

Reacondicionamiento sísmico de pórticos de hormigón armado con relleno de mampostería

Seismic retrofitting of reinforced concrete frames with masonry infill pannels

Ricardo Perera Velamazán

Dr. Ingeniero de Minas, ETSI Industriales
Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales (UPM)



Susana Gómez Schnackenberg

Dr. Ingeniero Industrial, ETSI Industriales
Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales (UPM)



Enrique Alarcón Álvarez

Dr. Ingeniero de Caminos, ETSI Industriales
Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales (UPM)

RESUMEN

Tanto las investigaciones experimentales y numéricas como las observaciones llevadas a cabo en áreas afectadas por terremotos aportan de forma continua nuevos datos sobre el comportamiento sísmico de las construcciones. Los avances en este campo redundan en normativas más exigentes y sistemas constructivos más efectivos.

Dentro de la ingeniería sísmica, uno de los objetivos está en proporcionar métodos simplificados de evaluación del daño potencial en una estructura sometida a acciones sísmicas como forma de medir la posible reparabilidad de la misma.

En el presente trabajo se propone una técnica de reacondicionamiento sísmico aplicada a pórticos de hormigón armado con relleno de mampostería. La eficiencia de dicha técnica es evaluada mediante ensayos experimentales.

Asimismo se propone un modelo numérico simplificado de evaluación de daño estructural cuya validación es llevada a cabo con los resultados experimentales anteriores.

SUMMARY

The experimental and numerical research as well as the observations performed in areas affected by earthquakes contribute new data about the seismic behaviour of buildings. The advances in this field produce more demanding codes and more effective construction systems.

One of the main objectives of seismic engineering is to find simplified methods of assesment of the potential damage in a structure under earthquake loadings as a measure of the reparability of the structure.

In the present work a seismic retrofitting technique is proposed for masonry infilled reinforced concrete frames. The performance of this technique is evaluated through experimental tests.

In the same way, a simplified numerical model for structural damage evaluation is proposed and calibrated with the experimental results.

1. INTRODUCCIÓN

Las consecuencias producidas por los terremotos más recientes (Kobe, Northridge, Loma Prieta, Umbria-Italia, Turquía) ha puesto de manifiesto, una vez más, los trágicos efectos acaecidos sobre la población - miles de personas muertas y heridas, personas sin vivienda, daños irreversibles sobre los edificios y sobre la herencia cultural de un país, alteración brusca de los sistemas que constituyen la infraestructura de una ciudad- en definitiva, un gran terremoto se traduce en pérdidas socio-económicas muy elevadas.

¿Cómo se podrían evitar situaciones tan catastróficas? Se están haciendo en este sentido en los últimos años esfuerzos en distintas direcciones. Por un lado, se dedica mucha aten-

ción a actualizar constantemente las normativas de proyecto sismorresistente de acuerdo con los estudios más avanzados. Se hace necesario también establecer un control estricto de calidad durante el proceso de construcción. Sin embargo, si se piensa en el parque de viviendas de cualquier ciudad localizada en una zona de peligrosidad sísmica elevada se puede afirmar que el porcentaje de edificios construidos con códigos anteriores a las normativas sismorresistentes modernas es muy elevado y es indudable que el daño experimentado por las estructuras depende fuertemente de la normativa según la cual fue proyectada. A este efecto, se podría recordar la distinción que se hizo en USA entre los edificios proyectados antes y después de 1971 debido a la actualización de las normativas americanas tras el terremoto de San Fernando en 1971. Por ello, la creciente conciencia de la necesidad de poner al día las construcciones existentes respecto al estado de arte ha hecho del procedimiento de evaluación y reacondicionamiento sísmico un campo de estudio en auge y, de hecho, existen ya recomendaciones en este sentido.

Así, por ejemplo, abunda en el sur de Europa la edificación de pórticos de hormigón armado con relleno de mampostería. El efecto de la mampostería no se considera en las normas, pero estudios recientes apuntan a que su influencia en el comportamiento sísmico de la estructura es positiva cuando el pórtico está proyectado de acuerdo con normas sísmicas actuales. Sin embargo, muchos de los edificios que hay construidos han sido proyectados de acuerdo a normas obsoletas o bien, sin tener en cuenta recomendación sísmica alguna.

La esencia de cualquier procedimiento de evaluación sísmica se basa en la comparación entre una medida de la "demanda" que el terremoto impone sobre la estructura y una medida de la "capacidad" que el edificio es capaz de aportar para resistir. En este proceso comparativo se emplean habitualmente índices de daño caracterizados por alguno de los parámetros ligados a la respuesta estructural tales como la ductilidad estructural y la energía disipada. Estos índices pretenden tener en cuenta los modos de fallo. A la evaluación del daño potencial en una estructura sometida a acciones sísmicas se le han dedicado numerosos estudios e investigaciones en los últimos años.

Respecto al reacondicionamiento, aunque el número de soluciones ensayadas es elevado, se pueden distinguir tres categorías fundamentales en que se incluyen todas ellas. Una opción es desacoplar la respuesta del edificio de la del terreno por medio de aisladores, lo que obliga a intervenir en la cimentación. Esto resulta complejo y costoso, y sólo para edificaciones con exigencias muy particulares se hace adecuada esta técnica.

