

INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ DE PÓRTICOS SISMORRESISTENTES DE HORMIGÓN ARMADO EN EL DISEÑO DE DISIPADORES DE ENERGÍA POR FLUENCIA DE METAL

Marcelo Rubinstein, Oscar Möller, Juan P. Ascheri y Raúl Aira

Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina, marub@fceia.unr.edu.ar

Palabras claves: Pórticos sismorresistentes, Influencia de la rigidez, Diseño, Disipadores, Fluencia de metal.

Resumen. El diseño de control pasivo de la respuesta de pórticos de hormigón armado utilizando disipadores de energía por fluencia de metal es un tema de interés actual de la ingeniería sismorresistente. El objetivo es sustituir la disipación de energía mediante daño estructural en la rótulas plásticas por fluencia en los disipadores, que luego pueden ser reemplazados.

En este trabajo se discute la influencia de la rigidez global del pórtico en el sistema pórtico más disipadores para lograr, frente al sismo de diseño, que el pórtico permanezca elástico y distorsión máxima de piso 0,7 %, requisitos avalados por antecedentes bibliográficos.

Mediante técnicas de diseño preliminar, desarrolladas en trabajos anteriores, se determina un diagrama push-over simplificado, corte basal vs. desplazamiento en la cima, representativo de la capacidad del sistema pórtico más disipadores y brazos de instalación. En él se observa que incrementar la flexibilidad global del pórtico aumenta la diferencia entre su desplazamiento de fluencia y el de los disipadores y en consecuencia amplía el rango de deformación plástica de los mismos, disponible dentro del campo elástico del pórtico, facilitando la posibilidad de lograr el primer requisito de diseño mencionado. Por otra parte dicho incremento de la flexibilidad está limitado por el requisito impuesto para la distorsión de piso.

Lo antedicho se manifiesta cuantitativamente al calcular la demanda. Para ello se utiliza el desplazamiento de fluencia del sistema de disipadores y el corte basal promedio entre los correspondientes a la fluencia de los disipadores y del pórtico. Con estos parámetros, del espectro de diseño (YPS) se obtiene la ductilidad requerida y se calcula el desplazamiento máximo, que permite controlar si se satisfacen los requisitos.

Se concluye así que resultaría conveniente diseñar un pórtico tan flexible como lo permita el límite establecido para la distorsión de piso.

Se presentan dos ejemplos empleando pórticos de diferente rigidez global, situados en la ciudad de Mendoza. Los resultados son comparados entre sí y con los obtenidos mediante análisis no lineal, estático y dinámico.

1 INTRODUCCIÓN

Un tema de desarrollo actual en la ingeniería sismorresistente es el denominado control pasivo de estructuras sismorresistentes que, en general, consiste en la aplicación de dispositivos que modifican la respuesta estructural, sin recurrir a fuentes de energía externas, con el objetivo de disminuir o evitar el daño. Dentro de este marco se encuentran los disipadores de energía (Soong et al. 1997; Bozzo et al. 2000), accionados por la deformación de la estructura.

En particular los disipadores de energía por fluencia de metales (Soong et al. 1997; Bozzo et al. 2000; Ascheri et al. 2006) consisten en conjuntos de chapas de pequeña dimensión, instaladas en los entrepisos de los pórticos de hormigón armado sismorresistentes mediante brazos metálicos en forma de V invertida, que son accionadas por los desplazamientos relativos de los pisos respectivos. Queda así constituido un sistema estructural compuesto: pórtico – disipadores más brazos de instalación, en el cual, en términos relativos, es posible reconocer una parte flexible: el pórtico y otra rígida: disipadores más brazos de instalación. Esta última entra en fluencia prematuramente, a través de sus chapas, y disipa energía mientras el pórtico permanece elástico, evitando el daño en la estructura principal y concentrándolo en elementos reemplazables. Este comportamiento se manifiesta en el diagrama push-over, corte basal vs. desplazamiento en la cima, simplificado trilineal (Kasai et al. 2004).

En este trabajo se discute la influencia de la rigidez del pórtico en el desempeño del conjunto pórtico-disipadores más brazos de instalación. En principio parece conveniente proyectar un pórtico con rigidez global, corte basal-desplazamiento en la cima, relativamente baja, para aumentar el intervalo entre los desplazamientos de fluencia de los disipadores y el pórtico, en el cual se disipa energía sin daño en este último, pero por otra parte la respuesta de un pórtico demasiado flexible puede sobrepasar límites aconsejables para las distorsiones de piso, causando daño en elementos no estructurales de la construcción. Para realizar esta discusión se toma como ejemplo un pórtico de hormigón armado de cinco pisos ubicado en la ciudad de Mendoza para el que, aplicando técnicas de diseño preliminar, recientemente desarrolladas, se proyectan dos versiones con pórticos de diferente rigidez global.

La demanda sísmica corresponde a sismos raros, con intervalo medio de recurrencia $T = 475$ años y probabilidad de excedencia de 10 % en 50 años y está representada por un espectro de diseño inelástico en el formato de punto de fluencia o YPS, construido con acelerogramas basados en un estudio de microzonificación sísmica, para la ciudad de Mendoza (INPRES, 1995).

Los resultados son verificados con los obtenidos aplicando análisis no-lineal estático y dinámico (Möller, 2001; Ascheri et al. 2006).

