

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ESTRUCTURAS REFORZADAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA SOMETIDAS A EXCITACIÓN SÍSMICA**

**Gustavo L. Palazzo<sup>a</sup>, Francisco J. Crisafulli<sup>b</sup> y Francisco López Almansa<sup>c</sup>**

<sup>a</sup> *Ceredetec, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional  
Rodríguez 273 (5500), Ciudad de Mendoza, Argentina ([gpalazzo@frm.utn.edu.ar](mailto:gpalazzo@frm.utn.edu.ar))*

<sup>b</sup> *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo  
Casilla de Correo 405 (5500), Ciudad de Mendoza, Argentina ([jcrisa@uncu.edu.ar](mailto:jcrisa@uncu.edu.ar))*

<sup>c</sup> *Departamento de Estructuras en la Arquitectura, Universidad Politécnica de Cataluña  
Avda. Diagonal 649 (08028), Barcelona, España ([francesc.lopez-almansa@upc.edu](mailto:francesc.lopez-almansa@upc.edu))*

**Palabras claves:** disipadores de energía, diseño sismorresistente con disipadores, análisis de estructuras con disipadores, simulación numérica de disipadores.

**Resumen.** Gran cantidad de estructuras han sido construidas en regiones de alta peligrosidad sísmica cuando el conocimiento de la ingeniería sísmica era inexistente o estaba en sus comienzos. Como estas construcciones carecen de los avances logrados en el análisis y diseño sismorresistente de los últimos años, podrían tener un desempeño inadecuado frente a sismos destructivos. En estos casos pueden implementarse disipadores de energía basados en la plastificación de metales, tal como las barras de pandeo restringido (BPR). Actualmente se cuenta con numerosas investigaciones donde se evalúa numérica y experimentalmente la eficiencia de estos dispositivos para disipar energía. Pero se estiman insuficientes los estudios referidos al diseño y análisis de estructuras que incorporan estos disipadores de energía. Con objeto de realizar aportes en esta última temática, se presenta en este trabajo el estudio de un pórtico metálico analizado por otros investigadores con disipadores viscoelásticos y de fricción. Se describe un procedimiento para el diseño de la estructura con BPR, y se evalúan las posibles metodologías de análisis para el sistema estructura – BPR. Además, propuesta una técnica de análisis y un modelo constitutivo para los disipadores, se verifican resultados con dos programas comerciales de elementos finitos. En las conclusiones se hacen consideraciones sobre la propuesta de análisis y diseño de estructuras con BPR.

## 1 INTRODUCCIÓN

La ingeniería sísmica ha realizado importantes avances en las últimas décadas, desarrollando una serie de conceptos innovadores (aislamiento sísmico, disipación pasiva de energía, control activo y semi – activo de estructuras) 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 mecánicos en las construcciones, con objeto de mejorar su capacidad frente a sismos destructivos (Soong y Dargush, 1997; Aiken, 1996).

Si bien se han propuesto una gran variedad de dispositivos para mejorar la respuesta sismorresistente de edificaciones, se consideran en este trabajo las barras de pandeo restringido, que se esquematizan en la Figura 1-a (Watanabe et al., 1988). Estos disipadores de energía pueden incorporarse a una estructura aporticada, como se muestra en la Figura 1-b, y contribuir a la disipación de la energía que ingresa a la estructura durante un sismo. De esta manera puede evitarse el daño en la estructura principal.

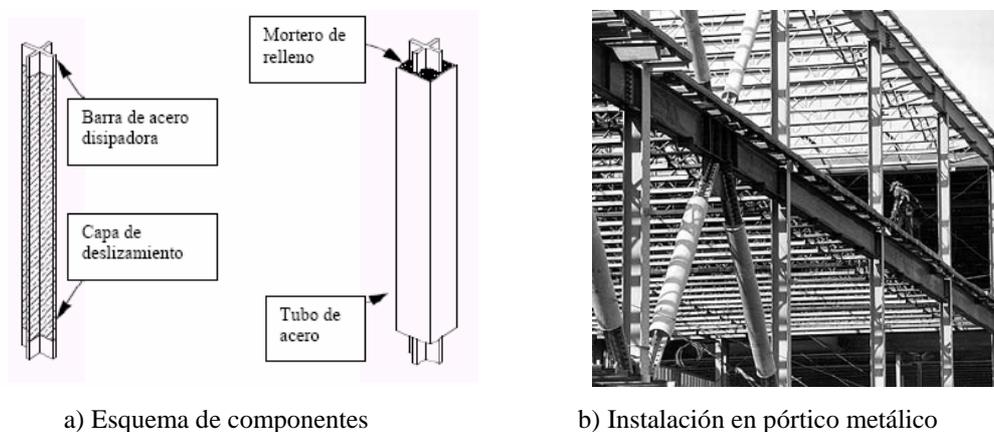


Figura 1: Barras de pandeo restringido.

Al incorporarse a las estructuras aporticadas como barras diagonales, si se logran vínculos que permitan el giro, estos dispositivos estarán solicitados solo a esfuerzos de tracción y compresión. Deberán soportar además grandes deformaciones, para lograr la disipación de energía con comportamiento plástico ante un sismo destructivo.

Dado que las longitudes necesarias de estas barras para que sean diagonales de pórticos serán importantes, y que el dimensionamiento del área de su sección transversal está vinculado a la condición de disipación de energía, deberá disponerse de un mecanismo para evitar el pandeo global y de los modos superiores de la barra disipadora. Además, una capa en la interfase entre ambos componentes deberá evitar que se transmitan en exceso esfuerzos de la barra disipadora al mecanismo contra el pandeo. Así, como se observa en la Figura 1-a, estos dispositivos están constituido por: barra central para la disipación de energía, tubo externo relleno de mortero de cemento u hormigón (para evitar el pandeo de la barra central en compresión), y capa de interfase (para reducir el rozamiento entre las partes principales).

