

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA RESPUESTA SÍSMICA NO LINEAL DE EDIFICACIONES PREFABRICADAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA

P. Mata A¹, S. Oller¹, A.H. Barbat¹ y R. Boroschek²

¹: *Universidad Politécnica de Cataluña, UPC*

²: *Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.*

RESUMEN

El desempeño deficiente de algunas estructuras prefabricadas ha limitado su uso en las zonas sísmicas debido a su bajo nivel de amortiguamiento estructural, los efectos $P-\Delta$ y la baja ductilidad de las uniones estructurales. Estas características permiten el proponer del uso de dispositivos disipadores pasivos para mejorar su comportamiento sísmico. En este trabajo se estudia la respuesta sísmica de dos edificios prefabricados. La respuesta de las estructuras equipadas con disipadores de energía se compara con el caso no-controlado. La primera estructura es un edificio industrial de hormigón prefabricado con bajo amortiguamiento y con uniones de conexión de baja ductilidad. Segundo es una estructura porticada construido típicamente en áreas urbanas. Se simulan las estructuras usando la formulación del Simo para las vigas. Cada sección de la viga está dividida en una rejilla secundaria de fibras a lo largo del eje de la viga. Los materiales de cada fibra se pueden componer de varios constituyentes simples con sus respectivas leyes constitutivas. La teoría de mezclas simple se utiliza para tratar el compuesto resultante. Una clase especial de elemento se desarrolla para modelar los dispositivos disipadores. Los resultados obtenidos en este trabajo permiten validar el uso del control pasivo para mejorar el desempeño sísmico de estructuras prefabricadas.

SUMMARY

The poor performance of some precast structures have limited their use in seismic zones due to their low level of structural damping, $P-\Delta$ effects and low ductility of de structural joints. These characteristics allow proposing the use of passive dissipating devices for improving their behavior. The seismic response of two precast buildings is studied in this work. The response of the structures equipped with energy dissipators is compared with the non-controlled case. The first structure is a low damped industrial precast concrete building with low ductility connecting joints. The second one is a 3D frame typically built in urban areas. The structures are simulated using the Simo's formulation for beams. Each beam section is meshed in a secondary grid of fibers along the beam axis. The materials of each fiber can be composed of several components having appropriated constitutive laws. The simple mixing theory is used to treat the resulting composite. A special kind of element is developed for modelling the dissipating devices. The results obtained in this work allow validating the use of passive control for improving the seismic performance of precast structures.

Introducción

El uso de estructuras prefabricadas de hormigón armado en áreas sísmicas con frecuencia ha sido limitado, debido a la falta de la confianza sobre su funcionamiento en regiones sísmicas así como por la ausencia de guías de diseño o de códigos específicos para el análisis y el diseño de las zonas críticas en la estructura, es decir las uniones de conexión. Debido a estas razones, las ventajas reconocidas de las estructuras prefabricadas sobre los métodos in situ para hormigón armado que se refieren principalmente a los

aspectos de la construcción (control de calidad, velocidad de montaje), han capturado la mayoría de la atención por los investigadores, mientras que se pasa por alto su eficacia estructural. El mal desempeño de varias las estructuras de aparcamiento prefabricadas durante el terremoto de Northridge de 1994 debido principalmente a un diseño incorrecto de detalles ha aumentado la falta de confianza en tales sistemas estructurales, contribuyendo a incrementar las restricciones sobre el uso de prefabricados en zonas sísmicas. Durante los últimos años, se han investigado algunos conceptos alternativos para el análisis y diseño de estructuras de hormigón armado prefabricado en zonas sísmicas en comparación con criterios con frecuencia aceptados basados en la "emulación del hormigón armado in situ" [Pampanin, 2003].

Entre las desventajas asociadas a las estructuras prefabricadas tradicionales, con frecuencia se mencionan [Mata, Barbat y otros. 2004]:

- Un bajo coeficiente de amortiguamiento estructural global. Por una parte, el 5% de amortiguamiento estructural global asociado con frecuencia a las estructuras convencionales de hormigón armado no es necesariamente el valor apropiado para prefabricados; éstos últimos podrían tener valores considerablemente más pequeños, del orden del 2%, con las consiguientes amplificaciones en la respuesta dinámica.
- Efectos $P-\Delta$ importantes para el caso de algunas estructuras flexibles. La industria prefabricada tiende a generar elementos más flexibles diseñados principalmente para cargas permanentes y, por lo tanto, los efectos $P-\Delta$ podrían aumentar para los estados de carga accidentales que actúen horizontalmente.
- Uniones de conexión poco dúctiles. El diseño sísmico convencional no es directamente aplicable al caso de estructuras de hormigón armado prefabricado porque las uniones de conexión entre elementos no son monolíticos. Además, las uniones son puntos donde la demanda de la ductilidad es importante y, por lo tanto, son puntos críticos de la estructura donde espera que se concentre el daño. Adicionalmente, las zonas donde existe daño concentrado contribuye al ablandamiento del comportamiento mecánico global lo cual se puede identificar con una rótula plástica en la estructura. Como es bien sabido, se puede desarrollar sólo un número limitado de rótulas plásticas en la estructura antes de que se obtenga un comportamiento estructural que corresponde al de un mecanismo.

