

CONSIDERACIONES SOBRE EL ANÁLISIS DE PÓRTICOS SISMORRESISTENTES CON BARRAS DE PANDEO RESTRINGIDO

Gustavo Palazzo^a, Pablo Martín^b y Marcelo Guzmán^c

^a*Ceredetec, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273 (5500),
Ciudad de Mendoza, Argentina (gpalazzo@frm.utn.edu.ar)*

^b*Ceredetec, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273 (5500),
Ciudad de Mendoza, Argentina (pablo.martin@frm.utn.edu.ar)*

^c*Ceredetec, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273 (5500),
Ciudad de Mendoza, Argentina (mguzman@frm.utn.edu.ar)*

Palabras claves: BPR, Ingeniería Sísmica, Aislamiento Sísmico.

Abstract. Las barras de pandeo restringido (BPR) son una clase de disipadores de energía por plastificación de metales, que pueden incorporarse como riostras en estructuras nuevas o en aquellas que deben ser rehabilitadas. En estos dispositivos una barra central de acero puede disipar energía a través de ciclos de plastificación estable de tracción – compresión; mientras que el pandeo se evita colocando la barra dentro de un tubo de acero relleno de hormigón. Con estos disipadores se puede alcanzar entonces un comportamiento estructural dúctil, requisito indispensable cuando se requiere que la estructura disipe energía por deformaciones inelásticas (caso de estructuras sismorresistentes). La norma americana ANSI/AISC 341-2005 admite como tipología estructural a los pórticos con BPR, y propone para el análisis estático de las mismas un factor de reducción de las ordenadas espectrales elástica $R = 8$. Mientras que en la pre norma FEMA 356-2000, la ordenada espectral elástica se reduce según factores de modificación de amortiguamiento, que son función de la capacidad de disipación de energía de los dispositivos considerados. La normativa Argentina, en cambio, no contempla requerimientos para estructuras con tecnologías innovadoras como las mencionadas. A los efectos de realizar contribuciones en esta temática, se analizan en este trabajo diferentes metodologías de análisis para la tipología estructural de referencia. El estudio se particulariza para un pórtico metálico a escala, de un vano y cinco niveles, con BPR. Para éstas se plantean diseños y metodologías de análisis según las normas americanas mencionadas, tomando como base los espectros de diseño del Reglamento INPRES-CIRSOC 103 vigente. Luego se realizan, mediante un programa de elementos finitos de propósito general, análisis dinámico no lineal de la estructura con BPR sometida a 4 acelerogramas correspondientes a terremotos destructivos. Para esta última metodología de análisis, se compara también el desempeño de la estructura cuando se mantiene la rigidez de las BPR, pero se varía su capacidad de disipación de energía (variando el área de la sección transversal y la longitud de la zona de plastificación de los disipadores). En las conclusiones se proponen recomendaciones para el análisis de pórticos con BPR, que podrían implementarse en las actualizaciones del Reglamento Sismorresistente Argentino.

1 INTRODUCCIÓN

La ingeniería sísmica ha realizado importantes avances en las últimas décadas, desarrollando una serie de conceptos innovadores que permiten proteger de mejor manera a las construcciones, sus ocupantes y contenidos, frente a la acción sísmica u otras del tipo dinámico. La aplicación de estos conceptos se materializa en la incorporación de distintos dispositivos en las construcciones. Éstos modifican las características de la respuesta de la misma, con objeto de mejorar su capacidad frente a sismos destructivos (Aiken, 1996, Soong y Dargush, 1997, Wada *et al.*, 2004).

Las nuevas tecnologías pueden clasificarse, siguiendo a Wada *et al.* (2004), en: i) sistemas de aislamiento sísmico; ii) sistemas de disipación pasiva de energía; iii) sistemas de control activo y semiactivos; y iv) sistemas de control híbrido.

Los sistemas de disipación pasiva de energía permiten mejorar el desempeño de una estructura sometida a terremotos, incorporando dispositivos destinados a disipar energía en forma controlada. De esta manera pueden disminuirse o eliminarse en la estructura principal las zonas diseñadas para la ocurrencia de deformaciones plásticas durante un terremoto destructivo. Se logra entonces reducir o anular el daño en la estructura principal, concentrando el mismo en los disipadores de energía, los cuales pueden reemplazarse luego de un evento sísmico importante.

Existe una gran variedad de disipadores de energía, los cuales pueden clasificarse en (Soong y Dargush, 1997): i) disipadores hysteréticos; ii) disipadores viscoelásticos (sólido y líquido); y iii) disipadores de fluido viscoso.

Los disipadores hysteréticos poseen, ante cargas cíclicas, un comportamiento elasto-plástico (disipadores por plastificación de metales) o plástico rígido (disipadores de fricción). Disipan energía por deformaciones inelásticas de los metales que lo constituyen. Y en esta tipología se cuenta con: i) pórticos de plastificación; ii) disipadores por corte; iii) dispositivos de placas; y iv) dispositivos de barras (en los que están incluidas las BPR consideradas en este trabajo).

Incorporadas como riostras en pórticos sismorresistentes, las BPR permiten disipar energía bajo esfuerzos de tracción y compresión en forma estable, y sin degradación de la resistencia.

Los pórticos metálicos que incorporan este tipo de riostras están incluidos en las tipologías admisibles de la norma americana AISC 341 (2005) y ASCE/SEI (2005), y constituyen una mejora respecto de los pórticos especiales arriostrados concéntricamente. Estos últimos también están incluidos en la norma Argentina INPRES-CIRSOC 101 – Parte IV (2000).

Los disipadores en consideración, como se observa en la Figura 1, están compuestos en su configuración clásica por: i) una barra de acero dúctil, diseñada para que pueda desarrollar comportamiento plástico bajo esfuerzos de tracción y compresión; ii) un tubo externo relleno de mortero u H^o para evitar el pandeo de la barra central; y iii) una capa deslizante sobre la barra central para evitar la transmisión de esfuerzos al tubo externo relleno y permitir sus deformaciones transversales en compresión por el efecto Poisson.

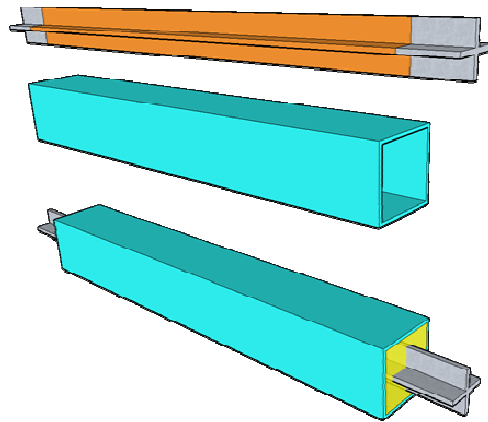


Figura 1 Componentes principales de una BPR típica

En las últimas décadas se han realizado acciones para incorporar en los códigos sismorresistentes procedimientos de análisis y diseño de estructuras con sistemas de disipación pasiva de energía (Hanson y Soong, 2001). Así en Estados Unidos se consideran esta clase de nuevas tecnologías en: i) el FEMA 356 (2000) para la rehabilitación de estructuras existentes; ii) el FEMA 450 (2003) para construcciones nuevas; y iii) el AISC 341 (2005) para pórticos con BPR.

En lo referente al análisis de estructuras con disipadores mediante métodos lineales, en el FEMA 356 (2000) se considera la reducción de la respuesta mediante coeficientes de amortiguamiento B . Se disminuye entonces el corte basal para el procedimiento estático lineal, o se modifica el espectro de respuesta para el método modal espectral. También se consideran estos coeficientes en la determinación de los desplazamientos de techo que participan en el cálculo de los desplazamientos de cada piso.

Estos coeficientes B tienen en cuenta la disipación de energía proporcionada por los disipadores, y se determinan a partir del amortiguamiento efectivo β_{ef} dado por la ec. (1).

$$\beta_{ef} = \beta_1 + \frac{\sum_j W_j}{4 \pi W_k} \quad (1)$$

En la ec.(1) anterior β_1 es el amortiguamiento de la estructura principal, W_j es el trabajo realizado por el dispositivo j en un ciclo completo correspondiente al desplazamiento δ_i de nivel, \sum_j extiende la suma a todos los dispositivos j , y W_k es la energía de deformación máxima en la estructura calculada con la ec. (2) en función las fuerzas de inercia en el nivel i , F_i , extendiendo la suma a todos los niveles.