Otra opción consiste en intervenir sobre la estructura directamente incrementando su capacidad de disipación. En esta dirección hay un gran número de técnicas que pretenden incrementar la resistencia de los elementos de la estructura, su ductilidad, o ambas a base de recubrimientos de distintos materiales (acero, fibra de carbono,...) o de la inyección de los mismos.

Una tercera opción consiste en dotar a la estructura de elementos disipadores adicionales. Se pretende concentrar fundamentalmente en estos elementos la disipación de energía quedando de este modo protegida la estructura.

1.1. Objetivos

Este trabajo se concentra en la evaluación de una técnica de reacondicionamiento específica aplicada a la tipología de pórticos de hormigón armado con relleno de mampostería dimensionados con normativas antiguas. Este tipo de reacondicionamiento se enmarca en la tercera categoría de técnicas mencionadas anteriormente y consiste en sustituir uno de los paños de relleno por un arriostramiento metálico excéntrico con un elemento disipador metálico vertical de cortante. Se pretende conservar así el efecto rigidizador positivo de la mampostería, mientras se compensa la escasa ductilidad de ésta con la capacidad de disipación de un elemento metálico.

En la práctica habitual este tipo de elementos disipadores, perfiles metálicos de reducida longitud, se sitúan en el medio o en los extremos de las vigas del piso. Sin embargo, bajo la acción de sismos severos, se deben aceptar deformaciones elevadas de los disipadores en aquellas vigas. En el caso de que las vigas tuviesen que permanecer en el rango elástico, se deben emplear elementos disipadores verticales con el fin de trasladar las deformaciones plásticas a zonas más tolerables donde resulte más fácil la reparación o sustitución de las partes dañadas.

Paralelamente a la evaluación de resultados experimentales obtenidos mediante la aplicación de esta técnica, en lo que sigue se desarrolla un modelo numérico de evaluación del daño sísmico cuyo objetivo sea el de predecir el comportamiento sísmico de pórticos de hormigón armado y, por tanto, la posibilidad de utilizarlo como herramienta numérica en la fase de decisión sobre la necesidad de reacondicionamiento sísmico de una estructura.

De su comparación con los resultados experimentales se pueden extraer las conclusiones pertinentes sobre su aplicabilidad futura.

2. MODELO DE EVALUACIÓN NUMÉRICA

Para la evaluación numérica del daño estructural en pórticos de hormigón armado con relleno de mampostería y la simulación posterior de la técnica de reacondicionamiento propuesta en este trabajo se hace necesario el desarrollo de tres modelos numéricos diferentes: uno para los elementos que constituyen el pórtico, otro para los muros de fábrica y, por último, el modelo correspondiente al reacondicionamiento.

A continuación, se presenta de una forma simplificada cada uno de los tres modelos empleados.

2.1. Modelos de evaluación del daño sísmico

A la evaluación del daño potencial en estructuras de hormigón armado sometidas a acciones sísmicas se han dedicado muchos estudios e investigaciones en las últimas décadas. El procedimiento generalmente aceptado consiste en una evaluación en dos etapas: primeramente se lleva a cabo un cálculo estático no lineal de la estructura y el índice de daño se calcula a posteriori en una etapa de posproceso. Este método no

deja de resultar paradójico al utilizar para el cálculo del daño un procedimiento en el que no se incluye la influencia del mismo.

De una forma más congruente se puede plantear la evaluación del daño como un proceso acoplado al cálculo estructural y, por tanto, influyendo sobre el comportamiento mecánico de la estructura. Para ello, se ha de establecer el modelo utilizando los conceptos de la Mecánica de la Degradación Continua lo cual conduce a formulaciones demasiado complejas.

Otra alternativa que es la utilizada en este estudio se basa en una aplicación de los conceptos de la Mecánica de la Degradación a los modelos de rótula plástica concentrada en los extremos. Una generalización de estos últimos para incluir el daño supone que en los extremos de cada barra se concentran no sólo los efectos plásticos sino también todos aquellos efectos que producen disipación en la estructura. Para ello, al igual que con la deformación plástica se definen unas variables de degradación en los extremos de las barras que permiten cuantificar el deterioro sufrido en cada una de estas secciones extremas.

Una aplicación de esta formulación para la simulación de los elementos del pórtico de hormigón y los muros de mampostería es la que se describe en los siguientes apartados de forma simplificada.

2.1.1. Modelo de daño concentrado para elementos aperticados

Como se ha mencionado anteriormente, en el desarrollo del modelo se emplean los conceptos de la Mecánica de la Degradación Continua. Según esto, la influencia del daño sobre el comportamiento elástico de un elemento se considera mediante el principio de equivalencia en deformaciones [1] que permite expresar la deformación reversible como:

$$\varepsilon - \varepsilon^p = \frac{\sigma}{E(1-d)} \quad (1)$$

donde d representa una variable de daño isotrópica y la rigidez de descarga del material dañado queda definida por $E(1-d)$.

De la deformación reversible la deformación verdaderamente elástica se obtiene como:

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

El resto de la deformación reversible se asocia a la microfisuración producida durante el proceso de carga y representa el proceso de degradación de las propiedades elásticas [2]. Su valor se obtiene a partir de (1) y (2) como:

$$\varepsilon^s = \frac{\sigma d}{E(1-d)} \quad (3)$$

En el caso particular de un elemento de celosía la aplicación de la ecuación (3) conduce a la siguiente expresión

$$\delta^d = \frac{NL}{EA} \frac{d_a}{(1-d_a)} \quad (4)$$

en la cual N , δ^d y d_a representan el esfuerzo axial, el alargamiento debido al daño de la barra y el daño axial, respectivamente.