Se obtienen conclusiones útiles, desde el punto de vista conceptual, para el proyecto del tipo de estructura considerada y para futuras mejoras de técnicas de diseño preliminar.

2 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA PÓRTICO-DISIPADORES MÁS BRAZOS DE INSTALACIÓN

Como se ha dicho, en el sistema estructural compuesto: pórtico-disipadores más brazos de instalación se distinguen, en términos relativos, una parte rígida formada por los disipadores y sus brazos de instalación y otra flexible, el pórtico.

A continuación se considera la capacidad del conjunto y luego la manera de evaluar la demanda sísmica sobre el mismo.

2.1 Capacidad

La capacidad del conjunto se expresa mediante el diagrama push-over, corte basal vs. desplazamiento en la cima, el que se logra por superposición de los respectivos diagramas de cada una de las partes.

- Disipadores más brazos de instalación.

En la figura 1 se muestra el disipador de energía y sus brazos de instalación correspondiente a un entrepiso genérico j del pórtico.

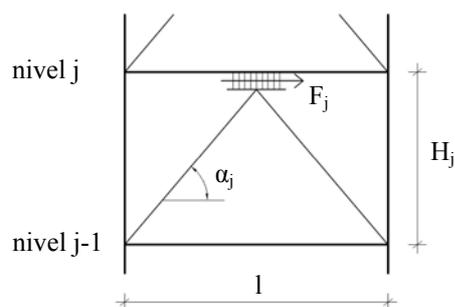


Fig. 1 Disipador y brazos de instalación de un piso genérico.

Se han adoptado disipadores formados por chapas de acero con forma triangular, siendo W_0 y L las dimensiones de la base y la altura, respectivamente, h el espesor de cada chapa, parámetros constantes para todos los disipadores, y N_j el número de chapas del disipador del entrepiso J .

Desplazamiento de fluencia y fuerza correspondiente, en el disipador genérico (Soong et al. 1997):

$$\Delta_y = \frac{\varepsilon_y L^2}{h} \quad (1)$$

$$F_{jy} = \frac{N_j E W_0 h^3}{6L^3} \Delta_y \quad (2)$$

Donde ε_y y E son, respectivamente, la deformación longitudinal específica de fluencia y el módulo de elasticidad del acero.

Se observa que el esfuerzo de corte basal correspondiente a los disipadores más brazos de instalación es F_j para $j=1$, 1^{er} entrepiso. De acuerdo con la experiencia, el disipador de este nivel se proyecta para que aporte, en fluencia, un esfuerzo del orden de la tercera parte a la mitad del esfuerzo de corte basal de fluencia del pórtico.

La disipación de energía se optimiza logrando que todos los disipadores entren en fluencia simultáneamente. Para ello se considera que mientras disipadores se mantienen elásticos, con buena aproximación, el esfuerzo de corte es transmitido por el sistema de disipadores más brazos de instalación y que dicho esfuerzo resulta de la aplicación de fuerzas horizontales distribuidas en altura con la conocida ley de los métodos estáticos reglamentarios. Luego se consigue el objetivo planteado adoptando el número de chapas N_j , a partir del valor adoptado para $j=1$ y con la ley de variación en altura del esfuerzo de corte.

Luego, cuando los disipadores entran en fluencia, la contribución al desplazamiento en la

cima del pórtico será:

$$D_{yd}^d = N_p \Delta_y \quad (3)$$

Donde: N_p es el número de pisos y Δ_y el desplazamiento de fluencia, según ec. (1).

Por otra parte se deben considerar los desplazamientos debido a las deformaciones de los brazos de instalación.

De acuerdo con la figura 1 el esfuerzo axial en cada brazo, uno traccionado y otro comprimido, resulta:

$$S_j = \pm \frac{F_j}{2 \cos \alpha} \quad (4)$$

Y, la deformación longitudinal correspondiente:

$$\delta = \pm \frac{S_j H_j}{EA \operatorname{sen} \alpha_j} \quad (5)$$

Donde: EA es la rigidez axial.

En la figura 2 se muestra, para el entrepiso genérico, el desplazamiento horizontal debido a la deformación de los brazos de instalación.

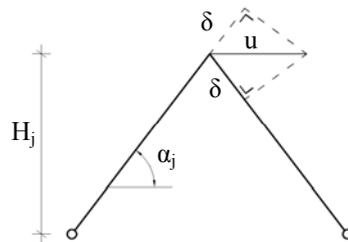


Fig. 2 Desplazamiento horizontal genérico debido a la deformación de los brazos de instalación.

Resulta:

$$u = \frac{\delta}{\cos \alpha_j} \quad (6)$$

De las ecuaciones (5) y (6), resulta:

$$u = \frac{H_j}{\operatorname{sen} \alpha_j \cos \alpha_j} \frac{S_j}{EA} \quad (7)$$

Los brazos de instalación, metálicos, se diseñan tal que:

$$\frac{S_{jy}}{EA} = p_b \varepsilon_{fb} \quad (8)$$

Donde: S_{jy} es el esfuerzo axial en correspondencia con la fluencia del disipador, resulta de la ecuac. (4) para F_{jy} , ε_{fb} es la deformación longitudinal específica de fluencia del acero del brazo y p_b un porcentaje bajo, porque es deseable un desplazamiento en la cima bajo cuando los disipadores entran en fluencia, para permitir la disipación de energía cuando el pórtico responde en el período elástico.

