

DISIPADOR METALICO PARA UNA CONEXIÓN SECA ARTICULADA DE VIGA Y COLUMNA ¹

Carlos Gerbaudo² y José A. Inaudi³

Resumen: Este trabajo presenta los estudios analíticos y numéricos realizados para el diseño de un dispositivo metálico de disipación de energía para conexiones viga-columna. Este dispositivo fue concebido para ser utilizado en estructuras prefabricadas de hormigón armado y estructuras de acero de grandes luces de edificios industriales o residenciales. El disipador es compatible con el diseño tradicional de uniones secas articuladas de viga y columna y su objetivo es aumentar la capacidad de disipación de energía por medio de la deformación plástica de elementos metálicos. El trabajo revisa el estado del arte de la aplicación de disipadores de energía a estructuras prefabricadas de hormigón sometidas a excitaciones sísmicas, y reporta el estudio analítico del comportamiento mecánico del nudo viga-columna con el amortiguador metálico, el análisis numérico del comportamiento cíclico y del pandeo inelástico de la placa metálica del disipador, la formulación de una metodología de diseño con la aplicación práctica a una estructura prefabricada de hormigón sometida a carga sísmica, y finalmente, la validación experimental preliminar del desempeño del amortiguador metálico en un prototipo.

Palabras clave: conexión viga-columna, disipador metálico de energía, estructura prefabricada de hormigón, respuesta sísmica

DESIGN OF A METALLIC ENERGY DISSIPATING DEVICE FOR BEAM-COLUMN CONNECTIONS

Abstract: Analytical and computational studies carried out for the design of a metallic energy dissipating device in beam-column connections are reported in this paper. The device is conceived for applications in large-span pre-cast concrete and steel structures for industrial or residential buildings. The dissipater is designed to be compatible with traditional design of dry pinned beam-column connections and aimed at adding energy dissipation capacity by means of plastic deformation of metallic elements. The paper reviews the state of the art of the application of energy dissipating devices to pre-cast concrete structures subjected to earthquake excitation, and reports the analytic study of the mechanical behavior of the beam-column joint with metallic damper, the computational analysis of cyclic behavior and inelastic buckling of the metallic plate of the device, the formulation of a design methodology with the practical application to a pre-cast concrete structure subjected to earthquake loading, and finally, a preliminary experimental validation of the performance of the metallic damper in a prototype device.

Keywords: metallic energy-dissipating device, beam-column connection, pre-cast concrete structure, seismic response

INTRODUCCIÓN

El diseño convencional de estructuras resistentes a acciones sísmicas consiste en proveer una adecuada configuración estructural y ductilidad de los elementos que constituyen la estructura principal resistente a fuerzas horizontales, con el objeto de disipar la energía del sismo mediante deformaciones inelásticas de los propios miembros que constituyen la estructura.

Ante la ocurrencia de un evento sísmico, la incursión de la estructura en el campo inelástico causa daños irreversibles en los elementos estructurales y no estructurales del edificio, y si las acciones sísmicas se mantienen

¹ Artículo recibido el 15 de septiembre de 2007 y aceptado el 19 de noviembre de 2007.

² M.S., INGROUPOficina de Proyectos, Córdoba, Argentina. E-mail: ingroup@ciudad.com.ar

³ Ph.D., Profesor, Departamento de Estructuras, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. E-mail: jinaudi@iua.edu.ar

durante un tiempo suficientemente largo o se repiten sucesivos eventos, el efecto acumulativo del daño puede agotar la ductilidad disponible de la estructura provocando la falla frágil de los elementos estructurales y su colapso. La experiencia muestra que los costos de reparación de los daños son excesivamente elevados, y en algunos casos es necesario demoler completamente la estructura.

La filosofía actual del diseño sísmico busca reducir los daños de los elementos estructurales y no estructurales durante la ocurrencia de un sismo moderado o severo mediante la aplicación de tecnologías de control de vibraciones que integradas al sistema estructural convencional provee una instancia de protección adicional que actúa reduciendo o eliminando las demandas de ductilidad sobre el sistema estructural principal (Soong y Spencer, 2002; Soong y Dargush, 1997; Aiken, 1996; Soong y Constantinou, 1994).

Dentro de los sistemas de control pasivo de vibraciones se encuentran los disipadores metálicos de energía, que son mecanismos simples y efectivos de disipación de energía a través de la deformación inelástica de los metales. La idea conceptual se remonta a los trabajos de Kelly (Kelly et al., 1972) y Skinner (Skinner et al., 1975) en Nueva Zelanda, y desde entonces se han utilizado una amplia variedad de dispositivos, que en su mayoría utilizan la fluencia de placas de acero dulce para disipar la energía. Los dispositivos metálicos más conocidos son el ADAS (Added Damping And Stiffness) (Bergman y Goel, 1987; Whittaker et al., 1991), TADAS (Triangular Plates Added Damping And Stiffness) (Tsai et al., 1993) y el sistema Honeycomb (Kobori et al., 1988; Kajima Corporation, 1991).

Actualmente, en Japón se están desarrollando y evaluando experimentalmente disipadores metálicos histeréticos ubicados en el propio nudo de viga y columna (KIS, 2003; Koetaka et al., 2005; Suita et al., 2001), donde la energía impartida por el sismo es disipada principalmente por el dispositivo amortiguador, mientras los miembros de la estructura principal se mantienen esencialmente elásticos.

En el presente trabajo se presentan los estudios, análisis y ensayos realizados para el diseño de una conexión seca articulada de viga y columna con un disipador metálico de nudo que concentra la demanda de deformación, absorbiendo y disipando en forma estable la energía impartida por el sismo, protegiendo a los elementos principales de la estructura de daños importantes y preservando los elementos no estructurales y contenido del edificio.

En particular, se enfoca el estudio a estructuras prefabricadas de hormigón armado de grandes luces, donde se mantiene la concepción del diseño tradicional de uniones secas articuladas de viga y columna, adicionando un sistema de disipación pasiva de energía con disipadores metálicos.

En general, las estructuras industriales de grandes luces, con configuración estructural típica de columnas esbeltas empotradas en su base y nudos de viga y columnas articuladas, presentan una rigidez lateral relativamente baja, y frente a fuerzas horizontales se producen elevados desplazamientos laterales y grandes rotaciones relativas de viga y columna en el nudo superior, por lo que surge la idea conceptual de utilizar un disipador metálico de nudo de forma triangular que funciona disipando energía por fluencia de una placa localizada en el mismo nudo con una adecuada restricción frente al pandeo fuera del plano.

En este trabajo se presentan los conceptos y principios de funcionamiento del disipador metálico de nudo para una conexión seca articulada de viga y columna premoldeada, la evaluación analítica y experimental del dispositivo y la aplicación práctica en una estructura de hormigón prefabricado de grandes luces.

CONCEPTO Y DISEÑO DEL DISIPADOR

Se presenta el marco conceptual y análisis del funcionamiento de un dispositivo triangular de acero aplicado en el nudo articulado formado por la unión de una columna con una viga.

Comportamiento de las fibras

Se considera un disipador metálico triangular de lado l_d y espesor t , donde se ha idealizado la articulación física de la unión de viga y columna mediante una única rótula ubicada en el vértice del dispositivo triangular según se muestra en la Figura 1a, donde se supone que los extremos de viga y columna son rígidos.