Este resultado constituye el núcleo del modelo de daño desarrollado en este estudio ya que, por generalización de los modelos de plasticidad concentrada, se suponen todos los efectos disipativos considerados (daño y plasticidad) concentrados en los extremos de las barras. Esto permite representar cualquier elemento de pórtico de forma idealizada mediante un elemento elástico con muelles en los extremos representativos de los fenómenos disipativos (Modelo de disipación concentrada) [3].

Si se considera para cada elemento la distribución de tensiones definida por el vector $q=(M_i, M_j, N)^t$ conteniendo los momentos de flexión en los extremos y el esfuerzo axial se tiene:

$$u^d = \begin{pmatrix} \theta_i^d \\ \theta_j^d \\ \delta^d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{d_i}{1-d_i} \frac{L}{4EI} & & \\ & \frac{d_j}{1-d_j} \frac{L}{4EI} & \\ & & \frac{d_a}{1-d_a} \frac{L}{EA} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_i \\ M_j \\ N \end{pmatrix} = F^d q \quad (5)$$

donde θ_i^d y θ_j^d representan los giros debidos al daño en los extremos de la barra, d_i y d_j las variables de daño asociadas a estos giros y F^d la matriz de flexibilidad asociada al daño. En la formulación de la ecuación (5) se ha postulado para los efectos de flexión una relación similar a la de la ecuación (4).

A partir de la ecuación (5) y del modelo de disipación concentrada empleado se obtienen las ecuaciones de comportamiento características del elemento de pórtico:

$$u - u^p = [F^0 + F^d] q \quad (6)$$

donde u^p agrupa la parte plástica de las deformaciones generalizadas y F^0 representa la matriz de flexibilidad elástica.

Al ser establecido el modelo dentro del marco de la termodinámica de los procesos irreversibles la evolución de las variables internas ha de formularse también de forma congruente con este marco. Más detalles de este modelo se pueden encontrar en [4] y [5].

2.1.2. Modelo de daño para muros de mampostería

El carácter no homogéneo y anisótropo del material que constituye los muros de mampostería hace que su respuesta sea compleja y de difícil modelado. Las dos grandes categorías de modelos de mampostería desarrollados hasta ahora son

los modelos micromecánicos y los modelos fenomenológicos o globales [6].

La primera clase, basada esencialmente en el Método de Elementos Finitos, requiere la modelización de cada uno de los constituyentes por separado y de la unión entre ellos y entre el muro y el pórtico lo cual resulta de gran dificultad y conduce a modelos demasiado complejos para su aplicación práctica.

Los modelos globales o simplificados permiten la representación del comportamiento del muro en conjunto mediante un elemento diagonal equivalente. Este elemento, además de simplificar notablemente el problema, representa de un modo integral las propiedades mecánicas del panel de relleno lo cual resulta muy valioso debido al carácter heterogéneo del material que lo constituye.

En este trabajo, se ha formulado un modelo de degradación para el muro basado en el elemento diagonal equivalente y en los principios de la Mecánica de la Degradación.

El elemento diagonal es modelado como un muelle inelástico longitudinal cargado axialmente. La relación de comportamiento dependiente del daño correspondiente se formula entonces de un modo directo empleando el principio de equivalencia en deformaciones. La siguiente relación se obtiene:

$$N = K_0(1-d)\delta^e = K_0(1-d)(\delta - \delta^p) \quad (7)$$

siendo N el esfuerzo axial en el elemento diagonal, δ , δ^e y δ^p los alargamientos total, elástico y plástico del elemento, respectivamente, K_0 su rigidez inicial y d la variable de daño interna representativa de la degradación del muro.

El valor de la rigidez inicial K_0 se define a partir de las expresiones proporcionadas por diversos autores para determinar la anchura efectiva del elemento diagonal equivalente. En este estudio se ha empleado la propuesta por Mainstone [7] según la cual se tiene:

$$w_{ef} = 0.175(\lambda_h H)^{-0.4} \sqrt{H^2 + L^2} \quad (8)$$

siendo H y L la altura del piso y la longitud del dintel del pórtico, respectivamente, y además

$$\lambda_h = \sqrt{\frac{E_w T_w \sin 2\theta}{4 E_c I_c H_{in}}} \quad (9)$$

donde E_w es el módulo elástico del muro, E_c el módulo elástico del pórtico, t_w el espesor del muro, I_c el momento de inercia de la columna del pórtico, θ la inclinación de la diagonal con respecto a la horizontal y H_{in} la altura del panel.

La estimación de las leyes de evolución del daño y el alargamiento plástico se lleva a cabo, como en el caso de los elementos de pórtico, dentro del marco de la termodinámica de los procesos irreversibles.

