

DISIPADORES HISTERÉTICOS METÁLICOS COMO TÉCNICA DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES COLOMBIANAS

JUAN ANDRÉS OVIEDO*
MARÍA DEL PILAR DUQUE**

RESUMEN

En este artículo se presenta un análisis cualitativo de la posibilidad de implementar técnicas de control de respuesta sísmica en edificaciones en Colombia. Teniendo en cuenta las condiciones locales actuales de la ingeniería y de las prácticas de construcción en el país, se presentan las principales razones por las que se considera que la técnica de protección pasiva de estructuras sería la más apta para ser implementada en Colombia. Se plantean aspectos deseables para la fabricación y aplicación de disipadores de energía metálicos, y se presentan los disipadores tipo riostras metálicas con pandeo restringido como una opción viable para la protección y control del daño estructural en edificaciones en el país.

PALABRAS CLAVE: disipador de energía; riostra con pandeo restringido; control pasivo; amortiguador metálico.

METALLIC HYSTERETIC DAMPERS AS A SEISMIC RESPONSE CONTROL TECHNIQUE IN COLOMBIAN BUILDINGS

ABSTRACT

This paper presents a qualitative analysis of the possibility of implementing seismic response control techniques in buildings in Colombia. Given the current local conditions in engineering and construction in the country, herein are presented the main reasons why it is considered that the passive control of structures would be the most suitable technique to be implemented in Colombia. Desirable features on the fabrication and application of metallic energy dissipators are exposed, and metallic buckling-restrained braces (BRB) dissipators are presented as one viable option for the protection and control for structural damage of buildings in the country.

* Ingeniero Civil, EIA. Máster y candidato a Doctor en Ingeniería, Universidad de Hokkaido, Sapporo, Japón. Investigador del grupo Estructuras y Construcción de la EIA. Ingeniero Asociado f'c Control y Diseño de Estructuras Ltda. Medellín, Colombia. pfluov@eia.edu.co

** Ingeniera Civil. Máster en Ingeniería Civil, énfasis en Estructuras, Universidad de los Andes, Colombia. Profesora EIA. Investigadora del grupo de investigación Estructuras y Construcción de la EIA. Medellín, Colombia. pfmaduq@eia.edu.co

KEY WORDS: energy dissipator; buckling-restrained brace; passive control; steel damper.

DISIPADORES HISTERÉTICOS METÁLICOS COMO TÉCNICA DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EM EDIFICAÇÕES COLOMBIANAS

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise qualitativa da possibilidade de executar técnicas do controle da resposta sísmica em edificações em Colômbia. Dadas as práticas locais atuais da engenharia e das práticas de construção no país, são apresentadas as razões principais por que se considera que a técnica de proteção passiva de estruturas seria a mais apropriada a ser executada na Colômbia. As características desejáveis na fabricação e na aplicação de dissipadores metálicos da energia são expostas, e os dispositivos tipo BRB são apresentadas como uma opção viável para a proteção e o controle do dano estrutural em edifícios no país.

PALAVRAS-CÓDIGO: dissipador da energia; com pandeo restringido; controle passivo; amortecedor de aço.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente en Colombia el diseño sísmico ha estado fundamentado en la resistencia y ductilidad. Para movimientos sísmicos leves se espera que la estructura pueda manejar las solicitaciones de deformación y resistencia dentro de su intervalo elástico, sin contar con la ductilidad. Para sismos moderados y fuertes se espera que las fuerzas y deformaciones sean mayores y que vengan acompañadas de un daño estructural determinado que permita la disipación de la energía de vibración.

Las metodologías convencionales de diseño han sido aplicadas a la gran mayoría de las estructuras como medida de protección sismorresistente. El tipo de edificaciones proyectadas y los procedimientos tradicionales, a pesar de que han mostrado buenos resultados, también han dado muestra de bajo desempeño estructural en varios de los sismos de la historia del país [8].

Aspectos de nuestra infraestructura y economía como el uso generalizado de construcciones de

concreto reforzado, donde la capacidad de disipación de energía es limitada (generalmente acompañada de un nivel de daño considerable¹); ciudades con tendencia a la densificación y, por ende, al aumento de construcciones en altura, y un gran número de construcciones sin características sismorresistentes, que, ante un evento sísmico generarían grandes cantidades de desperdicio con el correspondiente impacto ambiental negativo, hacen ver la necesidad de la implementación del uso de técnicas de control de respuesta sísmica con las que, sin un alto costo, se aumente la protección de respuesta sísmica en edificaciones esenciales como hospitales y estaciones de policía, la rigidez por viento en edificaciones costeras y la durabilidad de las estructuras, y se disminuyan tanto los daños postsismo por medio del control de las deformaciones en la estructura como los costos por reparaciones y rehabilitaciones y se otorgue una protección adicional a la vida y al patrimonio de los usuarios e inversionistas de las edificaciones.