Para un ángulo de giro θ pequeño ($\theta \ll 1$) el desplazamiento longitudinal de una fibra ubicada a una distancia s del punto de giro es:

$$u_{(s)} = s\theta \sin \alpha \quad (1)$$

y la deformación específica longitudinal para esta fibra se puede expresar como:

$$\varepsilon_{xx(s)} = \frac{u_{(s)}}{l_{(s)}} = \frac{s\theta \sin \alpha}{s / \cos \alpha} = \theta \cos \alpha \sin \alpha \quad (2)$$

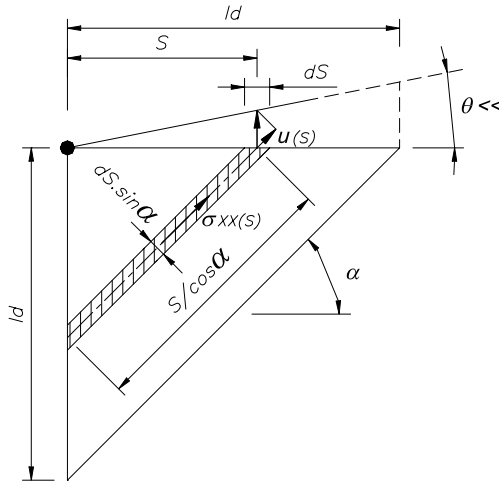


Figura 1a: Cinemática del disipador.

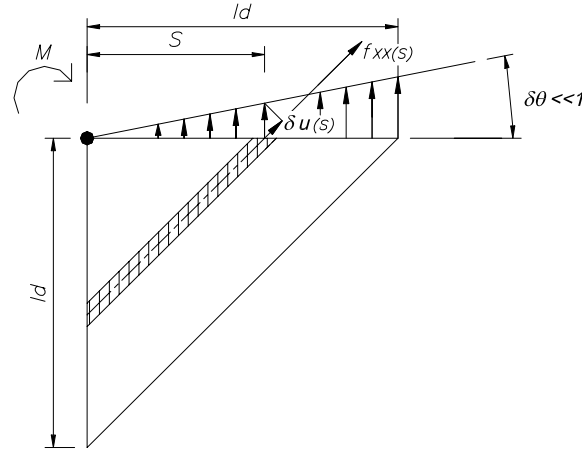


Figura 1b: Aplicación de Trabajos Virtuales.

El ángulo de giro para alcanzar la deformación de fluencia del material del disipador es:

$$\theta_y = \frac{\varepsilon_y}{\cos \alpha \sin \alpha} \quad (3)$$

Se demuestra que el valor máximo de la deformación ocurre para un ángulo del disipador de $\pi/4$ (Gerbaudo, 2006), es decir, un disipador con la geometría de un triángulo rectángulo. Para este caso la deformación específica longitudinal de la fibra ubicada a una distancia s del punto de giro es:

$$\varepsilon_{máx(s)} = \theta \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{2}\theta \quad (4)$$

En la ecuación (4) se puede observar que el valor de la deformación específica longitudinal para una fibra del disipador es independiente de la distancia a la articulación, es decir, todas las fibras del disipador tienen el mismo valor de deformación longitudinal y tensión para un dado ángulo de giro.

Por lo tanto, la tensión para cualquier fibra del disipador es función del valor del ángulo de giro y de la geometría del disipador:

$$\sigma_{xx(s)} = E_d \varepsilon_{xx(s)} = E_d \theta \cos \alpha \sin \alpha \quad (5)$$

Para encontrar el momento de fluencia de la chapa se utiliza el Principio de los Trabajos Virtuales aplicando un giro virtual $\delta\theta$ al disipador (Figura 1b). Planteando las ecuaciones de equilibrio del sistema resulta:

$$M_{y_{dis}} = \frac{1}{2} \sigma_y t l_d^2 \sin^2 \alpha \quad (6)$$

Para un ángulo de la chapa del disipador triangular de 45° que maximiza la eficiencia cinemática del dispositivo, construido con un material que fluye a una tensión σ_y , el momento de fluencia del disipador resulta:

$$M_{y_{dis}} = \frac{1}{4} \sigma_y t l_d^2 \quad (7)$$

El giro necesario para que el material del disipador entre en fluencia es:

$$\theta_y = 2\varepsilon_y = 2 \frac{\sigma_y}{E_d} \quad (8)$$

En el caso de un metal dúctil, la deformación longitudinal de fluencia es del orden de 0.001, por lo que el giro que produce la fluencia del disipador resulta de 0.002 rad, es decir, la chapa metálica entra rápidamente en fluencia para un giro relativamente pequeño, y para giros mayores puede desarrollar grandes deformaciones en el campo plástico disipando una elevada cantidad de energía.

Relacionando las ecuaciones del momento y giro de fluencia se obtiene la rigidez rotacional del disipador:

$$k_\theta = \frac{M_{y_{dis}}}{\theta_y} = \frac{1}{8} E_d t l_d^2 \quad (9)$$

Cinemática y constitutivas del disipador

Se analiza el funcionamiento de la conexión formada por un mecanismo de dos piezas articuladas con la rótula alejada una distancia a y b del vértice del disipador, según se muestra en la Figura 2.

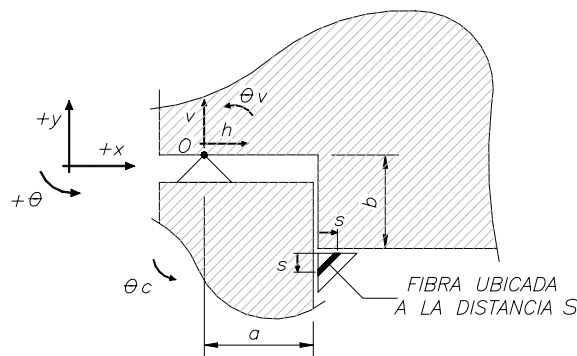


Figura 2: Mecanismo de viga y columna articulado tipo “tijera” con disipador metálico de nudo.

Las ecuaciones cinemáticas del mecanismo son:

Por el giro y desplazamientos de la viga

$$\begin{aligned} u_{x(s)}^v &= h + \theta_v b \\ u_{y(s)}^v &= v + \theta_v (a + s) \end{aligned} \quad (10)$$

Por el giro y desplazamientos de la columna

$$\begin{aligned} u_{x(s)}^c &= h + \theta_c (b + s) \\ u_{y(s)}^c &= v + \theta_c a \end{aligned} \quad (11)$$

El desplazamiento en la dirección x de una fibra del disipador ubicada en la posición s será:

$$u_{xx(s)} = u_{x(s)}^v \cos \alpha - u_{x(s)}^c \cos \alpha + u_{y(s)}^v \sin \alpha - u_{y(s)}^c \sin \alpha$$

$$u_{xx(s)} = \begin{bmatrix} -\cos \alpha (b+s) - \sin \alpha a & \cos \alpha b - \sin \alpha (a+s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_c \\ \theta_v \end{bmatrix} \quad (12)$$

La deformación específica longitudinal en la dirección x de la fibra resulta de dividir el desplazamiento en la dirección x por la longitud original de la fibra:

$$\varepsilon_{xx(s)} = \frac{u_{xx(s)}}{s / \cos \alpha} = \frac{\cos \alpha}{s} \begin{bmatrix} -\cos \alpha (b+s) - \sin \alpha a & \cos \alpha b - \sin \alpha (a+s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_c \\ \theta_v \end{bmatrix} \quad (13)$$

Se observa en la ecuación (13) que las deformaciones que se generan en el disipador sólo dependen de los giros de la columna y viga que concurren al nudo.