La evolución de la deformación plástica propuesta viene definida por una ley de plastificación compuesta de un primer tramo con endurecimiento, hasta alcanzar la capacidad última del elemento diagonal, seguida de un reblandecimiento en el que el esfuerzo del elemento tiende a cero (Figura 1). Considerando esfuerzos compresivos positivos la expresión de la función de plastificación que se ha supuesto es

$$f = N - \left[A_1 e^{-B_1 \delta^p} + A_2 e^{-B_2 \delta^p} \right] \quad (10)$$

donde A_1 , A_2 , B_1 y B_2 son cuatro parámetros desconocidos estimados a partir de la delimitación de las condiciones que ha de cumplir N en la función de plastificación [8].

La evolución de la variable daño d se asocia a la de la deformación plástica mediante su definición ligada a la energía disipada por plastificación.

2.2. Modelo numérico del reacondicionamiento

En este apartado se describe el modelo implementado para reproducir el comportamiento del reacondicionamiento empleado.

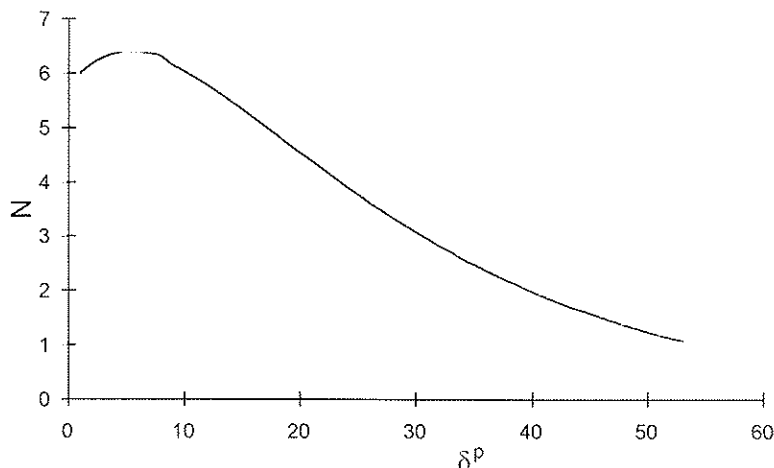


Figura 1. Potencial plástico para el elemento diagonal equivalente.

Como técnica de reacondicionamiento se ha empleado la sustitución de uno de los paños de relleno por un arriostramiento metálico excéntrico con un elemento disipador metálico vertical de cortante (Figura 2).

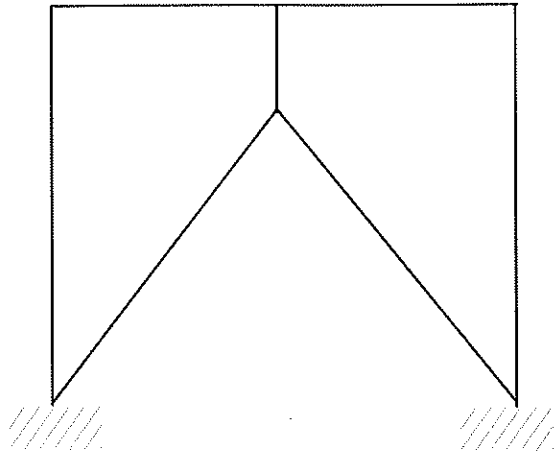


Figura 2. Pórtico arriostrado con elemento disipador vertical.

El modelo usado para representar el comportamiento del elemento disipador de cortante vertical se basa en el propuesto por Ricles y Popov [9] para elementos horizontales considerando los resultados experimentales llevados a cabo en la Universidad de Darmstadt (Alemania) para elementos verticales [10].

En el modelo de Ricles y Popov se adoptan las siguientes hipótesis de comportamiento de este tipo de elemento disipador:

- a) se desprecian los esfuerzos axiales ya que en un arriostramiento correctamente dimensionado, estos esfuerzos deberían ser mínimos;
- b) el elemento no sufre inestabilidades fuera del plano;
- c) no se produce interacción entre el momento y el cortante.

El disipador se modela como un elemento elástico lineal con tres rótulas no lineales en los extremos donde se concentran todas las acciones inelásticas derivadas del cortante y del momento (Figura 3). Suponiendo una relación carga-deformación bilineal para cada rótula la combinación en paralelo de las mismas produce leyes multilineales para el cortante y el momento.

Según los resultados experimentales obtenidos por algunos autores [11][12] la plastificación por cortante sigue una ley de endurecimiento isótropo mientras la debida al momento es más bien cinemática.

La definición del modelo requiere la determinación de todos aquellos parámetros que caracterizan las relaciones esfuerzo-deformación cortantes y momento-giro (Figura 4). A partir de resultados experimentales llevados a cabo sobre elementos disipadores verticales en el laboratorio ELSA de Ispra y en la Universidad de Darmstadt se han adoptado las siguientes calibraciones para el modelo analítico de este tipo de elementos:

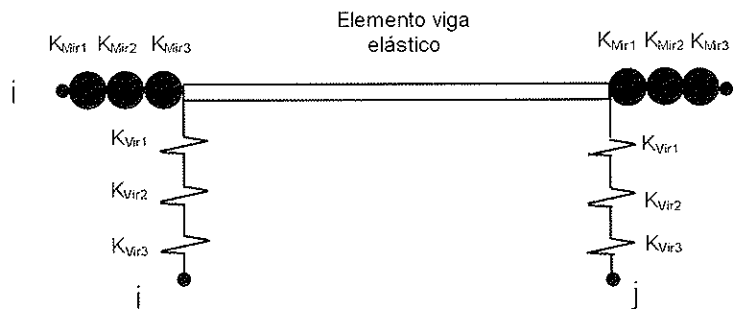


Figura 3. Elemento disipador de cortante.

