

**DISEÑO DE UN DISIPADOR METÁLICO
PARA UNA CONEXIÓN ARTICULADA DE VIGA Y COLUMNA**

por

Carlos Fabián Gerbaudo
Ingeniero Civil

Director

Dr. Ing. José A. Inaudi

TESIS PRESENTADA A LA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES
EN CUMPLIMIENTO DE LOS REQUERIMIENTOS PARA EL GRADO
DE

MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

en la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA



Mayo 2006

*Diseño de un disipador metálico
para una conexión articulada de viga y columna*

RESUMEN

En el presente trabajo se exponen los estudios, análisis y ensayos conducentes al diseño de un disipador metálico para una conexión articulada de viga y columna. El estudio se enfoca a estructuras prefabricadas de grandes luces, tanto metálicas como de hormigón, donde se mantiene la concepción del diseño tradicional de uniones secas articuladas de viga con columna, adicionando un sistema de disipación pasiva de energía mediante dispositivos metálicos.

El objetivo del trabajo es el diseño de un disipador metálico de nudo y el estudio de la viabilidad técnica de la unión seca articulada de viga y columna conectada por el disipador. El alcance del trabajo comprende la revisión de antecedentes sobre el estado del arte y estado de aplicación de las nuevas tecnologías de control pasivo de vibraciones mediante disipadores de energía de estructuras prefabricadas sometidas a sismo, el estudio analítico del comportamiento de la unión articulada viga-columna con disipador, la modelación numérica y comportamiento cíclico del disipador y los fenómenos de inestabilidad por pandeo plástico de la chapa metálica, la formulación de una metodología de diseño con la aplicación práctica a una estructura prefabricada de hormigón sometida a sismo, y finalmente, la validación conceptual del funcionamiento del disipador mediante un ensayo experimental.

ABSTRACT

The analytical and computational studies carried out for the design of a metallic energy dissipating device for beam-column connections are reported in this thesis. The device is conceived for applications in large-span pre-cast concrete structures for industrial or residential buildings and for steel structures. The dissipater is designed to be compatible with traditional design of dry pinned beam-column connections and aimed at adding energy dissipation capacity with metallic devices.

The scope of this investigation includes a review of the state of the art of the application of energy dissipating devices to pre-cast concrete structures subjected to earthquake excitation, 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.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento al Director de Tesis Dr. Ing. J.A.Inaudi por su dedicación y apoyo, al cuerpo de profesores de la Maestría, al Laboratorio de Estructuras en la persona de su Director Ing. G. Pirard y su equipo de trabajo por la realización del ensayo experimental, y a la SECYT de la UNC por el otorgamiento de la Beca de Formación Superior para Docentes durante los años 2003-2004.

Dedicado a mis padres,
mi esposa por su amor, paciencia,
y comprensión, y mis hijas por la alegría que
me brindan a borbotones todos los días.

Índice

1	INTRODUCCIÓN	1-1
1.1	Filosofía del diseño sísmico	1-1
1.2	Sistemas de control de vibraciones	1-2
1.3	Estructuras prefabricadas de hormigón sismorresistentes	1-10
1.4	Sistemas de conexión de estructuras prefabricadas	1-11
1.5	Configuración e instalación de disipadores	1-14
1.6	Disipador metálico de nudo	1-16
1.7	Objetivo y alcance	1-17
1.8	Organización de la tesis	1-18
2	IDEA CONCEPTUAL	2-1
2.1	Introducción	2-1
2.2	Respuesta de una columna en ménsula	2-1
2.3	Análisis de un disipador metálico triangular: comportamiento de las fibras	2-4
2.4	Análisis de un disipador metálico en una columna en ménsula	2-7
2.5	Ejemplo de aplicación	2-13
3	ANÁLISIS DEL NUDO VIGA-COLUMNA CON DISIPADOR	3-1
3.1	Introducción	3-1
3.2	Formulación general	3-1
3.3	Ecuaciones cinemáticas	3-2
3.4	La tijera perfecta: modelo simplificado	3-7
3.5	Resultados	3-12

*Diseño de un disipador metálico
para una conexión articulada de viga y columna*

4	DISEÑO CONCEPTUAL DEL DISIPADOR	4-1
4.1	Concepto estructural de conexiones secas articuladas y disipadores tijera	4-1
4.2	Requerimientos de diseño del disipador	4-1
4.3	Tamaño y forma del disipador	4-4
4.4	Ubicación del disipador	4-4
4.5	Propuesta de disipador	4-5
5	VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO CÍCLICO DEL DISIPADOR	5-1
5.1	Introducción	5-1
5.2	Modelo numérico del disipador triangular	5-1
5.3	Análisis de inestabilidad o pandeo del disipador	5-4
5.4	Control del pandeo plástico del disipador	5-6
5.5	Influencia de la no linealidad del material	5-8
5.6	Resultados del análisis numérico	5-14
6	ASPECTOS DEL DISEÑO ESTRUCTURAL	6-1
6.1	Prediseño	6-1
6.2	Diseño de la estructura y sus conexiones	6-6
6.3	Diseño de la conexión viga-columna	6-8
7	CASO DE APLICACIÓN	7-1
7.1	Concepto estructural de conexiones secas y disipadores “tijera”	7-1
7.2	Descripción de la estructura prefabricada	7-2
7.3	Sismo de diseño	7-2
7.4	Predimensionado de la estructura	7-4

*Diseño de un dissipador metálico
para una conexión articulada de viga y columna*

7.5	Modelo numérico	7-4
7.6	Resultados del análisis estructural	7-6
7.7	Diseño de la conexión viga-columna	7-6
7.8	Comparación con estructura prefabricada de nudos húmedos	7-8
8	EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL DISIPADOR METÁLICO	8-1
8.1	Descripción del dispositivo de ensayo	8-1
8.2	Características del dissipador metálico	8-3
8.3	Resultados del ensayo	8-4
8.4	Comparación con modelo analítico y numérico	8-6
8.5	Conclusiones del ensayo experimental	8-9
9	CONCLUSIONES	9-1
9.1	Conclusiones del estudio	9-1
9.2	Características de la conexión articulado con dissipador metálico	9-1
9.3	Futuros desarrollos	9-4
10	REFERENCIAS	10-1
I	APÉNDICE 1. DISEÑO DE LA CONEXIÓN SECA ARTICULADA	I-1
I.1	Sistemas de conexión y transferencia de carga	I-1
I.2	Resistencia a tracción de un grupo de conectores	I-2
I.3	Resistencia al corte de un grupo de conectores	I-4
I.4	Resistencia combinada a tracción y corte	I-7
I.5	Espesor de la placa base	I-7
I.6	Soldaduras	I-7
I.7	Verificación al aplastamiento por contacto	I-8

Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Maestría en Ciencias de la Ingeniería
Mención en Estructuras y Geotécnica

Tesis de Maestría

**Diseño de un disipador metálico
para una conexión articulada de viga y columna**

Índice

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Filosofía del diseño sísmico	1
1.2	Sistemas de control de vibraciones	2
1.2.1	Disipadores metálicos	5
1.2.2	Disipadores friccionales	7
1.2.3	Disipadores viscoelásticos y viscosos	8
1.2.4	Amortiguadores de masa sintonizada	9
1.2.5	Rehabilitación de estructuras	10
1.3	Estructuras prefabricadas de hormigón sismorresistentes	10
1.4	Sistemas de conexión para estructuras prefabricadas	11
1.4.1	Conexiones dúctiles	12
1.4.2	Conexiones híbridas	12
1.5	Configuración e instalación de disipadores	14
1.6	Disipador metálico de nudo	16
1.7	Objetivo y alcance	17
1.8	Organización de la tesis	18

1 Introducción

La utilización de tecnologías avanzadas para el control de vibraciones en edificios, en particular la aplicación de sistemas pasivos de protección en estructuras civiles sismorresistentes, se ha estudiado y difundido ampliamente en los últimos años. Los sistemas de control pasivo de vibraciones se clasifican en forma general en el aislamiento sísmico y los disipadores o amortiguadores de energía.