Además, si la geometría del disipador corresponde a un triángulo con un ángulo de 45° ($\pi/4$), se cumple que $\sin \alpha = \cos \alpha$, y la ecuación (13) se reduce a:

$$\varepsilon_{xx(s)} = \frac{1}{2} \frac{(a+b+s)}{s} [\theta_v - \theta_c] \quad (14)$$

siendo $\theta = (\theta_v - \theta_c)$ el giro relativo en el nudo viga-columna, el desplazamiento de la fibra ubicada en la posición s resulta:

$$u_{xx(s)} = \frac{1}{\sqrt{2}} (a+b+s) \theta \quad (15)$$

También a partir de la deformación de la fibra ubicada en la posición s se puede calcular su estado tensional para un material elastoplástico perfecto:

$$\text{para } \varepsilon_{xx(s)} < \varepsilon_y; \quad \sigma_{xx(s)} = \frac{1}{2} E_d \left(\frac{a+b+s}{s} \right) \theta$$

$$\text{para } \varepsilon_{xx(s)} \geq \varepsilon_y; \quad \sigma_{xx(s)} = \frac{1}{2} E_d \left(\frac{a+b+s}{s} \right) \theta_y = \sigma_y \quad (16)$$

Aplicando el Principio de los Trabajos Virtuales se puede encontrar el momento externo en la articulación que satisface las ecuaciones de equilibrio, y cuando el disipador entra en fluencia, $\sigma_{xx(s)} = \sigma_y = cte$, es posible encontrar una expresión del momento de fluencia del disipador:

$$M_{y_{dis}} = \frac{1}{2} \sigma_y t \left[(a+b)(l_2 - l_1) + \frac{1}{2}(l_2^2 - l_1^2) \right] \quad (17)$$

También es posible encontrar una expresión analítica para la rigidez del disipador triangular a partir de una formulación energética:

$$k_\theta = \frac{1}{4} E_d t \left[(a+b)^2 \ln \left(\frac{l_2}{l_1} \right) + 2(a+b)(l_2 - l_1) + \frac{1}{2}(l_2^2 - l_1^2) \right] \quad (18)$$

La fuerza correspondiente a la fluencia del disipador resulta de integrar las tensiones normales en toda la chapa:

$$F_{y_{dis}} = \sigma_y t l_d \sin \alpha \quad (19)$$

Las ecuaciones (17) a (19) representan un modelo simplificado del disipador metálico triangular construido con un material elastoplástico perfecto cuando la articulación o punto de giro se encuentra a una distancia a y b del vértice del triángulo. En las Figuras 3a y 3b se presenta el modelo constitutivo propuesto.

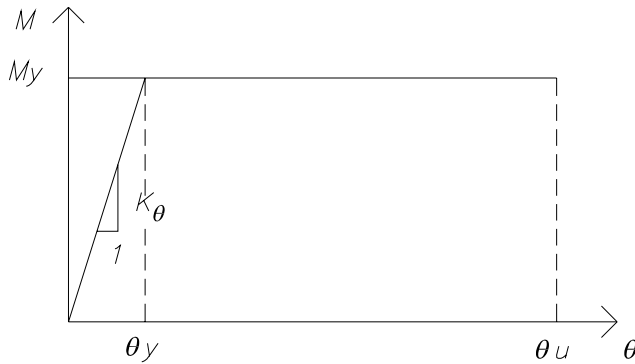


Figura 3a: Relación constitutiva del disipador con respuesta elastoplástica perfecta.

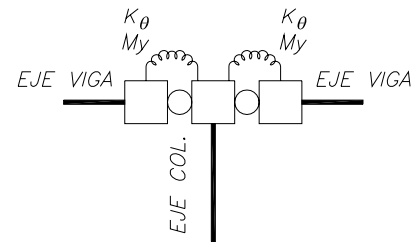


Figura 3b: Modelo simplificado del disipador tipo rótula perfecta.

VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO CÍCLICO

La evaluación del comportamiento cíclico del disipador se realiza mediante un modelo de elementos finitos utilizando un elemento triangular de placa denominado LBST (*Linear Basic Shell Triangle*) (Flores y Oñate, 2001) que permite estudiar el comportamiento estático y dinámico de estructuras con grandes deformaciones y no linealidad geométrica y del material.

Se analiza el comportamiento del disipador sometido a ciclos alternados de desplazamientos impuestos de tipo sinusoidal, con amplitud y frecuencia controlada, que simulan la acción dinámica del sismo, con el objeto de verificar la estabilidad del dispositivo frente a cargas cíclicas.

Análisis de la estabilidad del disipador

El análisis de una posible inestabilidad de la chapa fuera de su plano se realiza mediante la introducción de una imperfección a la geometría perfecta del modelo con una forma proporcional al primer modo de pandeo elástico de la placa. Para este fin se realiza un análisis numérico lineal de la chapa con un material elástico ideal para encontrar la forma modal correspondiente al primer modo de pandeo elástico. En las Figuras 4a y 4b se muestran la chapa metálica con su geometría perfecta y el primer modo de pandeo elástico.

El análisis no lineal del disipador se realiza partiendo de una geometría imperfecta de la placa con la forma del primer modo de pandeo. La geometría imperfecta de la placa se puede expresar de la siguiente forma:

$$X_{imp} = X_{perfecta} + \phi \alpha h \quad (20)$$

donde:

- X_{imp} = geometría de la placa con imperfección
- $X_{perfecta}$ = geometría de la placa perfecta
- ϕ = forma del primer modo de pandeo elástico normalizado
- α = parámetro de amplificación del modo de pandeo
- h = espesor de la placa.

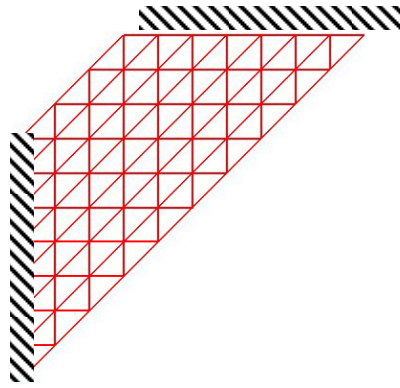


Figura 4a: Geometría perfecta de la chapa del dissipador metálico.

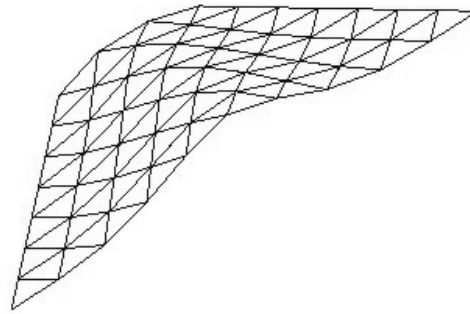


Figura 4b: Primer modo de pandeo elástico de la chapa.