En la bibliografía se presentan numerosos estudios donde se evalúan teórica y experimentalmente la efectividad de estos dispositivos como disipadores de energía mediante la plastificación de la barra central. Pero se estima que las investigaciones y la normativa sobre el análisis y diseño de estructuras que incorporan sistemas de disipación de energía son insuficientes. Por ello, el objetivo de este trabajo es realizar aportes en esta última temática.

Para ello en las secciones siguientes, luego de describir las características de la estructura adoptada para este estudio, se presenta una metodología de diseño de BPR para reforzar estructuras, y se analizan las metodologías de análisis y modelos constitutivos posibles de adoptar para verificar el diseño dispuesto. En las conclusiones se hacen consideraciones sobre la propuesta diseño de las

BPR y sobre un procedimiento seleccionado para el análisis de la estructura con los disipadores.

## 2 CARACTERÍSTICA DE LA ESTRUCTURA SELECCIONADA PARA EL ESTUDIO

Para el estudio de análisis y diseño de estructura con disipadores que se hace en este trabajo se consideró el pórtico de acero descrito por Hanson y Soong (2001). Esta estructura fue analizada por los autores con y sin disipadores viscoelásticos y friccionales. Por lo tanto, se eligió la misma a los efectos de comparar la respuesta estructural que se obtiene al considerar en ella BPR. Un esquema de esa estructura con los disipadores de presente en la Figura 2.

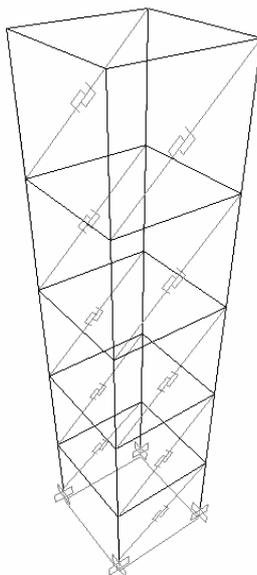


Figura 2: Esquema de la estructura estudiada.

La altura total del pórtico es de 5.69 m, con una altura de 0.91 m para el primer nivel y de 1.19 para los 4 niveles restantes. En cada dirección tiene un vano de 1.32 m de luz. Adoptando los valores de masa y de rigidez descritos por Hanson y Soong (2001), se llega a una frecuencia de 3,29 Hz (período de 0,304 s) para el primer modo de vibración, y de 9,64 Hz (período de 0,104 s) para el segundo modo.

En el trabajo de referencia solo se consideró como excitación el acelerograma de El Centro escalado para un PGA de 0.6 g. En el presente estudio se extendió el análisis a un grupo de acelerogramas mencionados en la Tabla 1, que pertenecen a la base de datos *World Collapse Accelerograms* (Hernández y Saragoni, 2002). La base de datos está conformada exclusivamente por registros en los que se comprobó colapso estructural de edificios emplazados en las inmediaciones de la estación registradora. Estos registros son los más apropiados para realizar análisis no lineal de estructuras, ya que se tiene la certeza de que su acción llevó a construcciones reales a incursionar en el campo no lineal y, en algunos casos, hasta el colapso. Varios de estos registros corresponden a terremotos de falla cercana. Además se agregaron, tal como se describe en Tabla 2, acelerogramas obtenidos en la zona de Argentina de mayor riesgo sísmico, y otros dos terremotos de tipo vibratorio.

Terremoto	Denom.	Fecha	Estación
Cape Mendocino	C.M.1	25/04/92	Cape Mendocino
Cape Mendocino	C.M.2	25/04/92	Petrolia
Coalinga	Coalinga	22/07/83	Transmitter Hill
Chi-Chi	Chi Chi	20/09/99	Chy080
Düzque	Düzque	12/11/99	Lamont Station 375
Imperial Valley	I.V.	15/10/79	Bonds Corner
Kobe	Kobe	16/01/95	Kjm
Loma Prieta	L.P.	18/10/99	Corralitos
Northridge	Northr.1	17/01/94	Rinaldi Receiving Sta
Northridge	Northr.2	17/01/94	Simi Valley - Katherine
Tabas, Iran	Tabas	16/09/78	Tabas

Tabla 1: Acelerogramas seleccionados de la *World Collapse Accelerograms*.

Terremoto	Denom.	Fecha	Estación
Caucete	Caucete	23/11/97	San Juan
Llolleo	Chile	03/03/95	-
Mendoza	Mendoza	26/01/85	Las Heras
México	México	19/09/85	Central Telefónica

Tabla 2: Otros acelerogramas seleccionados.

### 3 DISEÑO DE BPR PARA EL REFUERZO DE ESTRUCTURAS

Se presentan en la bibliografía una gran variedad de procedimientos para el diseño de estructuras con disipadores (Hanson y Soong, 2001; Curadelli, 2003; Hurtado, 2006).