Por otro lado, es reconocida la eficacia de las técnicas de control pasivo para contribuir a la reducción de la respuesta dinámica de estructuras sometidas a acciones sísmicas. Es posible mejorar el comportamiento sísmico de estructuras de hormigón armado prefabricado usando dispositivos disipadores de energía para absorber una parte de la energía inducida por terremotos y para concentrar el daño en zonas específicas.

Una opción para realizar un análisis realista de estructuras (prefabricadas o no) equipadas con dispositivos disipadores de energía para el cargas sísmicas es por medio del empleo del análisis no lineal material y geométrico en historias del tiempo, asumiendo descripciones constitutivas apropiadas para los materiales y aplicando registros de aceleración de base representativos de la sismología local. El modelo numérico debe poder simular los cambios de la configuración de la estructura durante el terremoto, especialmente para el caso de estructuras flexibles.

En este trabajo se emplea la formulación del Simo–Vu Quoc para vigas, el cual es capaz de desarrollar grandes deformaciones, desplazamientos y rotaciones [Simo y otros. 1985]. Cada sección de la viga está discretizada en una rejilla de fibras dirigidas a lo largo del eje de la viga. Se emplean dos tipos de materiales: hormigón y acero. Para describir el comportamiento mecánico del hormigón, se utiliza un modelo constitutivo de daño local basado en la teoría de Kachanov. Las barras de refuerzo de acero se tratan usando un modelo del plástico de fibra unidimensional. El material asociado a una fibra es tratado por medio de la teoría de mezclas simple [Oller y otros. 1997]. La incorporación de los dispositivos disipadores de energía se obtiene desarrollando un elemento especial libre de rotaciones y con sólo un punto de integración.

En esta publicación se realiza la simulación numérica de la respuesta dinámica de dos edificios típicos de hormigón armado prefabricado con dispositivos disipadores de energía sometidos a cargas sísmicas. Ambas estructuras presentan las deficiencias descritas previamente. El primero corresponde a un marco plano empleado para construir edificios industriales. Segundo es un pórtico de hormigón armado tridimensional que corresponde un edificio construido en áreas urbanas. En los cálculos se consideran tanto el comportamiento no lineal de las estructuras como de los dispositivos que disipan energía.

Herramienta numérica

Una paquete de software específico, PLCDYN, capaz de llevar a cabo análisis dinámicos con no linealidad geométrica y constitutiva, se ha desarrollado para simular el comportamiento no lineal de las estructuras de ingeniería civil incluyendo elementos disipadores de energía. El código desarrollado permite el solucionar de problemas en muchas diversas áreas del mecánico de sólidos: estático, dinámico, no linealidad material y geométrica, los problemas termo–mecánicos acoplados y estructuras basadas en materiales compuestos [Car y otros. 2000].

Para el caso de la formulación geométrica exacta para estructuras de vigas debida a Simo–Vu las hipótesis cinemáticas del modelo permiten el simular deformaciones finitas y grandes desplazamientos y rotaciones durante la acción dinámica [Ibrahimbegovic, 1995; Simo y otros. 1985, 1986, 1988; Mata y otros. 2005]. Para el análisis dinámico se ha implementado un esquema paso a paso iterativo de Newmark, que actualiza consistentemente todas las variables dinámicas asociadas al campo de desplazamientos y rotaciones finitas, [Simo y otros. 1989].

Cada sección de la viga de los elementos está discretizada en una rejilla secundaria de los cuadriláteros para incluir una distribución no homogénea de materiales. Cada cuadrilátero corresponde a una fibra orientada a lo largo del centroide de la viga (Ver Figura 1). El material de cada fibra es compuesto por varios componentes, teniendo cada uno de ellos su propia ley constitutiva. Por esta manera, es posible considerar el refuerzo de acero como uno de los componentes del compuesto situado en los cuadriláteros del borde exterior de la sección. El compuesto que resulta se trata según la teoría de mezclas simple [Car y otros. 2000], que imponen el mismo campo deformaciones para todos los componentes en un mismo punto material. Se determina el valor del tensor de tensiones para cada componente según su ley constitutiva, la tensión total se obtiene suponiendo que cada componente contribuye a la tensión total según su participación volumétrica en la mezcla.