No se podría generalizar sobre una técnica de control de respuesta sísmica que fuera la más

¹ Armenia, enero de 1999; más de 1000 muertes y 25000 familias afectadas; además del daño estructural, las estructuras fundamentales como hospitales y estaciones de rescate colapsaron dejando fuera de servicio estas instituciones de atención a la comunidad [4].



apropiada para ser usada en una edificación en particular; por lo contrario, su selección está altamente relacionada con el propósito de la estructura, sistema estructural, condiciones de sitio y economía local.

En este artículo se presenta un análisis cualitativo de las ventajas de la implementación de disipadores histeréticos metálicos con pandeo restringido, como la alternativa de protección sísmica que más se acomodaría a las características locales actuales de Colombia. También se pretende dar un paso adelante en el camino hacia el comportamiento y diseño de estructuras más seguras para el país, de la mano de una ingeniería estructural más actualizada. Este artículo forma parte de los trabajos de investigación llevados a cabo por el Grupo de Investigación en Estructuras y Construcción de la EIA, con miras a desarrollar y adaptar las nuevas técnicas de control de respuesta en el país.

2. TÉCNICAS DE CONTROL DE RESPUESTA

Las técnicas de control de respuesta se han desarrollado con el propósito de reducir y controlar el daño estructural asociado principalmente a sismos. Estas técnicas complementan las técnicas tradicionales de diseño al introducir elementos estructurales adicionales que deben disipar la mayor parte de la energía de vibración introducida por los sismos. Estos elementos adicionales se colocan estratégicamente en la estructura principal para que se dé el mayor aprovechamiento de su capacidad de disipación de energía y para que se localice el daño estructural. De esta manera, después de un evento sísmico fuerte, estos elementos fácilmente se reemplazan sin poner en riesgo la estabilidad y la funcionalidad de la edificación.

Oviedo y Duque [10] hacen una descripción general de las técnicas de control de respuesta sísmica y muestran las formas de clasificarse, entre las cuales se mencionan las técnicas de control pasivo, las técnicas de control activo e híbrido y las técnicas de control semiactivo. Entre las técnicas de control

pasivo se cuenta con los disipadores de energía histeréticos, viscosos y de fricción, como también con las técnicas de efectos de masa adicional y aislamiento en la base. Las técnicas de control activo e híbrido cuentan con dispositivos que necesitan de algún sistema de energía externa para su accionamiento.

2.1 Comparación de las técnicas de control de respuesta sísmica

La selección de la técnica de control de respuesta sísmica para usar en una edificación dada está relacionada con factores como altura, uso de la edificación, sistema estructural, propósito de diseño (rehabilitación, proyecto nuevo), relación costo-beneficio, planeamiento arquitectónico, etc.

Aunque varias edificaciones en el mundo se han proyectado con técnicas de control activo, semiactivo o híbrido, su aplicación continúa siendo baja debido al alto costo y demanda de procedimientos de verificación. En general, las estructuras con estas técnicas de control requieren una mayor atención a: (i) los dispositivos de control, (ii) las fuentes de energía externa, (iii) las operaciones de mantenimiento y (iv) los métodos de análisis y diseño estructurales. Además, el seguimiento del estado del sistema y sus componentes debe ser continuo, ya que la contribución de los dispositivos a la respuesta de la edificación cambia dinámicamente, regulando los parámetros de control estructural.

En general, los aisladores de base se les instalan a estructuras rígidas con el objetivo de alargar su período de vibración, reduciendo así la demanda sísmica. Sin embargo, a pesar de que las edificaciones altas poseen un período de vibración largo, las aceleraciones que se presentan en los pisos superiores pueden llegar a ser perjudiciales para los elementos no estructurales, los equipos inmobiliarios, instalaciones especiales en los casos de hospitales, hoteles y oficinas, y para el confort de los usuarios, por lo tanto, el aislamiento basal también se ha utilizado en el diseño de edificaciones con períodos de vibración largos, de tal manera que el nivel aislado se encargue

de disminuir la energía de vibración que sube a la superestructura, reduciendo así, no solo desplazamientos, sino también aceleraciones de piso. Ejemplo de un caso reciente en Japón de edificaciones altas con aislamiento basal es la Torre de Osaka, un edificio residencial de 50 pisos, con una altura de 170 m.

El aislamiento sísmico basal, en la mayoría de los casos, implica un costo inicial mayor en comparación con el uso de otras técnicas debido a: (i) la fabricación, construcción e instalación de los dispositivos de control en la estructura principal, (ii) la necesidad de elementos no estructurales especiales que permitan el libre movimiento del piso aislado y (iii) su continuo seguimiento.