En los documentos y normas americanas se establecen solo criterios de aceptación de los parámetros de respuesta de los disipadores. Así por ejemplo, el FEMA 450 establece que los disipadores de energía deberán tener una capacidad suficiente para soportar los valores máximos de las fuerzas y de los desplazamientos que en él se originen para el máximo terremoto esperado. El FEMA 356 por otra parte, dispone que los dispositivos dependientes de los desplazamientos deben ser capaces de soportar desplazamientos iguales o mayores al 130% del máximo desplazamiento calculado en el dispositivo bajo el nivel de riesgo sísmico BSE-2 (probabilidad del 2% de ser superado en 50 años). Para el caso específico de las BPR el ANSI/AISC 341-2005, dispone que la resistencia requerida en el disipador debe ser 1.1 veces la fuerza máxima en tracción  $F_{\text{máx-t}}$  o en compresión  $F_{\text{máx-c}}$  dadas por las ecs. (1) y (2). Estas fuerzas mayoradas se obtienen a partir de la máxima carga axial  $P_{\text{ysc}}$  correspondiente a una distorsión de piso del doble de la distorsión de diseño. Para el diseño del disipador se aumentan entonces estas fuerzas en un 10%, a los efectos de considerar posibles distorsiones de pisos superiores.

$$F_{\text{máx-t}} = \omega R_y P_{\text{ysc}} \quad (1)$$

$$F_{\text{máx-c}} = \beta \omega R_y P_{\text{ysc}} \quad (2)$$

En las ecs. anteriores aparecen mayorando a la máxima carga axial  $P_{\text{ysc}}$  los factores de ajuste de la resistencia a compresión  $\beta$  (que permite considerar la sobrerresistencia a compresión respecto a la resistencia a tracción), la relación entre la tensión de fluencia esperada y la tensión de fluencia mínima especificada  $R_y$ , y el factor de ajuste por endurecimiento de deformación  $\omega$ .

Para las conexiones, esos documentos indican que debe asegurarse su comportamiento elástico para las máximas sollicitaciones a las que estará sollicitado el disipador.

A los efectos de proponer una metodología de diseño de las BPR para el refuerzo de una estructura que pueda adaptarse a la práctica profesional actual, se describen en esta sección las etapas de un procedimiento iterativo para el de diseño buscado.

**Etapas 1** - *Análisis de la estructura con el método de las cargas laterales equivalentes (método estático)*: Aplicadas las fuerzas laterales equivalentes de la acción sísmica a la estructura libre (determinadas según el código de aplicación que corresponda), se determinan para cada nivel  $i$  los desplazamientos horizontales  $\delta_i$ , la deformación relativa de piso  $\Delta_{si}$ , y la distorsión horizontal de piso  $\theta_{si}$ .

**Etapas 2** - *Disposición de los disipadores y determinación de sus longitudes*: De acuerdo a las características generales de la estructura se determinan los vanos del pórtico donde se colocarán las BPR. Puede entonces definirse la longitud total  $L_T$  que deberán tener estos dispositivos y el ángulo  $\varphi$  que forma la barra con la horizontal. Se calcula luego, para cada nivel, el alargamiento/acortamiento máximo de la barra  $\delta_{BPR,i}$  según la ec. (3).

$$\delta_{BPR,i} = \Delta_{si} \cos \varphi \quad (3)$$

A partir de la Ley de Hooke puede determinarse la longitud de la zona de fluencia  $L_{BPR,y}$  de la barra, tal como expresa la ec. (4).

$$L_{BPR,y} = \frac{E \delta_{BPR,y}}{f_y} \quad (4)$$

Para ello habrá que definir la tensión de fluencia  $f_y$  del acero que se disponga para la materialización de la BPR, y el alargamiento/acortamiento para el inicio de fluencia  $\delta_{BPR,y}$ . Se propone determinar la última magnitud como función del alargamiento/acortamiento máximo previsto para el disipador  $\delta_{BPR,i}$ , de acuerdo con la ec. (5).

$$\delta_{BPR,y} = C_y \delta_{BPR,i} \quad (5)$$

El coeficiente  $C_y$  se elige de tal manera que  $L_{BPR,y}$  sea menor que la  $L_T$ . Debe preverse en esa diferencia la longitud que será necesaria para vincular las diagonales a la estructura de pórtico. No es conveniente que  $L_{BPR,y}$  sea mucho menor que  $L_T$ , ya que se reduciría la vida a fatiga del disipador.

**Etapas 3** - *Determinación de rigideces elásticas  $K_{e,i}$  para las BPR*: Se estima un valor de rigidez elástica  $K_{e,i}$  para la BPR del nivel superior. Luego se asignan las  $K_{e,i}$  para los niveles inferiores en forma proporcional a la deformación relativa de piso  $\Delta_{si}$  de cada nivel.

**Etapas 4** - *Determinación de áreas y fuerzas de fluencia en cada BPR*: Teniendo en cuenta que la BPR tendrá una sección de fluencia de rigidez axial  $K_{y,i}$ , y una zona de extremos de rigidez  $K_{extr,i}$ , la rigidez elástica total  $K_{e,i}$  está dada por la ec. (6).

$$K_{e,i} = \frac{1}{\frac{1}{K_{y,i}} + \frac{1}{K_{extr,i}}} \quad (6)$$

Dado que la rigidez axial del disipador es  $K = E A/L$ , reemplazando en la anterior se tiene la ec. (7).

$$K_{e,i} = \frac{1}{\frac{L_{y,i}}{E A_{y,i}} + 2 \frac{L_{extr,i}}{E A_{extr,i}}} = \frac{1}{\frac{L_{y,i}}{E A_{y,i}} + \frac{(L_T - L_{y,i})}{E A_{extr,i}}} \quad (7)$$

Si se propone una relación entre el área de extremos respecto al área de la zona de fluencia, por ejemplo  $A_{extr,i} = 1.5 A_y$ , puede despejarse de la ec. (7)  $A_y$  según se presenta en ec. (8).

$$A_y = \frac{K_{e,i} (L_T - 0.5 L_y)}{1.5 E} \quad (8)$$

Luego con la ec. (9) se determina la fuerza de fluencia  $F_y$ .

$$F_y = f_y A_y \quad (9)$$

**Etapa 5 - Análisis de la estructura con BPR:** Se realiza el análisis de la estructura con disipadores según el procedimiento de diseño propuesto en la sección 4.3.