Según las ecs. (7) y (8), el desplazamiento en la cima debido a la deformación de los brazos de instalación, cuando los disipadores entran en fluencia, resulta:

$$D_{yd}^b = p_b \varepsilon_{fb} \sum_{j=1}^{N_p} \frac{H_j}{\text{sen} \alpha_j \cos \alpha_j} \quad (9)$$

También se considera la contribución en el desplazamiento en la cima debido a la deformación de las vigas que accionan a los disipadores. Para un piso genérico, figura 1, se tiene en cuenta la deformación de la armadura del tramo traccionado de la viga, de longitud $0,5 l$, encargado de transmitir la mitad de la fuerza F_j .

Cuando el disipador entra en fluencia dicha deformación resulta:

$$\frac{F_{yj}}{2} \frac{0,5l}{EA} = \frac{F_{yj}}{EA} \frac{l}{4} \quad (10)$$

Donde: EA es la rigidez axial de la armadura traccionada.

Se elige:

$$\frac{F_{yj}}{EA} = p_v \varepsilon_{fv} \quad (11)$$

Donde: ε_{fv} es la deformación de fluencia de la armadura de la viga y p_v un porcentaje adoptado para controlar el estado de fisuración del hormigón de la viga.

Según las ecs. (10) y (11), el desplazamiento en la cima debido a la deformación de las vigas, cuando los disipadores entran en fluencia, resulta:

$$D_{yd}^v = p_v \varepsilon_v \frac{l}{4} N_p \quad (12)$$

En la figura 3 se muestra el diagrama push-over del sistema disipadores y brazos de instalación.

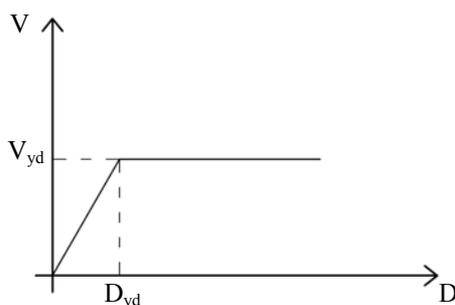


Fig. 3 Diagrama push-over de los disipadores y brazos de instalación.

Donde el desplazamiento en la cima, en correspondencia con la entrada en fluencia de los disipadores, de acuerdo con las ecs. (3), (9) y (12), es:

$$D_{yd} = D_{yd}^d + D_{yd}^b + D_{yd}^v \quad (13)$$

El esfuerzo de corte en la base V_{yd} resulta igual a la fuerza de fluencia del disipador del primer piso, ecuac. (2) para $j = 1$.

- Pórtico.

Para determinar el diagrama push-over del pórtico se aplica un procedimiento que se

encuentra en trabajos anteriores (Rubinstein et al. 2006; Rubinstein et al. 2007) y se resume a continuación.

Se adopta un mecanismo dúctil con rótulas plásticas en los extremos inferiores de las columnas del primer piso y en los extremos de vigas hasta aproximadamente las dos terceras partes de la altura del pórtico. El momento flector de fluencia en cada rótula se calcula como el producto de la curvatura de fluencia por la rigidez a flexión. La curvatura de fluencia se determina a partir de la geometría de la sección recta de la barra y de la deformación de fluencia de la armadura longitudinal (Priestley, 1998) y para la rigidez a flexión se utilizan valores reglamentarios del momento de inercia (INPRES-CIRSOC, 2000), que tienen en cuenta la fisuración. Luego el corte en la base se calcula aplicando el Principio de los Trabajos Virtuales sobre el mecanismo adoptado.

Por otra parte la rigidez global, correspondiente a corte en la base vs. desplazamiento en la cima se determina cargando al pórtico con carga triangular invertida de resultante unitaria y con la mencionada rigidez a flexión para sus barras.

En la figura 4 se indica el diagrama push-over del pórtico, en forma bilineal, donde V_{yp} y D_{yp} son, respectivamente, el corte basal y el desplazamiento en la cima correspondientes a la fluencia.

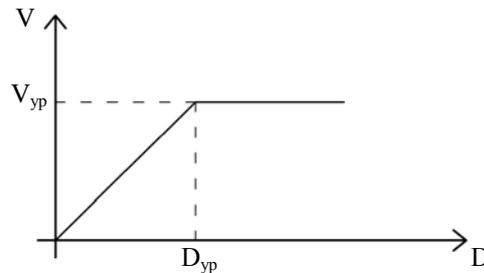


Fig. 4 Diagrama push-over del pórtico.

- Sistema pórtico-disipadores más brazos de instalación.

El diagrama push-over, representado en la figura 5, se obtiene por superposición de los diagramas de cada una de las partes componentes, también indicados en dicha figura.

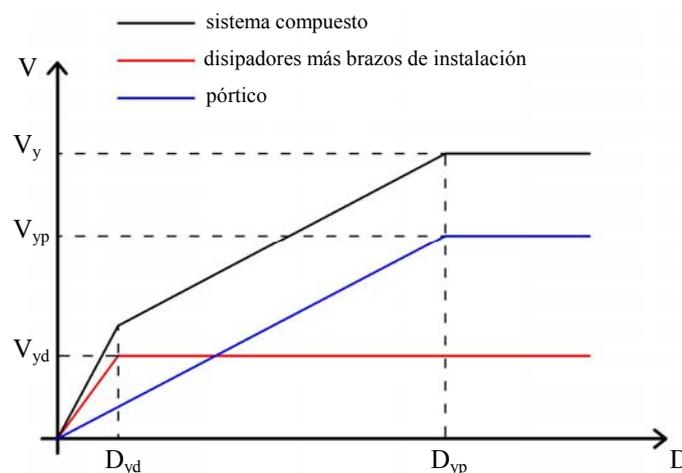


Fig. 5 Diagramas push-over.