El valor de la imperfección inicial es una variable que influye en el pandeo plástico de la chapa fuera de su plano. Para analizar su influencia en el comportamiento a pandeo de la chapa, se realiza un análisis de sensibilidad de la variable imperfección adoptando una serie de valores de deformación inicial del punto de máximo desplazamiento transversal de la chapa de 0.3 mm, 1.0 mm y 3.0 mm.

Se observa claramente en el comportamiento del modelo MEF que la chapa sufre un fenómeno de inestabilidad fuera de su plano, incrementándose las deformaciones transversales al plano de la chapa a medida que progresan los ciclos de carga y descarga, según se observa en la Figura 5.

También se observa en la Figura 5 que la deformación transversal inicial impuesta a la geometría de la chapa influye significativamente en los primeros ciclos de carga y descarga, pero a partir del quinto ciclo la respuesta de la chapa es similar en los tres casos. En las Figuras 6a y 6b se grafican el primer y décimo ciclo de histéresis de la chapa para una imperfección inicial de 0.3 y 3.0 mm respectivamente, y se observa que la degradación del primer ciclo de histéresis como consecuencia del pandeo plástico de la chapa es más pronunciado para el caso de mayor imperfección inicial. Sin embargo, en el décimo ciclo la respuesta de la chapa es prácticamente independiente de la magnitud inicial de la imperfección.

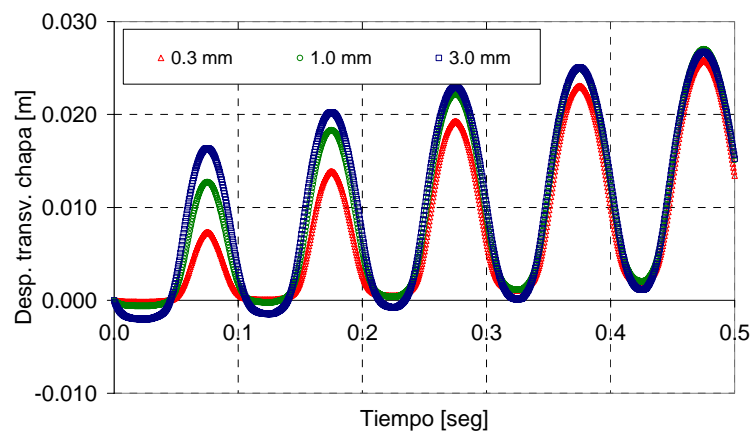


Figura 5: Análisis de sensibilidad a pequeñas imperfecciones.

El fenómeno de degradación del ciclo de histéresis, que se pone de manifiesto en las Figuras 6a y 6b después de diez ciclos de carga y descarga, se origina por la disminución de la deformación longitudinal de las fibras del material por el efecto no lineal geométrico de la deformación plástica transversal acumulada, con la consiguiente pérdida de la capacidad de disipar energía por fluencia de la chapa.

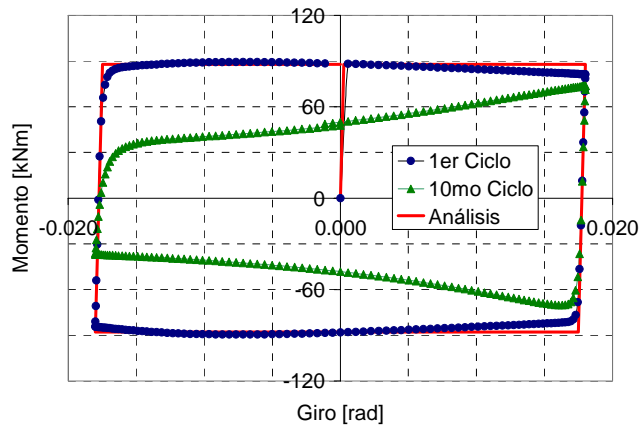


Figura 6a: Imperfección inicial de 0.3 mm.

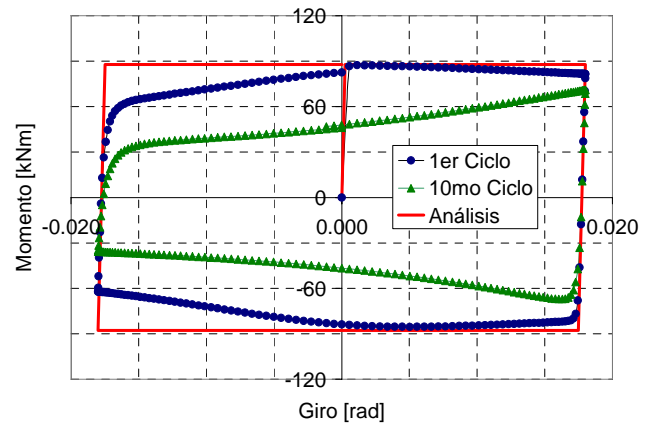


Figura 6b: Imperfección inicial de 3 mm.

Control del pandeo plástico del disipador

Una forma de controlar el pandeo plástico de la chapa metálica del disipador es adicionando uno o más rigidizadores transversales para aumentar la rigidez fuera del plano de la chapa. Se han realizado una serie de modelos numéricos con distinto número y configuración de rigidizadores llegando a la conclusión que con un solo rigidizador transversal ubicado en el centro de una de las caras de la chapa es posible controlar el pandeo y estabilizar el comportamiento histerético para varios ciclos. En la Figura 7a se muestra el modelo MEF del disipador metálico con un rigidizador radial y en la Figura 7b se presenta el mapa de desplazamientos totales después de 10 ciclos de carga y descarga, observándose que existe una concentración y acumulación de la deformación plástica en la zona central de cada semi-onda de pandeo de la chapa. Este tipo de comportamiento es muy dependiente de las propiedades mecánicas del acero utilizado (Boresi et al., 1993).

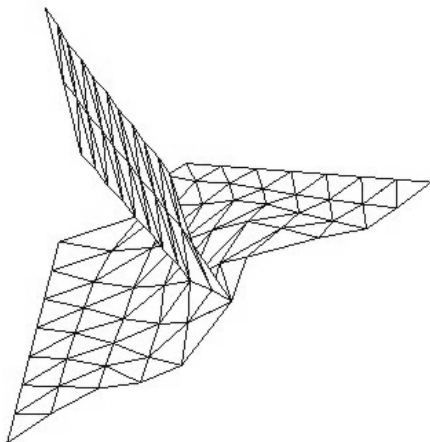


Figura 7a: Modelo numérico de chapa con 1 rigidizador radial y material elastoplástico perfecto.

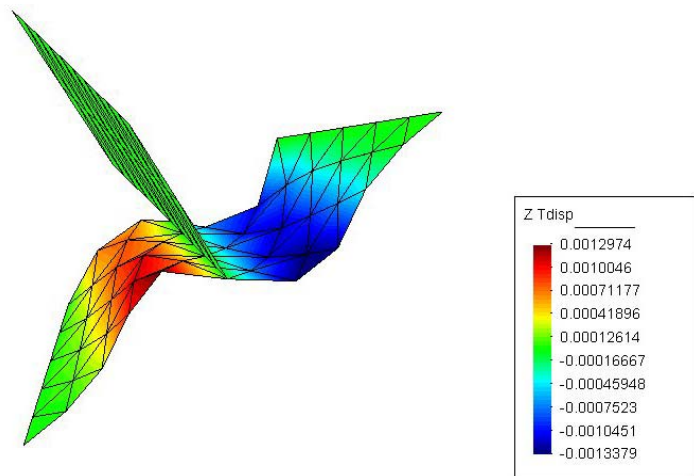


Figura 7b: Desplazamiento fuera del plano de la chapa [m] del disipador con 1 rigidizador radial.