**Etapa 6 - Análisis de resultados:** Se verifica que con las BPR propuestas se cumplan los requerimientos de *performance* establecidos para la estructura a rehabilitar. Si ellos no se cumplen, se hace proceso iterativo modificando el valor de  $K_{e,i}$  tomado como base. Logrados los objetivos de rehabilitación se diseñan las uniones disipador – estructura, y se verifica que no se superen las capacidades de deformación máxima en los disipadores.

Al aplicar este procedimiento a la estructura descrita en la sección 2., y a los efectos de lograr distorsiones horizontales de piso similares a las indicadas por Hanson y Soong (2001) para la estructura con disipadores viscoelásticos, se obtuvieron para las BPR los parámetros geométricos y mecánicos que se indican en Tabla 3.

Nivel	Longitudes [cm]		Diámetros [mm]		$P_y$ [kN]	$K_e$ [MN/m]
	$L_T$	$L_y$	$D_e$	$d_y$		
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

Tabla 3: Parámetros geométricos y mecánicos de las BPR a considerar en el pórtico metálico.

Con estos dispositivos la estructura alcanza para el primer modo de vibración una frecuencia de 4.68 Hz (con una reducción del período respecto a la estructura libre del 30%). Para el segundo modo se logra una frecuencia de 12.69 Hz (con una reducción del período del 24%).

## 4 ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS REFORZADAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA

### 4.1 Clasificación de los procedimientos de análisis

Los procedimientos de análisis de estructuras con disipadores de energía pueden clasificarse en 3 niveles, según el grado de precisión requerido y las capacidades computacionales necesarias (Hanson y Soong, 2001; Curadelli, 2003).

En el Nivel I se incluyen procedimientos de análisis donde se considera la no linealidad de la estructura y de los disipadores. Frente a un terremoto destructivo una estructura tendrá en general un comportamiento inelástico. Además si posee disipadores de energía, éstos también tendrán un comportamiento no lineal (excepto los disipadores viscoelásticos sólidos). Por lo tanto, el análisis dinámico no lineal de historia en el tiempo, donde pueden considerarse las no linealidades de los miembros estructurales y de los disipadores, constituye el procedimiento de análisis más riguroso y

completo. Programas comerciales de elementos finitos de propósito general, como ABAQUS por ejemplo, permiten realizar este tipo de análisis.

Para simular las BPR en estos programas se pueden emplear los modelos constitutivos termodinámicamente sustentables, a partir de la mecánica de los medios continuos.

Pero la desventaja que presentan estos procedimientos, es el elevado esfuerzo y tiempo computacional requerido para el análisis de estructuras grandes y complejas.

En el Nivel II se agrupan metodologías de análisis donde la estructura se considera con comportamiento no lineal y los disipadores linealizados, o se simula la estructura con comportamiento lineal y los disipadores en forma no lineal. Se busca con estos procedimientos simplificar el análisis del sistema estructura – disipador. Para el primer grupo de metodologías, es necesario representar los disipadores mediante parámetros de rigidez y amortiguamiento lineal equivalente. Esto hace que en la simulación no se pueda representar con precisión los dispositivos que se agregan a la estructura para mejorar su comportamiento. En el segundo grupo de técnicas, se considera el comportamiento lineal de la estructura, que es lo que habitualmente se acepta en reglamentos sismorresistentes. Además, el refuerzo estructural se orienta a lograr una estructura con comportamiento en rango elástico, y concentrar la disipación de energía frente a un sismo destructivo en el sistema de disipación de energía. Pueden obtenerse entonces procedimientos numéricos más eficientes desde el punto de vista numérico, y de mayor interés para el análisis de edificios con disipadores.

Para la formulación matemática de este procedimiento se plantea la ecuación de movimiento de un sistema de 1GDL, con masa  $M$ , rigidez global equivalente del sistema  $K$ , amortiguador viscoso de parámetro  $C$ , y un disipador que origina una fuerza  $R$  en las conexiones con la estructura principal (Soon y Dargush, 1997; Wilson, 2001; Cahis, 2001 y Hurtado, 2006). El dispositivo queda entonces caracterizado según un modelo de fuerza – desplazamiento macroscópico, y se concentra entonces la no linealidad en ese término de la ecuación de movimiento. Denominando al desplazamiento del suelo con  $u_g(t)$  y al desplazamiento lateral relativo con  $u(t)$ , la ec. de movimiento del sistema está dada por la ec. (10).

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + K u(t) + R(t) = -M \ddot{u}_g(t) \quad (10)$$

La rigidez  $K$  se determina según la ec. (11), como la suma de la rigidez elástica  $K_E$  del sistema flexible, y la rigidez  $K_{DM}$  del sistema soporte – disipador.

$$K = K_E + K_{DM} \quad (11)$$

$K_{DM}$  representa la rigidez de un modelo bilineal en serie, integrado por el soporte de rigidez  $K_M$  y el disipador de rigidez  $K_D$  (que tendrá un valor  $K_1$  elástico y otro  $K_2$  para la fase de post fluencia), tal como se expresa en la ec. (12).

$$K_{DM} = \frac{1}{\frac{1}{K_D} + \frac{1}{K_M}} \quad (12)$$

Para resolver la ecuación de movimiento del sistema estructura - disipadores, ec (10), se han desarrollado distintos procedimientos, entre los que se destaca el “análisis no lineal rápido” de Wilson (2001), el cuál ha sido incorporado a los programas comerciales SAP2000 y ETABS. De acuerdo a Wilson (2001), si se usa este método numérico para el análisis dinámico no lineal de grandes estructuras que poseen un pequeño número de elementos no lineales, el tiempo computacional requerido será solo un poco mayor que el tiempo necesario para el análisis dinámico lineal de esa estructura. Por ello el autor recomienda su empleo para el análisis de estructuras con disipadores de energía, ya que las propiedades del dispositivo determinadas experimentalmente pueden ser directamente incorporadas en el modelo computacional.