La resistencia del sistema compuesto resulta:

$$V_y = V_{yp} + V_{yd} \quad (14)$$

2.2 Demanda

La demanda se expresa mediante un espectro de diseño inelástico en el formato de punto de fluencia o YPS (Aschheim et al. 2000).

En la figura 5 se observa que la parte disipadores más brazos de instalación es la primera en agotar su resistencia y disipa energía en el intervalo $D_{yd} - D_{yp}$, en el que el pórtico se mantiene elástico, sin experimentar daño. En consecuencia la demanda se calcula teniendo presente esta consideración.

Los parámetros de ingreso son el desplazamiento en la cima D_{yd} correspondiente a la fluencia de los disipadores, expresado en el sistema equivalente de un grado de libertad, para lo que se supone el modo fundamental de vibración con desplazamientos proporcionales a la altura y la resistencia promedio correspondiente al intervalo $D_{yd} - D_{yp}$, de la figura 5:

$$V_{yd} + V_{yp} \frac{D_{yd}}{D_{yp}} \quad (15)$$

y V_y , expresada por unidad de peso efectivo del primer modo.

Se observa que este parámetro calculado para el conjunto pórtico-disipadores más brazos de instalación coincide con el correspondiente a los disipadores más brazos de instalación debido a que se supone que la parte del peso efectivo en el primer modo que corresponde a este sistema es un porcentaje del total igual al de la respectiva participación en el corte basal.

Como resultado, del espectro de diseño YPS, se obtiene la ductilidad requerida μ_r y se calcula el desplazamiento requerido en la cima:

$$D_r = \mu_r \cdot D_{yd} \quad (16)$$

Con este desplazamiento se verifica el cumplimiento de requisitos de diseño (Bozzo et al. 2000; Kasai et al. 2004) establecidos de acuerdo con los objetivos del control pasivo: concentrar el daño en los disipadores, reemplazables, evitarlo en la estructura principal y acotarlo para los elementos no estructurales.

Se debe verificar:

Respuesta del pórtico en el campo elástico:

$$D_r \leq D_{yp} \quad (17)$$

Limitación en la distorsión de piso:

$$\frac{D_r}{H} \leq 0,7\% \quad (18)$$

Donde H es la altura del pórtico.

3 INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ DEL PÓRTICO EN LA RESPUESTA DEL CONJUNTO

De acuerdo con lo visto en el apartado anterior, sobre el comportamiento del sistema pórtico-disipadores más brazos de instalación, resulta de interés para el diseño analizar la influencia que en dicho comportamiento tiene una variación en la rigidez del pórtico, conservando los mismos disipadores y brazos de instalación.

Se considera una disminución en la rigidez del pórtico originada en una variación de la altura de las secciones rectas de sus barras. De este modo se produce una disminución en la

resistencia y un aumento en el desplazamiento de fluencia en la cima.

Se pueden señalar como ventajas:

Incremento del intervalo de desplazamientos $D_{yd} - D_{yp}$ en el cual los disipadores pueden actuar en el período elástico del pórtico, aumentando la posibilidad de satisfacer la condición (17).

Disminución del esfuerzo de corte transmitido a la fundación.

Desventaja:

Incremento de la posibilidad de no satisfacer la condición (18).

Escribiendo las condiciones (17) y (18) en forma unificada:

$$D_r \leq \text{mín.}(D_{yp}; 0,7\% H) \quad (19)$$

Se observa que para su verificación no implica ventaja que D_{yp} supere a $0,7\% H$.

Se puede concluir que resulta conveniente diseñar un pórtico flexible, con la limitación:

$$D_{yp} \leq 0,7\% H \quad (20)$$

4 VERIFICACIÓN INELÁSTICA

En este trabajo los resultados obtenidos, aplicando procedimientos de diseño preliminar descriptos en el apartado 2, para dos versiones con diferente rigidez global, de un pórtico de cinco pisos de hormigón armado con disipadores por fluencia de metal, son verificados aplicando un software de análisis no lineal (Möller, 2001) estático, para determinar la capacidad y dinámico, para calcular la demanda.

En dicho software se encuentra incorporado un elemento (Ascheri et al. 2006) que cuenta con tres resortes no lineales, para cada grado de libertad, que permite simular el comportamiento de los disipadores por fluencia de metal.

A continuación se resumen las características del software mencionado.

El pórtico se discretiza con elementos de barra, con los cuales se alcanza un buen balance entre precisión y simplicidad. Para representar los diferentes mecanismos que contribuyen al comportamiento histerético de las regiones críticas de miembros de hormigón armado, el elemento se descompone en varios subelementos como se muestra en la figura 6.