Las fuerzas y los momentos seccionales se obtienen integrando las tensiones sobre la sección entera en cada punto de la integración. Esta clase de aproximación evita el

desarrollo o el empleo de las leyes constitutivas basados en relaciones del tipo fuerza–desplazamiento para el elemento, que es la manera más común de modelar el comportamiento no lineal de vigas, pero esta clase de leyes es válida solamente para cierta geometría de secciones o de comportamientos mecánicos [Barbat y otros. 1997]. Las fuerzas y los momentos seccionales así obtenidos se utilizan para comprobar el equilibrio global del sistema dinámico. Se repite el proceso iterativo hasta que se obtiene la convergencia.

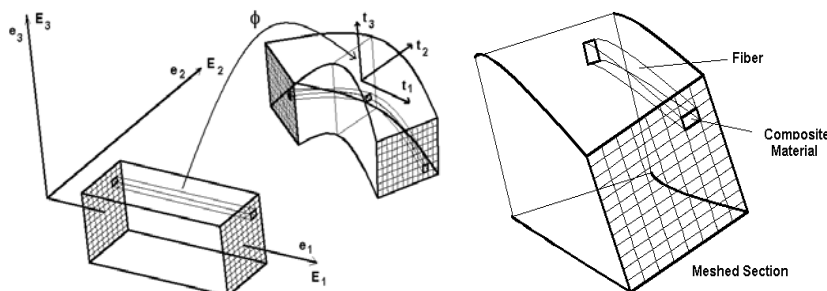


Figura 1: Cinemática de las vigas y rejilla de cuadriláteros en cada sección.

Leyes constitutivas para los materiales

El comportamiento del hormigón para diversos estados de tensiones se simula empleando un modelo isotrópico del daño basado en principios termodinámicos fundamentales [Barbat y otros. 1997]. Este modelo puede simular en una manera simple y eficiente una de las características básicas del comportamiento de este material: degradación, ablandamiento y propiedades diferenciadas para los casos de tensiones de tracción ó compresión. La Figura 2 muestra la forma del criterio del daños en el espacio tensiones principales que se emplea en este modelo. En esta figura es posible ver que el modelo considera propiedades diferenciadas para los estados de tracción ó compresión. El algoritmo de la integración que resulta para este modelo es simple y conveniente para los casos de estructuras de gran tamaño. En esta caso, el comportamiento no lineal se reduce a la evolución de una sola variable interna escalar, llamado el daño o degradación [Hanganu y otros. 2002].

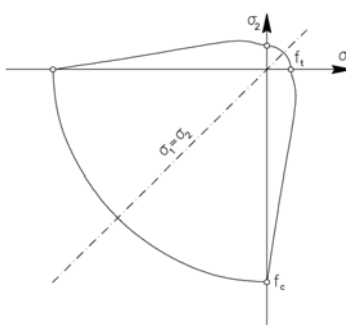


Figura 2: Modelo de daño.

Los refuerzos longitudinales de acero y los estribos de la viga son modelados por el medio del modelo plástico. El modelo consiste en un material ortotrópico con un módulo elástico de acero en la dirección del refuerzo y las características del hormigón en las otras dos direcciones. El flujo plástico se orienta a lo largo de la fibra una vez que se alcance el criterio de fluencia [Car y otros. 2000].

Localización de las deformaciones

Se espera que exista localización de las deformaciones en algunos elementos estructurales cuando se produzcan grandes incursiones en el rango no lineal [Hanganu y otros. 2002]. La objetividad de la respuesta se obtiene por medio de realizar una regularización la energía disipada en cada punto de integración considerando la longitud característica del elemento finito donde se produce la localización. De esta manera, la energía disipada máxima por el material queda limitada por su energía de fractura. Este procedimiento correctivo permite obtener una respuesta estructural global objetiva pero la longitud de la zona en donde se localizan las deformaciones continúa siendo dependiente de la malla de elementos empleada

Elementos disipadores de energía

Los dispositivos disipadores de energía son modelados por medio de un elemento bi-articulado de barra con solamente un punto de la integración en el centro del de la luz del mismo. La condición bi-articulada de los nodos permite obtener desplazamientos en la dirección del eje del elemento y, por lo tanto, sólo se desarrollan fuerzas axiales. Se proporcionan leyes constitutivas unidimensionales específicas para cada tipo de elemento. En este trabajo, solamente los dispositivos con plasticidad como ley constitutiva serán empleados pero el elemento desarrollado se puede emplear con cualquier otra clase de mecanismo disipativo como los descritos en [Mata y otros. 2006].