La ecuación de movimiento, ec. (10), también puede resolverse mediante métodos de integración

explícitos o implícitos. Si bien para el análisis sísmico de estructuras lineales la integración directa de la ecuación de movimiento no es en gral. numéricamente eficiente comparada con los métodos de superposición modal, sí puede serlo para evaluar estructura no lineales. De acuerdo a Wilson (2001), para un análisis sísmico paso a paso de una estructura, solo deben usarse métodos incondicionalmente estables, implícitos y de un solo paso. Entre ellos se tiene la familia de métodos de Newmark, especialmente indicado para análisis de estructuras sometida a excitaciones sísmicas. Además el autor especifica que en la familia de métodos de Newmark se destaca el procedimiento de aceleración promedio. En SAP2000 puede realizarse este análisis mediante el método Hilber – Hughes – Taylor, tomando el parámetro  $\alpha = 0$ .

La simulación del comportamiento no lineal de las BPR en el programa SAP2000, ya sea para análisis no lineal rápido o para la integración directa de la ecuación de movimiento, puede hacerse con el modelo de Wen. Para sistemas de varios grados de libertad Baber y Wen (1981) plantearon para cada nivel la ecuación de movimiento con una fuerza de restitución  $R(t)$  según la ec. (13).

$$R(t) = C \dot{u}(t) + \alpha K_1 u(t) + (1 - \alpha) K_1 z \quad (13)$$

En la ec. anterior  $C$  es el amortiguamiento viscoso del disipador,  $\alpha$  la relación de rigidez post fluencia respecto a la rigidez elástica ( $K_2 / K_1$ ), y  $z$  el parámetro correspondiente a la histéresis dado por la ec. (14), donde también interviene un parámetros  $A$  (Wen, 1976). Tal como lo indica el autor mencionado, según sean los parámetros que intervienen en la determinación de  $z_i$  será la forma del comportamiento histerético de la estructura.

$$\dot{z} = \alpha |\dot{u}| z^n - \beta \dot{u} |z^n| + A \dot{u} \quad (14)$$

Los parámetros que pueden introducirse en el modelo de Wen considerado por SAP2000 en los análisis de historia en el tiempo son  $\alpha$ ,  $K_1$ ,  $F_y$  y el parámetro  $n$  para controlar la forma del ciclo histerético.

Se destaca que los métodos de análisis para estructura lineal – disipadores no lineales tienen dos ventajas principales. La primera es el bajo costo computacional. La segunda es que no es necesario considerar un amortiguamiento viscoso lineal equivalente para el conjunto estructura - disipadores. Así, a la estructura principal se le pueden asignar los valores clásicos de amortiguamiento viscoso previstos en los reglamentos, y considerar los disipadores según el modelo constitutivo no lineal que se elija.

En el Nivel III se tienen técnicas de análisis donde se logra una nueva simplificación considerando que el comportamiento del sistema estructura - disipadores es lineal. Podrían utilizarse estos procedimientos a nivel de pre dimensionado de la estructura con disipadores. Pero dado el desarrollo de los algoritmos de cálculo para simular el comportamiento no lineal de estos dispositivos, se estima que esta aproximación no es necesaria si se cuenta con herramientas computacionales.

## 4.2 Requerimientos de análisis según normas

En años recientes se han incorporado a los reglamentos y documentos americanos requerimientos para procedimientos de análisis a aplicar en estructuras con disipadores de energía. Estas metodologías pueden encontrarse en FEMA 356 (2000), FEMA 450 (2003), ASCE / SEI 7 (2005) y ANSI/AISC 341 (2005). Estos documentos establecen condiciones para aplicar procedimientos de análisis no lineales (Nivel I y II descriptos en la sección 4.1), y procedimientos lineales (Nivel III). En estas última técnicas (espectro de respuesta o de la fuerza lateral equivalente) se plantea la reducción de la respuesta mediante los coeficientes de amortiguamiento  $B$ , que se obtienen de tabla como función del amortiguamiento efectivo  $\beta$ . Este amortiguamiento  $\beta$  se calcula como una combinación de 3 componentes, según se indica en la ec. (15).

$$\beta = \beta_I + \beta_V \sqrt{\mu} + \beta_H \quad (15)$$

Donde  $\mu$  es la demanda de ductilidad del sistema sismorresistente (debida al terremoto de diseño o al máximo terremoto esperado); y:  $\beta_I$  la componente debida a la disipación de energía inherente a los elementos de la estructura principal hasta que se alcanza en ella el desplazamiento de fluencia, excluyendo el amortiguamiento viscoso agregado (valor típico del 5% para estructuras de H° A°);  $\beta_V$  es la componente de disipación viscosa de energía debida al sistema de disipación de energía incorporado en la estructura (parámetro que se toma igual a cero para dispositivos de disipación de fricción o de plastificación de metales); y  $\beta_H$  es la componente de amortiguamiento debido al comportamiento histerético post fluencia del sistema sismorresistente y del sistema de disipación de energía.