El control pasivo con disipadores histeréticos metálicos se utiliza en edificaciones de diferentes alturas y materiales. Esta técnica utiliza componentes adicionales más simples que, estratégicamente colocados en la estructura, intervienen en la respuesta de la edificación controlando el daño de ésta y concentrándolo en ellos. En general, el control pasivo ofrece grandes ventajas prácticas por: (i) requerir procedimientos más sencillos para la verificación del estado de los dispositivos, para su mantenimiento y reemplazo durante la vida útil de la estructura, (ii) utilizar menos componentes adicionales que intervienen en la respuesta de la edificación ante una excitación externa, y (iii) la sencillez en los procedimientos de análisis y diseño estructurales [17], aptos para la práctica profesional.

2.2 Ensayos a los dispositivos de control

La cantidad y tipos de ensayos que deben tomarse en cuenta para la evaluación del comportamiento de los dispositivos dependen directamente de la técnica para ser implementada. En forma general, se tendría que, si se desea utilizar aislamiento sísmico, se deben realizar ensayos experimentales de los aisladores, amortiguadores, conexiones flexibles entre la superestructura y el nivel aislado, y ensayos de cada uno de los componentes de los dispositivos.

Si se utilizan técnicas de control activo, aparte de los ensayos a todos los dispositivos, se deben incluir también las respectivas pruebas para las fuentes de energía externas necesarias para el correcto funcionamiento de los dispositivos de control; por lo tanto, se deben realizar ensayos a cada uno de sus componentes y a las operaciones de mantenimiento.

En el caso de técnicas de absorción de energía por medio de disipadores metálicos, los ensayos se enfocan en el comportamiento del metal y del dispositivo como tal. El acero, material componente comúnmente usado en los dispositivos metálicos, debe ser ensayado a compresión y tracción, si el modo de falla y el comportamiento histerético del dispositivo están asociados a esfuerzos axiales. Si el modo de falla es por cortante, flexión o torsión, se deben hacer los respectivos ensayos para obtener su comportamiento histerético. También se deben ensayar prototipos del dispositivo ya construido y ensamblado para validar su comportamiento histerético.

3. REGLAMENTACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL

Países como los Estados Unidos, el Japón, la China, Taiwán e Italia han hecho parte del continuo esfuerzo por estandarizar y reglamentar el uso y aplicación de las técnicas de control de respuesta sísmica y sus dispositivos. En [5] puede encontrarse una reseña de algunos códigos en el mundo.

Estos códigos buscan brindar una protección adicional a las estructuras y aumentar su durabilidad por medio de la concentración de deformación inelástica en dispositivos adicionales al sistema estructural principal. Esta concentración de deformación inelástica es responsable directa de un alto grado de disipación de la energía impuesta por el sismo o viento, protegiendo de este modo la estructura principal para que permanezca en el intervalo elástico o con incursiones inelásticas bajas que no signifiquen un gran daño estructural. Además de procedimientos



simplificados de análisis y diseño, se enfatiza sobre el uso de métodos de análisis no lineales tiempo-historia, que son más apropiados para conocer el comportamiento de las estructuras en el intervalo inelástico. Se regulan los ensayos de laboratorio a los cuales deben estar sometidos los dispositivos que se usan, sus características de comportamiento y, finalmente, el desempeño esperado de la edificación.

Hasta la fecha varios dispositivos de disipación de energía para edificaciones se han desarrollado y probado experimentalmente; sin embargo, no existe un dispositivo que se pueda utilizar de forma general con los más altos beneficios. Por esta razón, es importante que para las condiciones locales de cada país se estudien, prueben, reglamenten y utilicen dispositivos acordes con sus necesidades, para que la relación beneficio-costos de las estructuras y la protección adicional a las vidas y patrimonio de los habitantes sean los máximos.

4. DISIPADORES HISTERÉTICOS METÁLICOS

Tomando como referencia lo mencionado en el numeral 2 de este artículo, el control pasivo con disipadores histeréticos metálicos ofrecería mayores beneficios para la fabricación, instalación y mantenimiento de los dispositivos de control, así como también para el análisis y diseño de edificaciones proyectadas con estos dispositivos en Colombia. En la tabla 1, se muestra un cuadro comparativo de tres técnicas de control pasivo con base en algunos de los aspectos que los autores consideran más importantes para su posible implementación en edificaciones colombianas, teniendo en cuenta las prácticas actuales de diseño y construcción colombianas. Su clasificación y calificación se basan en la experiencia y conocimiento de los autores.

De acuerdo con la tabla 1, se puede concluir que los dispositivos pasivos de tipo histerético basados en deformación son los de mayor versatilidad y beneficio para las condiciones actuales del país.