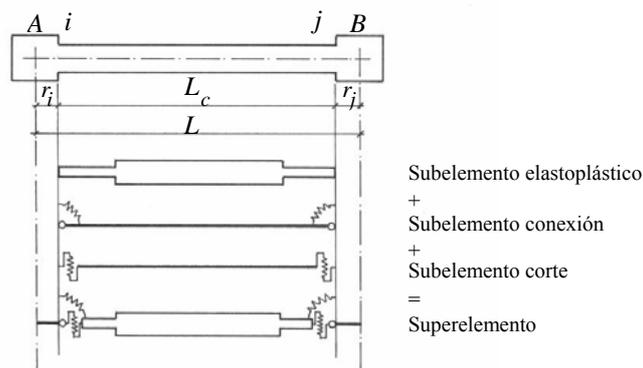


Fig. 6 Elemento de barra – Subelementos.

- Subelemento elastoplástico: representa el comportamiento elástico de la barra y la respuesta no lineal de las regiones extremas, con longitud variable dependiendo de la historia de carga.
- Subelemento conexión: caracteriza la rotación concentrada que se produce en la interfaz

barra-nudo por deterioro del anclaje y deslizamiento de armaduras ancladas en el nudo.

- Subelemento corte: describe la distorsión por corte en las regiones críticas de la barra y el deslizamiento por corte en la interfaz barra-nudo. Extremos rígidos consideran nodos de dimensiones no despreciables.

En este trabajo se utiliza solamente el subelemento elastoplástico, el cual se representa en la figura 7.

Las hipótesis fundamentales son: (a) El estado de toda la zona plástica, durante carga, descarga o recarga, es controlado por el estado de la sección extrema. (b) La rigidez de la zona plástica se representa por una rigidez promedio efectiva pEI , la cual depende de la sección extrema. Estas hipótesis significan que sólo hay que seguir la historia momento-curvatura de las dos secciones extremas del elemento.

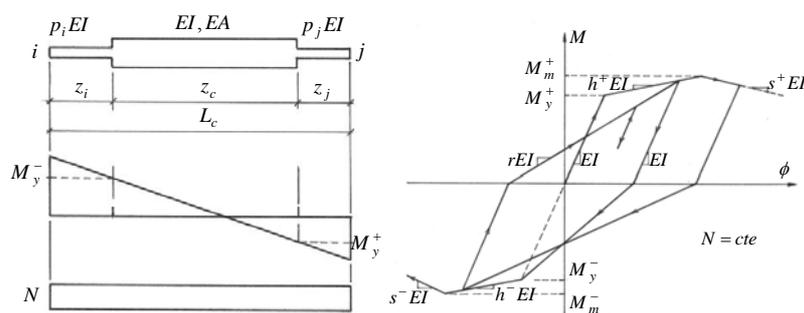


Fig. 7 Subelemento elastoplástico – Relación momento curvatura.

También se muestra en la figura 7 la relación momento-curvatura adoptada, con las reglas de descarga y recarga del modelo de Clough.

La relación $M - \phi$ se define para una sección de hormigón armado, es construida para un esfuerzo axial constante, usando las siguientes hipótesis: (a) La sección permanece plana después de la deformación y normal al eje deformado del miembro. (b) Los modelos de Mander son utilizados para las relaciones constitutivas del hormigón y del acero.

La curvatura última ϕ_u se define cuando al final de un número predeterminado de ciclos completos hasta $\pm \phi_u$ uno de los siguientes estados límites es alcanzado: (a) Reducción del 20 % del momento resistente. (b) Agotamiento de la capacidad de absorber energía por parte de la armadura transversal. A partir del balance energético de la sección, la deformación última a compresión del hormigón es calculada. (c) Exceder la deformación máxima a tracción o a compresión de la armadura longitudinal.

En el modelo histerético de la figura 7 los factores de rigidez p_i , p_j tienen los siguientes valores: (a) elástico: $p = 1$, (b) endurecimiento: $p = h$, (c) ablandamiento: $p = s$ con $z_i = l_p$ longitud característica $\cong 0.75 d$, con d : altura de la sección, (d) descarga: $p = 1$, (e) recarga: $p = 2/(1/r + 1)$ que se obtiene de promediar la rigidez de la sección extrema rEI con la elástica $1EI$ del final de la zona plástica.

Los parámetros M_y , M_m , EI , h , s para las direcciones positivas y negativas son calculadas a partir de la linealización de la real relación $M - \phi$ obtenida de un procesamiento de la sección.

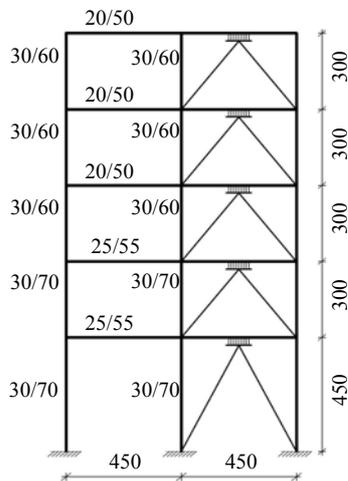
El sistema de ecuaciones no lineales es formulado en un esquema incremental Lagrangeano actualizado. Se resuelve con integración directa paso a paso en el tiempo con el

método de Newmark, e iteraciones de Newton-Raphson para ajustar el equilibrio entre acciones externas y fuerzas internas de los elementos, considerando además el balance de fuerzas internas entre los subelementos.