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_i F_i \delta_i \quad (2)$$

Calculado el β_{ef} pueden luego determinarse los coeficientes de amortiguamiento B en una tabla del documento. Así, si no existiera en la estructura ningún sistema de disipación de energía (caso de estructuras convencionales), $\beta_{ef} = \beta_1$ y $B = 1$. Para $\beta_{ef} \leq 100$ se obtienen de las tablas mencionadas $B = 4$.

Al igual que en el FEMA 356 (2000), se plantea en el FEMA 450 (2003) la reducción de la respuesta obtenida mediante análisis lineales por los coeficientes de amortiguamiento B, que se obtienen de tabla como función del amortiguamiento efectivo β_{ef} . Este amortiguamiento β_{ef} se calcula según este documento como una combinación de 3 componentes, de acuerdo con la ec. (3). Debe determinarse este parámetro para la demanda de ductilidad debida al terremoto de diseño y al máximo terremoto considerado.

$$\beta_{ef} = \beta_1 + \beta_v \sqrt{\mu} + \beta_H \quad (3)$$

En la ec.(3) anterior:

- μ : Demanda de ductilidad del sistema sismorresistente.
- β_1 : Componente de amortiguamiento debida a la disipación de energía inherente a los elementos de la estructura principal hasta que se alcanza el desplazamiento de fluencia del sistema sismorresistente, excluyendo el amortiguamiento viscoso agregado. Se asume un valor típico del 5% para esta componente en el caso de estructura de H° A° sin amortiguadores.
- β_v : Componente de disipación viscosa de energía debida al sistema de disipación de energía incorporado en la estructura. Este parámetro se toma igual a cero para dispositivos de disipación de fricción o de plastificación de metales. Se calcula para otros dispositivos, en cada modo m, según la ec.(4), (ídem segundo sumando de la ec. (1) en el FEMA 356, 2000).

$$\beta_{vm} = \frac{\sum_j W_{mj}}{4 \pi W_{mk}} \quad (4)$$

Donde W_{mj} representa el trabajo realizado por el dispositivo j en un ciclo completo de respuesta dinámica correspondiente al modo de vibración m de la estructura, para el desplazamiento modal δ_{mi} de nivel i; y W_m es la máxima energía de deformación en el modo de vibración m. Este parámetro que se calcula con la ec.(5) en función de las fuerzas de inercia F_i del modo m en el nivel i, y del desplazamiento δ_{mi} del nivel i en el modo m.

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_i F_{im} \delta_{im} \quad (5)$$

La fracción de amortiguamiento crítico β_{vm} para cada modo m debe ajustarse por el cambio en el período de la estructura debido a la plastificación esperada del sistema sismorresistente. Esto se hace en el FEMA 450 (2005) multiplicando β_{vm} por $\sqrt{\mu}$ (ver ec. 3).

- β_H : Componente de amortiguamiento debido al comportamiento histerético post fluencia del sistema sismorresistente y de los elementos del sistema de amortiguamiento. Este

parámetro de amortiguamiento debe basarse en resultados de ensayos o de análisis, o calcularse con la ec (6).

$$\beta_H = q_H (0.64 - \beta_I) \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) \quad (6)$$

Donde q_H es un factor de ajuste del ciclo histerético, que tiene en cuenta el *pinching* o cualquier otro efecto que reduce el área del ciclo histerético durante los ciclos repetidos causados por la demanda sísmica. Si no se tienen resultados de análisis o de ensayos, el FEMA 450 (2003) propone una expresión para determinar su magnitud.

En el AISC 341 (2005) no se reduce el espectro de diseño en función del amortiguamiento equivalente, sino que se fija un valor para el coeficiente de modificación de respuesta sísmica igual a 8 para pórticos con BPR donde las uniones vigas – columnas son resistentes a momentos, e igual a 7 si los mismos no tienen ese tipo de uniones. Teniendo en cuenta que en estos sistemas se espera que puedan soportar deformaciones inelásticas significativas, se ha fijado como valor de R el máximo admitido en ASCE / SEI 7 (2005).

Teniendo en cuenta los procedimientos lineales antes descriptos para el análisis de estructuras con sistemas de disipación pasiva de energía, es necesario establecer el grado de aproximación que podría alcanzarse con la aplicación de los mismos. Para ello, en este trabajo se realizan análisis dinámicos no lineales de historia en el tiempo de un pórtico metálico con BPR. Para evaluar la influencia de la cantidad de energía disipada en los parámetros de respuesta de la estructura se consideran en el pórtico diagonales con igual rigidez pero con distintas capacidades de disipación de energía.

2 SIMULACIONES NUMÉRICAS REALIZADAS

Para el estudio numérico se consideró un pórtico espacial de acero, de un vano y 5 niveles, evaluado por Hanson y Soong (2001) con y sin disipadores viscoelásticos y friccionales, según se muestra en la Figura 2.

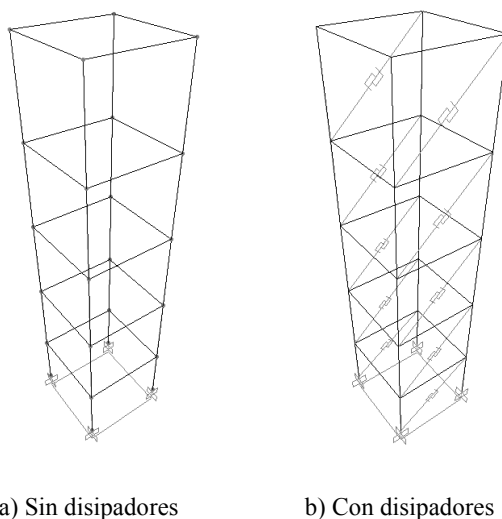


Figura 2: Esquema de pórtico metálico analizado

Este pórtico tiene una altura total de 5.69 m, con altura de 0.91 m para el primer nivel y de 1.19 para los 4 niveles restantes. Posee un vano en cada dirección de 1.32 m de luz.

En las ecs. (7), (8) y (9) se indican las matrices de masa M y rigidez K dadas por Hanson y Soong (2001), que se consideraron para componer el modelo numérico de la estructura sin BPR.

$$M \text{ [kg]} = \begin{bmatrix} m_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 594.00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 575.86 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 575.86 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 575.86 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 507.84 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_5 & -k_5 & 0 & 0 & 0 \\ -k_5 & k_5 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 \\ 0 & -k_4 & k_4 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 + k_2 & -k_2 \\ 0 & 0 & 0 & -k_2 & k_2 + k_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$K \text{ [kN/m]} = \begin{bmatrix} 2581.36 & -2581.36 & 0 & 0 & 0 \\ -2581.36 & 5162.70 & -2581.36 & 0 & 0 \\ 0 & -2581.36 & 5162.70 & -2581.36 & 0 \\ 0 & 0 & -2581.36 & 5162.70 & -2581.36 \\ 0 & 0 & 0 & -2581.36 & 8306.20 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Según se describe en Palazzo et al. (2008), se diseñaron para esta estructura BPR a los efectos de alcanzar en cada nivel desplazamientos similares a los obtenidos por Hanson y Soong (2001) en la estructura libre y con disipadores viscoelásticos. En la Tabla 1 se describen los parámetros de las BPR adoptadas.

Tabla 1 Parámetros geométricos y mecánicos para las BPR adoptadas

Nivel	Longitudes [cm]		Diámetros [mm]		P_y [kN]	k_{c-BPR} [MN/m]
	L_{BPR-T}	L_{BPR-y}	D_{BPR-e}	d_{BPR-y}		
1	160.64	136.62	5.5	4.5	5.23	2.08
2	178.04	147.64	8.0	6.5	11.01	3.98
3	178.04	150.43	7.0	5.7	8.47	3.04
4	178.04	154.90	5.8	4.8	5.86	2.09
5	178.04	153.12	4.3	3.5	3.15	1.13

Para el análisis estructural se adoptó en este estudio el método de historia en el tiempo según SAP2000 (2002), considerando el comportamiento elastoplástico de las BPR según el

modelo simplificado de fuerza – desplazamiento de Bouc-Wen (también descrito en Palazzo et al., 2008).