Simulaciones numéricas

Edificio industrial prefabricado

En este ejemplo se estudia la respuesta sísmica no lineal de un edificio industrial prefabricado plano típico que se muestra en la Figura 3. El edificio tiene una luz frontal de 24 m y de 12 m de la dirección entre ejes. Su altura es de 12 m. El hormigón de la estructura es H-35, (35 Mpa, compresión última), con un módulo elástico de 290.000 Mpa. Se ha asumido un coeficiente del Poisson de 0.2. El refuerzo de acero de las secciones consideradas en el estudio corresponde al 10% del área seccional y la discretización en cuadriláteros de las secciones se presenta en la misma figura para cada elemento. La tensión última para el acero es de 510 Mpa. Las dimensiones de las columnas son 60x60 cm². La viga tiene una sección variable con una altura inicial de 60 centímetros en los apoyos y de 160 centímetros en el centro de la luz.

Las cargas permanentes consideradas son 1050 N/m² mas peso de la mitad superior de las paredes de cerramiento (432.000 N). El registro de aceleración de base empleado es el correspondiente a la componente N-S del terremoto del EL Centro, 1940.

Los dispositivos disipadores de energía fueron simulados por medio del empleo del modelo previamente descrito para obtener solamente la fuerza axial en cada elemento. Las características de los dispositivos disipadores fueron diseñadas para fluir con una fuerza axial de 150.000 N y para un desplazamiento relativo entre los dos nodos de 1.5 milímetros. La longitud de los dispositivos es de 2.00 m.

Se ha llevado a cabo un análisis estático no lineal en la estructura con y sin los dispositivos disipadores de energía. Una secuencia de desplazamientos impuestos con forma sinusoidal se aplica en la esquina superior de la estructura. Los resultados se resumen en la Figura 4 donde se presenta el esfuerzo cortante de base en función del

desplazamiento lateral superior. En esta figura es posible ver que en el caso de la estructura con control pasivo se obtienen incrementos en la rigidez y resistencia en comparación con el caso no-controlado. Además, una mayor capacidad de disipación de energía se obtiene para la estructura controlada como se evidencia a partir de los mayores ciclos histeréticos obtenidos.

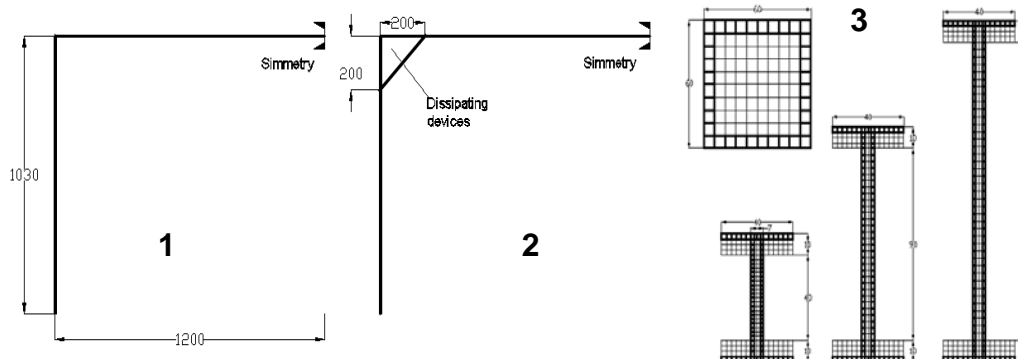


Figura 3: Mitad izquierda del edificio industrial prefabricado. 1: Pórtico normal 2: Los dispositivos disipadores de energía se incorporan en las esquinas superiores del edificio. 3: Modelo numérico de las secciones de la columna y de la viga.