El inconveniente de estas simplificaciones, por ejemplo para las BPR, es que se intenta establecer una relación entre la energía disipada por comportamiento plástico del disipador (comportamiento histerético) y un amortiguamiento viscoso equivalente expresado por  $\beta_H$ .

### 4.3 Procedimiento de análisis propuesto y resultados obtenidos

De acuerdo a lo expuesto en las secciones 4.1 y 4.2, se adoptó para el análisis de la estructura descrita en la sección 2. (con y sin disipadores) un comportamiento lineal para la estructura de acero y no lineal para los disipadores. Como modelo constitutivo de las BPR se adoptó el modelo de Wen antes descrito, considerando los parámetros de rigidez y fuerza de inicio de fluencia de Tabla 3. Se adoptó una relación de rigideces  $\alpha$  de 0.1, y un valor n igual a 2. El análisis no lineal de historia en el tiempo (con no linealidad concentrada en los disipadores) se realizó con el programa SAP2000.

Como primeros resultados de estos análisis, se muestran en la Figura 3 los valores máximos de respuesta para la estructura libre y con BPR, excitada con el acelerograma de El Centro escalado. Se comparan en la misma los resultados obtenidos por Hanson y Soong (2001), empleando disipadores viscoelásticos.

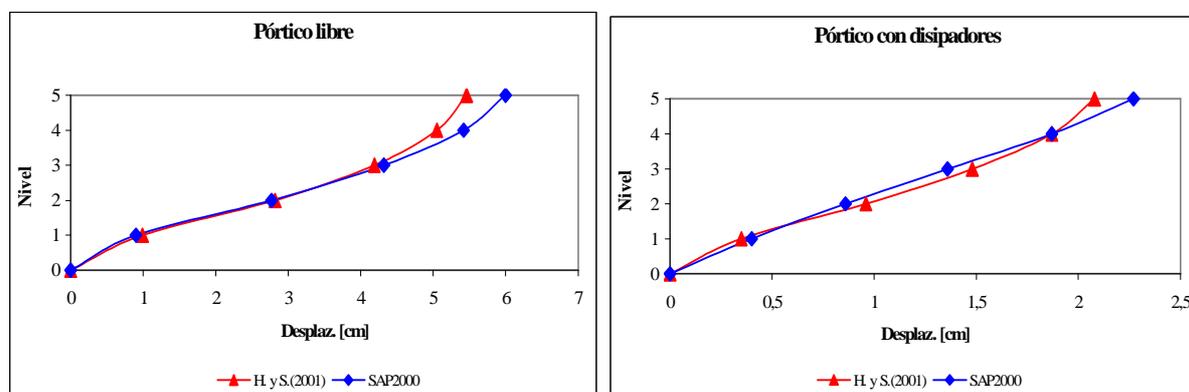


Figura 3: Esquema de la estructura estudiada.

Para la estructura libre se obtuvieron diferencias de desplazamientos máximos menores al 10%. Esa diferencia se considera aceptable a los fines del presente estudio. Mientras que la respuesta máxima con BPR esa diferencia es inferior al 16% respecto al pórtico con disipadores viscoelásticos. Esto muestra que con BPR pueden lograrse reducciones de desplazamientos similares a las obtenidas con otro tipo de disipadores.

También, como se indicó en la sección 2., se realizaron análisis de la estructura con/sin BPR excitada según los acelerogramas caracterizados en la Tabla 1 y 2. Para estos casos se consideraron como parámetros de respuesta: la relación desplazamiento de techo / altura del pórtico, la distorsión horizontal de piso máxima, el corte basal, el momento flector en pie de columna de planta baja, y el esfuerzo axial en la mencionada columna. Como síntesis de los resultados analizados, se presenta en Figura 4 la reducción de la respuesta lograda en la estructura con BPR respecto a la estructura libre.