La aplicación de estos dispositivos de control encuentra ciertas restricciones en estructuras de grandes luces, como por ejemplo estructuras prefabricadas de hormigón para naves industriales o depósitos, constituidas por columnas altas y esbeltas y vigas de gran longitud. En estas tipologías estructurales se torna ineficiente la utilización de aisladores sísmicos por su elevada flexibilidad, mientras que la mayoría de los disipadores de energía necesitan de un sistema de diagonales y conectores en los vanos libres de la estructura, con ciertos requerimientos de rigidez y resistencia, resultando económicamente inviable la ejecución de estos arriostramientos en vanos de grandes dimensiones.

El diseño convencional de estructuras prefabricadas de hormigón de grandes luces en zonas sísmicas recurre a la materialización de conexiones rígidas resistentes a momento en los nudos de viga y columna, que disipan la energía del sismo mediante deformaciones inelásticas concentradas en el nudo (ductilidad), logrando que la estructura se mantenga en pie, sin colapsar, durante un sismo severo, aceptando daños importantes de costosa reparación o que pueden llevar a la necesidad de demolición de la estructura.

Debido a la amplia difusión de construcciones con estructuras prefabricadas de grandes luces en nuestro país, donde un vasto sector del territorio se encuentra en zona sísmica, resulta de interés el estudio de un sistema de control pasivo de vibraciones para estas estructuras.

En el presente trabajo se exponen los estudios, análisis y ensayos conducentes al diseño de un disipador metálico para una conexión articulada de viga y columna, enfocando el estudio a estructuras prefabricadas de grandes luces, tanto metálicas como de hormigón, donde se mantiene la concepción del diseño tradicional de uniones secas articuladas de viga con columna, adicionando un sistema de disipación pasiva de energía mediante dispositivos metálicos.

1.1 Filosofía del diseño sísmico

El diseño convencional de estructuras resistentes a acciones sísmicas se basa 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 y uniones que constituyen la estructura, logrando que durante un sismo severo la estructura mantenga una forma estable con capacidad para soportar las carga gravitatorias, evitando el colapso de la estructura.

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

Esta concepción de diseño previene el colapso de las estructuras y evita las pérdidas de vidas humanas, sin embargo, puede determinar que el costo de reparación de los daños resulte elevado, y que en algunos casos pueda ser necesario demoler completamente la estructura después de un sismo severo.

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.

1.2 Sistemas de control de vibraciones

La utilización de sistemas de aislamiento y disipación de energía en la reducción de vibraciones e impacto de equipos mecánicos data de las primeras décadas del siglo pasado (Den Hartog, 1947) y desde entonces son profusamente aplicados en la industria automotriz y aeronáutica, sin embargo, su aplicación en la ingeniería civil sismorresistente comienza en la década de 1970.

Los sistemas de protección o control de vibraciones para estructuras civiles han sido categorizados por Soong y Constantinou, 1994, en tres clasificaciones principales según el detalle de la Tabla 1.1.

Los aisladores sísmicos y disipadores de energía se incluyen en la categoría de sistemas de control pasivo, ya que son dispositivos de carácter reactivo que no necesitan una fuente de energía externa para su funcionamiento y su respuesta depende de las condiciones de trabajo del sistema estructural donde se encuentran instalados (Soong y Spencer, 2002; Soong y Dargush, 1997; Aiken, 1996), mientras que los sistemas de control activo poseen la habilidad de monitorear en tiempo real el estado de la estructura y analizar la sollicitación o señal de entrada al sistema, y en función de las variables relevadas modifican o adecuan las propiedades estructurales para controlar la respuesta del sistema (Spencer y Soong, 1999). En la actualidad, también se han desarrollado sistemas de control híbridos que combinan sistemas pasivos y activos, y sistemas de control semiactivos de dispositivos de carácter reactivo cuyas características mecánicas son controlables con bajos requerimientos energéticos externos.

Tabla 1.1. Clasificación de los sistemas de control de vibraciones

<i>Aisladores sísmicos</i>	<i>Disipadores de energía</i>	<i>Control Activo</i>
<ul style="list-style-type: none"> – Aisladores elastoméricos – Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo – Aisladores elastoméricos con dispositivos de disipación de energía – Péndulo de fricción – Apoyos de placas deslizantes con dispositivos de disipación de energía – Apoyos deslizantes lubricados con dispositivos de disipación de energía 	<ul style="list-style-type: none"> – Disipadores friccionales – Disipadores metálicos – Disipadores viscoelásticos – Disipadores viscosos – Amortiguadores de líquido sintonizado – Amortiguadores de masa sintonizados 	<ul style="list-style-type: none"> – Sistemas de arriostramientos diagonales – Sistemas de masas – Sistemas de masas y rigidez variable – Sistemas de pulsos – Sistemas aerodinámicos

Los aisladores sísmicos son instalados típicamente entre el nivel de fundación y la estructura del edificio, y modifican las características dinámicas de la superestructura, aumentando su período de vibración y alejándolo de la zona de frecuencias dominantes de los sismos esperados, disminuyendo la respuesta de la estructura en términos de aceleración, deformaciones y distorsiones de piso, concentrando la demanda de deformaciones sobre los aisladores que se diseñan para soportar deformaciones laterales importantes (del orden de 10 a 40 cm) dependiendo de la zona sísmica y características de la superestructura y sistema de aislamiento, y en forma simultánea transmitir las cargas verticales a la fundación.

Los aisladores sísmicos son eficientes en superestructuras relativamente rígidas, en las que el sistema de aislamiento produce una variación significativa del período natural de vibración. En estructuras convencionales de 1 a 10 plantas con períodos en el rango de 0.05 a 1 segundo, el sistema de aislamiento puede elevar su período natural sobre los 2 segundos con la consiguiente reducción de pseudo-aceleraciones del espectro de diseño. El uso de un sistema de aislamiento sísmico en estructuras rígidas puede reducir las solicitaciones y desplazamientos inducidos en el edificio por factores comprendidos entre 2 y 4 dependiendo de las características dinámicas del sistema suelo-fundación y las características mecánicas de los aisladores sísmicos.