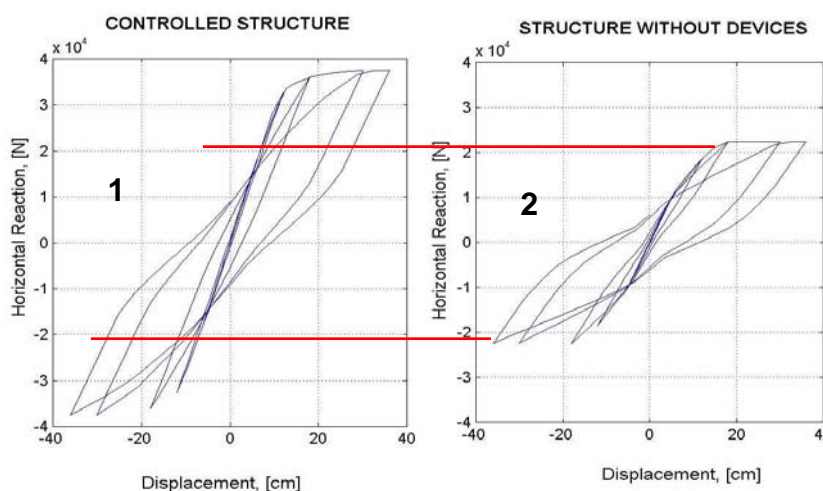
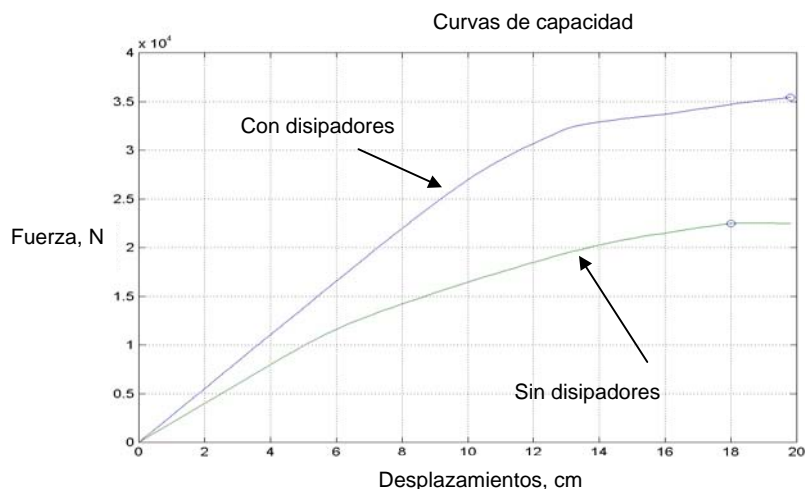


Figura 4: Ciclos histeréticos. 1: Estructura con disipadores. 2: Estructura sin control pasivo.

Por otro lado, la ductilidad de la estructura aumenta cuando se emplean los dispositivos del control como puede ser visto en la Figura 5.

Los resultados de las simulaciones numéricas permiten el ver que el empleo de los dispositivos de disipación plástica contribuye para mejorar el comportamiento sísmico de la estructura para el caso del registro sísmico empleado. La Figura 6 muestra los ciclos histéresis obtenidos para la estructura con y sin el empleo de los disipadores. Para el caso de la estructura entera los ciclos se obtienen a partir del desplazamiento lateral del punto superior y de la reacción horizontal (cortante de base) en las columnas. Es posible apreciar que la estructura no-controlada presenta mayores desplazamientos laterales y un grado mayor de daño estructural, (mayor área de los ciclos histeréticos) que para el caso controlado). En el caso de la estructura equipada con disipadores se obtiene una respuesta más rígida y una parte de la energía disipada se concentra en los dispositivos de control

según lo esperado.



Cuadro 5: Curvas de la capacidad.

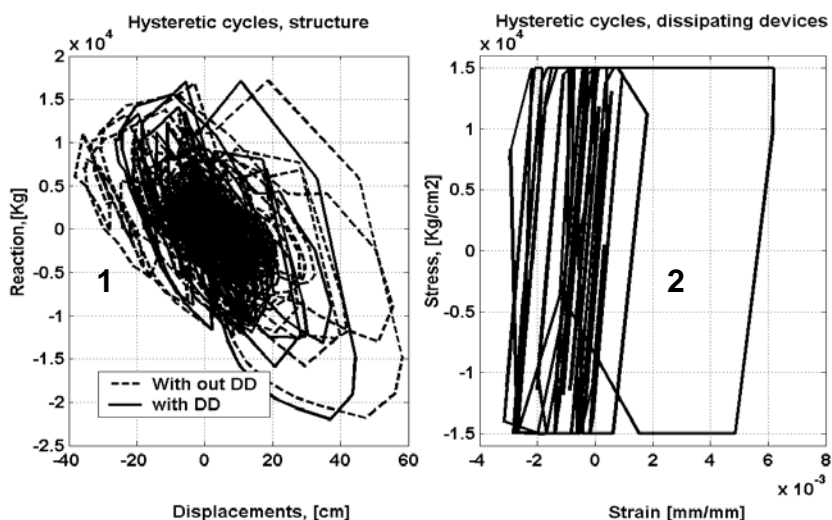


Figura 6: Ciclos de histéresis. 1: Estructura. 2: Dispositivos disipadores de energía.