En las Figuras 8a y 8b se presentan los resultados del modelo numérico para una chapa de material elastoplástico ideal, con una imperfección inicial de 1.0 mm, sin rigidizador y con un rigidizador transversal en el centro de una de las caras de la chapa. Se observa que la chapa con rigidizador transversal presenta un comportamiento histerético muy estable, aún después de diez ciclos completos de carga y descarga.

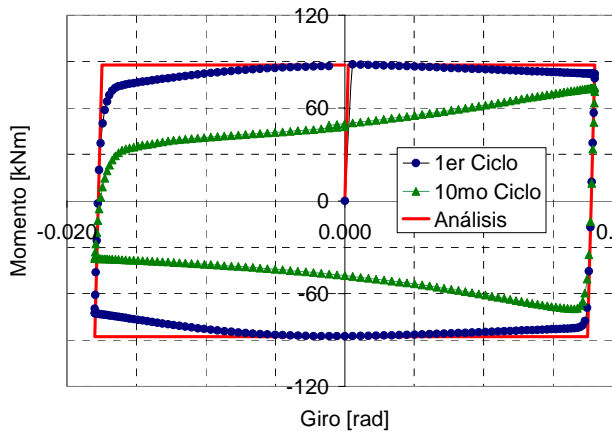


Figura 8a: Chapa sin rigidizador con material elastoplástico perfecto (imperfección inicial = 1.0 mm).

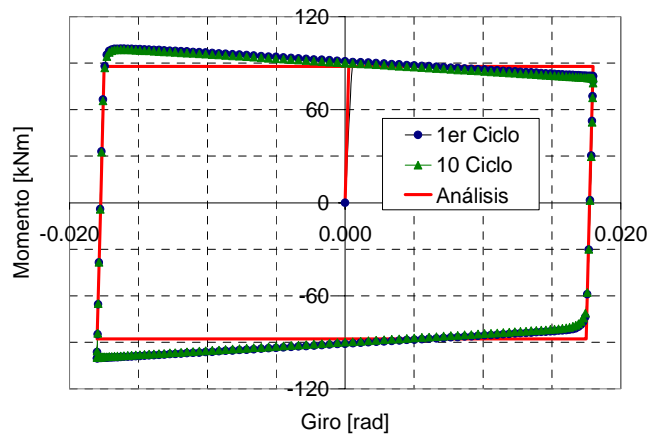


Figura 8b: Chapa con 1 rigidizador radial con material elastoplástico perfecto (imperfección inicial = 1.0 mm).

Influencia de la no linealidad del material

La evaluación del comportamiento del disipador fabricado con un material base que presenta un comportamiento no lineal con endurecimiento o aumento del nivel de la tensión de fluencia por ciclos sucesivos de carga y descarga, se analiza mediante un modelo de elementos finitos con un material cuyas propiedades mecánicas son simuladas con un modelo de endurecimiento isotrópico lineal (Chen y Chan, 1988).

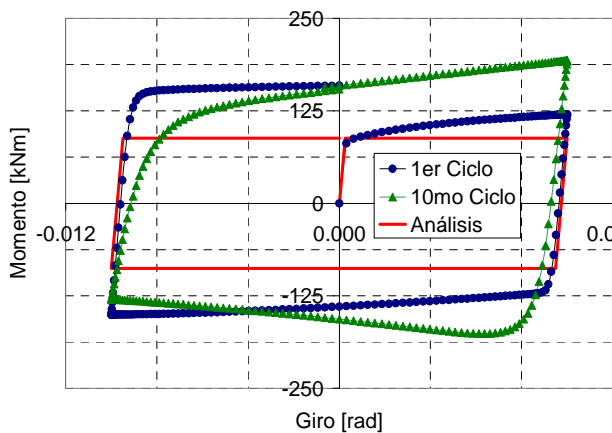


Figura 9a: Chapa sin rigidizador Material no lineal con endurecimiento isotrópico.

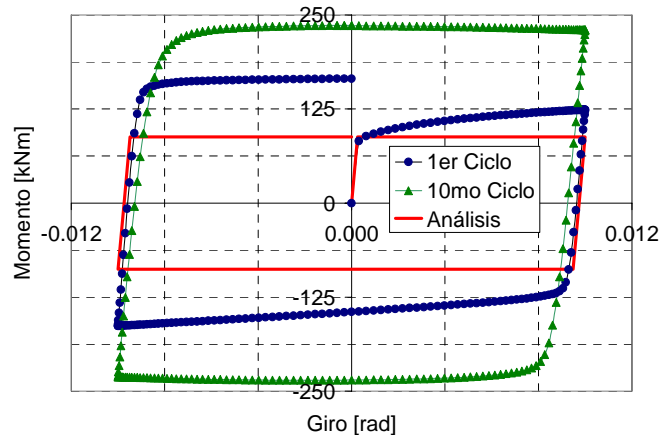


Figura 9b: Chapa con 1 rigidizador transversal Material no lineal con endurecimiento isotrópico.

En las Figuras 9a y 9b se muestran los resultados obtenidos con el modelo de elementos finitos considerando un material no lineal con endurecimiento isotrópico. Para el caso de la chapa sin rigidizador, al final del décimo ciclo el momento de fluencia del disipador es de 154 kNm, es decir, un aumento del 75 % respecto al valor del momento de 88 kNm correspondiente a la chapa ideal de material elastoplástico, y la fuerza máxima aplicada por el disipador es de 332 kN, es decir, 1.87 veces el valor de 178 kN correspondiente a la fluencia inicial de la chapa.

Para la chapa con rigidizador, al final del décimo ciclo el momento de fluencia del disipador es de 236 kNm, un aumento del 168 % respecto al momento de fluencia del disipador ideal, y la fuerza máxima resulta de 478 kN, es decir, 2.68 veces la fuerza de fluencia del disipador ideal.

Se destaca que mientras el ciclo de histéresis mantiene o aumenta su área para un material con endurecimiento, lo que significa una mejora en el comportamiento sísmico de la estructura por la mayor cantidad de energía disipada, la

fuerza de fluencia del aparato disipador aumenta notablemente, por lo que se deberá tener en cuenta los efectos de dichas fuerzas en el dimensionamiento y cálculo de la conexión de viga y columna.

La modelación numérica realizada con un modelo de endurecimiento isotrópico constituye una herramienta efectiva para el análisis general del comportamiento del disipador metálico y el diseño de los rigidizadores transversales. Sin embargo, no puede reflejar fielmente el comportamiento anisotrópico o efecto Bauschinger del material bajo cargas reversibles que incursionan en el campo plástico.

Mediante el análisis numérico se ha podido comprobar que la formulación analítica simplificada predice con suficiente precisión el comportamiento de una chapa metálica en fluencia.

La respuesta del modelo simplificado presenta una buena correlación con el comportamiento físico del disipador cuando mayor es la eficiencia del aparato frente al pandeo de la chapa fuera del plano, y cuando se utiliza un metal de base muy dúctil con un nivel de fluencia prácticamente constante.