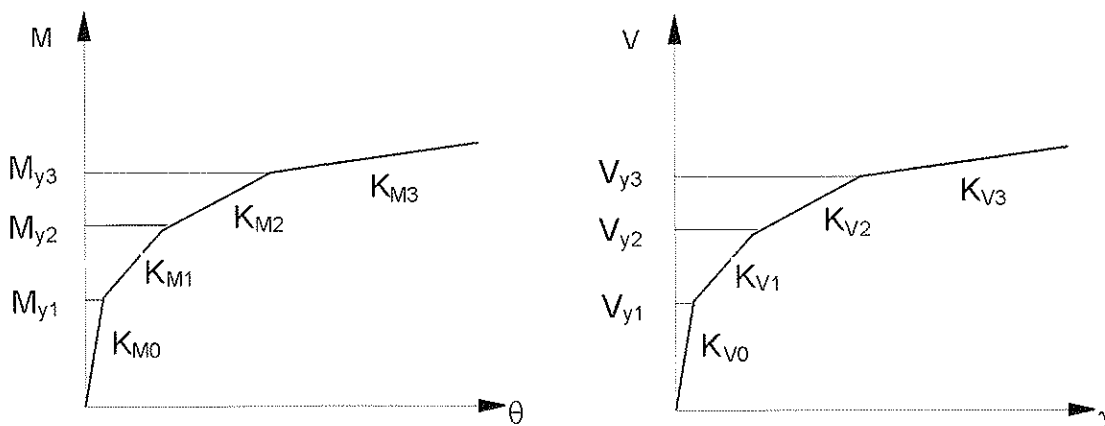


Figura 4. a) Comportamiento de la sección extrema en flexión. b) Comportamiento de la sección extrema en corte.

$$\begin{aligned}
 & V_{Y1} = 1.0V_Y & M_{Y1} &= 1.00 M_Y \\
 \text{a) } & V_{Y2} = 1.5V_Y & M_{Y2} &= 1.03 M_Y \\
 & V_{Y3} = 2.0V_Y & M_{Y3} &= 1.06 M_Y
 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 & K_{V2} = 0.100 K_{V1} & K_{M2} &= 0.030 K_{M1} \\
 \text{b) } & K_{V3} = 0.030 K_{V1} & K_{M3} &= 0.015 K_{M1} \\
 & K_{V4} = 0.007 K_{V1} & K_{M3} &= 0.002 K_{M1}
 \end{aligned} \quad (12)$$

siendo M_Y y V_Y los límites elásticos del momento y del esfuerzo cortante, respectivamente, $K_{V1} = \frac{6EI}{e}$, $K_{M1} = \frac{GA_{alma}}{e}$ y $e =$ longitud del elemento disipador.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El ensayo experimental de la técnica de reacondicionamiento propuesta se llevó a cabo en el laboratorio ELSA de Ispra sobre un pórtico de hormigón armado a escala real de cuatro pisos y tres dinteles dimensionado solamente para cargas de gravedad. El detallado de dicho edificio es representativo de las construcciones de hace 40 años en países mediterráneos.

El reacondicionamiento se ensayó solamente para el segundo piso del edificio. Para estudiar su influencia sobre pórticos rellenos con muros de mampostería se introdujeron en este piso dos muros y el arriostramiento excéntrico con elemento disipador vertical (Figura 5). De esta forma el efecto rigidizador producido por los muros se mantiene mientras su baja ductilidad se ve compensada por el excelente comportamiento disipativo del elemento disipador.

Para el elemento disipador se adoptó un perfil HE120A de acero ST52 de 0.6 m de longitud (Figura 6). En su dimensionamiento se consideró una resistencia a cortante similar a la prevista para los muros de mampostería a efectos de no incrementar la resistencia del pórtico excesivamente y no sobrecargar así la cimentación. Las indicaciones empleadas para su dimensionamiento y distribución se pueden encontrar en [10] y un resumen de la principales características del elemento disipador se muestran en la Tabla 1.

Para el ensayo del piso reacondicionado se aplicó una historia de carga en desplazamientos en el segundo piso restringiendo el desplazamiento lateral del primer piso.

La historia de carga se eligió a partir del comportamiento monótono previsto para el piso reacondicionado escogiéndose los niveles de desplazamiento que aparecen en la Tabla 2.

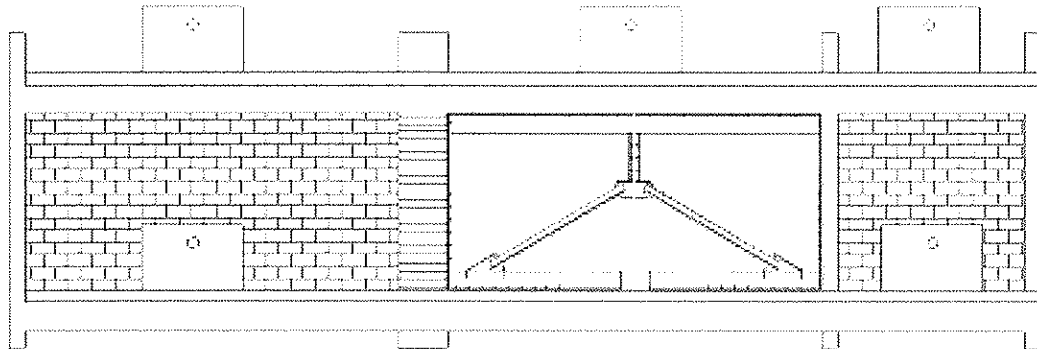


Figura 5. Esquema de reacondicionamiento con disipador vertical.

