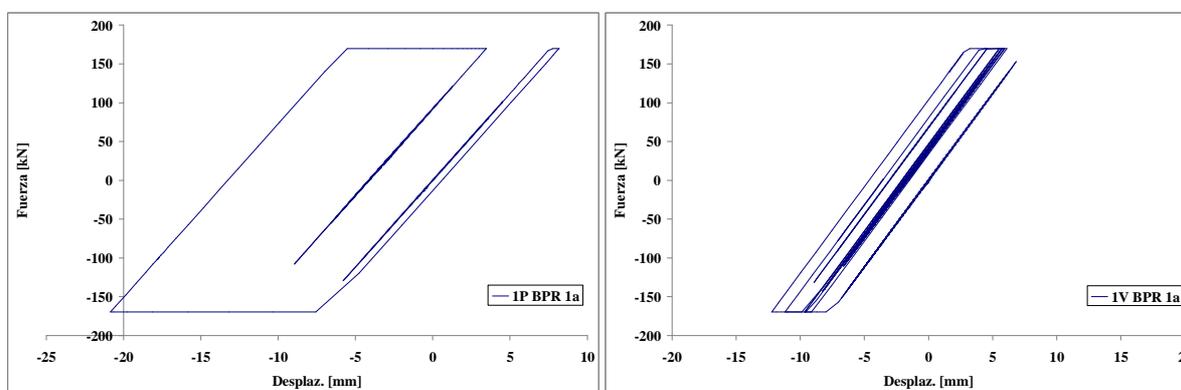
Figura 7-b: Deriva de piso para el pórtico sometido a terremoto tipo vibratorio.

La Tabla 3 presenta, como antes se realizara con los desplazamientos, la reducción porcentual de los momentos flectores en la columna central del pórtico al considerar la estructura con y sin BPR. Tampoco para este parámetro se presenta una variación diferente para ambos tipos de acelerogramas seleccionados.

Tipo Pulso		Tipo vibratorio	
Negativo	Positivo	Negativo	Positivo
73,82	65,12	67,04	75,24

Tabla 3: Reducción promedio del momento flector en la base de la columna central del pórtico con BPR respecto a la estructura libre, en [%].

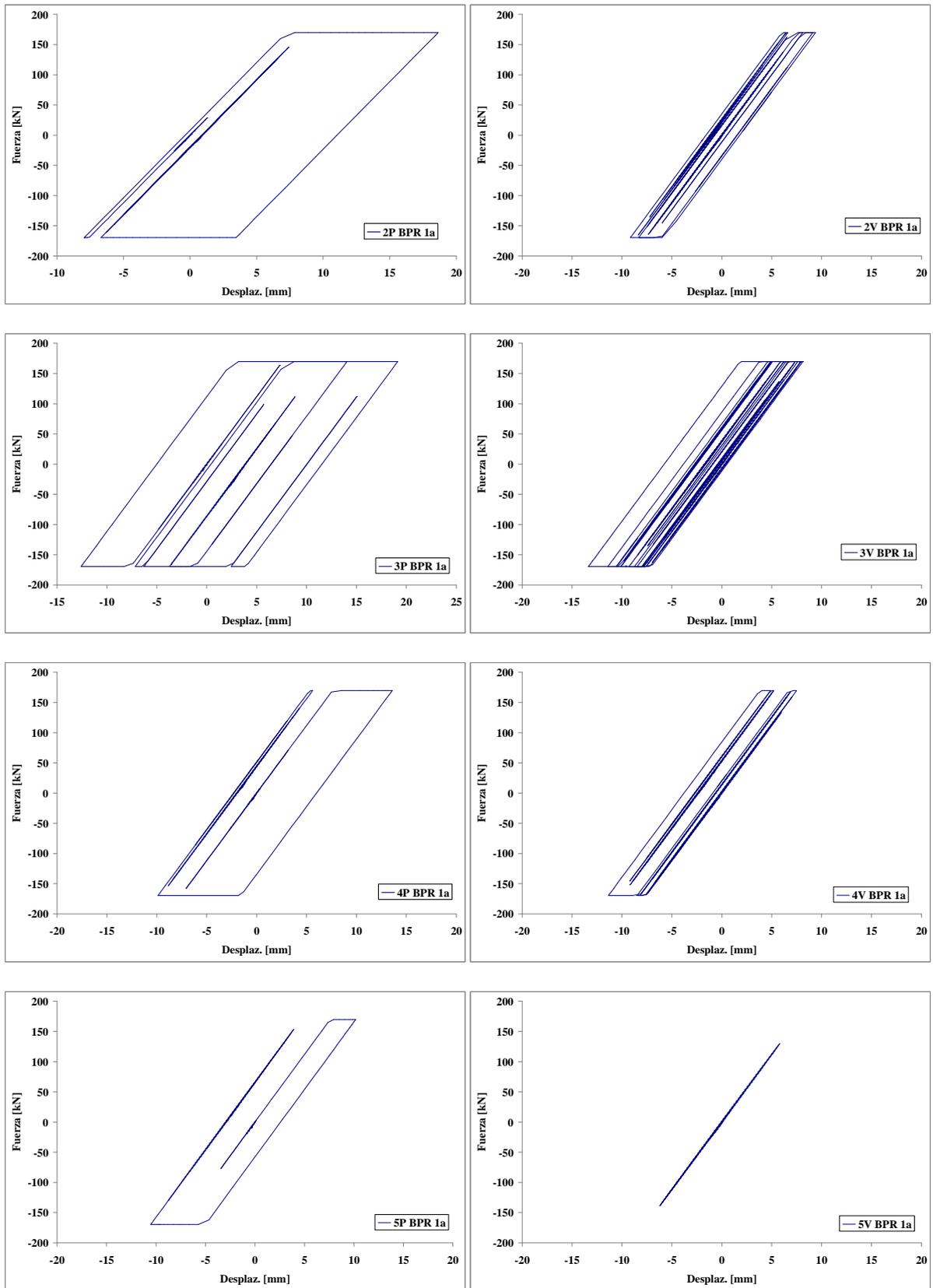
También se han evaluado las curvas fuerza – desplazamiento en las BPR, que muestran la cantidad de energía disipada en cada dispositivo. En la Figura 8 y 9 se presentan estas curvas para una barra del primer y último nivel del pórtico, considerando los dos tipos de acelerogramas en estudio.