En el caso de metales que presentan endurecimiento o aumento del nivel de fluencia bajo cargas cíclicas, el ciclo de histéresis mantiene o aumenta su área, lo que significa una mejora en el comportamiento sísmico de la estructura por la mayor cantidad de energía disipada, pero por otro lado, aumenta la fuerza de fluencia del aparato disipador, que deberá ser tomada en cuenta en el dimensionamiento del propio disipador y de la conexión viga y columna.

Se ha determinado analíticamente (Gerbaudo, 2006) que para un acero dulce el factor de mayoración de la fuerza de fluencia para diez ciclos de carga y descarga es del orden de 1.5. Este coeficiente puede ser determinado para cada tipo de acero y utilizado para ajustar las fuerzas de fluencia obtenidas con el modelo simplificado.

Con el objeto de validar los modelos propuestos se realizó un ensayo experimental para evaluar conceptualmente el comportamiento del disipador bajo cargas cíclicas reversibles y el grado de correlación del funcionamiento del prototipo físico del disipador con el obtenido en los análisis numéricos.

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

El objeto del ensayo es la verificación experimental del comportamiento cíclico bajo cargas reversibles de un prototipo de disipador metálico instalado en una conexión articulada de viga y columna.

El dispositivo de ensayo consta de una pieza metálica que simula el nudo articulado de una viga con una columna, constituido por una viga de acero de sección I suficientemente rígida conectada mediante una articulación a otra pieza metálica compuesta por dos perfiles U vinculados con presillas, sujetando esta última pieza a la losa reactiva del laboratorio mediante un dispositivo de perfiles y barras abulonadas. El prototipo del disipador metálico sometido a ensayo fue conectado al nudo articulado viga-columna mediante cordones de soldaduras (véase la Foto 10b).

Las cargas reversibles se aplicaron en el extremo de la viga metálica mediante un par de gatos hidráulicos que reaccionan sobre sendos bloques de hormigón, conectados en serie con una celda de carga que envía los registros a una central de adquisición de datos. En el extremo de la viga se instaló un dispositivo electrónico de medición de desplazamiento conectado a la misma central de datos. Además se instalaron flexímetros de control en distintas partes del dispositivo de ensayo con el objeto de estimar los desplazamientos de cuerpo rígido sufridos por el disipador durante el ensayo. En las Figuras 10a se muestra una vista general del ensayo experimental y en la Figura 10b se presenta un detalle del nudo articulado con el disipador metálico de nudo.

El disipador metálico ensayado fue diseñado en función de la capacidad de aplicación de carga de los gatos y del tamaño de la pieza metálica de ensayo, resultando una chapa triangular de 4.8 mm de espesor, 101 mm de lado y 54 mm de abertura en el vértice, con un rigidizador transversal de 6 mm de espesor. El material del disipador es acero dulce laminado en caliente de gran ductilidad con una tensión de fluencia de 208 MPa, una tensión máxima de rotura de 330 MPa y un alargamiento máximo de rotura de 44 %.

En la Figura 11a se muestran los ciclos de histéresis del disipador obtenidos experimentalmente, destacándose que, en general, se mantiene sin degradación la rigidez elástica del sistema, tanto en compresión como en tracción, y se observa una asimetría de los ciclos de compresión respecto a los de tracción, a causa del pandeo plástico sobre una mitad de la chapa del disipador originado por los desplazamientos significativos fuera del plano del borde de sujeción de

la chapa metálica a la viga de baja rigidez flexional en dirección perpendicular al movimiento impuesto, afectando la estabilidad de esta mitad de chapa del disipador.



Foto 10a: Pieza metálica, gatos hidráulicos y dispositivos de adquisición de datos de fuerzas y desplazamientos.



Foto 10b: Nudo articulado viga-columna con disipador metálico y flexímetros de control de giros adicionales en la articulación.

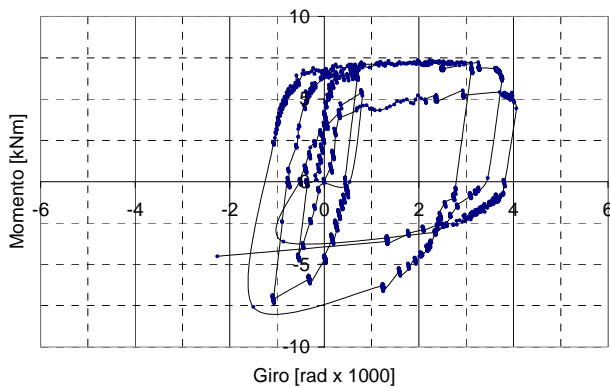


Figura 11a: Ciclos de histéresis del disipador metálico registrados durante el ensayo

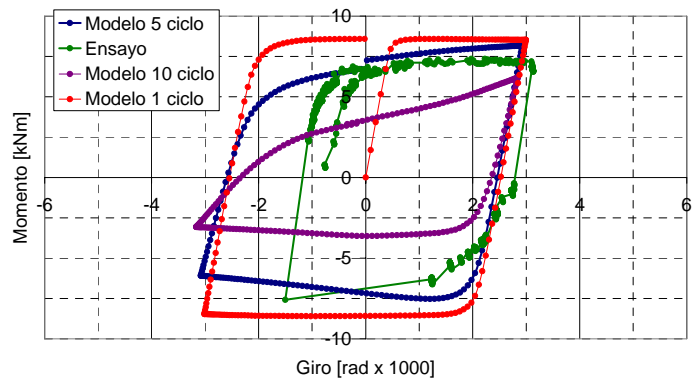


Figura 11b: Ciclos de histéresis obtenidos con el modelo numérico ajustado y comparación del tercer ciclo de histéresis del ensayo experimental

El comportamiento observado durante el ensayo se pudo corroborar mediante un modelo numérico ajustado que tiene en cuenta la flexibilidad de uno de los bordes de sujeción de la chapa, cuyos resultados se muestran en la Figura 11b donde se puede observar que los ciclos de histéresis resultantes del nuevo modelo ajustado del disipador metálico presentan una degradación del área de histéresis a medida que progresan los ciclos de carga y descarga como consecuencia de la acumulación de deformación plástica no reversible, notándose que el ciclo medido en el experimento muestra un patrón de comportamiento similar al modelo numérico.

CASO DE APLICACIÓN

A continuación se aplica la tecnología de conexión seca articulada de viga y columna con disipador metálico de nudo al caso de una estructura convencional de hormigón prefabricado de grandes luces correspondiente a una nave industrial.

Se analiza un módulo típico de estructura prefabricada formada por un pórtico de 4 vanos con luces de 26.0 m y columnas de sección cuadrada de 0.60 m x 0.60 m con altura media de aproximadamente 11.0 m. Las fundaciones de la

estructura corresponden a bases aisladas fundadas en un manto de arena medianamente compacta. Los cerramientos laterales no son estructurales y se apoyan sobre el nivel de fundación y las vigas exteriores de los pórticos perimetrales.

La unión de las vigas portantes con las columnas se realiza mediante una conexión seca articulada con un dissipador metálico de nudo tipo “tijera” que provee un momento plástico nominal de 105 kNm.

En la Figura 12 se presenta la configuración estructural del módulo típico de la nave prefabricada y en la Figura 13 el modelo numérico de análisis, con vigas y columnas de material elástico, fundaciones representadas mediante resortes elásticos con rigidez rotacional, y dissipadores modelados con rótulas elastoplásticas no lineales.