En la Figura 3 se comparan los valores máximos de desplazamientos para el terremoto de El Centro escalado obtenidos por Hanson y Soong (2001), indicado como HyS(2001), y según el modelo en SAP2000 (2002). Esa comparación se realiza para la estructura libre, así como para el pórtico con disipadores viscoelásticos y con BPR.

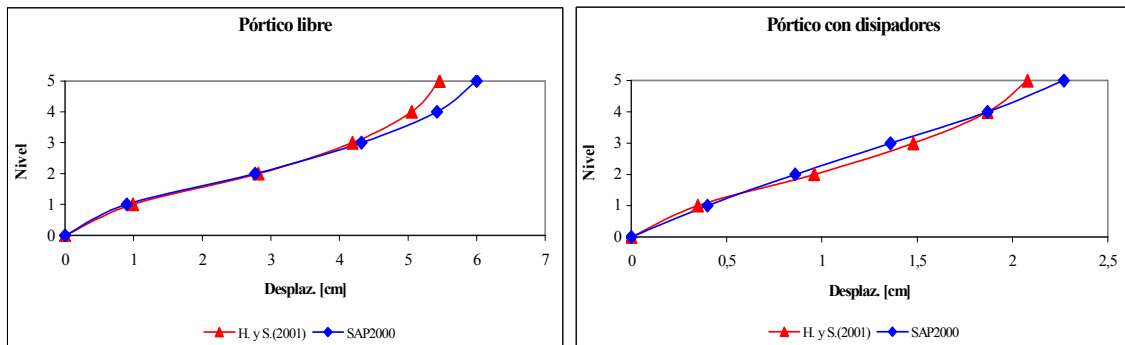


Figura 3 Esquema de pórtico metálico analizado

El pórtico libre posee un período fundamental de 0.30 s, y de 0.21 s cuando se le incorporan las BPR.

Para este estudio, además del acelerograma del El Centro escalado se han considerado en los análisis dinámicos de historia en el tiempo los registros que se describen en la Tabla 2. Se indica en la Tabla mencionada: el nombre del terremoto, la denominación dada en este trabajo, la fecha de ocurrencia, la estación seleccionada, la componente adoptada, la magnitud en escala Mercalli, la distancia a la falla, y el pico de aceleraciones PGA. Para el acelerograma del El Centro se indican en la Tabla sus parámetros sin escalar.

Tabla 2 Parámetros de los acelerogramas seleccionados

Terremoto	Denom.	Fecha	Estación	Comp.	Mag.	Distancia epicentral [km]	PGA [g]
Cape Mendocino	C.M.-1	25/04/92	Cape Mendocino	N-S	7.1	8.5	1.50
San Juan	Caucete	23/11/77	INPRES	E-W	7.4	80	0.19
Imperial Valley	ElCentro	19/05/40	El Centro	180°	7.0	8.3	0.31
Kobe	Kobe	16/01/95	KJMA	N-S	6.9	0.6	0.82

También como se describe en Palazzo et al. (2008), y a los efectos de verificar el grado de aproximación logrado con el modelo de Bouc-Wen para las BPR en SAP2000 (2002), se compararon parámetros de respuesta para simulaciones de la estructura en el programa de elementos finitos de propósito general ABAQUS (2003). Así en la Figura 4; Figura 5 y Figura 6 siguientes se muestran las historias de los desplazamientos, los diagramas fuerza – desplazamiento, y las historias de la energía disipada logradas con ambos programas. Se concluye que en general se tienen respuestas similares.

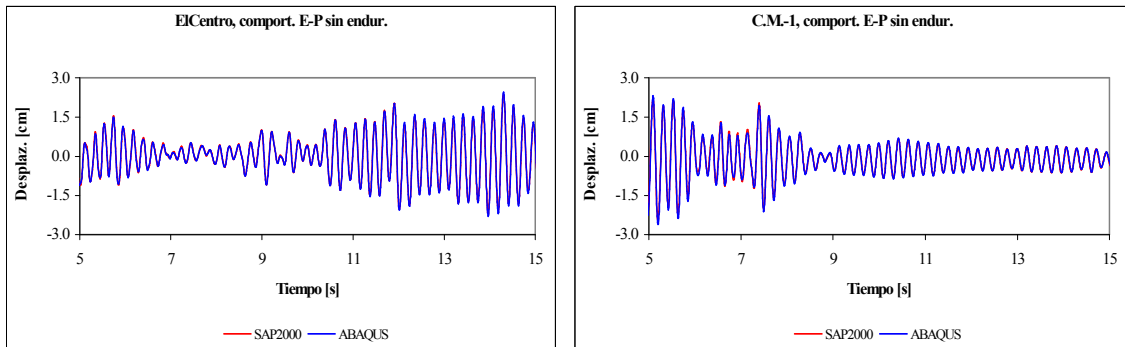


Figura 4 Historia de los desplazamientos en el pórtico metálico con BPR, excitado con los acelerogramas de El Centro y C.M.-1, según SAP2000 y ABAQUS

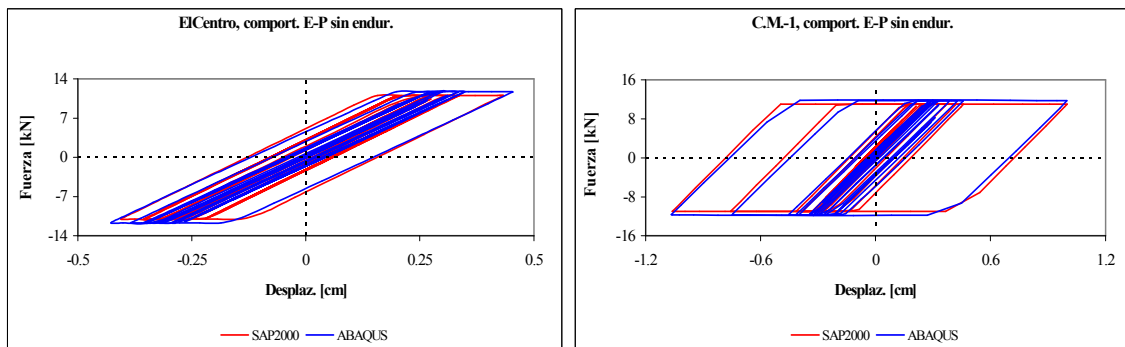


Figura 5 Diagramas fuerza - desplazamiento en la BPR del 2do nivel del pórtico metálico, excitado con los acelerogramas de El Centro y C.M.-1, según SAP2000 y ABAQUS

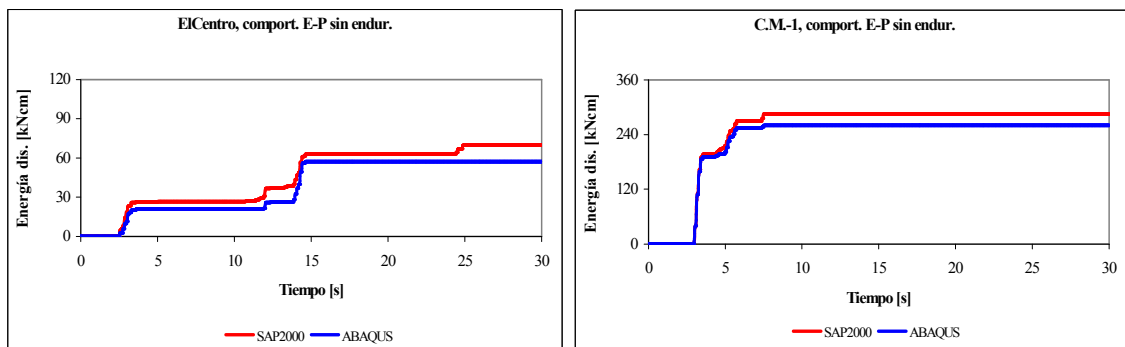


Figura 6 Historia de la energía disipada en el pórtico metálico con BPR, excitado con los acelerogramas de El Centro y C.M.-1, según SAP2000 y ABAQUS

3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PÓRTICO METÁLICO CON 4 TIPOS DE RIOSTRAS

De acuerdo a lo enunciado en la introducción, para estudiar la influencia de la cantidad de energía disipada en las riostras del pórtico sobre los parámetros de respuesta de la estructura, se consideraron con 3 tipos de diagonales (además de las BPR definidas en Tabla 1). A los efectos de evaluar solamente la influencia de esa energía, se mantuvieron constantes las

rigideces de las BPR consideradas originalmente. Así se analizó la estructura teniendo en cuenta: diagonales con comportamiento elástico (Elástica) y BPR que disipan menor cantidad de energía que los disipadores originales (BPR-1 y BPR-2). En la Tabla 3 se indican las principales características de estas diagonales, mientras que los parámetros geométricos y mecánicos de las mismas se detallan en Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 3 Principales características de las diagonales modificadas en el pórtico metálico

Denom.	Características
Elástica	Diagonales consideradas con comportamiento elástico.
BPR-1	Import ante reducción de $L_{BPR,y}$ respecto a las BPR originales.
BPR-2	Igual $L_{BPR,y}$ que la BPR-1, pero se reduce la tensión de fluencia a un valor f_y de 240 MPa.