La Figura 7 muestra las respuestas en historias del tiempo del nudo superior de la unión viga-columna. Una reducción del 12 % se obtiene para el desplazamiento lateral máximo comparado con el caso no controlado. La aceleración y la velocidad se controlan de la misma manera, pero se obtienen solamente un 4 y un 5 % de reducción. Una explicación posible para la baja eficacia de los disipadores es que los dispositivos contribuyen solamente para aumentar la ductilidad de la unión viga-columna pero no contribuyen significativamente a aliviar la demanda de cortante basal en las columnas debido a sus dimensiones y a su localización en la estructura. Por otro lado, las uniones son puntos críticos en estructuras prefabricadas y por lo tanto, el empleo de los disipadores combinados con un diseño cuidadoso de las columnas puede ayudar a mejorar el su comportamiento sísmico.

Edificación urbana tridimensional

En este ejemplo se estudia la respuesta sísmica no lineal de un edificio prefabricado construido en áreas urbanas. Véase la Figura 8. El edificio tiene una luz y dos plantas de anchura de 6 y 3 m, respectivamente. El hormigón de la estructura es H-25, (25 Mpa, última compresión), con un módulo elástico de 25.000 Mpa. Se ha asumido un coeficiente de Poisson de 0.2. Los refuerzos de acero considerados en el estudio son los correspondientes al 8% del área seccional para los elementos cercanos a la unión (25 % de la columna o de la longitud de la viga), y un 4% para los elementos en la parte media de las luces. La tensión última para el acero es 510 Mpa. Las dimensiones de las columnas son los 30x30 cm². Las vigas tienen una sección 15x30 cm².

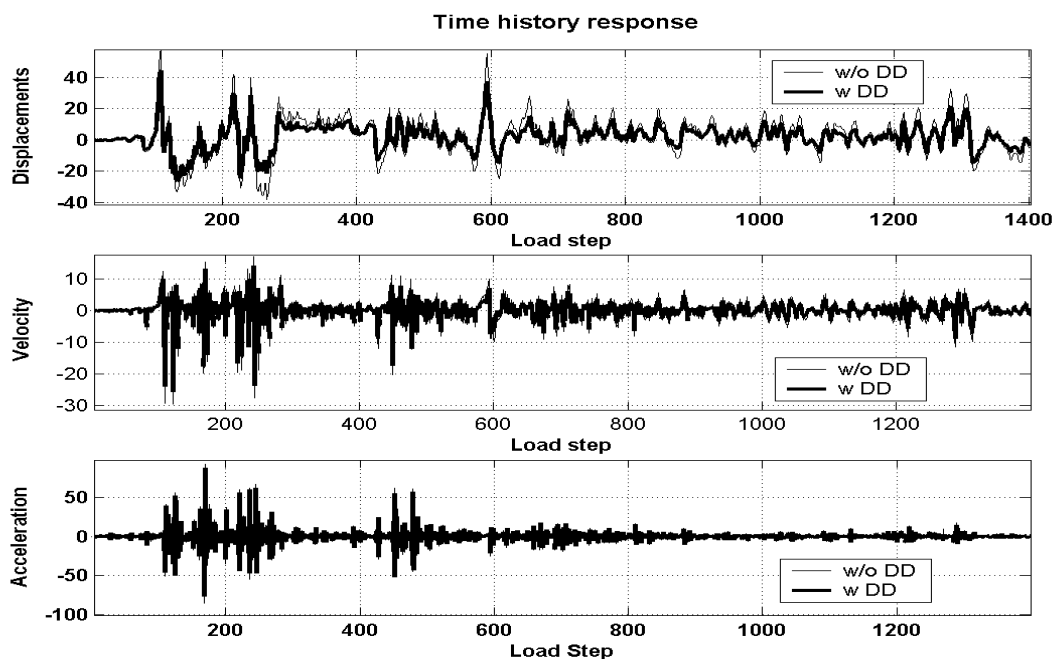


Figura 7: Historias de tiempo de las respuestas de la estructura con y sin disipadores.

Las cargas permanentes consideradas son el peso de las plantas de hormigón, una carga viva de 2500 N/m² y el peso de las paredes de cierre, (432.000 N). El registro de aceleración de base es el mismo del ejemplo anterior en la dirección X y se emplea un factor de escala de 0.3 en la dirección ortogonal. No se consideran excentricidades accidentales o estructurales en este trabajo, sin embargo, es posible hacerlo si se modifica la densidad total de las vigas.