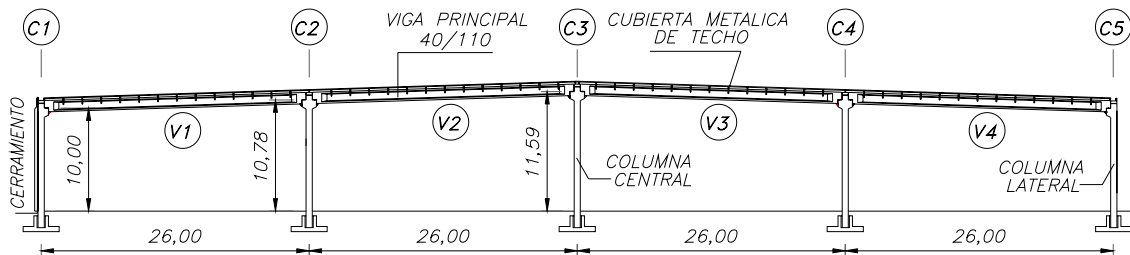


Figura 12: Módulo típico de estructura prefabricada.

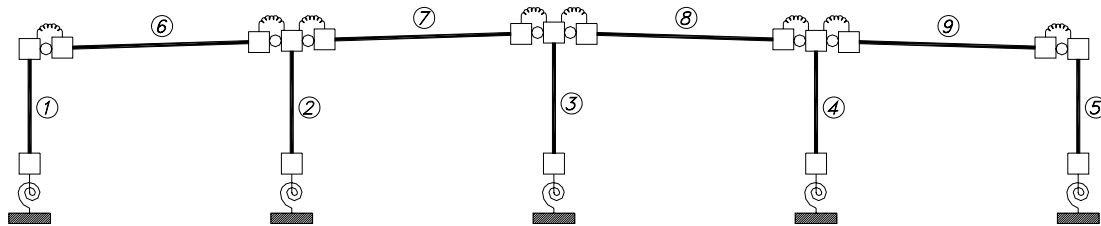


Figura 13: Modelo de cálculo de estructura prefabricada.

El estudio de la respuesta de la estructura se realiza mediante un análisis dinámico no lineal en el tiempo con el programa SAT-Lab (Inaudi y De la Llera, 2002), utilizando un acelerograma calibrado del sismo de Llolleo (Chile, 1985) compatible con el espectro de diseño de la Zona Sísmica 2 de la Norma Chilena NCh2369, obteniéndose la historia de desplazamientos y solicitaciones de la estructura.

El período fundamental de vibración de la estructura de pórtico plano con conexiones secas articuladas resultó de 1.29 seg y el desplazamiento de la estructura alcanzó un valor máximo de 0.088 m, es decir, una distorsión de piso máxima $\Delta = 0.88 \% < 1.5 \%$ recomendado como límite máximo por el reglamento de aplicación (NCh2369).

El momento de fluencia de cada dissipador es de 105 kNm, y el momento de fluencia en la base de la columna en función de la sección y armaduras adoptadas es de 600 kNm, por lo que la relación del momento de fluencia del dissipador al de la columna es del 20 % (105 kNm / 600 kNm).

En la Figura 14 se presenta el diseño de la conexión seca articulada de viga y columna con el dissipador metálico de nudo, destacándose que el apoyo articulado, además de permitir el giro relativo entre la viga y la columna, debe tener capacidad para transmitir esfuerzos combinados de corte y normales reversibles de compresión y tracción y debe ser suficientemente rígido para garantizar el “efecto tijera”.

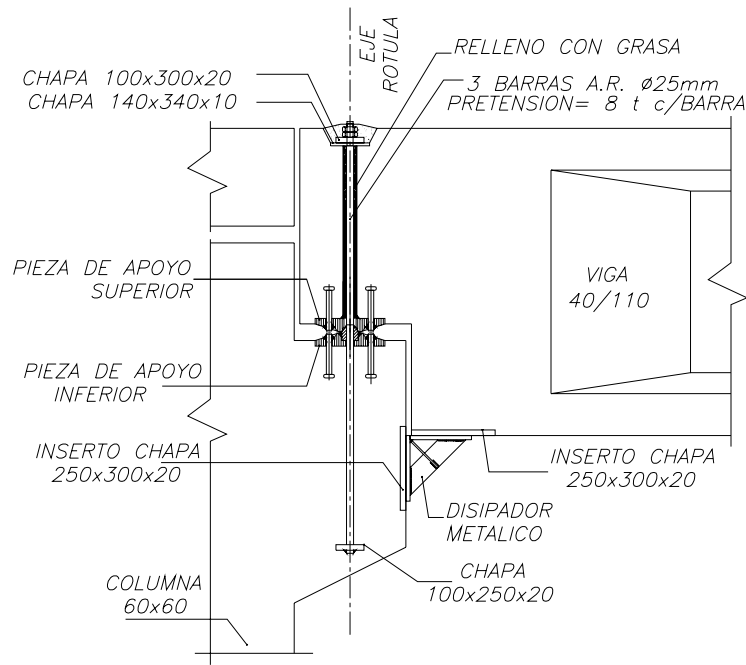


Figura 14: Conexión seca articulada viga-columna con disipador metálico.

A los fines comparativos, se ha predimensionado la misma estructura con un diseño convencional de columnas y vigas premoldeadas con conexiones rígidas resistentes a momento construidas in situ. En la Tabla 1 se presenta la comparación de la estructura diseñada con conexiones secas articuladas y disipadores metálicos de nudo tipo “tijera” y el diseño mediante conexiones resistentes a momento.

También se grafican en las Figuras 15a y 15b los espectros elásticos de aceleración y desplazamiento para la estructura con disipadores (C.D.) y con conexiones húmedas (C.H.), donde se observa el efecto de los disipadores que modifican la rigidez y amortiguamiento del sistema, resultando una reducción en los desplazamientos debido fundamentalmente al mayor nivel de amortiguamiento que aportan los disipadores al sistema.

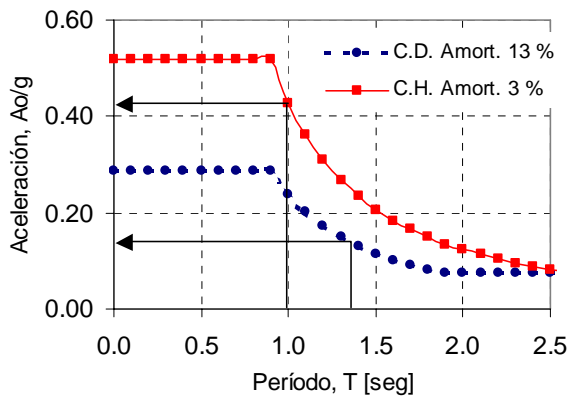


Figura 15a: Espectros de aceleración de las estructuras con disipadores y nudos húmedos.