En cambio, en estructuras que son intrínsecamente flexibles, con períodos naturales superiores a 1.5 segundos, la eficiencia del aislador no es significativa, por cuanto el desplazamiento del período al rango de 2 a 3 segundos no produce en general una reducción significativa en el espectro de pseudo-aceleraciones, y además períodos naturales mayores a 4 segundos pueden traer aparejados deformaciones laterales excesivas en el sistema de aislamiento, por lo que su aplicación en estos casos no resulta recomendable en términos generales.

En estructuras flexibles, resulta conveniente reducir las vibraciones mediante la incorporación de disipadores de energía. Se han desarrollado una variedad de dispositivos que disipan energía por deformaciones cíclicas, y que se incorporan a la estructura resistente principal con el objeto de alcanzar altos valores de amortiguamiento equivalente, logrando el control de la demanda de desplazamientos. En la Tabla 1.2 se indican los factores de reducción de desplazamiento en función del amortiguamiento equivalente según Aiken, 1996. Asumiendo que las deformaciones y solicitaciones en los elementos estructurales se relacionan linealmente en el rango elástico, se pueden reducir las solicitaciones de la estructura en valores superiores al 40 % adicionando niveles de amortiguamiento del 20 al 30 %.

Tabla 1.2. Factor de reducción de desplazamiento en función de la relación de amortiguamiento crítico

Relación de amortiguamiento crítico	Factor de reducción de desplazamiento
5 %	1.0
10 %	1.2
15 %	1.4
20 %	1.6
30 %	1.9

Existen varios tipos de disipadores de energía. Los más utilizados y estudiados en la literatura son los disipadores metálicos en distintas configuraciones que utilizan la fluencia de metales dúctiles, los disipadores friccionales cuyo funcionamiento se basa en la fricción seca o de Coulomb entre superficies con presiones de contacto, los disipadores viscosos que disipan energía mediante el movimiento de fluidos viscosos, y los disipadores viscoelásticos constituidos típicamente por placas de polímeros acrílicos que trabajan por deformaciones de corte.

La función principal de los aparatos de disipación es la reducción de la demanda de deformaciones de la estructura principal mediante la disipación de energía, en rangos de desplazamiento inferiores a los que activan la fluencia en el sistema estructural principal, logrando los beneficios en la respuesta dinámica estructural debido al aumento del amortiguamiento, evitando o reduciendo significativamente los daños de la estructura principal y sus componentes. A continuación se realiza una síntesis de los disipadores de energía más estudiados en la literatura desde 1970 hasta el presente.

1.2.1 Disipadores metálicos

Los disipadores metálicos 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. 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) que se muestran en las Figuras 1.1 a 1.3.

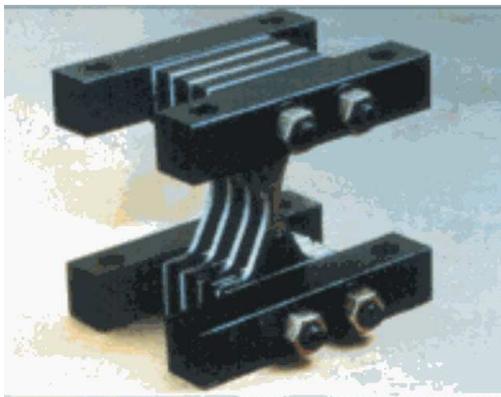


Figura 1.1. Sistema ADAS



Figura 1.2. Sistema TADAS



Figura 1.3. Sistema Honeycomb

El sistema ADAS consiste de un conjunto de placas de acero o metal dúctil con sección en forma de X, empotradas en una base superior e inferior, que sometida a un desplazamiento relativo entre dichas bases produce una plastificación uniforme de las placas metálicas disipando energía en forma estable y controlada.

El sistema TADAS es un conjunto de placas trapezoidales, con su lado mayor empotrado en una base rígida y el extremo opuesto articulado. Al producirse un desplazamiento relativo entre ambos extremos de la placa se produce la plastificación global del dispositivo por flexión con curvatura simple.

El sistema “Honeycomb” utiliza también un conjunto de placas de acero dúctil mecanizadas con forma de H, cuya geometría tiene por objeto lograr una plastificación uniforme en toda la sección de acero, con un comportamiento histerético muy estable y de forma casi rectangular, con una respuesta próxima a la rígido-plástica ideal.

Otros dispositivos metálicos utilizan el plomo con respuesta elastoplástica y aleaciones de níquel-titanio con memoria de forma que presentan la ventaja de amplios lazos de histéresis con forma de “S” muy estables, que los transforman en dispositivos simples y confiables (Dong, *et al.*, 2006; Aiken *et al.*, 1993).

Otro sistema de control pasivo que utiliza el principio de la fluencia del metal son las diagonales resistentes a tracción/compresión con capacidad de disipar energía por deformación plástica de la barra de acero que compone la diagonal.

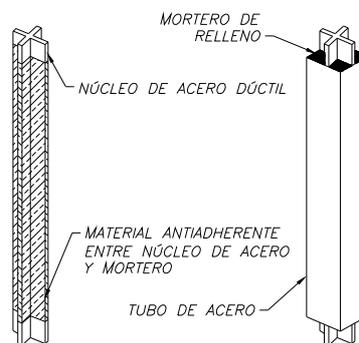


Figura 1.4. Mecanismo esquemático de diagonales resistentes a tracción y compresión

El sistema de diagonales no adherentes denominado “unbonded brace” (Watanabe *et al.*, 1988; Clark *et al.*, 1999) se basa en una barra, perfil o tubo de acero dúctil embebido en un tubo de mayor sección relleno de mortero que impide el pandeo del elemento metálico en compresión. La barra interior de acero se encuentra recubierta de un material antiadherente, de manera de evitar la adherencia con el mortero de relleno. De esta manera, la barra interior incursiona en el campo plástico tanto en tracción como en compresión, disipando una importante cantidad de energía. En la Figura 1.4 se muestra esquemáticamente el sistema de diagonales no adherentes.

Actualmente se están investigando nuevos amortiguadores pasivos que utilizan materiales celulares de peso liviano, baja rigidez, y con capacidad de soportar elevadas deformaciones de compresión y altas tensiones de fluencia, lo que le permite disipar una gran cantidad de energía (Tsopelas, P. y Nerbun, D., 2004).

En Chile, se han desarrollado y evaluado experimentalmente numerosos tipos de amortiguadores metálicos contruidos con placas de cobre dúctil, de bajo límite de fluencia y alta resistencia a la corrosión, mostrando que estos dispositivos son muy efectivos para absorber energía y reducir las deformaciones y distorsiones de piso de la estructura principal, con costos de fabricación e instalación razonablemente económicos (De la Llera, *et al.*, 2004).

En nuestro país, se han realizando importantes estudios sobre el comportamiento y aplicación en estructuras sismorresistentes de dispositivos de disipación de energía basados en la fluencia de metales. Zabala *et al.*, 2003, realizaron una serie de ensayos de un disipador de fluencia de metales tipo ADAS, llegando a la conclusión que es factible construir y ensayar los disipadores metálicos y aplicarlos tanto en el proyecto de nuevas estructuras como en la rehabilitación de estructuras existentes.