Varias simulaciones numéricas fueron realizadas para obtener una combinación optimizada de la características de los dispositivos de disipación de energía para saber cuál es el nivel de fluencia, F_y , rigidez, K , y desplazamiento de fluencia, D_y , que dan un nivel de protección mayor a la estructura. Las características de los dispositivos disipadores se resumen en la Tabla 1.

Los resultados de la simulación se expresan en términos del desplazamiento lateral máximo y de las derivas medias del piso; el cortante basal y el momento volcante se presentan simultáneamente como función del tipo de dispositivo empleado en la Figura 9. De esta figura es posible ver que incluso cuando las ventajas más grandes de términos de

las variables globales seleccionadas se logran para diversas características del dispositivo, las características más ventajosas están relacionadas con los dispositivos flexibles ($K=8000$ N/mm) con un desplazamiento de fluencia medio (aproximadamente 2.5 milímetros) y una fuerza de fluencia alrededor de los 4000 N.

Tabla 1: Parámetros de los elementos disipadores.

Características de los disipadores		Características de los disipadores		Características de los disipadores		Características de los disipadores		Características de los disipadores	
F_y , (N)	1000	F_y , (N)	2000	F_y , (N)	3000	F_y , (N)	4000	F_y , (N)	5000
D_y , (mm)	1.250	D_y , (mm)	1.250	D_y , (mm)	1.250	D_y , (mm)	1.250	D_y , (mm)	1.250
F_y , (N)	1000	F_y , (N)	2000	F_y , (N)	3000	F_y , (N)	4000	F_y , (N)	5000
D_y , (mm)	2.500	D_y , (mm)	2.500	D_y , (mm)	2.500	D_y , (mm)	2.500	D_y , (mm)	2.500
F_y , (N)	1000	F_y , (N)	2000	F_y , (N)	3000	F_y , (N)	4000	F_y , (N)	5000
D_y , (mm)	5.000	D_y , (mm)	5.000	D_y , (mm)	5.000	D_y , (mm)	5.000	D_y , (mm)	5.000

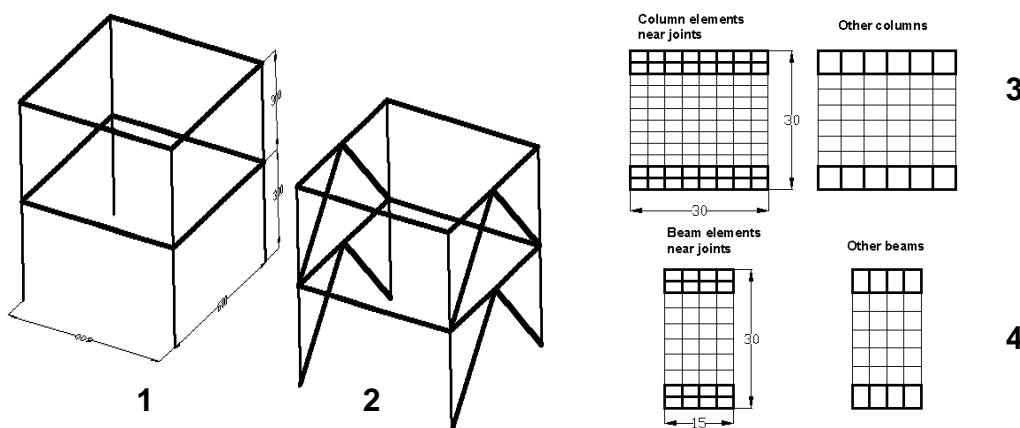


Figura 8: (1) marco 3D. (2) Los dispositivos disipadores se incorporan en las diagonales. (3, 4) Secciones de las columnas y de las vigas.

Por lo tanto, las características seleccionadas de los disipadores eran: Plástico con una fuerza axial de 4000 N para obtener la fluencia, desplazamiento relativo de fluencia de 2.50 milímetros. La longitud de los dispositivos disipadores es de 6.7 m. Los dispositivos de control solamente fueron incorporados en la dirección donde se aplica el registro sísmico mas intenso.

Conclusiones

En este trabajo se estudia el comportamiento sísmico de dos estructuras de hormigón armado prefabricadas típicas empleando un código numérico, que incorpora una formulación geoméricamente exacta para vigas en deformación finita usando los leyes constitutivos apropiados para los materiales. La regla de mezclas simple se emplea para tratar los compuestos que resultan. En este modelo, las secciones de las vigas se discretizan en fibras proporcionando una herramienta útil para simular los efectos del terremoto sobre las estructuras. Un elemento específica es desarrollado para simular dispositivos disipadores de energía plásticos. Se estudian las ventajas de emplear dispositivos disipadores para proteger y para mejorar el comportamiento sísmico de estructuras prefabricadas de bajo amortiguamiento, flexibles y con uniones poco dúctiles para los casos de estructuras industriales y de edificación urbana. A partir de los resultados

obtenidos es posible ver que es posible mejorar la respuesta sísmica de estructuras prefabricadas por medio del empleo de disipadores de energía con propiedades mecánicas apropiadas.