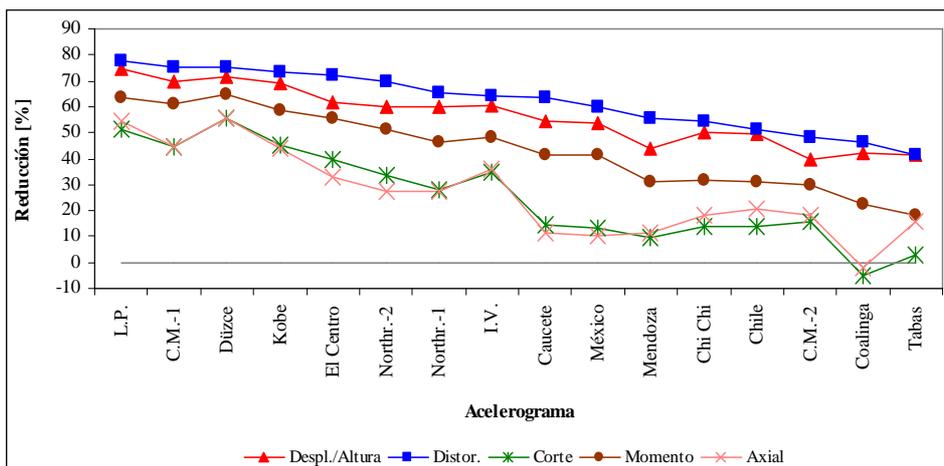


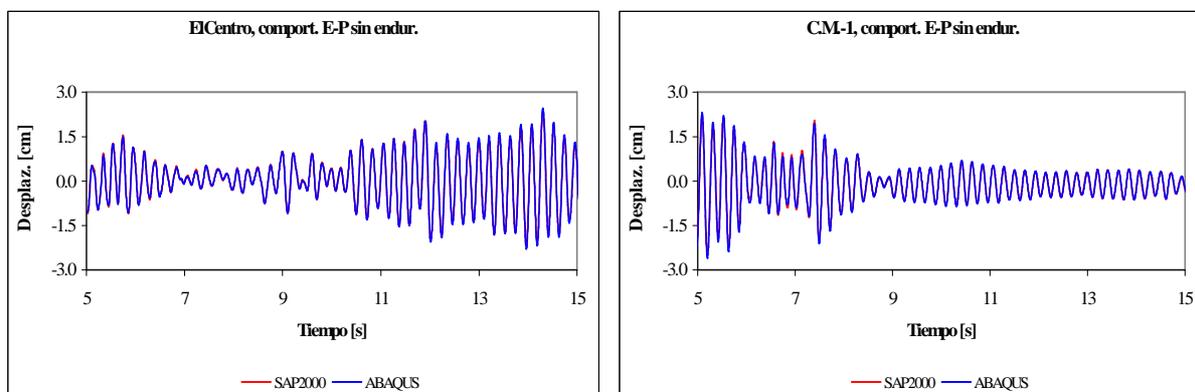
Figure 4: Reducción de la respuesta en la estructura con BPR respecto a estructura libre.

### 4.4 Verificación del procedimiento propuesto

Para verificar los resultados del análisis efectuado en SAP2000 se llevaron a cabo simulaciones numéricas en el programa de elementos finitos de propósito general ABAQUS. En este programa se adoptó un análisis dinámico implícito. Las BPR se simularon con comportamiento elástico – perfectamente plástico (con una tensión de inicio de fluencia de 330 MPa), y considerando el diagrama tensión – deformación obtenido en el ensayo a tracción de una barra de acero con igual tensión de fluencia. Para estos últimos valores se consideró endurecimiento cinemático e isótropo. En SAP2000 para los disipadores se mantuvo el modelo de Wen descrito en la sección 4.3. Los tiempos computacionales empleados para estos análisis fueron de 13 s para SAP2000 (análisis modal de historia en el tiempo) y de 1 hora en ABAQUS (análisis dinámico implícito, con incremento de tiempo inicial de 0.01 s).

Como síntesis de los resultados obtenidos se muestra en la Figura 5 la historia de los desplazamientos obtenidos en el último nivel del pórtico. Se presenta en ella la respuesta considerando modelos elasto-plástico y con endurecimiento isótropo en las BPR, excitada la estructura con los acelerogramas de El Centro escalado y C.M.1.

De igual manera en la Figura 6 se presentan los diagramas fuerza-desplazamiento en un disipador del nivel 2 del pórtico.



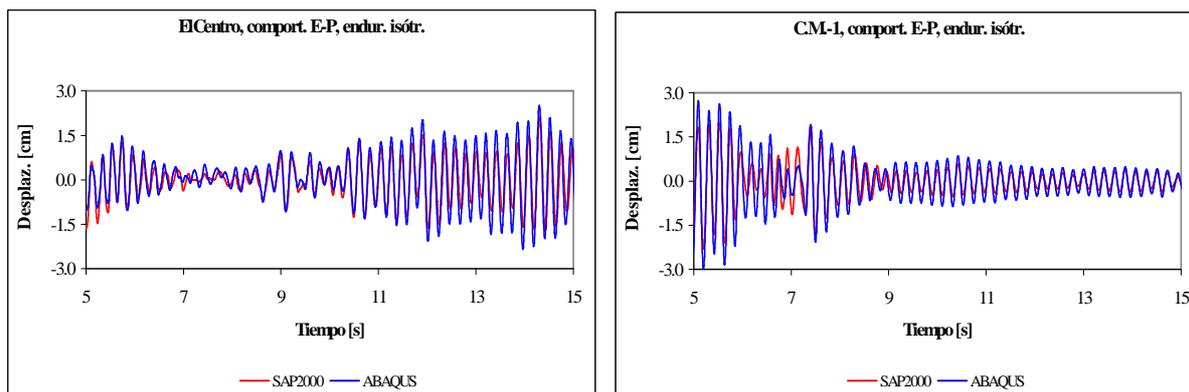


Figure 5: Historia de los desplazamientos del último nivel para el pórtico metálico con BPR.