También Palazzo y Crisafulli (2004) han publicado un interesante trabajo sobre la respuesta comparativa de tres dispositivos de control pasivo de vibraciones: ADAS y TADAS, ambos basados en fluencia de placas metálicas, y “Unbonded brace” basado en la fluencia de una barra metálica, presentándose la discusión sobre la selección de estrategias de diseño de estructuras que incorporan estos dispositivos, y llegando a la conclusión que los tres dispositivos son eficientes para disipar energía, y desde el punto de vista constructivo sería más simple de materializar e instalar el sistema de “unbonded brace”, que también presenta la ventaja de menor cantidad de material frente a un dispositivo TADAS de similar respuesta histerética.

1.2.2 Disipadores friccionales

La fricción es un mecanismo confiable de disipación de energía y se han desarrollado numerosos dispositivos que utilizan este principio físico. Entre los dispositivos existentes se puede mencionar el dispositivo Pall estudiado por Pall y Marsh, 1982 y Aiken *et al.*, 1993. Otros dispositivos utilizados son el amortiguador friccional de Sumitomo, el dispositivo EDR (Energy Dissipating Restraint), ambos evaluados por Aiken *et al.*, 1993, y las conexiones o juntas deslizantes con tornillos y perforaciones ovaladas, que pueden ser juntas con deslizamientos lineales (Sliding Bolted Joints, SBJ) utilizadas en arriostramientos y diagonales de pórticos (Popov *et al.*, 1995; Butterworth y Clifton, 2000), y conexiones abulonadas rotacionales (Rotacional Slotted Bolted Connetion, RSBC) para nudos de viga y columna de pórticos metálicos (Yang y Popov, 1995; Butterworth, 2000).

En la Figura 1.5a se muestra el principio de funcionamiento de la unión abulonada deslizante y en la Figura 1.5b su aplicación en un nudo de unión entre viga y diagonales resistentes a tracción/compresión, y en la Figura 1.6 se presenta una conexión abulonada rotacional en un nudo de viga y columna de una estructura metálica.

1.2.3 Disipadores viscoelásticos y viscosos

Los materiales viscoelásticos han sido utilizados desde hace más de 30 años en ingeniería estructural para el control de vibraciones inducidas por el viento. Mahmoodi, 1969, describió las características de un amortiguador de corte viscoelástico. Disipadores de polímeros viscoelásticos fueron desarrollados por la Empresa 3M y fueron utilizados en numerosas aplicaciones para controlar la respuesta dinámica en estructuras sometidas a la acción del viento (Mahmoodi *et al.*, 1987; Mahmoodi y Kell, 1989). En la década de 1980 se realizaron los primeros experimentos y estudios analíticos que demostraron que los disipadores viscoelásticos pueden ser utilizados en forma efectiva para la reducción de vibraciones inducidas por el sismo (Lin *et al.*, 1988; Aiken y Kelly, 1990).

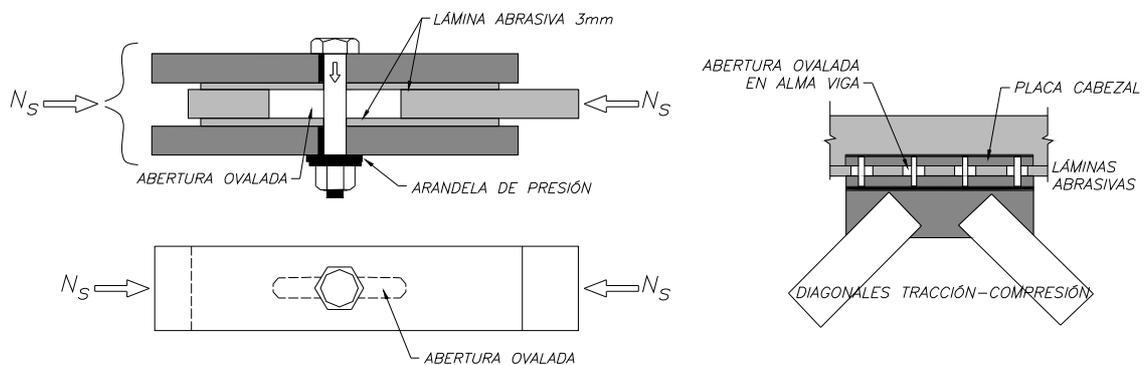


Figura 1.5a. Detalle de junta deslizante básica

Figura 1.5b. Junta deslizante en conjunción con diagonales tracción/compresión

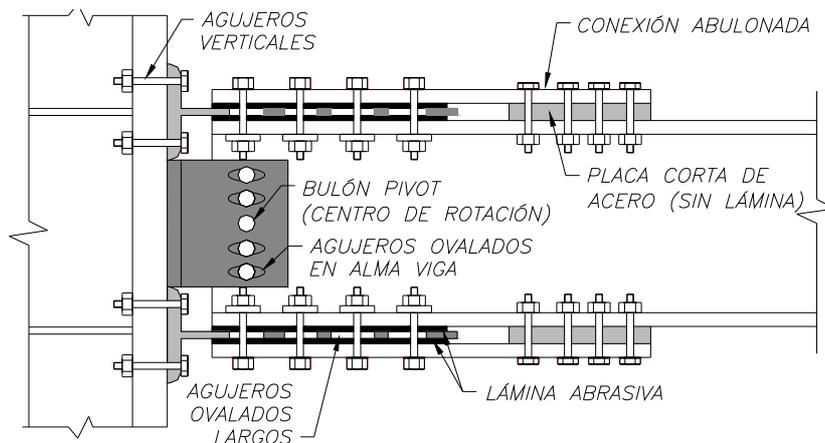


Figura 1.6. Conexión abulonada rotacional

A la par de los estudios experimentales y analíticos del propio disipador, durante los últimos 20 años se han desarrollado varios trabajos de investigación sobre técnicas y métodos de diseño y herramientas de análisis de estructuras con disipadores de energía, entre los que se pueden citar a Lavan y Levi, 2006; Ribakov y Reihorn, 2003; Uliarte, 1998 e Inaudi *et al.*, 1993. También se han propuesto modelos de análisis para estructuras con disipadores viscoelásticos teniendo en cuenta que el comportamiento de los materiales viscoelásticos bajo cargas dinámicas depende de la frecuencia de la excitación, el nivel de deformación y la temperatura (Lee *et al.*, 2005; Inaudi y Kelly, 1995; Inaudi *et al.*, 1994).

Los amortiguadores viscosos poseen un comportamiento viscoso lineal o no lineal, y son relativamente insensibles a cambios de temperatura, y pueden tener un diseño compacto en tamaño en relación con su capacidad de fuerza restitutiva. Uno de los dispositivos más utilizados consiste en un pistón móvil dentro de un cilindro relleno de fluido viscoso siliconado, que disipa energía mediante el movimiento del fluido viscoso a través de orificios y conductos, obteniéndose una respuesta proporcional a la velocidad de deformación para un amplio rango de frecuencias (Figura 1.7b). Varios experimentos y estudios analíticos en edificios y puentes que incorporan disipadores viscosos fueron realizados por Constantinou *et al.*, 1993, y Reinhorn y Li, 1995. Otros sistemas ingeniosos utilizan el movimiento de un muro dentro de un medio viscoso (Arima, *et al.*, 1988).