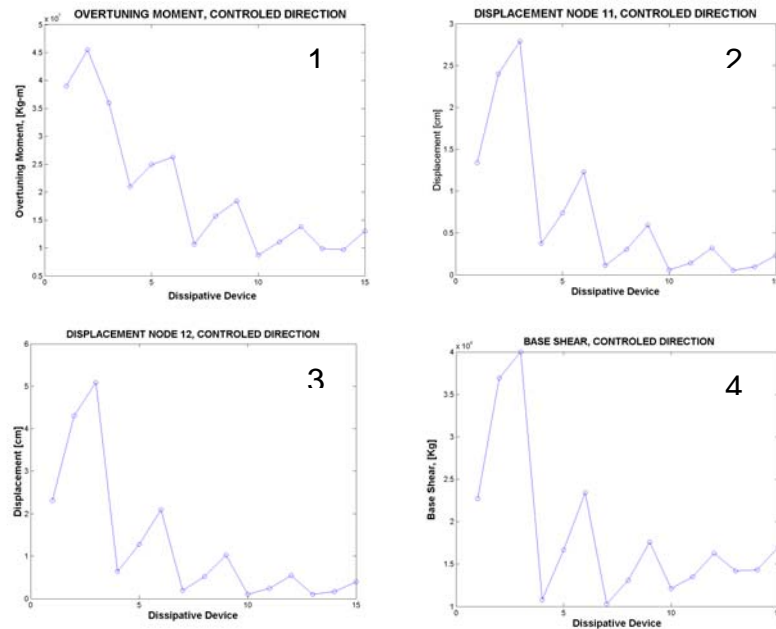


Figure 9: Respuesta máxima para cada dispositivo disipador. (1) Momento volcante. (2) Desplazamiento superior. (3) Deriva de entre piso. (4) Cortante basal.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por: La Universidad de Chile, proyecto FONDECYT nº 1970732; el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, Proyecto: "Numerical simulation of the seismic behavior of structures with energy dissipation systems", Contract nº: BIA2003 - 08700 - C03 - 02; Y el proyecto de la comisión europea: Integrated R&D Project of the EC "LessLoss-Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides" funded by the European Commission, Directorate General of Research under the Contract nº GOCE-CT-2003-505448.

Referencias:

- Barbat A. H, Oller S, Oñate E and Hanganu A. (1997). *Viscous damage model for Timoshenko beam structures*. International Journal of Solids and Structures. Vol. 34. Nº 30. pp. 3953—3976.
- Hanganu Alex D., Oñate E. and Barbat A.H. (2002). A finite element methodology for local/global damage evaluation in civil engineering structures. *Computers & Structures* 80, 1667—1687.
- Ibrahimbegovic. A. (1995). On the finite element implementation of geometrically nonlinear Reissner's beam theory: three-dimensional curved beam elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 122, 11-26.
- Mata A. P, Barbat A and Oller S. (2004). *Improvement of the seismic behavior of precast concrete structures by means of energy dissipating devices*. Third European Conference on Structural Control, 3ECSC. 12-15 July, Vienna University of

Technology, Vienna, Austria.

- Mata A. P, Oller. S and Barbat A. (2005). *Numerical tool for nonlinear seismic analysis of buildings with energy dissipating systems*. 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Kobe, Japan, June 13-16.
- Mata P., Boroschek R., Barbat A.H. and Oller S. (2006). *High damping rubber model for energy dissipating devices*. Journal of Earthquake Engineering, JEE, (accepted for publication).
- Pampanin S. (2003). *Alternative design philosophies and seismic response of precast concrete buildings*. Fib. News. Structural Concrete, 4, N° 4.
- Simo. J.C, and Vu-Quoc L. (1985). *A finite strain beam formulation, Part I*. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering. 49, 55-70
- Simo. J.C, and Vu-Quoc L. (1986). *A three dimensional finite strain rod model, Part II: Computational aspects*. Computational Methods in Applied Engineering. 58, 79-116.
- Simo. J.C, and Vu-Quoc L. (1988). *On the dynamic in space of rods undergoing large motions-A geometrically exact approach*. Computer Methods in Applied Mechanics Engineering. 66, 125-161.