Otro aspecto importante para el uso de las técnicas de control constituye la restauración de edificaciones que son patrimonio cultural de Colombia, que cuenta con una gran gama de monumentos históricos nacionales que deben ser conservados y que, si en algún momento deben ser intervenidos estructuralmente para fines de reforzamiento o rehabilitación, las soluciones estructurales deben estar en concordancia con la seguridad y conservación de la arquitectura original del proyecto y su funcionalidad. Los disipadores histeréticos metálicos ofrecen medidas de rehabilitación o reforzamiento estructural sin comprometer de manera significativa la arquitectura y brindando un mayor nivel de seguridad en comparación con las técnicas tradicionales. Sin embargo, el aislamiento basal resulta más efectivo en el caso de la restauración estructural de monumentos que no pueden sufrir los desplazamientos requeridos por los disipadores histeréticos. En este caso, es de suma importancia evitar algún daño en componentes estructurales y no estructurales que se pueda ocasionar durante la instalación de los aisladores en la base de la edificación.

4.1 Instalación

Los disipadores histeréticos metálicos son instalados usualmente en el plano de los pórticos del sistema estructural principal. Dependiendo de la forma como los disipadores se conectan a los pórticos, pueden clasificarse como de conexión directa, de conexión indirecta y sistemas especiales [5]. En la figura 1 se pueden ver algunos ejemplos de esta clasificación. En a) los disipadores conectan directamente los elementos estructurales de los pisos en que el dispositivo está instalado, controlando el desplazamiento relativo de entrepiso, en b) los disipadores conectan las vigas, controlando en cierta medida el desplazamiento relativo de entrepiso y en c) los disipadores se instalan en las vigas o en las columnas, desconectando los elementos estructurales para que los dispositivos trabajen y disipen energía.

Tabla 1. Aspectos deseables para el uso de dispositivos de control pasivo de respuesta sísmica dentro de las prácticas de diseño y construcción colombianas actuales

Aspectos deseables	Control pasivo		
	Aislamiento basal	Disipadores histeréticos	Masa adicional
Bajo costo de instalación y puesta en obra de los dispositivos de control		*	
Larga vida útil de los dispositivos	*	*	*
Bajo costo de mantenimiento de los dispositivos de control ¹	*	*	*
Bajo costo de reemplazo de los dispositivos de control		*	
Baja probabilidad de reemplazo postsismo de los dispositivos de control	*		*
Bajo costo de fabricación de los dispositivos de control ²		*	
Instalación simple en obra de los dispositivos de control		*	
Reducción del daño estructural por sismo	*	*	*
Simplicidad en el uso para la rehabilitación o reforzamiento de estructuras existentes		*	*
Simplicidad en la implementación en sistemas de pórticos	*	*	*
Simplicidad en la implementación en sistemas de muros de carga		*	*
No requiere mano de obra altamente calificada para la instalación de los dispositivos de control		*	
Alto control de daño en contenidos ³	*		*
Bajo impacto en las prácticas de construcción actuales		*	
Fácil consecución de materiales necesarios para la fabricación de los dispositivos en el país		*	
Baja interrupción del continuo funcionamiento de estructuras indispensables durante la instalación o reemplazo de los dispositivos de control	*	*	*

¹ Algunos dispositivos no necesariamente requieren mantenimiento.

² Para las técnicas de aislamiento basal y masa adicional se han desarrollado algunos dispositivos simples con un costo inferior a los comúnmente utilizados.

³ Note que las técnicas de aislamiento basal y masa adicional suelen ofrecer un mayor control de daño en contenidos que los disipadores histeréticos. Sin embargo, el nivel de protección ofrecido por los disipadores histeréticos es adecuado.

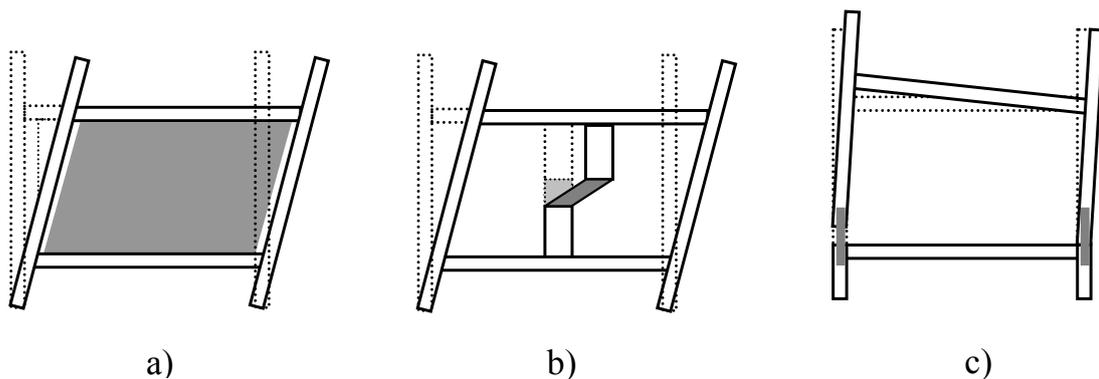


Figura 1. Esquemas de instalación de disipadores metálicos en pórticos. a) conexión directa; b) conexión indirecta; y c) conexión con sistemas especiales [3]