En las Figuras 1.7a y 1.7b se presenta un prototipo de disipador viscoelástico y un amortiguador viscoso respectivamente.

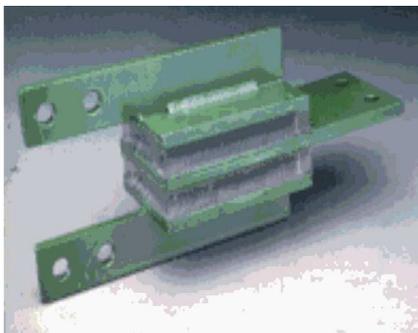


Figura 1.7a. Prototipo de disipador viscoelástico

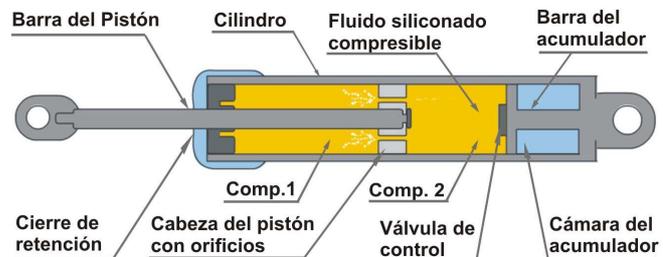


Figura 1.7b. Esquema de un amortiguador viscoso

1.2.4 Amortiguadores de masa sintonizada

El amortiguador de masa sintonizada o TMD (Tuned mass damper) fue desarrollado a principios de siglo a partir de una observación de Frahm (Den Hartog, 1947). El dispositivo consiste en un sistema inercial acoplado a la estructura primaria, cuyas frecuencias deben ser sintonizadas en valores muy cercanos o iguales a las frecuencias propias de la estructura principal, reduciendo las vibraciones inducidas por el viento o sismo. Generalmente se instalan en la parte superior de los edificios, y la masa y rigidez del sistema se calibran para que la frecuencia de oscilación del TMD sea cercana a la frecuencia fundamental de la estructura.

El sistema descrito anteriormente resulta poco efectivo para el control de los modos superiores de la estructura, por lo que se ha desarrollado el concepto de múltiples amortiguadores de masa (Multiple distributed tuned mass damper, MDTMD) que se basa en la distribución y regulación de los TMD en función de las diferentes frecuencias de la estructura (Clark, 1988).

Otra extensión al concepto de TMD es el denominado amortiguador de líquido sintonizado (Tuned Liquid Damper, TLD) que se basa en el uso del oleaje y el movimiento de un líquido dentro de un estanque para reducir las vibraciones inducidas por cargas externas.

1.2.5 Rehabilitación de estructuras

Un gran campo de difusión y aplicación de los disipadores de energía se encuentra en las tareas de rehabilitación de estructuras existentes con el objeto de suministrarles la resistencia y capacidad adecuada para resistir el sismo de diseño. En general, se refuerzan los pórticos de hormigón armado no dúctil o de acero con diagonales metálicas conectadas en serie con amortiguadores histeréticos o viscosos, aumentando la rigidez lateral de la estructura y su capacidad de disipar energía, logrando el control de las deformaciones y distorsiones de piso. En este campo de investigación se pueden mencionar los trabajos recientes de Benavent-Climent (2006), Molina *et al.* (2004), Curadelli y Riera (2004) y Bartera y Giacchetti (2004).

1.3 Estructuras prefabricadas de hormigón sismorresistentes

Las estructuras prefabricadas de hormigón de grandes luces para naves industriales o depósitos, presentan configuraciones estructurales típicamente formadas por columnas esbeltas en ménsulas y vigas principales de luces importantes, simplemente apoyadas, que funcionan como puntales distribuyendo las cargas horizontales en forma proporcional a la rigidez de las columnas. Estos sistemas son efectivos para carga laterales relativamente bajas como por ejemplo las cargas de viento o sismos de baja intensidad.

El diseño típico de las conexiones de estas estructuras prefabricadas de hormigón utiliza el concepto de unión seca articulada de viga y columna, sin capacidad de transmisión de momentos flectores en los nudos. La utilización de conexiones simples ejecutadas en seco es un incentivo en la construcción prefabricada en la que los tiempos y simplicidad de montaje resultan las características distintivas y competitivas de este tipo de solución, frente a la estructura de hormigón armado convencional.

La aplicación de este tipo de soluciones en zonas de alta sismicidad no es recomendable en general, pero la complementación de este sistema estructural con sistemas de disipación de energía suplementarios para controlar los niveles de deformación de la estructura resultan una alternativa viable. Sin embargo, la utilización de elementos disipadores con conectores diagonales convencionales resulta de un alto costo por las grandes luces de estos tipos estructurales, además de los inconvenientes funcionales que un diseño con diagonales instaladas en los vanos libres de los pórticos puede suponer en la construcción de espacios abiertos en naves industriales.

Por tal motivo, el diseño convencional de estructuras prefabricadas de hormigón sismorresistente con capacidad de resistir grandes cargas laterales recurre como solución estándar a la materialización de pórticos con nudos resistentes a momento (precast moment-resistant frames), del que existen numerosos sistemas de conexión que se describen a continuación.

1.4 Sistemas de conexión para estructuras prefabricadas

Las conexiones resistentes a momento disipan la energía del sismo mediante deformaciones inelásticas concentradas en el nudo, logrando que la estructura se mantenga en pie, sin colapsar, durante un sismo severo.

Un tipo convencional de conexión resistente a momento son las uniones húmedas en obra. En la fabricación de las piezas se dejan pelos o armaduras en espera en los elementos premoldeados y luego del montaje se completa el nudo en obra con armaduras y hormigón de segunda etapa. En la Figura 1.9 se presenta una conexión típica de viga y columna mediante nudo húmedo hormigonado en segunda etapa.

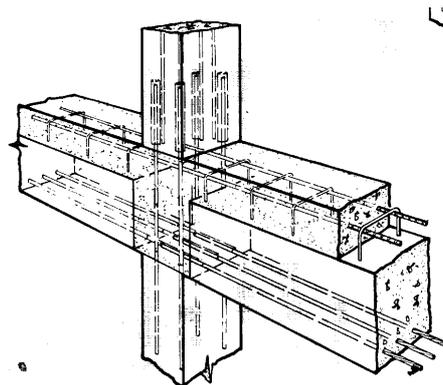


Figura 1.9. Conexión viga-columna con nudo húmedo hormigonado en 2da Etapa

En los últimos años, se están investigando y desarrollando conexiones dúctiles especiales para estructuras premoldeadas de hormigón con capacidad de recentrar la estructura luego del sismo, presentando deformaciones residuales muy pequeñas con la consiguiente reducción de daños en la estructura y elementos no estructurales (Pampanin *et al.*, 2001; Nakaki *et al.*, 1999; Priestley *et al.*, 1999; El-Sheikh *et al.*, 1999).

Las conexiones dúctiles disipan energía mediante la incursión en el campo plástico de las armaduras de acero, y pueden clasificarse en:

- Conexiones dúctiles a tracción y compresión TCY (*Tension compression yielding*)
- Conexiones de vigas híbridas HB (*Hybrid Beam system*).