Tabla 4 Parámetros geométricos y mecánicos para las BPR-1.

Nivel	Longitudes [cm]		Diámetros [mm]		P_y [kN]	$k_{e,BPR}$ [MN/m]
	$L_{BPR,T}$	$L_{BPR,y}$	D_{BPR-e}	d_{BPR-y}		
1	160.64	5.69	4.6	3.8	3.73	2.08
2	178.04	9.84	6.8	5.6	8.00	3.98
3	178.04	7.52	5.9	4.8	6.08	3.04
4	178.04	5.16	4.9	4.0	4.15	2.09
5	178.04	2.78	3.6	2.9	2.22	1.13

Tabla 5: Parámetros geométricos y mecánicos para las BPR-2.

Nivel	Longitudes [cm]		Diámetros [mm]		P_y [kN]	$k_{e,BPR}$ [MN/m]
	$L_{BPR,T}$	$L_{BPR,y}$	D_{BPR-e}	d_{BPR-y}		
1	160.64	5.69	4.6	3.8	2.71	2.08
2	178.04	9.84	6.8	5.6	5.82	3.98
3	178.04	7.52	5.9	4.8	4.42	3.04
4	178.04	5.16	4.9	4.0	3.01	2.09
5	178.04	2.78	3.6	2.9	1.61	1.13

3.1 Respuestas de BPR aisladas

A los efectos de comparar la energía disipada en los dispositivos seleccionados, se muestran en la Figura 7 los diagramas fuerza – desplazamiento para las BPR del segundo nivel del pórtico metálico. Como acción actuante se consideraron las historias de desplazamientos presentadas en Figura 8. Estos resultados corresponden al análisis *Dinamic/Implicit* realizado en ABAQUS (2003).

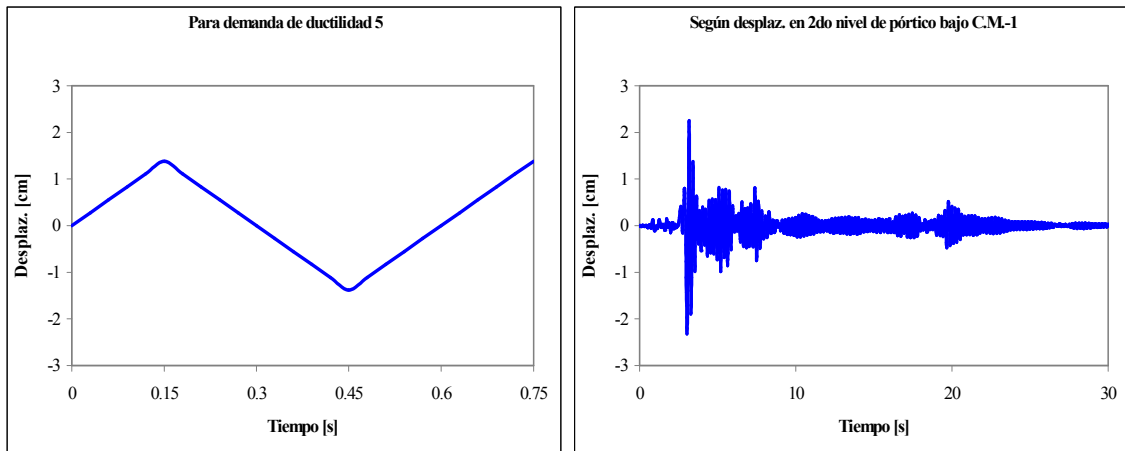


Figura 7 Historia de desplazamiento aplicada a la BPR del 2do nivel del pórtico metálico (aislada)

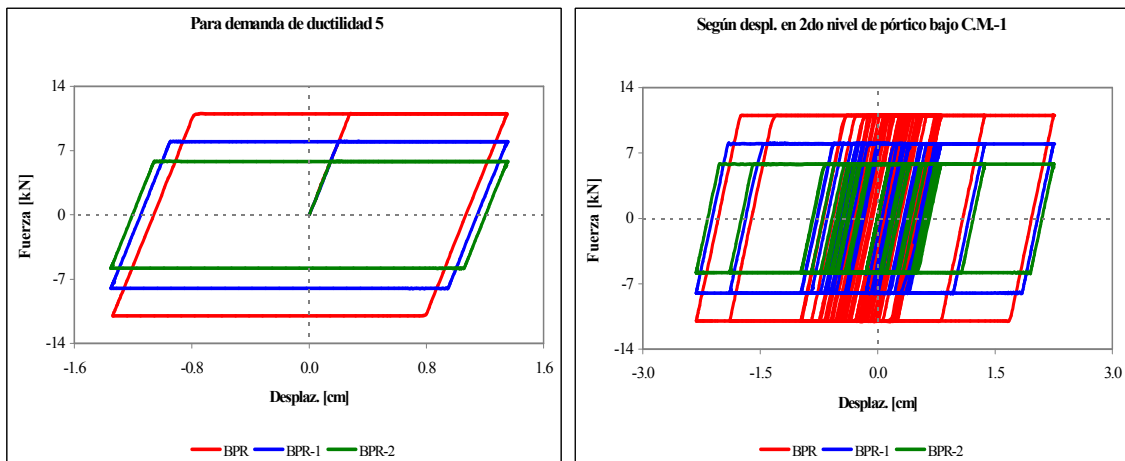


Figura 8 Diagramas fuerza-desplazamiento para distintas BPR del 2do nivel del pórtico metálico

Se destaca que el análisis de las BPR-1 y BPR-2 bajo los desplazamientos correspondientes al acelerograma C.M.-1 presentó problemas numéricos. Por ello, sólo se obtuvo en estos casos la respuesta para los primeros 5.7 s.

La historia de energía disipada para el análisis antes mencionado se presenta en la Figura 9, mientras que el porcentaje de energía disipada por las BPR-1 y BPR-2 respecto a las BPR originales se muestra en la Figura 10.