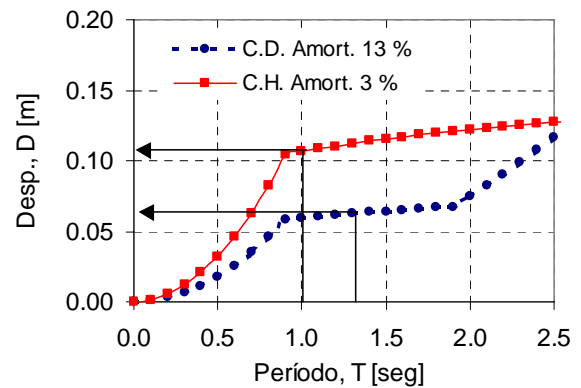


Figura 15b: Espectros de desplazamiento de las estructuras con disipadores y nudos húmedos.

Tabla 1: Comparación entre conexión seca articulada con disipadores metálicos de nudo tipo “tijera” y conexión resistente a momento.

Propiedad de la estructura	Conexión seca articulada con disipadores “tijera”	Conexión resistente a momento
Período de la estructura, T [seg]	1.29	1.00
Relación de amortiguamiento equivalente, ζ [%]	13 %	3 %
Coefficiente sísmico elástico de diseño, C_o	0.151	0.428
Ductilidad requerida, R	1.0	5.0
Distorsión de piso, Δ [%]	0.88	1.07
Sección de columna, [m]	0.60 x 0.60	0.70 x 0.70

Además se han analizado los costos de construcción de la estructura con disipadores y con conexiones húmedas, resultando un costo de inversión similar en ambos casos (Gerbaudo, 2006).

CONCLUSIONES

A partir de los resultados computacionales y experimentales obtenidos en esta investigación, se considera viable, desde el punto de vista técnico y económico, una unión seca articulada de viga y columna conectada mediante un disipador metálico para la tipología de estructuras de hormigón armado de grandes luces con columnas esbeltas.

Los resultados del trabajo muestran que el disipador triangular metálico de nudo propuesto es un aparato muy eficiente para disipar energía, ya que todas sus fibras fluyen para deformaciones muy inferiores a las que producen la plastificación o fluencia de la base de la columna, en la medida que no se produzcan fenómenos de inestabilidad o pandeo de la chapa en compresión.

La incorporación de un disipador metálico instalado en el nudo de conexión de viga y columna, con un momento de plastificación del orden del 10 al 30 % del momento de fluencia de la sección correspondiente a la base de la columna, produce niveles de amortiguamiento equivalente comprendidos entre el 10 y 20 % para valores de deformaciones que mantienen a la columna en el rango elástico para estructuras típicas de grandes luces prefabricadas de hormigón. Este nivel de amortiguamiento equivalente logra mejorar sustancialmente la respuesta de la estructura frente a la acción del sismo, reduciendo significativamente las aceleraciones y niveles de daño estructural en el sistema respecto de una estructura con nudos rígidos resistentes a momento. Con esta tecnología se logra controlar las grandes deformaciones que se producen en estructuras de columnas en ménsulas sometidas a acciones horizontales.

Los resultados del estudio muestran que, en general, el disipador metálico de nudo propuesto es apropiado para el control de los desplazamientos en estructuras flexibles de periodos naturales medios y altos comprendidos en el plafón o en la cola del espectro de diseño, donde el sistema presenta su mayor eficiencia para el control de los desplazamientos y distorsiones de piso.

Mediante el ensayo experimental se pudo demostrar conceptualmente que el disipador metálico es capaz de disipar energía mediante un ciclo de histéresis controlado, y que las expresiones analíticas desarrolladas y los modelos numéricos son capaces de predecir con suficiente precisión el comportamiento real de un disipador metálico conectado a una unión articulada de viga y columna.

Los resultados obtenidos en esta fase experimental de evaluación de concepto sientan las bases para el futuro desarrollo de un programa completo experimental y numérico para la aplicación práctica en estructuras civiles del disipador metálico de nudo presentado en este trabajo.

REFERENCIAS

- Aiken, I (1996). “Passive Energy Dissipation - Hardware and Applications”, *Proceedings of the Los Angeles County and SEAOSC Symposium on Passive Energy Dissipation Systems for New and Existing Building*, Los Angeles, California, USA.
- Bergman, D. M. y Goel, S. C. (1987). “Evaluation of Cyclic Testing of Steel-Plate Devices for Added Damping Dissipators”, Report UMCE 87-10, Civil Engineering Department, University of Michigan, Ann Arbor, USA.

- Boresi, A. P., Schmidt R. J. y Sidebottom O. M. (1993). *Advanced Mechanics of Materials*, 5th Edition, John Wiley & Sons Inc, New York.
- Chen, W. F. y Chan, D. J. (1988). *Plasticity for Structural Engineers*, Springer-Verlag, New York, USA.
- Flores, F. G. y Oñate, E. (2001). "A basic thin shell triangle with only translational DOFs for large strain plasticity", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 51, pp. 57-83.
- Gerbaudo, C. F. (2006). "Diseño de un disipador metálico para una conexión articulado de viga y columna", Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Inaudi J. A. y De la Llera, J.C. (2002). SAT-Lab, www.sat-lab.com.
- Kajima Corporation (1991). "Honeycomb Damper Systems", www.kajima.co.jp.
- Kelly, J. M., Skinner, R. I. y Heine, A.J. (1972). "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 5, Nro. 3, pp. 63-68.
- KIS (2003). "Kyoto University Experimental Project Earthquake-Resistant Steel Frames", www.steel.dpri.kyoto-u.ac.jp/kis2003.
- Kobori, T., Yamada, T., Takenaka, Y., Maeda, Y., y Nishimura, I. (1988). "Effect of dynamic tuned connector on reduction of seismic response-application to adjacent office buildings", *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 5, Tokyo/Kyoto, Japan.
- Koetaka, Y., Chusilp, P., Zhang, Z., Ando, M., Suita, K., Inoue, K. y Uno, N. (2005). "Mechanical property of beam-to-column moment connection with hysteretic dampers for column weak axis", *Engineering Structures*, Vol. 27, Nro. 1, pp.109-117.
- NCh 2369 (2003). Norma Chilena Oficial, "Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales", Chile.
- Skinner, R.I., Kelly, J. M., y Heine, A.J. (1975). "Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 3, pp. 287-296.
- Soong, T. T. y Spencer Jr., B. F. (2002). "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice", *Engineering Structures*, Vol. 24, Nro. 3, pp. 243-259.
- Soong, T. T y Dargush, G. F. (1997), "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- Soong, T. T. y Constantinou, M.C. (1994), "Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering", Springer-Verlag, New York, USA.
- Suita, K., Inoue, K., Takeuchi, I. y Uno N. (2001). "Mechanical behavior of bolted beam-to-column connections with hysteretic damper", *Proceedings of the 3rd Japan-Korea-Taiwan Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures*, Taipei, Taiwan, pp. 117-125.
- Tsai, K. C., Chen, H.W., Hong, C. P. y Su, Y. F. (1993). "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistance construction", *Earthquake Spectra*, Vol. 9,Nro. 3, pp. 505-528.
- Whittaker, A. S., Bertero, V. V., Thompson, C. L. y Alonso, L.J. (1991). "Seismic testing of steel plate energy dissipation devices," *Earthquake Spectra*, Vol. 7, Nro. 4, pp. 563-604.
- Yang, T. S. y Popov, E. P. (1995). "Experimental and analytical studies of steel connections and energy dissipators", Technical Report N° UCB/EERC-95/13, University of California, Berkeley, California, USA.