En la Figura 1.10 extraída de Nakaki *et al.*, 1999, se presentan los prototipos de conexiones dúctiles para estructuras prefabricadas de múltiples pisos ensayados mediante el programa PRESSS (*Precast Seismic Structural Systems*) en la Universidad de California.

1.4.1 Conexiones dúctiles

La conexión de pórtico dúctil a tracción y compresión TCY procura emular el comportamiento del nudo viga-columna de un pórtico de hormigón armado tradicional. Sin embargo, en lugar de distribuir la plastificación sobre una longitud finita de rótula plástica, la conexión TCY concentra la plastificación en una pequeña zona próxima a la interfase de la viga con la columna.

Para asegurar que la armadura de refuerzo de la viga provea la resistencia de momento y la disipación de energía sin falla prematura, se evita la adherencia de la armadura mediante un envainado sobre una pequeña longitud adyacente a la columna.

Las conexiones dúctiles ensayadas en el programa PRESSS son de dos tipos:

- i) TYC *gap* (Figura 1.10c) en la cual se deja ex profeso una junta abierta de 25 mm entre el extremo de la viga y la cara de la columna que sólo se rellena con mortero en su parte inferior, y en la parte superior de la viga se deja la junta libre, rellenando con lechada de cemento las vainas que alojan la armadura pasiva, dejando una pequeña longitud de barra sin adherencia adyacente a la junta abierta, con capacidad de plastificarse tanto en tracción como en compresión.
- ii) TYC (Figura 1.10d) que emula una conexión tradicional de pórtico hormigonado in situ, en el cual la totalidad de la junta en la interfase viga-columna se rellena in situ con un mortero de alta resistencia y baja retracción para asegurar el contacto viga-columna, y las armaduras pasivas de vinculación entre viga y columna se dejan sin adherencia en una corta longitud con el objeto de controlar la plastificación de las barras.

1.4.2 Conexiones híbridas

El sistema de conexión híbrida de pórticos HB consiste en cables de postensados anclados en los nudos extremos del pórtico, alojados en un conducto cuya traza recorre concéntricamente el eje longitudinal de las vigas simples de cada vano, atravesando las columnas de múltiples pisos por orificios especialmente diseñados para tal fin. Además, se dispone de armadura pasiva de acero dúctil ubicada en las caras superior e inferior de la sección.

El acero de pretensado sin adherencia provee una fuerza restitutiva ya que permanece en estado elástico durante un evento sísmico, y además genera una fuerza de sujeción entre las vigas y las columnas que permite la transferencia de la fuerza de corte por fricción en la interfase entre viga y columna.

El acero de refuerzo pasivo, provee la resistencia a momento y durante la ocurrencia de un evento sísmico las armaduras incursionan en el campo plástico generando una rótula con capacidad de disipar energía. Las barras de armadura pasiva son aisladas con una vaina para evitar la adherencia en una región adyacente a la columna con el objeto de reducir la demanda de deformación inelástica y concentrar la rotación plástica post-fluencia en la interfase viga-columna.

La cantidad de armadura de acero dúctil y acero de pretensado esta balanceada para lograr que el pórtico se recentre luego de la ocurrencia de un evento sísmico debido a la fuerza restitutiva elástica que provee el postensado. La junta en la interfase viga-columna se rellena in situ con un mortero de alta resistencia y baja retracción para asegurar el contacto viga-columna. En la Figura 1.10a se presenta una conexión híbrida típica para un nudo interior de viga-columna.

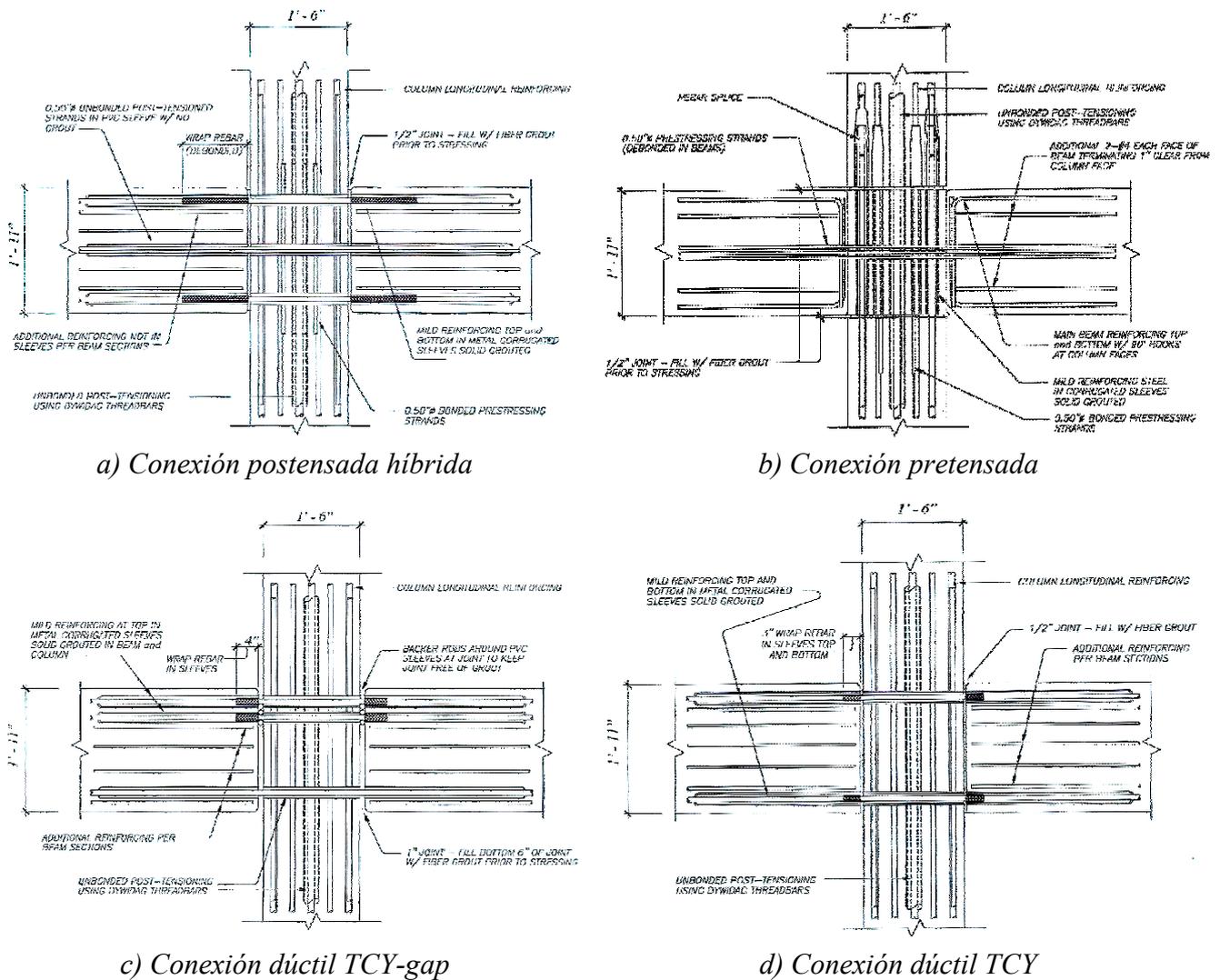


Figura 1.10. Conexiones dúctiles para estructuras prefabricadas [Nakaki et al., 1999]

La conexión pretensada (Figura 1.10b) se utiliza en pórticos formados por columnas individuales de un solo piso vinculadas con vigas de múltiples vanos que son hormigonadas y pretensadas en banco con determinadas longitudes parciales de sus cordones de pretensado sin adherencia. El sistema constructivo prevé el montaje de las vigas sobre las columnas de cada piso, enhebrando las armaduras en espera de la columna a través de pases especialmente diseñados en las vigas, que luego se empalman mediante anclajes mecánicos con la armadura del próximo tramo de columna asegurando la continuidad en el nudo. Cuando el pórtico se deforma lateralmente, los cordones sin adherencia permanecen elásticos, brindando una fuerza restitutiva que recentra la estructura. Este sistema disipa una menor cantidad de energía que los anteriormente descritos.