Los disipadores de conexión directa han sido los más utilizados, ya que otorgan mayor eficiencia y control de la respuesta estructural. La figura 2a) muestra un esquema de la aplicación típica de disipadores metálicos tipo riostra con pandeo restringido que conectan la unión viga-columna del piso inferior con la viga del piso superior. La conexión se hace por medio de placas soldadas o pernadas, las cuales deben permanecer rígidas y elásticas. La figura 2b) muestra el esquema de un arreglo de placas de flexión. Estas placas son conectadas con riostras elásticas al piso inferior y con una conexión especial a las vigas del piso superior. Información detallada sobre estos dispositivos puede encontrarse en [10], [15], [16], [18] y [19]. La figura 3 muestra la aplicación real de riostras con pandeo restringido en una edificación de acero.

4.2 Condiciones de consecución, fabricación e instalación de disipadores metálicos en Colombia

Existen diferentes tipos de dispositivos que obedecen a métodos propios y hacen variar los costos y precios. Las empresas que ofrecen estos dispositivos exigen para su cotización, en la mayoría de las veces, especificaciones de acuerdo con el diseño estructural.

En el mundo hay varias empresas dedicadas a la producción y promoción de dispositivos de respuesta sísmica. Una de las principales es Taylor Devices Inc., de los Estados Unidos. En su sitio web hay un resumen de las estructuras que han sido proyectadas o rehabilitadas con sus dispositivos y se hace referencia a más de 20 años en el mercado con más de 180 aplicaciones. En Japón, Nippon Steel Corporation y Sumitomo Corporation, entre otras compañías, están dedicadas a la fabricación de estos dispositivos. En su sitio web se pueden consultar sus productos, y de igual forma que para la compañía norteamericana, el precio de cada dispositivo debe buscarse de acuerdo con el diseño estructural. El hecho de que el costo de los dispositivos dependa del diseño estructural da cierta flexibilidad al analista y diseñador para definir la mejor opción: economía y alto desempeño estructural.

En Colombia, la cultura del acero ha estado creciendo desde sus primeros usos a principios de los años noventa. En la actualidad existen en el país empresas dedicadas a las estructuras metálicas, empresas que por la acción de campañas de difusión y capacitación, han fomentado e incrementado su uso. El diseño y la fabricación locales están a la vanguardia y se pueden comparar con empresas extranjeras en tecnología, métodos de diseño, fabricación y

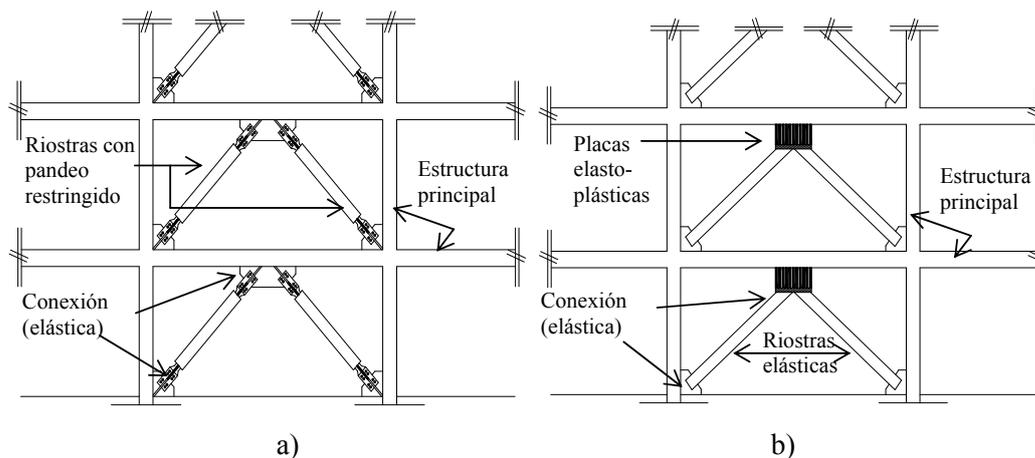


Figura 2. Esquemas de instalación de disipadores de conexión directa. a) riostras con pandeo restringido; b) placas a flexión



Figura 3. Edificio de acero con riostras de pandeo restringido. Foto cortesía del profesor Mamoru Iwata, Universidad de Kanagawa, Japón

montaje², por lo cual la fabricación de disipadores de acero sería una opción muy interesante y susceptible de ser desarrollada en Colombia, contando con la industria nacional existente.