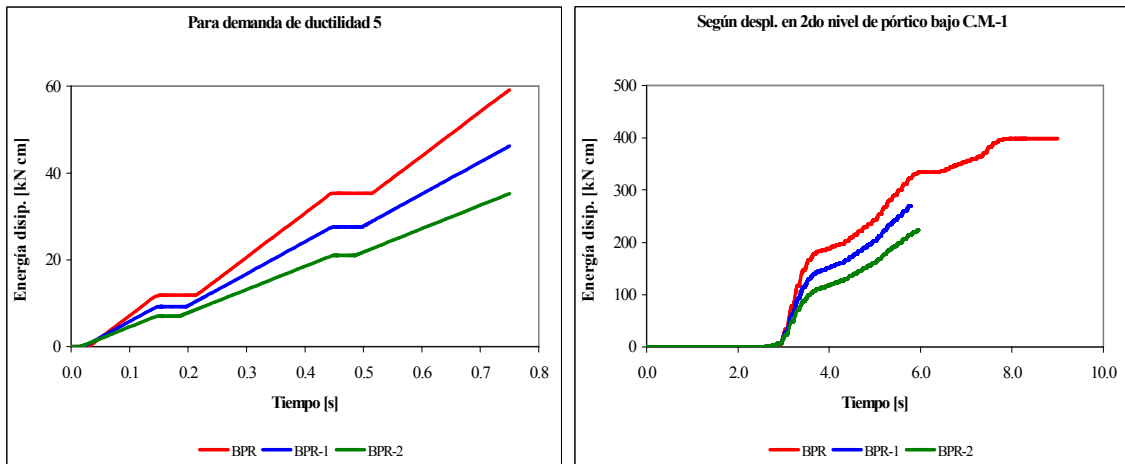


Figura 9: Historia de la energía disipada para distintas BPR del 2do nivel del pórtico metálico

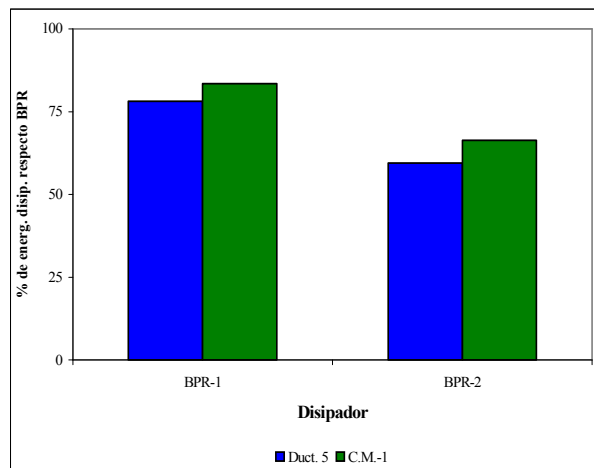


Figura 10: Variación de la energía disipada en la BPR-1 y BPR-2 del nivel 2 del pórtico metálico, respecto a las BPR original

Se han propuesto entonces para los estudios de este trabajo diagonales con igual rigidez que las BPR pero que: i) No disipan energía (elástica); ii) Disipan aprox. un 20% menos de energía (BPR-1); iii) Disipan aprox. un 40% menos de energía (BPR-2).

3.2 Respuestas en el pórtico metálico.

Para el pórtico metálico con los 3 tipos de diagonales definidos en la Tabla 3 se realizaron análisis dinámicos de historia en el tiempo en SAP2000 (2002), y se compararon parámetros de respuesta con las BPR originales.

En las Figura 11 a Figura 16 se compara, para cada tipo de diagonal y la BPR original, los desplazamientos máximos, y la distorsión horizontal máxima para cada nivel del pórtico. Luego en la Figura 17 y Figura 18 se hace una comparación entre diagramas fuerza - desplazamiento para las distintas BPR en el nivel 2 del pórtico metálico.

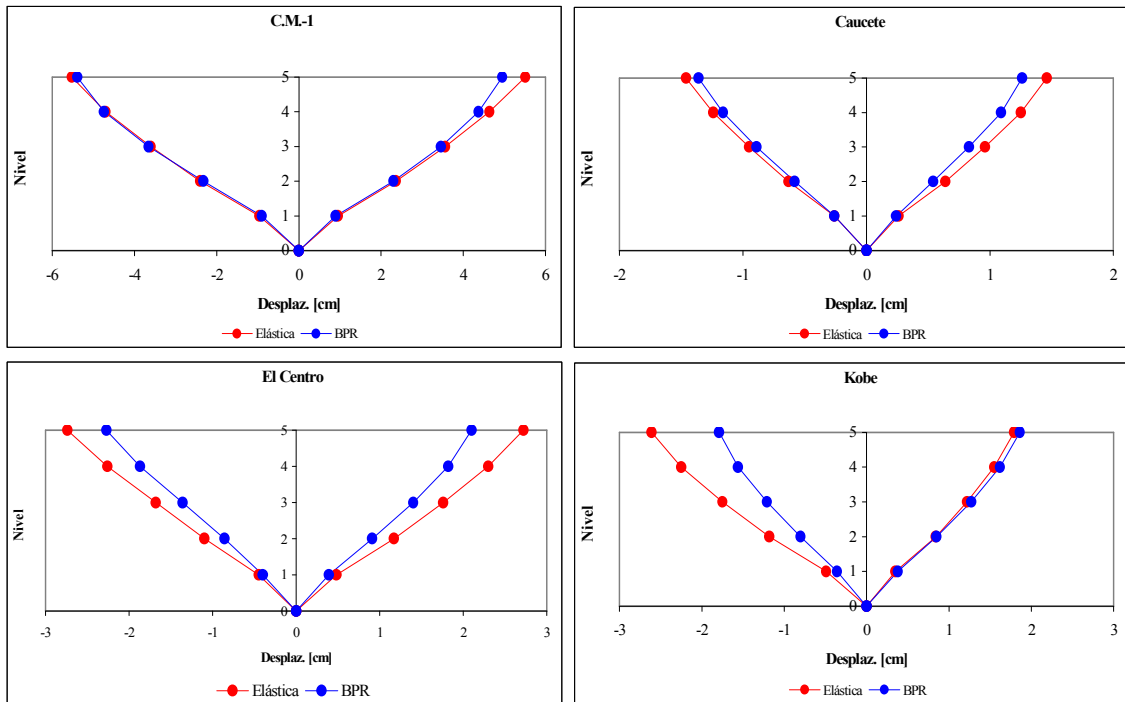


Figura 11 Desplazamientos máximos para cada nivel del pórtico metálico (riostra Elástica y BPR)

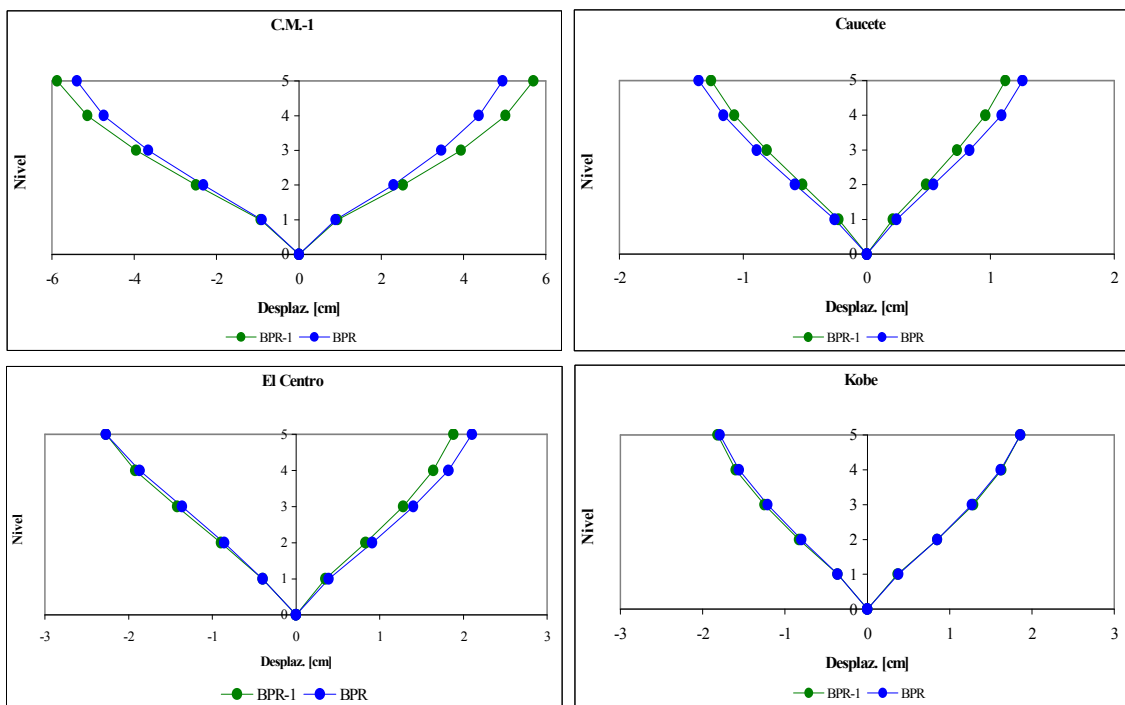


Figura 12 Desplazamientos máximos para cada nivel del pórtico metálico (riostra BPR-1 y BPR)