Otra tipología de conexiones para construcciones prefabricadas con configuración estructural de pórticos sismorresistentes son los nudos viga-columna resistentes a momento reforzados con barras externas de acero y uniones abulonadas o soldadas. En estas estructuras, la filosofía de diseño consiste en columnas fuertes y vigas débiles, con relaciones de resistencia de momento de columna a viga en el nudo de 1.3 a 2.2, manteniéndose en el campo elástico la conexión propiamente dicha y forzando la formación de zonas plásticas o rótulas en la viga. Este tipo de conexiones se ha ensayado experimentalmente en estructuras de pórticos constituidos por columnas de hormigón armado con vigas híbridas formadas por tubos de acero rellenos de hormigón reforzado con fibras (Parra-Montesinos *et al.*, 2005) y con vigas compuestas por perfiles laminados de acero con una losa de compresión de hormigón armado (Liang y Parra-Montesinos, 2004), arribando a la conclusión en ambos trabajos que los especímenes construidos y ensayados exhiben una alta capacidad de distorsión relativa de piso en el rango del 4 al 5 %, concentrándose las rotaciones inelásticas en la viga mientras la conexión se mantiene en el rango elástico.

También se han desarrollado modelos numéricos calibrados experimentalmente de uniones de viga-columna para estructuras prefabricadas compuestas de hormigón y acero resistentes a momento, realizándose un análisis paramétrico de la influencia de la losa compuesta con fuerte y débil resistencia en el comportamiento de la conexión (Salvatore *et al.*, 2005).

En el campo de las estructuras metálicas, se han desarrollado estudios analíticos y experimentales de conexiones resistentes a momento, en particular, a partir del terremoto de Northridge donde se produjo la falla de numerosas estructuras metálicas por defectos de diseño en sus uniones. Dentro de estos estudios se menciona el trabajo de Wilkinson *et al.* (2006) donde se propone una nueva conexión de nudo metálico resistente a momento, que presenta un diseño especial del extremo de viga que logra alejar la plastificación de la cara de la columna y la conexión forzando la rotulación en la propia viga.

1.5 Configuración e instalación de disipadores

La configuración clásica de disipadores instalados en estructuras aporricadas consiste en el uso de barras diagonales simples (Figura 1.11a) o en forma de A tipo “Chevron” (Figura 1.11b) que conectan pisos contiguos y se localizan en los vanos libres formando diversas tipologías, como por ejemplo en X o K (Figura 1.11c).

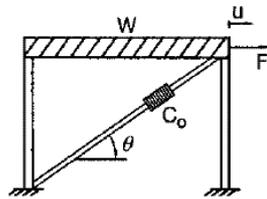


Figura 1.11a. Configuración diagonal simple

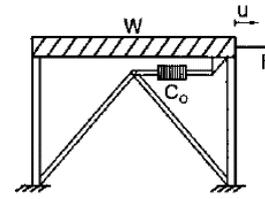
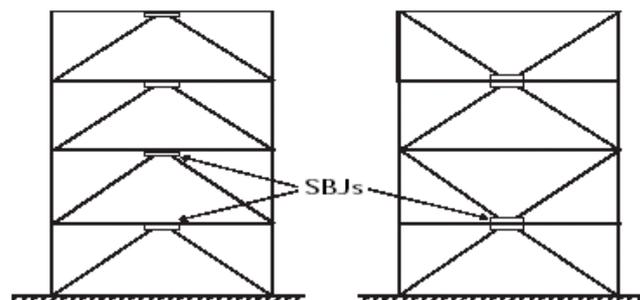


Figura 1.11b. Configuración en A o tipo "Chevron"



a) Diagonales tipo K b) Diagonales tipo X
Figura 1.11c. Configuraciones clásicas de diagonales

Estos elementos conectores permiten concentrar la deformación del piso en el disipador. Para lograr este comportamiento las diagonales deben tener una capacidad resistente y elevada rigidez de manera de garantizar la eficiencia del disipador ante distorsiones de piso relativamente pequeñas.

También, en los últimos años se han desarrollado y evaluado experimentalmente nuevas configuraciones de conectores para disipadores que utilizan barras múltiples diagonales que presentan la ventaja de amplificar sustancialmente el efecto del aparato amortiguador y pueden ser utilizados en estructuras de pórticos relativamente rígidos con pequeñas distorsiones de piso (Jenn-Shin *et al.*, 2005; Constantinou y Sigaher, 2001). En las Figuras 1.12 se presentan diversas configuraciones de barras múltiples diagonales.

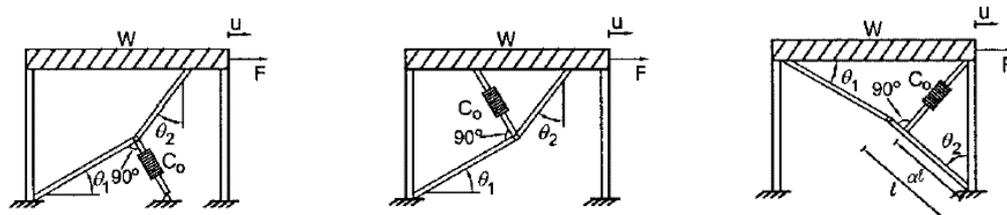


Figura 1.12. Nuevas configuraciones con barras múltiples diagonales

1.6 Disipador metálico de nudo

En estructuras de grandes luces (> 10 m entre columnas) y alturas de piso importantes (> 4 m) el desarrollo de elementos diagonales o arriostramientos con una alta rigidez axial implica la utilización de grandes secciones, lo que puede aumentar los costos significativamente, tornando inviable en términos económicos la aplicación de disipadores a estructuras de grandes luces. Al aumentar la longitud del elemento diagonal, se reduce la eficiencia del disipador por cuanto la mayor parte de la deformación relativa entre los extremos del arriostramiento se debe a la deformación elástica de la barra, disminuyendo significativamente la deformación del elemento disipador y su capacidad de disipar energía.

Además, la ubicación de diagonales en los vanos libres de la estructura, limita la libertad de diseño arquitectónico y en muchos casos la funcionalidad de la obra por requerimientos de espacios y corredores libres de obstáculos.