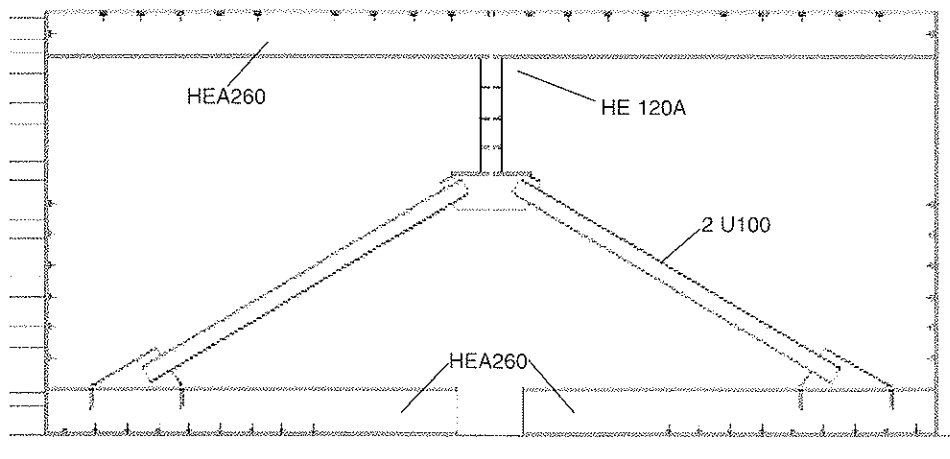


Figura 6. Detalle del arriostramiento.

Tabla 1. Características del elemento disipador

Tensión normal de fluencia (alas)	360 N/mm ²
Tensión normal de fluencia (alma)	380 N/mm ²
V _p	118.56 kN
V _{max}	250 kN
M _y	20.2 kNm
M _p	43.03 kNm.

De cada uno de ellos se aplicaron tres ciclos con el objetivo de recoger el efecto de repetición de la carga.

Tabla 2. Historia de carga aplicada

% desp. rel. entre forjados	Desp. Absoluto (mm.)
0,04	1,08
0,08	2,16
0,12	3,24
0,16	4,32
0,24	6,48
0,32	8,64
0,48	12,96
0,64	17,28
0,80	21,6

De los resultados experimentales (Figura 7) se pueden distinguir fundamentalmente tres etapas en el comportamiento del piso.

En los primeros ciclos la rigidez (Figura 8) y la resistencia no experimentan variaciones importantes. Sin embargo, se empiezan a observar ya no linealidades debidas fundamental-

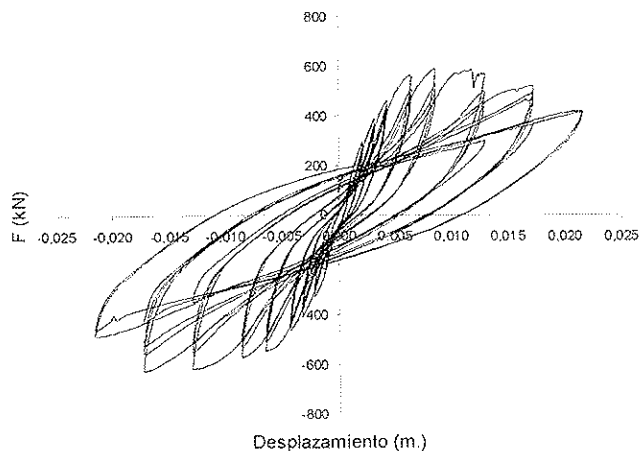


Figura 7. Comportamiento histerético del pórtico reacondicionado.

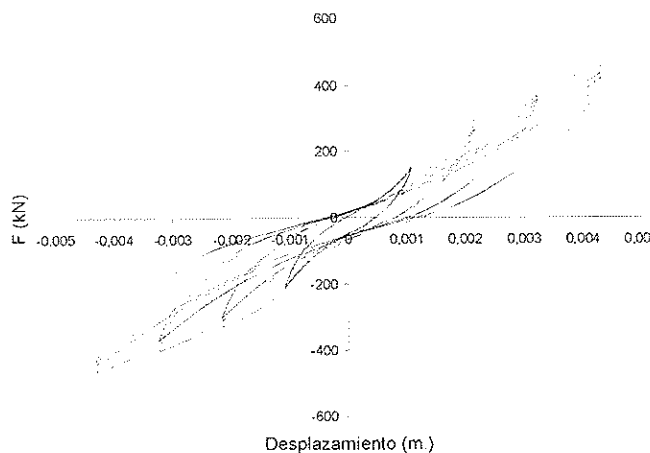


Figura 8. Respuesta en los ciclos iniciales.

mente a los muros. En esta primera fase se estaría hablando de un desplazamiento entre forjados del 0.16%.