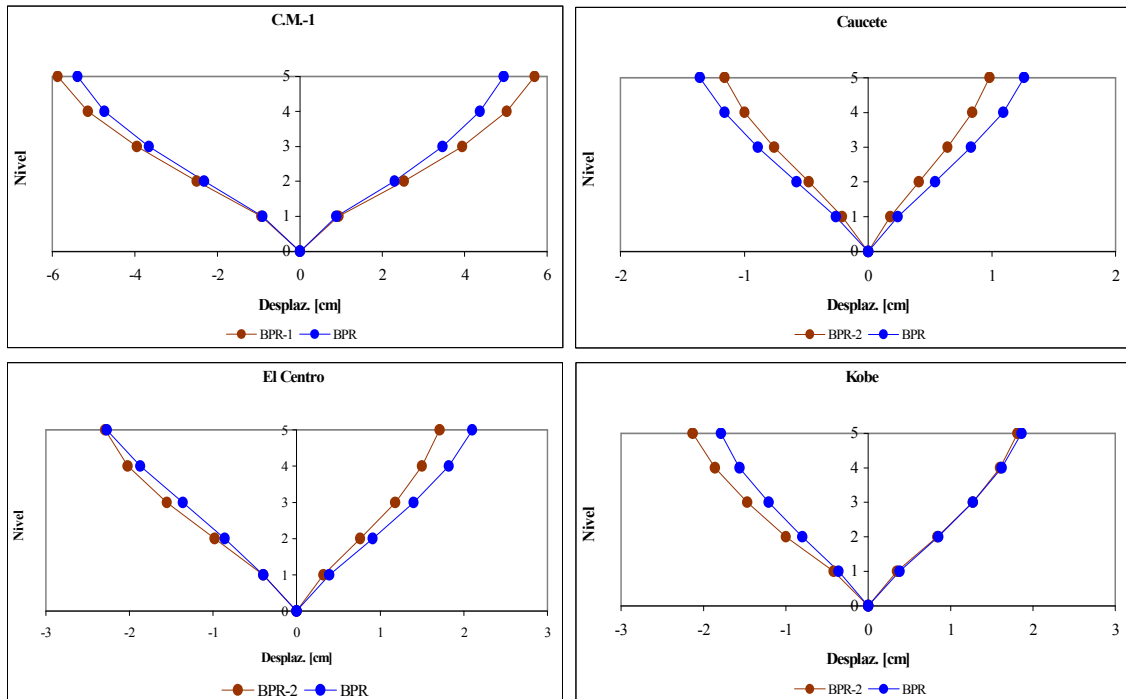


Figura 13: Desplazamientos máximos para cada nivel del pórtico metálico (riostra BPR-2 y BPR)

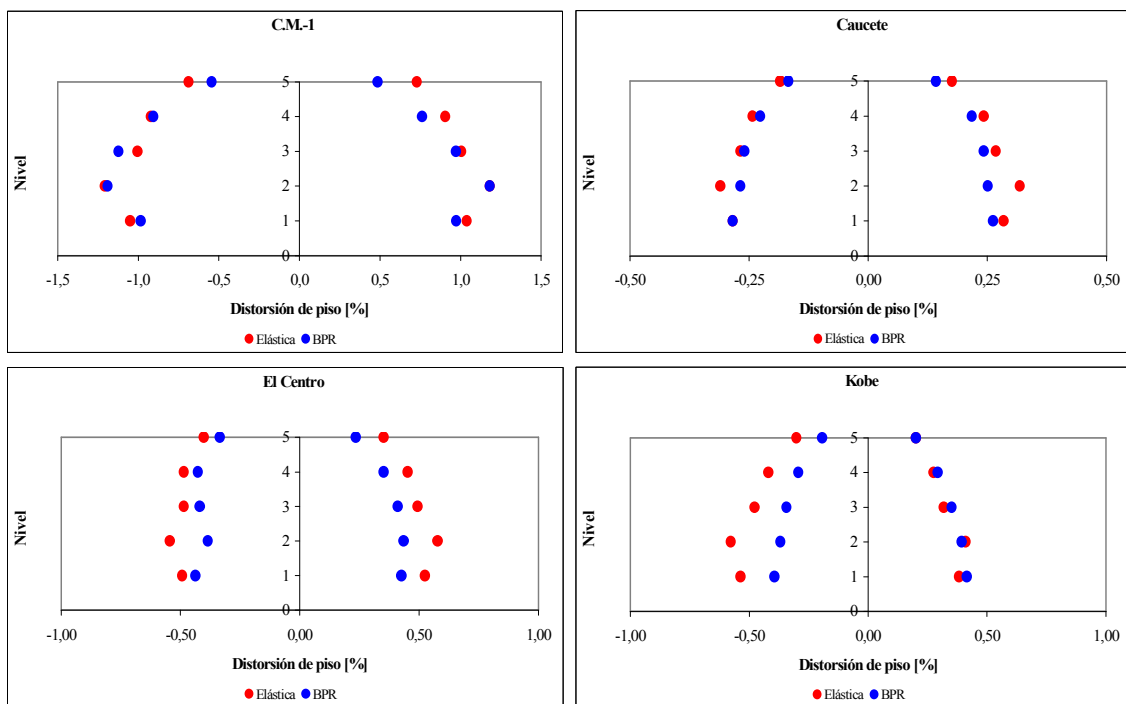


Figura 14: Distorsión horizontal máxima en el pórtico metálico (riostra Elástica y BPR)

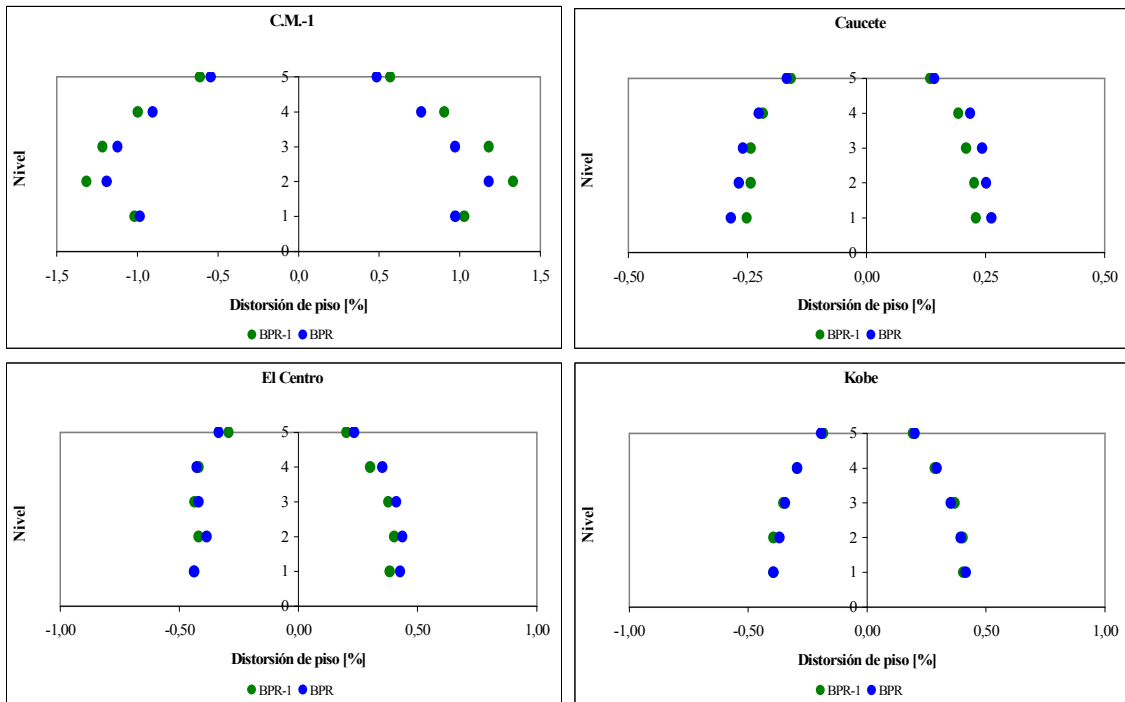


Figura 15: Distorsión horizontal máxima en el pórtico metálico (riostra BPR-1 y BPR)