i) Para acelerograma tipo pulso

ii) Para acelerograma tipo vibratorio

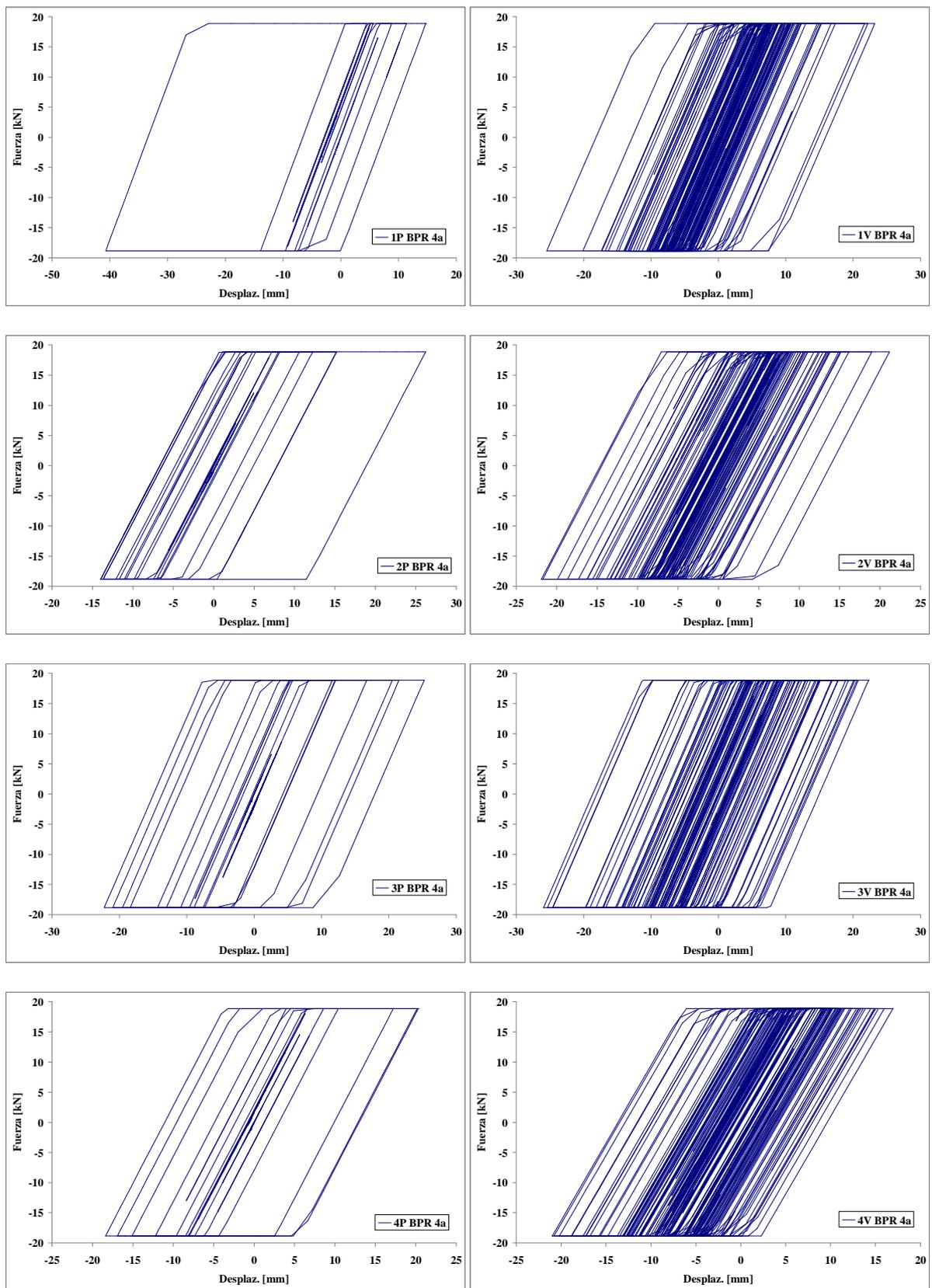
Figura 8-a: Curva fuerza – desplazamiento para una BPR del primer nivel del pórtico.