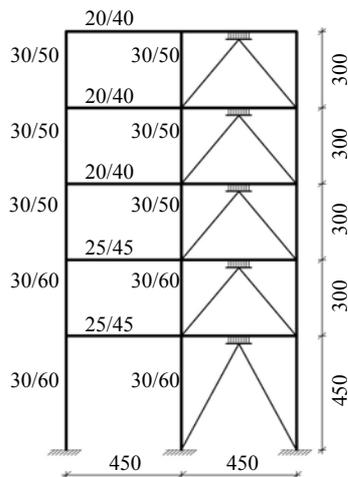
Como los subelementos están conectados en serie, la flexibilidad del superelemento se obtiene por simple suma de las matrices de flexibilidad de los subelementos. El resultado se invierte y se expresa en términos de los clásicos seis grados de libertad de una barra en el plano de longitud L_c . Transformaciones geométricas tienen en cuenta extremos rígidos y grandes desplazamientos. Se considera una matriz de masa consistente y amortiguamiento viscoso proporcional a la masa y rigidez.

5 EJEMPLO

En la figura 8 se muestran dos versiones, con diferente rigidez global, del pórtico genérico de un sistema sismorresistente de cinco pisos, formado por cuatro pórticos, ubicado en la ciudad de Mendoza. Los disipadores y brazos de instalación son los mismos para ambos casos, denominados en adelante, en forma comparativa, pórtico rígido y pórtico flexible.



(a) Pórtico Rígido



(b) Pórtico Flexible

Notas

- Masa en cada nivel:
 $m = 123,85 \text{ KN seg}^2/\text{m}$
- Carga gravitacional en cada nivel:
permanente: 8 KN/m^2
sobrecarga: 2 KN/m^2
factor de mayoración de la sobrecarga: $f_1 = 0,50$
- Materiales:
Según CIRSOC 201:
Hormigón: H-25.
Acero: ADN 420
- Medidas en cm.
- Medidas indicadas de las secciones rectas de las barras del pórtico: espesor/altura
- Disipadores
Material: Acero F-24
Geometría: $L = 200 \text{ mm}$
 $W_o = 133 \text{ mm}$
 $h = 36,1 \text{ mm}$
Número de chapas:
 $N = 10, 9, 8, 6 \text{ y } 3$
del 1° al 5° piso
- Brazos de instalación
Piso 1: 2 PN U 20
Piso 2: 2 PN U 16
Piso 3: 2 PN U 14
Piso 4: 2 PN U 12
Piso 5: 2 PN U 12
Forma genérica: tubular

Fig. 8 Pórticos y sistema de disipadores.

5.1 Diagramas push-over

En la figura 9 se muestran los diagramas push-over, para cada una de las variantes, obtenidos aplicando técnicas de diseño preliminar.

Son diagramas representativos de la capacidad del sistema pórtico-disipadores más brazos de instalación. En ellos se pueden observar los intervalos del desplazamiento en la cima: (1,96 - 11,29) cm para el pórtico rígido y (1,96 - 16,16) cm para el pórtico flexible, en los que se produce disipación de energía, con comportamiento elástico del pórtico.

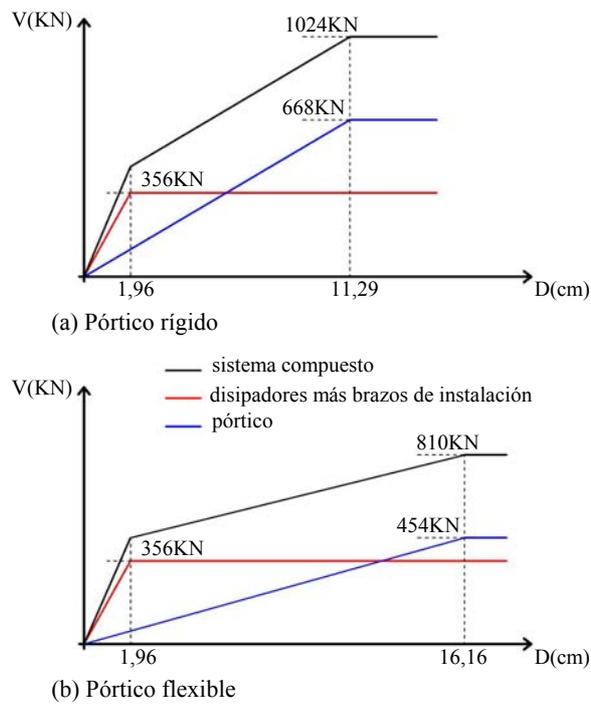


Fig. 9 Diagramas push-over.

5.2 Espectro de diseño

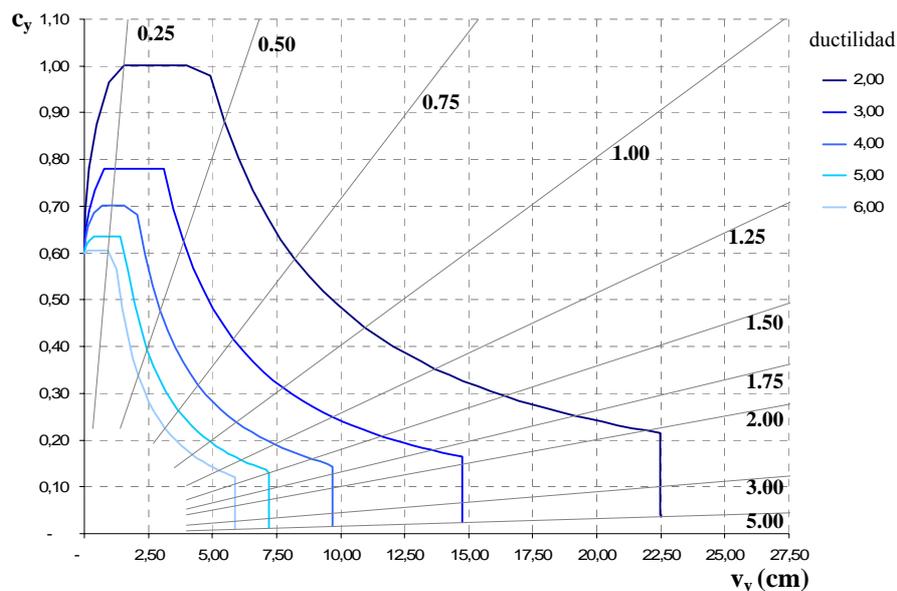


Fig. 10 Espectro de punto de fluencia.