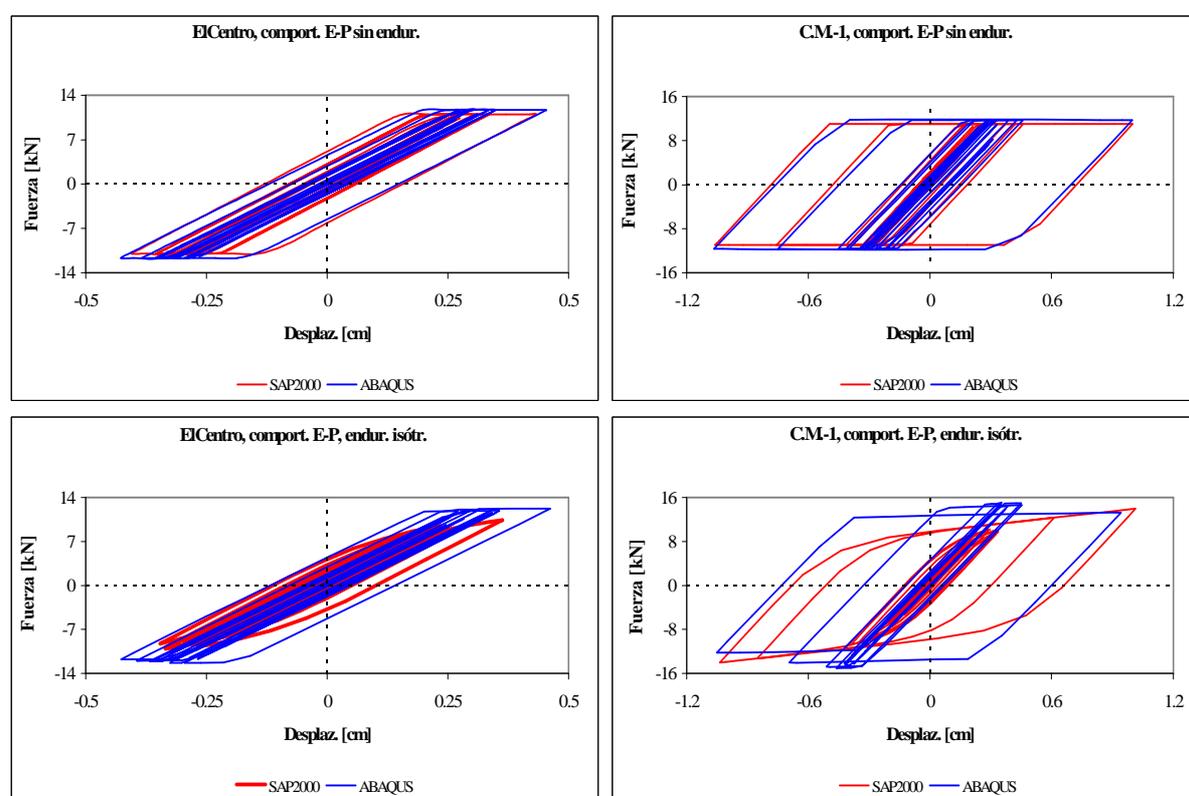


Figure 6: Diagramas fuerza - desplazamiento para BRP del nivel 2 del pórtico metálico con BPR.

Se observa en las Figuras anteriores que las historias de los desplazamiento y los diagramas fuerza-desplazamiento obtenidos con ambos programas son aproximadamente coincidentes. Aunque el tiempo computacional para el análisis en SAP2000 es significativamente inferior al empleado en ABAQUS.

## 5 CONCLUSIONES

Se pueden desarrollar procedimientos de diseño de estructuras con BPR simples, que pueden adaptarse a la filosofía de diseño sismorresistente actual. Son necesarios nuevos ensayos de estructuras con disipadores, especialmente con estructuras de  $H^{\circ}$   $A^{\circ}$ , para verificar esos procedimientos de diseño. De esa manera se podrán mejorar las recomendaciones que al respecto puedan hacerse en códigos sismorresistentes.

Para el análisis de las estructura con sistemas de disipación de energía, tal como se muestra en el trabajo, es conveniente la simulación con modelos constitutivos lineales para la estructura principal y no lineales para los disipadores. Dado el desarrollo de los programas comerciales de elementos

finitos de uso habitual en el medio profesional, estas metodologías de análisis pueden aplicarse tanto para el proceso de predimensionamiento del sistema estructura- disipadores, como para la verificación final del diseño adoptado.

## REFERENCIAS

- ABAQUS, V.6.7, 2006.
- Aiken, I., Passive Energy Dissipation – Hardware and Applications. *Proceeding Los Angeles County and Seaosc Symposium on Passive Energy Dissipation Systems for New and Existing Building*, Los Angeles, Estados Unidos, 1996.
- ANSI/AISC 341, Seismic Provisions for Structural Steel Building. *American Institute, of Steel Cosntruction*, Inc. 2005.
- ASCE / SEI 7, Minimum Design Load for Buildings and other Structures. *American Society of Civil Engineers*, 2005.
- Baber, T. y Wen, Y-K., Random Vibration of Hysteretic, Degrading Systems. *Journal of The Engineering Mechanics Division*, 104 (EM6): 1069-1087, ASCE, 1981.
- Cahís, X., Desarrollo de un nuevo disipador de energía sismorresistente. Análisis numérico y validación experimental de su comportamiento, *Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña*, 2000.
- Curadelli, O., Controle de vibrações em estruturas usando amortecedores metálicos, *Tesis doctoral, Universidad Federal Do Rio Grande Do Sul*, 2003.
- FEMA 356, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *Federal Emergency Management Agency*, 2000.
- FEMA 450, NEHRP Recommended Provisions and Commentary for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. *Federal Emergency Management Agency*, 2003.
- Hanson, S. y Soong, T., Seismic design with supplemental energy dissipation devices. *Earthquake Engineering Research Institute*, MNO-8, 2001.
- Hernandez, M. y Saragoni, R., Estudio de la respuesta no lineal en condiciones de colapso sísmico. *VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, 2002.
- Hurtado, F., Propuesta de disipador genérico SL para edificios y su diseño sismorresistente, *Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña*, 2006.
- SAP2000, Version 9.0.1, Analysis Reference Manual, Computer & Structures, Inc, 2004.
- Soong, T., y Dargush, G., Passive energy dissipation systems in structural engineering. *John Wilwy & Sons*, New York, USA, 1997.
- Watanabe, A., Hitomi, Y., Saeki, E., Wada, A. y Fujimoto, M., Properties of Brace Encased in Buckling- Restraining Concrete and Steel Tube. *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, Paper No. 6-7-4, Vol. IV, pp. 719- 724, 1998.
- Wen, Y-K., Method for Random Vibration of Hysteretic Systems. *Journal of The Engineering Mechanics Division*, 102 (EM2): 249-63, ASCE, 1976
- Wilson, E., “Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures”, *Computer & Structures, Inc.*, 2001.