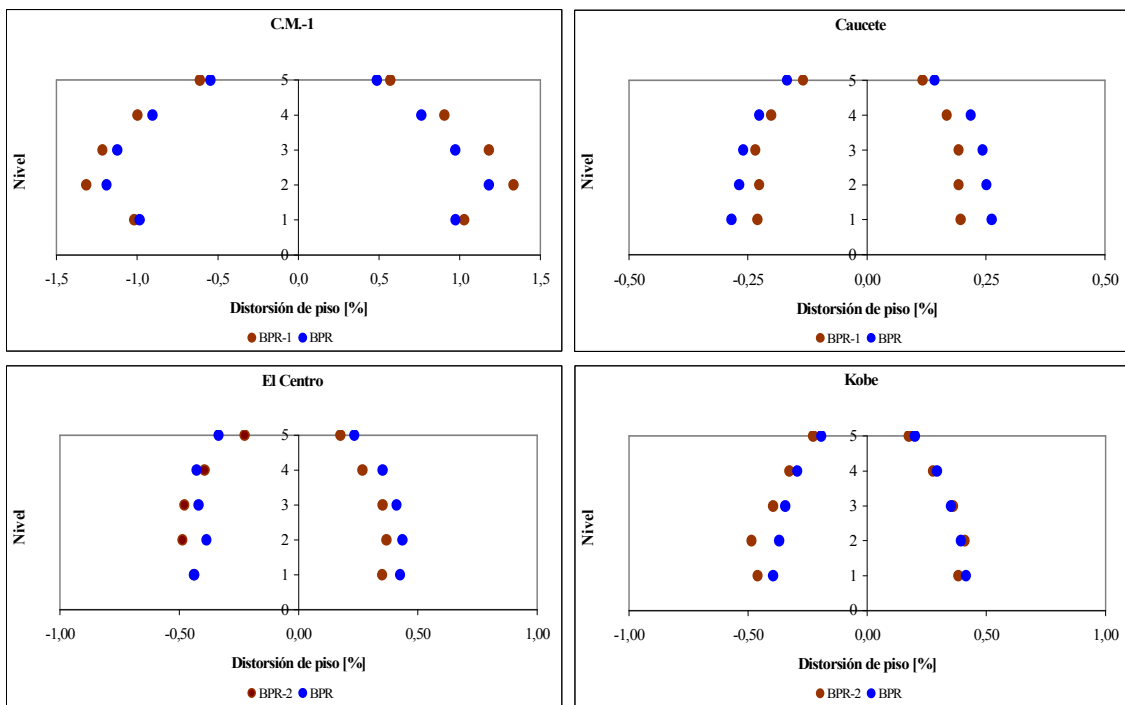


Figura 16 Distorsión horizontal máxima en el pórtico metálico (riostra BPR-2 y BPR)

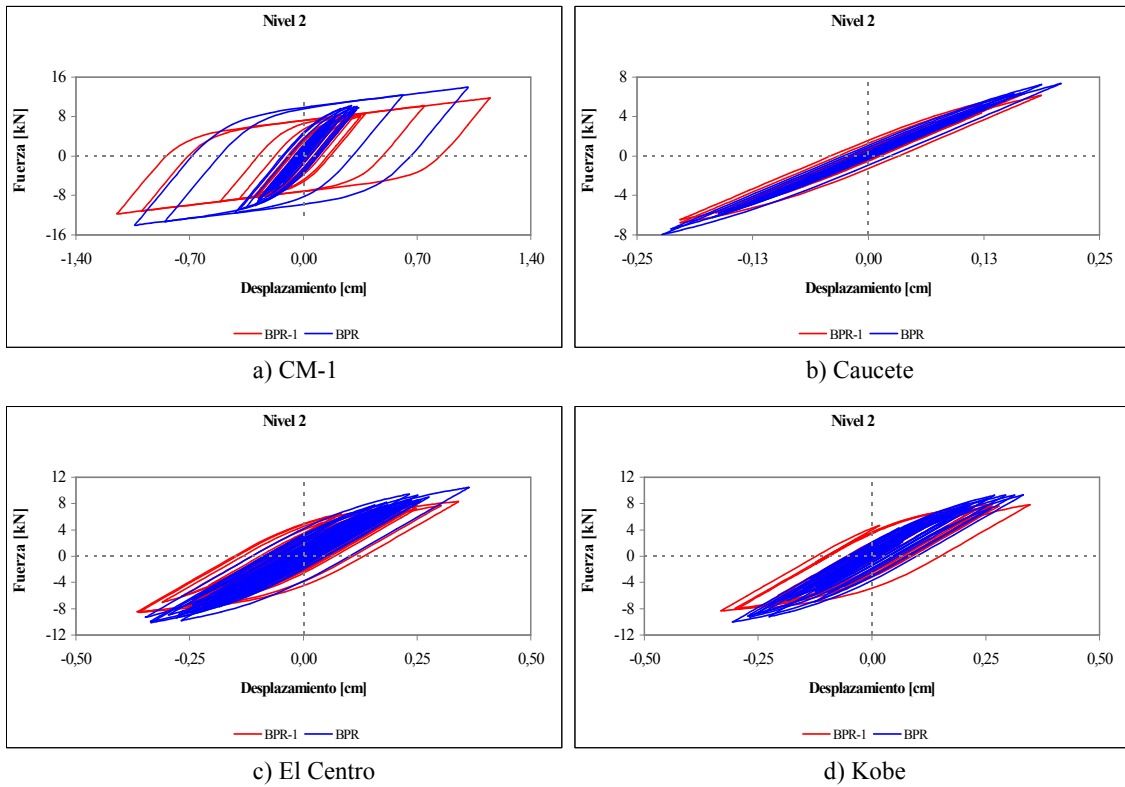


Figura 17: Diagramas fuerza - desplazamiento para la BPR-1 y BPR en el nivel 2 del pórtico metálico

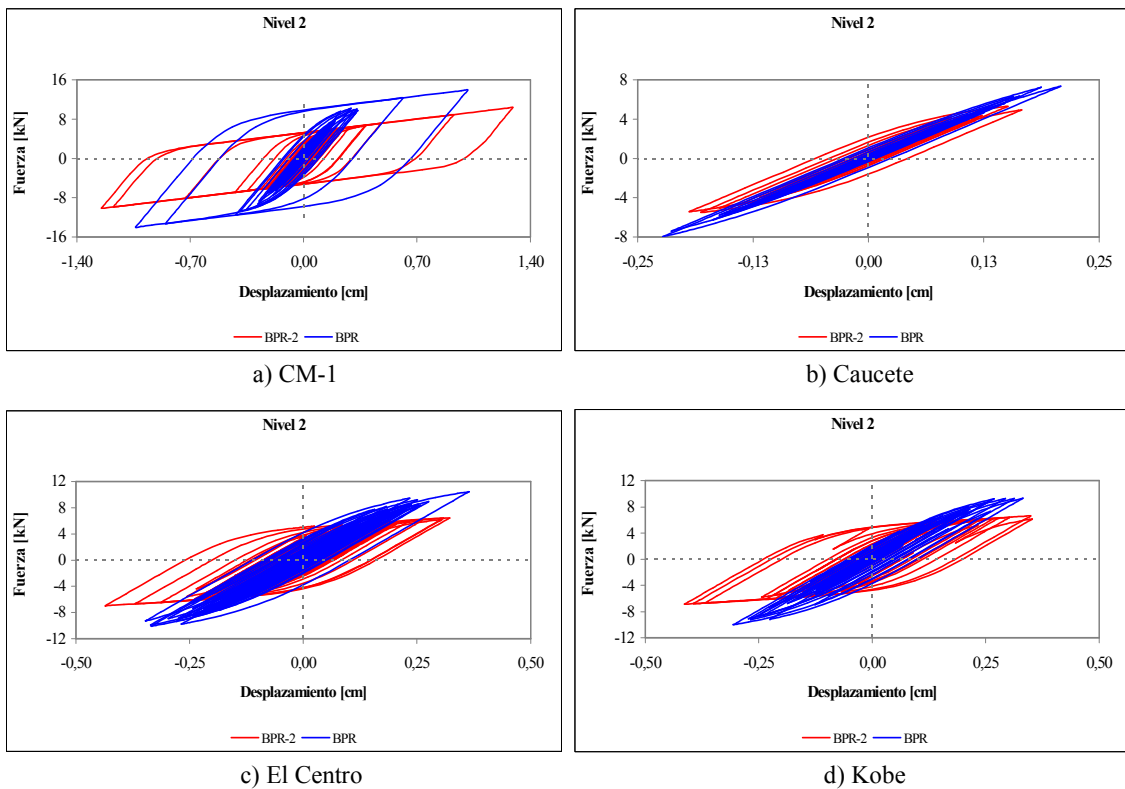


Figura 18: Diagramas fuerza - desplazamiento para la BPR-2 y BPR en el nivel 2 del pórtico metálico

Puede observarse en las Figura 11 a Figura 16, en general, la menor respuesta se tiene para el pórtico con las BPR originales, aunque las diferencias al considerar las otras diagonales no son significativas. Además, los diagramas fuerza – deformación en las diagonales que disipan energía presentan mayor diferencia para los acelerogramas de mayor demanda.