El control de estructuras por medio de disipadores metálicos tiene como requisito esencial la estabilidad de los ciclos de histéresis de los dispositivos ante cargas dinámicas. Esta estabilidad es la que garantiza que las estructuras conserven su comportamiento de acuerdo con los parámetros e hipótesis de análisis y diseño. El acero ofrece una estabilidad de resistencia y ductilidad muy buena en comparación con otros materiales, convirtiéndolo en un material ideal para el control de la disipación de energía. En el caso de materiales compuestos como el concreto reforzado, la estabilidad del comportamiento histerético es altamente dependiente de la interacción de los dos materiales, acero y concreto.

Existen en el país algunas empresas comprometidas con la fabricación, laminación e importación de elementos de acero con fines estructurales, lo que nos indica que la materia prima para los dispositivos es asequible. Se cuenta con disponibilidad de elementos de acero tipo ASTM-36, que ofrece uno de los mejores comportamientos en cuanto a la estabilidad de sus propiedades mecánicas y principalmente su punto de fluencia, lo que es un aspecto muy importante dentro del proyecto de estructuras con dispositivos de tipo histerético por deformación. El acero tipo ASTM-36 se ha utilizado para la fabricación de disipadores metálicos en México [13]. El control de calidad del comportamiento histerético del acero para utilizar no sería un inconveniente, puesto que se cuenta con los laboratorios locales que estarían en capacidad de realizarlo sin elevar los costos.

Las riostras metálicas comunes se han usado ampliamente en el país para rehabilitación sísmica, y hoy en día se cuenta con un gran número de aplicaciones, lo que ha creado una vasta conciencia de su empleo. Sin embargo, las riostras como disipadores histeréticos no han sido aplicadas todavía en Colombia. Las riostras como disipadores de energía cumplen un papel importante en las edificaciones por controlar las derivas, proporcionar rigidez adicional al sistema y mejorar el desempeño estructural, otorgando protección adicional a la estructura, además de contribuir con el propósito de revivir el uso de sistemas apertados de concreto y acero. La mayor diferencia entre las riostras comúnmente usadas en la rehabilitación de estructuras en Colombia y las riostras como dispositivos de disipación de energía es la capacidad de soportar ciclos de carga reversibles de tracción y compresión sin perder rigidez ni resistencia, como lo son las riostras metálicas con pandeo restringido.

Considerando la amplia experiencia de Colombia en el uso de riostras metálicas en edificaciones de

² ExpoCamacol 2008, XVIII Feria Internacional de la Construcción, la Arquitectura y el Diseño. http://www.expocamacol.com/pag/expositores_2008.html



acero y de concreto, los tipos de instalación de los dispositivos mostrados en la figura 2 se acomodarían perfectamente a las prácticas de construcción. Vale la pena mencionar algunos aspectos positivos de la aplicación de riostras con pandeo restringido [17]: (i) modelamiento simple de su comportamiento para el análisis estructural, (ii) fácil manejo de su levantamiento y puesta en obra dentro del sistema estructural principal, (iii) comportamiento histerético estable sin fallar por pandeo, y (iv) flexibilidad en el diseño estructural para seleccionar su rigidez y resistencia.

Actualmente en el país, la planeación de proyectos con edificios altos es mayor y el sistema estructural que se ha venido utilizando en los últimos años con mayor auge es el de muros portantes. De acuerdo con el comportamiento de este sistema estructural, las edificaciones altas de muros estructurales presentan deformaciones excesivas debido a su flexibilidad y al comportamiento dominado generalmente por flexión, por eso se ha optado por la combinación con el sistema de pórticos o plantear la estructura con sistemas de pórticos solamente. Además, el costo de las cimentaciones para edificaciones altas de sistemas de muros portantes puede resultar elevado en muchos casos. Otro aspecto importante de recalcar es el proyecto de edificaciones altas en zonas costeras. Su proyecto y construcción, con fines en su mayoría hoteleros, ha venido creciendo en los últimos años. En zonas costeras, el diseño y protección contra fuerzas de viento es algunas veces mayor que la demanda por sismo. En ese caso, se le debe proporcionar a la estructura la rigidez suficiente para evitar pequeñas e incómodas vibraciones que afecten el confort de los usuarios de la estructura; los disipadores de energía histeréticos metálicos ayudan a cumplir con esa función.

4.3 Comportamiento de una edificación con disipadores de energía tipo riostra

Tradicionalmente el diseño estructural ha estado enfocado en la determinación de fuerzas

externas que deben ser resistidas por las edificaciones, dentro de unos límites aceptables de deformación. Si la respuesta estructural, en este caso la deformación (deriva), no está dentro de los límites establecidos por los criterios de diseño, la estructura se modifica, la respuesta estructural se estima nuevamente y los niveles de deformación se verifican. Si la respuesta estructural está dentro de los criterios de diseño, la estructura es apta para las fuerzas de diseño consideradas. Indirectamente, el nivel de daño estructural se controla con el nivel de deformación, y en esta relación se admite un desplazamiento tal que no ponga en peligro la vida de los habitantes ni la estabilidad de la edificación.