i) Para acelerograma tipo pulso

ii) Para acelerograma tipo vibratorio

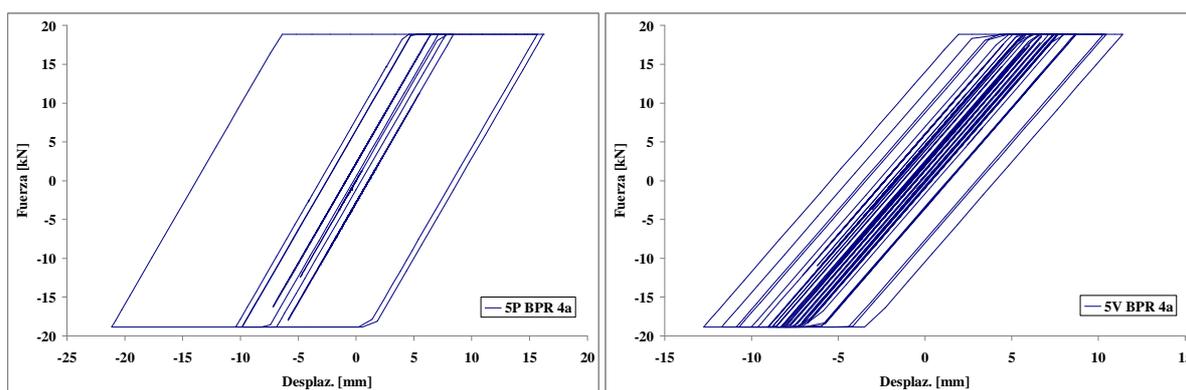
Figura 8-b: Curva fuerza – desplazamiento para una BPR del primer nivel del pórtico.



i) Para acelerograma tipo pulso

ii) Para acelerograma tipo vibratorio

Figura 9-a: Curva fuerza – desplazamiento para una BPR del cuarto nivel del pórtico.



i) Para acelerograma tipo pulso

ii) Para acelerograma tipo vibratorio

Figura 9-b: Curva fuerza – desplazamiento para una BPR del cuarto nivel del pórtico.

5 CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue evaluar numéricamente la influencia del tipo de acelerograma en el análisis dinámico no lineal de historia en el tiempo de un pórtico. Para los acelerogramas relativos a terremotos de falla cercana se presentan pocos pulsos de aceleración que no permiten disipar gran cantidad de energía. Los acelerogramas de tipo vibratorio pueden hacer que la estructura tenga un comportamiento oscilatorio con varios ciclos para la disipación de energía por comportamiento no lineal de alguna de sus partes. Se esperaría entonces que una estructura que incorpora dispositivos especialmente diseñados para disipar energía tuviera un comportamiento diferente según que la excitación le permitirá disipar más o menos energía. Pero para el modelo analizado y el software empleado para su análisis, no se encontraron diferencias significativa en los principales parámetros de respuesta considerados (desplazamientos y derivas de piso máximo en cada nivel, y momento flector en la base de las columnas).

Nuevas investigaciones numéricas y experimentales deberán realizarse para corroborar la conclusión antes detallada. Se debería determinar además la relación entre la cantidad de energía disipada por los dispositivos incorporados a la estructura y la reducción de los parámetros de respuesta de la misma.

REFERENCIAS

- AISC 341, Seismic provisions for structural steel building. *American Institute of Steel Construction, Inc.*, 2005.
- Black, C., Makris, N., Aiken, L., Component testing, seismic evaluation and characterization of buckling restrained braces. *Journal of Structural Engineering ASCE* 130, 329-337, 2004.
- INPRES-CIRSOC 103, Normas Argentinas para Construcciones Sismorresistentes – Parte I Construcciones en general. *Instituto Nacional de Tecnología Industrial*, 2008.
- Palazzo, G., Rehabilitación de pórticos sismorresistentes de hormigón armado mediante barras de pandeo restringido. *Tesis doctoral en la Universidad Tecnológica Nacional*, 2009.
- SeismoStruct, Software applications for analysis of structures subjected to seismic actions. *SeismoSoft Ltd.*, Pavia, Italy, V. 4.1.0., 2010.
- Wada, A. y Nakashima, M., From infancy to maturity of buckling restrained braces research. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canadá,

paper N° 1732, 2004.

Yamada, S.; Suita, K.; Tada, K., Kasai, K; Matsuoka, Y., y Shimada, Y., Collapse experiment on 4-story steel moment frame: Part 1 outline of test results. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2008.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Políticas Universitarias de Argentina, que a través del Programa de Promoción de la Universidad Argentina, financió el Proyecto “Peligrosidad sísmica y rehabilitación sismorresistente de edificios esenciales”, del cuál este trabajo es un resultado parcial.