También se estudiaron para los 4 acelerogramas mencionados, (Tabla 2) las variaciones porcentuales en los parámetros de respuesta del pórtico con las 3 diagonales definidas en Tabla 3, respecto al pórtico con las BPR originales. Esas variaciones, indicadas como valores positivos para los aumentos y como valores negativos para las reducciones, se muestran en Figura 19.

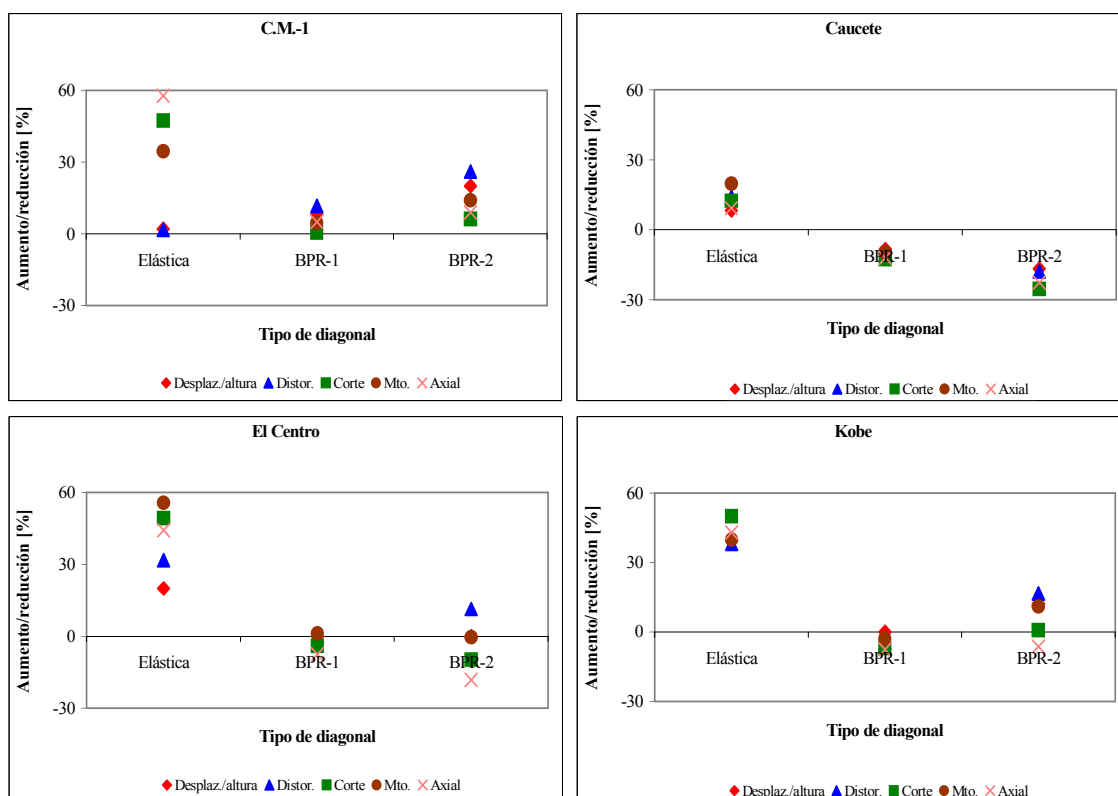


Figura 19: Parámetros de respuesta para el pórtico metálico con distintos tipos de diagonales, respecto de la estructura con BPR originales

Se observa en la Figura 19 que los parámetros de respuestas son en general mayores para la estructura con diagonales elásticas que con las BPR originales (diferencia que llega al 60% en algunos parámetros). En el caso del pórtico con BPR-1 y BPR-2 esa diferencia es menor correspondiendo a un aumento o reducción según el acelerograma.

4 CONCLUSIONES

En los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías para mejorar la respuesta de estructuras nuevas o existentes sometidas a excitaciones sísmicas. Entre ellas se encuentran los sistemas de disipación pasiva de energía, que incluyen entre otros a las BPR como disipadores por plastificación de metales.

Los reglamentos sismorresistentes deben incluir prescripciones para el análisis y diseño de las estructuras que adopten sistemas innovadores, sin embargo, esto sólo se ha logrado en

algunos países desarrollados.

En Estados Unidos se tienen reglamentos que proponen metodologías de análisis de estructurales con sistemas de disipación de energía. Para análisis estáticos el espectro que define el terremoto de diseño se reduce en función de un amortiguamiento equivalente o del factor R. Esto implica una mayor reducción de la acción sísmica a medida que la energía disipada por los dispositivos incorporados en la estructura sea mayor.

En este trabajo se realizaron análisis dinámicos no lineales de historia en el tiempo en una estructura con diferentes diagonales. Las mismas variaban en la estructura la cantidad de energía disipada, pero no su rigidez.

Si bien los parámetros de respuestas se modificaron, éstos no tuvieron una correlación directa con las variaciones en la cantidad de energía disipada en la estructura.

Por lo tanto se estima que para métodos de análisis estáticos son necesarias prescripciones especiales para el caso de estructuras con sistemas de disipación de energía basado en la plastificación de metales.

REFERENCIAS

- ABAQUS, 2003. ABAQUS v. 6.4. Documentation. *ABAQUS, Inc.*
- AISC 341, 2005. Seismic provisions for structural steel building. *American Institute, of Steel Construction, Inc.*
- ASCE / SEI 7, 2005. Minimum design load for buildings and other structures. *American Society of Civil Engineers and Structural Engineering Institute.*
- Aiken, I. 1996. Passive energy dissipation – hardware and applications. Proceeding of the Los Angeles County and SEAOSC Symposium on Passive Energy Dissipation Systems for New and Existing Building. Los Angeles, United States.
- FEMA 356, 2000. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. *Federal Emergency Management Agency.* Washington D.C., United States.
- FEMA 450, 2003. NEHRP recommended provisions and commentary for seismic regulations for new buildings and other structures. *Federal Emergency Management Agency.* Washington D.C., United States.
- Hanson, S. y Soong, T. 2001. Seismic design with supplemental energy dissipation devices. *Earthquake Engineering Research Institute, MNO-8.*
- INPRES-CIRSOC 103 - Parte I, 1991. Normas argentinas para construcciones sismorresistentes – Construcciones en general. *Instituto Nacional de Tecnología Industrial.*
- INPRES-CIRSOC 103 - Parte IV, 2000. Reglamento Argentino para construcciones sismorresistentes – Construcciones de acero. *Instituto Nacional de Tecnología Industrial.*
- Palazzo, G., Crisafulli, F. y López Almansa, F. 2008. Simulación numérica de estructuras reforzadas con disipadores de energía sometidas a excitación sísmica. Memorias del *ENIEF 2008*, San Luis, Argentina.
- SAP2000, 2002. Analysis Reference Manual, Versión 8.0.8. *Computers & Structures, Inc.,* California, EEUU.
- Soong, T. y Dargush, G. 1997. Passive energy dissipation systems in structural engineering. *John Wiley & Sons.*
- Wada, A. y Nakashima, M. 2004. From infancy to maturity of buckling restrained braces research. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, paper N° 1732.* Vancouver, Canadá.