Oviedo, Midorikawa y Asari [11, 12] realizaron una serie de análisis comparativos entre una edificación de concreto reforzado de 10 pisos sin disipadores tipo riostra con pandeo restringido y con ellos, y demostraron reducciones significativas del daño estructural en la estructura principal (concreto reforzado) y mejora del desempeño estructural cuando las riostras son instaladas. Reportaron reducciones hasta del 60 % en desplazamientos y daño sísmico de piso, mostraron una distribución en altura casi uniforme de la reducción de desplazamiento y daño sísmico, lo que sugiere una protección controlada de la estructura principal. La reducción de los desplazamientos horizontales de piso se atribuye básicamente al aumento de rigidez del sistema dado por las riostras, además de la contribución a la disipación de la energía de vibración.

Esta reducción de desplazamientos sugiere que la estructura principal podría ser dimensionada para un límite de deriva un poco más alto de lo comúnmente usado y las riostras se encargarían de controlar los desplazamientos. Sin duda, dimensionar la estructura principal para un límite de deriva mayor conduce a reducciones del tamaño de los elementos estructurales de la estructura principal y a posibles economías en la etapa de diseño. Como ejemplo se ha reportado que en edificaciones de acero, el peso de los elementos estructurales del sistema principal puede ser reducido hasta en un 10 % cuando se instalan las riostras con pandeo restringido [3].

En edificaciones de concreto reforzado, la reducción en la demanda de ductilidad en los elementos de la estructura principal sugiere una reducción de los niveles de reforzamiento; aunque no se podría asegurar, ya que el reforzamiento es altamente dependiente de aspectos como niveles de carga vertical, especificaciones mínimas de los códigos y factores de seguridad. En [9] y [14] se hace mención a una reducción del 50 % del peso de la edificación cuando se instalan en ella las riostras con pandeo restringido. Adicionalmente, se reportan sistemas estructurales principales de concreto reforzado con detallado estándar, con bajo contenido de acero y, en general, estructuras muy ligeras en peso.

Si se pudiese dimensionar la estructura principal para atender un límite mayor de deriva y las riostras otorgasen la rigidez adicional necesaria para controlar las derivas dentro de los límites usuales en la práctica, se estaría contando con edificaciones arriostradas con el mismo período de vibración de las edificaciones sin riostras y esto no traería aumentos en las fuerzas equivalentes horizontales de diseño, de acuerdo con los requisitos de diseño de la NSR-98. Con fuerzas de diseño iguales a las de la edificación sin riostras, el cortante soportado por la estructura principal se disminuye de inmediato, ya que las riostras también resisten las fuerzas cortantes de piso. Cabe anotar que la mayoría de estas afirmaciones también son aplicables a otros tipos de disipadores histeréticos.

4.4 Aplicación de disipadores histeréticos metálicos a edificaciones en Colombia

El objetivo primordial de la instalación y uso de técnicas de control de respuesta sísmica es la disminución del daño mediante la reducción de la demanda de ductilidad local en la estructura principal. En estructuras de concreto reforzado, la capacidad de los elementos de ofrecer más o menos ductilidad está directamente relacionada con el detallado de refuerzo que tenga el elemento. En Colombia, la

norma sismorresistente vigente NSR-98 [1] clasifica las estructuras en tres grupos según su capacidad de disipación de energía: DMI (capacidad mínima), DMO (capacidad moderada) y DES (capacidad especial). Estos tres grupos tienen requisitos y especificaciones de detallado de refuerzo diferentes y de mayor exigencia para las DES. Estas especificaciones están enfocadas hacia el nivel de reforzamiento que se les debe proporcionar a los elementos de concreto reforzado para evitar la pérdida de resistencia y capacidad de deformación.

Con base en lo descrito y dentro del contexto del diseño estructural tradicional en Colombia, si los disipadores histeréticos tipo riostra con pandeo restringido fueran instalados en pórticos de concreto reforzado resistentes a momento, se podrían considerar dos situaciones: rehabilitación sísmica y proyectos nuevos.

En el caso de rehabilitación o reforzamiento de estructuras existentes, al instalar estas riostras se estaría mejorando el desempeño estructural por aumentar la rigidez, la resistencia y el control de deformaciones. En el momento de un movimiento sísmico, se estaría disminuyendo la demanda de ductilidad en los elementos estructurales principales, pues las riostras estarían disipando parte o la totalidad de la energía impuesta por el sismo. Además, se estaría localizando el daño estructural en las riostras, reduciendo los desperdicios e impacto ambiental y disminuyendo las reparaciones postsismo sin afectar el funcionamiento continuo de la edificación.