En los tres niveles de desplazamiento siguientes (Figura 9) la carga deja prácticamente de aumentar y la no linealidad se hace más patente. Ya en la primera tanda de ciclos (0.24%) se produce la plastificación del elemento disipador. Igualmente se observó la pérdida de adherencia lateral entre pórtico y muros y el agrietamiento y aplastamiento de la mampostería en las esquinas.

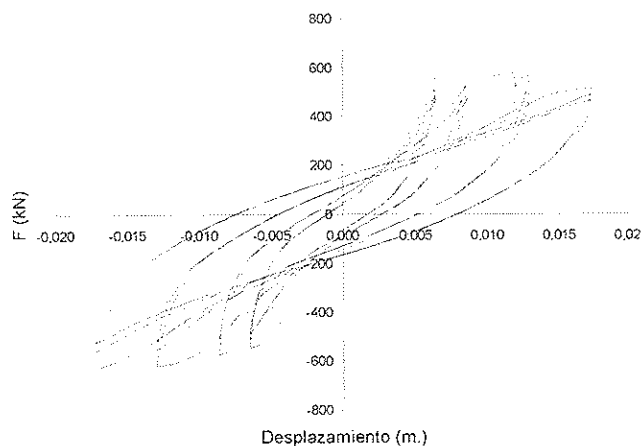


Figura 9. Ciclos en los que la pérdida de resistencia se hace patente.

Al aplicar un desplazamiento relativo de 0.48% se produce una brusca caída de resistencia provocada por la pérdida de resistencia a cortante de los pilares extremos. Se ha producido también plastificación de las alas del elemento metálico por flexión y ha continuado el aplastamiento de las esquinas de ambos muros.

Ya en los ciclos correspondientes al 0.64% de desplazamiento relativo se observó el fallo en los pilares extremos por cortante sin que el disipador hubiese alcanzado su capacidad máxima (Figura 10).

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

El ensayo anterior se simuló numéricamente con los modelos de elementos presentados anteriormente. En la Figura 11

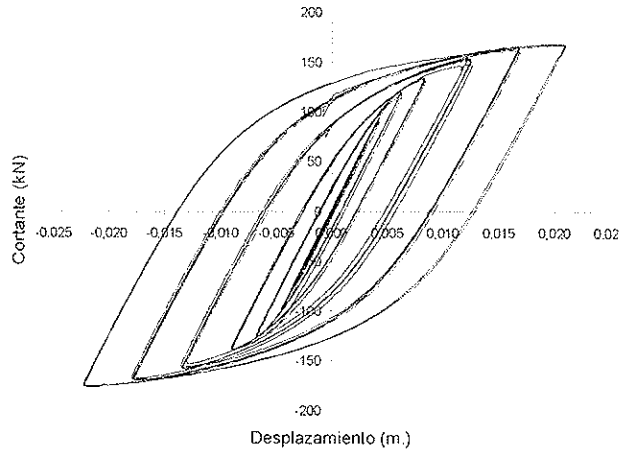


Figura 10. Comportamiento del dissipador.

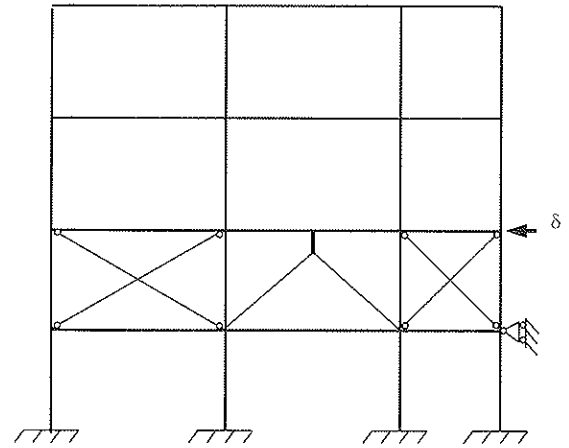


Figura 11. Modelo de cálculo empleado.

se representa el modelo propuesto para el piso con mampostería reacondicionado. Los elementos del pórtico se simularon con el modelo expuesto en el apartado 2.1.1 mientras el comportamiento de la mampostería se incluyó mediante diagonales equivalentes (apartado 2.1.2); en el reacondicionamiento para las diagonales metálicas se emplearon elementos viga elásticos y para el elemento dissipador metálico el modelo comentado en el apartado 2.2.

Los resultados numéricos se muestran en la Figura 12. Por comparación con la Figura 7 se observa un ajuste aceptable en todos los aspectos excepto en la degradación de resistencia. Los fenómenos acumulativos no fueron representados por el modelo.

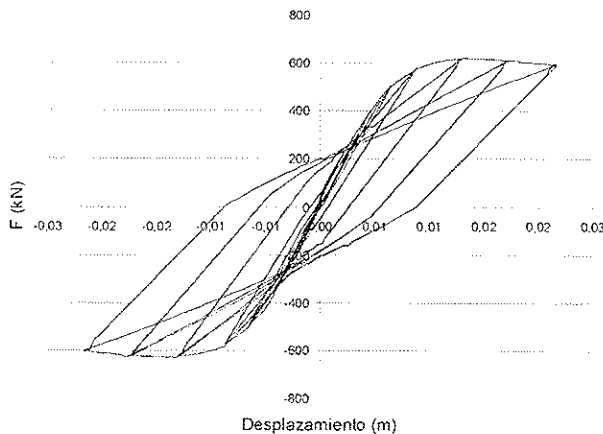


Figura 12. Resultados numéricos.