Frente a las mencionadas restricciones de diseño, surge la alternativa de utilizar un disipador o amortiguador de nudo en lugar de las configuraciones clásicas de diagonales en serie con disipadores.

Actualmente, en Japón se están desarrollando y evaluando experimentalmente la utilización en estructuras metálicas de conexiones con uniones mecánicas y disipadores histeréticos ubicados en el propio nudo. Una de las conexiones de viga y columna consiste en una diagonal metálica restringida frente al pandeo ubicada en la zona del nudo, que provee rigidez lateral al sistema y funciona como un disipador de energía. Ante la ocurrencia de un sismo, la energía impartida es disipada principalmente por el dispositivo amortiguador, mientras los miembros de la estructura principal se mantienen esencialmente elásticos (KIS, 2003).

Otra conexión de nudo para estructuras metálicas consiste en una unión resistente a momento con un disipador metálico tipo “U” conectado entre el ala inferior del perfil de la viga y el alma de la columna, que disipa energía por flexión y plastificación del segmento metálico tipo U (Koetaka *et al.*, 2005; Suita *et al.*, 2001).

Generalmente, las estructuras prefabricadas de hormigón de grandes luces, con conexiones secas articuladas, presentan grandes rotaciones relativas en el nudo de viga y columna en respuesta sísmica, por lo que surge la idea conceptual de utilizar un disipador metálico de nudo que deforme una placa localizada en el mismo nudo, con una adecuada restricción al pandeo fuera del plano. La posibilidad de inspección y facilidad de reemplazo, sugieren la ubicación del dispositivo en forma externa al nudo, es decir, no embebido en el hormigón.

Estas ideas dieron origen al diseño original planteado por el Dr. Ing. J. A. Inaudi (director de este tesista) en 2003 para la concepción de un disipador metálico externo para una conexión articulada de viga y columna premoldeadas de hormigón, cuyo planteo conceptual se muestra en la Figura 1.13 y cuyo estudio es motivo de esta tesis.

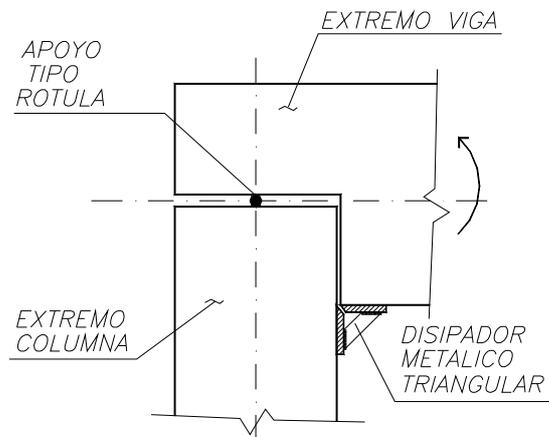


Figura 1.13. Planteo conceptual del disipador metálico de nudo

El disipador propuesto trabaja fundamentalmente desarrollando deformaciones específicas longitudinales de manera de lograr plasticidad en tracción cuando el nudo se abre, es decir cuando aumenta el ángulo entre la viga y la columna. Cuando el nudo se cierra, la placa sufre esfuerzos de compresión, por lo que en forma similar que el “unbonded brace” puede requerir una restricción al pandeo fuera del plano de manera de garantizar deformaciones axiales (membranales) y reducir al mínimo las deformaciones fuera del plano de la placa, que originarían una pérdida paulatina de resistencia ante deformaciones cíclicas, de manera análoga a un arriostamiento diagonal metálico sin restricción al pandeo.

1.7 Objetivo y alcance

El objetivo del trabajo consiste en el diseño y desarrollo tecnológico del disipador metálico para una conexión articulada de viga y columna propuesto por el Ing. José A. Inaudi, y la evaluación de la viabilidad técnica del dispositivo propuesto, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Posibilidad de desarrollar niveles significativos de disipación, de manera de lograr altos valores de amortiguamiento equivalente.
- Desarrollo analítico de un modelo simplificado de rótula ideal que represente el funcionamiento del disipador.
- Verificación numérica del comportamiento cíclico del disipador.
- Control del pandeo elastoplástico de la chapa del disipador.
- Validación a nivel conceptual del comportamiento del disipador mediante un ensayo experimental de un prototipo.
- Verificación del mecanismo de transmisión y resistencia de esfuerzos generados por el disipador en el nudo de hormigón armado.

El alcance del trabajo comprende el estudio analítico del comportamiento de la unión articulada viga-columna con disipador, la modelación numérica y estudio del comportamiento cíclico del disipador y los fenómenos de inestabilidad por pandeo elastoplástico de la chapa metálica, la formulación de una metodología de diseño con la aplicación práctica a una estructura prefabricada de hormigón ubicada en zona sísmica, y finalmente, la validación del funcionamiento del disipador mediante un ensayo experimental.

Este último punto consiste en la realización de una prueba de concepto de manera de determinar experimentalmente si es viable avanzar en una segunda etapa con el desarrollo tecnológico de este disipador para aplicaciones en estructuras prefabricadas, que en predicciones numéricas realizadas en este estudio mostraría un potencial promisorio.

1.8 Organización de la tesis

El trabajo de tesis está organizado en diez capítulos, de los cuales el primero corresponde a la presente introducción y el décimo a las referencias bibliográficas, además de un apéndice con los criterios de diseño de una conexión seca articulada.

En el capítulo segundo se desarrolla el marco conceptual y análisis del comportamiento de un sistema estructural simple formado por una columna en ménsula con un disipador metálico aplicado en el nudo superior articulado.

En el capítulo tercero se desarrolla la formulación general para el análisis de un nudo articulado de viga y columna conectado con un disipador metálico, y se presenta un modelo simplificado de rótula ideal elastoplástica perfecta que representa el comportamiento mecánico del disipador metálico.

En el cuarto capítulo se desarrolla el diseño conceptual del disipador metálico de nudo.

En el quinto capítulo se estudia la respuesta del disipador metálico frente a ciclos alternados de carga y descarga, utilizando modelos numéricos de elementos finitos con capacidad de análisis estático y dinámico en 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 estudiar fenómenos de inestabilidad o pandeo plástico de la chapa bajo cargas cíclicas reversibles y evaluar posibles alternativas de solución mediante la utilización de uno o más rigidizadores transversales.

En el capítulo seis se discuten aspectos generales del diseño estructural y se propone un método simplificado para el predimensionado de sistemas estructurales formados por columnas en ménsula y vigas principales de grandes luces, con conexiones secas articuladas y la incorporación de un sistema de disipadores metálicos en los nudos viga-columna con el objeto de controlar la respuesta de la estructura frente a sismo.

En el capítulo siete se presenta la aplicación a un caso de estructura prefabricada de hormigón de grandes luces correspondiente a una nave industrial, analizando la respuesta de la estructura y una comparación con una solución convencional de nudos húmedos.

En el octavo capítulo se presentan los resultados del ensayo experimental del prototipo de disipador bajo cargas cíclicas reversibles, y se analiza el grado de correlación con los modelos analíticos y numéricos desarrollados en el presente trabajo.

Finalmente, en el capítulo noveno se presentan las conclusiones del trabajo y las futuras líneas de investigación y desarrollo.