En la figura 10 se encuentra el espectro de diseño en el formato de punto de fluencia o

YPS. Para su construcción se consideraron sismos raros, con intervalo medio de recurrencia $T = 475$ años y probabilidad de excedencia de 10 % en 50 años. Se utilizaron nueve acelerogramas deducidos de un estudio de microzonificación sísmica para la ciudad de Mendoza (INPRES, 1995) y de los correspondientes espectros de respuesta se determinó el espectro de diseño mediante el valor medio más un desvío standard. Se obtuvo la respuesta inelástica, asociada a distintos niveles de ductilidad.

5.3 Demanda y verificaciones

A partir de los respectivos diagramas de push-over, se calculan los parámetros de entrada al espectro de diseño, de acuerdo a lo expuesto en el apartado 2.2 y como resultado se obtiene la ductilidad requerida para cada caso.

Ductilidades requeridas:

Pórtico rígido: $\mu_r = 5,50$

Pórtico flexible: $\mu_r = 6,20$

Desplazamientos, en la cima, máximos requeridos: $D_r = \mu_r \cdot D_{yd}$

Pórtico rígido: $D_r = 5,50 \cdot 1,96 \text{ cm} = 10,78 \text{ cm}$

Pórtico flexible: $D_r = 6,20 \cdot 1,96 \text{ cm} = 12,15 \text{ cm}$

Verificaciones:

Pórtico rígido:

$D_r = 10,78 \text{ cm} < D_{yp} = 11,29 \text{ cm}$

$\frac{D_r}{H} = \frac{10,78 \text{ cm}}{1650 \text{ cm}} = 0,65 \% < 0,7 \%$

Pórtico flexible:

$D_r = 12,15 \text{ cm} < D_{yp} = 16,16 \text{ cm}$

$\frac{D_r}{H} = \frac{12,15 \text{ cm}}{1650 \text{ cm}} = 0,74 \% \cong 0,7 \%$

Se observa que en ambos casos se satisfacen los requisitos de diseño y, como es de esperar, el pórtico flexible satisface con mayor amplitud la condición de respuesta del pórtico en el campo elástico y ocurre lo contrario con respecto a la distorsión de piso.

5.4 Verificaciones inelásticas

- Análisis no lineal estático

En la figura 11 se encuentran los diagramas push-over correspondientes a análisis no lineal y los obtenidos con procedimientos de diseño preliminar.

En ambos casos se observa que entre dichos diagramas existe un buen acuerdo para el punto de fluencia de los disipadores y diferencias en el punto correspondiente a la formación del mecanismo dúctil en el pórtico, mayores para el pórtico flexible.

Estas diferencias se pueden atribuir a una estimación por defecto de la rigidez a flexión del hormigón figurado, en el procedimiento de diseño preliminar.

- Análisis no lineal dinámico

Se emplearon los acelerogramas usados para la construcción del espectro de diseño y los resultados obtenidos correspondientes al valor medio más un desvío Standard, son los siguientes:

Desplazamiento máximo en la cima:

Pórtico rígido: 8,05 cm

Pórtico flexible: 8,00 cm

Distorsión máxima de piso:

Pórtico rígido (3^{er}. nivel): 0,64 %

Pórtico flexible (2^{do}. nivel): 0,69 %

Distorsión de piso media:

Pórtico rígido: 8,05 cm/1650 cm = 0,49 %

Pórtico flexible: 8,00 cm/1650 cm = 0,48 %

Del apartado 5.3 se transcriben los respectivos valores obtenidos con el diseño preliminar:

Pórtico rígido: 10,78 cm y 0,65 %

Pórtico flexible: 12,15 cm y 0,74 %

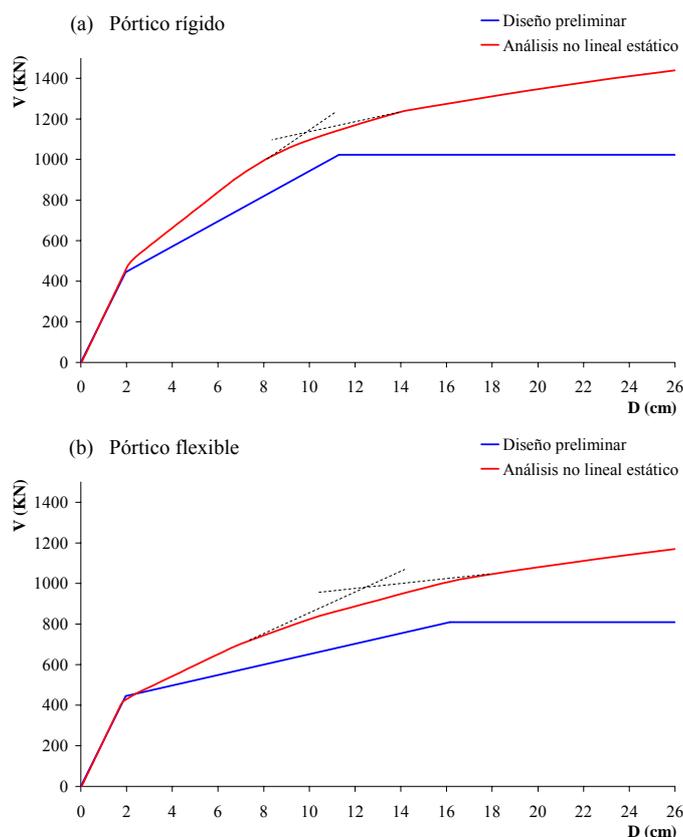


Fig. 11 Comparación de diagramas push – over.

La observación de los resultados del análisis no lineal estático y dinámico indica que para ambos pórticos el desplazamiento máximo en la cima se encuentra en el período elástico y, de acuerdo a lo esperado, con mayor margen para el flexible.

Dicho desplazamiento resultó prácticamente el mismo para ambos casos y esto podría explicarse por el carácter vibratorio de los acelerogramas empleados. En cambio empleando, por ejemplo, el terremoto de Kobe se obtuvo 13,82 cm para el pórtico rígido y 16,00 cm para el flexible.

Por otra parte la distorsión máxima de piso es, de acuerdo a lo esperado, mayor para el pórtico flexible e indica que referir la calidad de la respuesta al desplazamiento máximo en la cima es una simplificación que no tiene en cuenta la distribución de las distorsiones de piso, que resultan más representativas de las deformaciones impuestas al pórtico.

La comparación con los resultados del procedimiento de diseño preliminar muestra que

estos se encuentran del lado de la seguridad. Las diferencias, igual que para el caso estático, pueden disminuir si se incrementa la rigidez a flexión estimada para el hormigón fisurado.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha considerado el control pasivo de pórticos de hormigón armado sismorresistentes, mediante disipadores de energía por fluencia de metal y se ha discutido la influencia de la rigidez del pórtico en el desempeño del conjunto pórtico-disipadores más brazos de instalación.

Para el diseño del sistema de control se han empleado técnicas sencillas, de diseño preliminar, y se establecieron como requisitos: respuesta del pórtico en el campo elástico y un valor límite para la distorsión de piso media.

Para realizar la discusión se consideraron dos versiones, con diferente rigidez, del pórtico genérico de un sistema sismorresistente de cinco pisos, formado por cuatro pórticos, ubicado en la ciudad de Mendoza.

Los resultados muestran que para ambos casos se satisfacen los requisitos de diseño y, como es de esperar, el pórtico más flexible cumple con mayor amplitud la condición de respuesta del pórtico en el campo elástico y ocurre lo contrario con respecto a la distorsión de piso.

También se han obtenido resultados aplicando análisis no lineal estático y dinámico que confirmaron lo anteriormente expuesto y han mostrado que los resultados obtenidos con el procedimiento de diseño preliminar se encuentran del lado de la seguridad, con diferencias que pueden disminuir si se incrementa la rigidez a flexión estimada para el hormigón fisurado.

Se puede concluir que diversos aspectos del desarrollo del trabajo, los resultados obtenidos y la discusión de los mismos constituyen un aporte de interés para el diseño de control pasivo de pórticos mediante disipadores por fluencia de metal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Nacional de Rosario y al Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras, por el apoyo recibido para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Ascheri, J. P.; Rubinstein, M.; Möller, O. Diseño de control pasivo de pórticos sismorresistentes de varios pisos aplicando resultados de control activo predictivo, *Memoria XIX Jornadas AIE*, 2006.

Aschheim, M.; Black, E. F. Yield point spectra for seismic design and rehabilitation, *Earthquake Spectra*, 16 (2), 2000.

Bozzo, L. M.; Barbat, A. H. Diseño sismorresistente de edificios. Técnicas convencionales y avanzadas. *Editorial Reverté, S.A.*, 2000.

INPRES Microzonificación sísmica del Gran Mendoza. *Publicación Técnica N° 19*, 1995.

INPRES, CIRSOC, *Proyecto de Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes, Parte II, Construcciones de Hormigón Armado*, 2000.

Kasai, K.; Ito, H. JSSI Manual for building passive control technology. Part-8, Peak response

evaluation and design for elastically damped system. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, Canada. Paper n° 5060, 2004.

Möller, O. Metodología para evaluación de la probabilidad de falla de estructuras sismorresistentes y calibración de códigos. *Tesis de Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional de Rosario*, 249 páginas, 2001.

Priestley, M. J. N. Brief comments on elastic flexibility of reinforced concrete frames and significance to seismic design. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 31, N° 4, 1998.

Rubinstein, M.; Giuliano, A.; Möller, O. Diseño preliminar de estructuras sismorresistentes: un tratamiento unificado de los efectos traslacionales y rotacionales, *Memoria XIX Jornadas AIE*, 2006.

Rubinstein, M.; Möller, O.; Giuliano, A. Preliminary design and inelastic assessment of earthquake-resistant structural systems. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 26, N° 3, 297-313, 2007.

Soong, T. T.; Dargush, G. F. Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering. *John Wiley & Sons Ltd.*, 1997.