La rigidez inicial es algo menor en los resultados numéricos lo que puede estar relacionado con el hecho de que la rigidez inicial de la diagonal considerada en el cálculo fue de alrededor del 30% de la inicial estimada. Por tanto, la fase inicial de separación de portico y relleno y de progresiva fisuración de la mampostería no se recoge en el modelo numérico.

En la Figura 13 se muestra la distribución final de la degradación obtenida numéricamente.

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un estudio experimental del comportamiento de pórticos de hormigón armado con muros de mampostería reacondicionados mediante arriostramientos excéntricos con elementos dissipadores de cortante verticales. El uso de estos elementos verticales ha mostrado una capacidad disipativa excelente y resulta particularmente atractivo al permitir su dimensionamiento solamente para fuerzas cortantes horizontales.

Se ha presentado igualmente un modelo numérico de evaluación del daño en pórticos de hormigón armado con muros de relleno. Dicho modelo representa bien el comportamiento global de la estructura y puede ser empleado como herramienta de evaluación sísmica estructural. A la vista de los resultados, de cara a estudiar el comportamiento dinámico del pórtico sería deseable obtener un mejor ajuste de la rigidez inicial y de la consideración de los fenómenos de degradación de resistencia por fatiga.

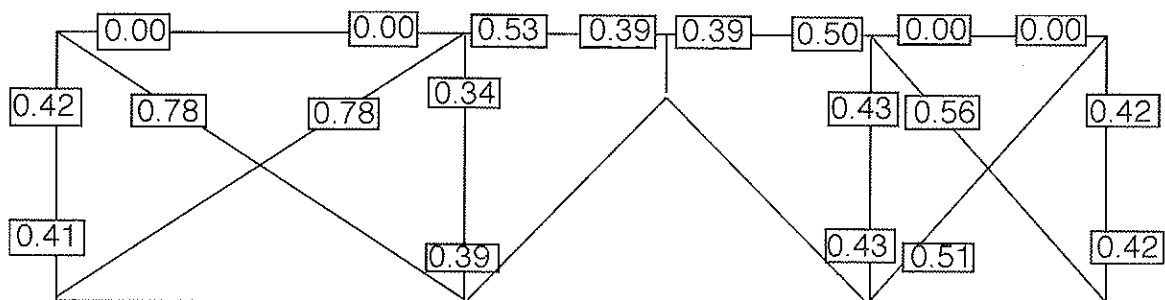


Figura 13. Distribución final del daño en el piso reacondicionado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro del Proyecto de Investigación PB-97-0564 titulado "Fiabilidad y vulnerabilidad sísmica de estructuras" subvencionado por el Ministerio de Educación y Cultura.

Asimismo, los datos experimentales usados en este trabajo fueron obtenidos de los ensayos experimentales llevados a cabo en el laboratorio ELSA del JRC (Joint Research Center) y financiados por la Comisión Europea bajo el programa ICONS de formación y movilidad de investigadores.

REFERENCIAS

- [1] Lemaitre, J., A course on damage mechanics, Springer Berlin 1996.
- [2] Ortiz, M., A constitutive theory for the inelastic behaviour of concrete, *Mech. Mater.*, Vol 4, 1985, 67-93.
- [3] Cohn, M.Z. and Franchi, A., Structural Plasticity Computer System: STRUPL. *J. Struct. Div.*, 105, 1979, 789-804.
- [4] Cipollina, A., López-Hinojosa and A., Flórez-López, J., A Simplified Damage Mechanics Approach to Nonlinear Analysis of Frames. *Comput. Struct.* 54, 1995, 1113-1126.
- [5] Perera, R., Carnicero, A., Alarcón, E. and Gómez, S., A fatigue damage model for seismic response of RC structures, *Computers and Structures* 78, 2000, 293-302.
- [6] Calvi, M., Reinforced concrete infilled frames", in "RC frames under earthquake loading, CEB (Comité Euro-International du Beton) Bulletin 231, 1996, 231-275.
- [7] Mainstone, R.J. , On the stiffnesses and strengths of infilled frames", *Proc. Inst. Civil Eng.*, iv 7360s, 1971.
- [8] Gómez, S., Evaluación del reacondicionamiento sísmico de pórticos de hormigón armado con relleno de mampostería mediante arriostramiento excéntrico, Tesis Doctoral, 2001.
- [9] Ricles, J.M. and Popov, E.P. , Dynamic analysis of seismically resistant eccentrically braced frames, Report No UCB/EERC-87/07, Earthquake Engrg.Res.Ctr., Univ. Of California, Berkeley, 1987b.
- [10] Tamijani, M.G., Analytical model and design of eccentrically braced frame with vertical shear link, Tesis Doctoral, TU Darmstadt, 1998.
- [11] Ricles, J.M. and Popov, E.P. , Experiments on eccentrically braced frames with composite floors, Report No UCB/EERC-87/06, Earthquake Engrg.Res.Ctr., Univ. Of California, Berkeley, 1987a.
- [12] Kasai, k. and Popov, E.P., A study of seismically resistant eccentrically braced steel frame systems Report No UCB/EERC-86/01, Earthquake Engrg.Res.Ctr., Univ. Of California, Berkeley, 1986.