En el caso de proyectos nuevos, se podría pensar inicialmente en un tratamiento similar a los procedimientos de diseño norteamericanos. En Estados Unidos estas riostras son manejadas como riostras avanzadas en vez de dispositivos disipadores de energía, las cuales pueden soportar esfuerzos de compresión sin fallar por pandeo, otorgando mayor capacidad de deformación a la edificación, capacidad relacionada con el factor de reducción de cargas sísmicas, R , en el método de diseño por fuerzas.



El uso del tradicional factor R, ampliamente aceptado en el mundo, lleva al diseño de edificaciones con una resistencia lateral menor que la requerida por la estructura para permanecer elástica. Un alto valor de R requiere que la estructura tenga una mayor capacidad de deformación sin perder resistencia lateral. La FEMA 450 [2] en el capítulo 4 indica valores de R de 7 y 8, para edificios de pórticos con riostras con pandeo restringido (BRBF). Clark *et al.* [4] utilizaron factores de reducción de resistencia con valores de 9 y 10 para sistemas de marcos de acero que incorporan riostras con pandeo restringido.

Un aumento del factor R representa de inmediato una reducción de las fuerzas laterales de diseño por disminuir la demanda de aceleración (tomando las mismas condiciones locales). Para edificaciones de concreto, en principio se pensaría en tener especificaciones para el detallado del refuerzo más estrictas al aumentarse el valor de R, correspondiente a la provisión de una mayor capacidad de deformación. Sin embargo, debido a que se ha mostrado cierta reducción de la demanda de ductilidad en la estructura principal, quedaría por verificar si la demanda de ductilidad está dentro de las especificaciones de reforzamiento usadas en la práctica ante el empleo de un menor R. En este sentido, se podría pensar en alguna reducción de los niveles de reforzamiento. Además, se podrían tener también reducciones del tamaño de los elementos de la estructura principal, por cuanto las riostras estarían aportando rigidez y resistencia laterales.

Comparando con una edificación tradicional sin riostras con pandeo restringido, como se mencionó en la sección 4.3, es posible obtener una economía en la inversión inicial para la estructura principal, debido a que se reduce el tamaño de sus elementos estructurales. Si se toma esta reducción de la inversión inicial para la estructural principal y se supone que el ahorro de dinero se invierte en la implementación de los disipadores pasivos, se tendrían entonces estructuras con el mismo costo, pero con una protección adicional a los elementos estructurales principales. Esta protección traería

una economía adicional en el caso de un sismo fuerte, donde los daños ocasionados a los elementos estructurales del sistema principal serían menores, quedando su reparación a un menor costo y mayor rapidez. Quizás una gran bondad que se deba recalcar en el uso de estos disipadores es que, en el caso de ser utilizados en estructuras indispensables (según NSR-98) como estaciones de bomberos, estaciones de policía u hospitales, el funcionamiento de las estructuras no se ve comprometido y de esta manera se puede brindar asistencia continua e inmediata a la comunidad después de un desastre por terremoto. En Estados Unidos ha sido reportado que en la evaluación de alternativas para proyectos se prefiere el uso de riostras con pandeo restringido, sobresaliendo por sus beneficios ante los sistemas tradicionales [5].

El uso de un valor mayor de R debido a la aplicación de riostras con pandeo restringido podría traer otra modificación en el costo inicial del proyecto. La evaluación del costo inicial de cualquier proyecto incluye también la cantidad de obra de las cimentaciones. En forma general, se podría pensar que ante fuerzas laterales de diseño menores, las fuerzas transmitidas a la cimentación (cortante basal y momento de volteo) se reducen y las cantidades de obra podrían ser menores, aunque esto depende de los requisitos mínimos contemplados por la norma.

En Japón las riostras con pandeo restringido se consideran como dispositivos disipadores de energía y el enfoque de análisis y diseño estructurales difiere del tradicional uso del factor R. Allí las edificaciones que tienen disipadores de energía se evalúan con procedimientos de análisis más detallados en los cuales se investiga la respuesta no lineal tiempo-historia de la estructura y de los dispositivos. De esta forma, la disipación de energía y la protección a la estructura principal pueden ser evaluadas claramente.

Es importante anotar que el desempeño estructural de las edificaciones con disipadores de energía histeréticos depende en gran medida del tipo de sistema estructural principal, arquitectura, efectos locales de sitio, tipo de dispositivo para

utilizar, cantidad de dispositivos y su localización en la estructura; por lo tanto, generalizar sobre el orden de magnitud de posibles economías y reducción de daños no es tarea fácil. Sin embargo, es un tema de mucho interés actual cuando muchas investigaciones se ejecutan y la protección de la estructura principal está demostrada ampliamente [9, 11, 12, 14]. De igual forma, no es una tarea sencilla generalizar sobre una tendencia de economía o sobre costo con relación al factor de reducción R.

5. RECOMENDACIONES

Se necesita que se lleven a cabo proyectos de investigación donde se consideren las prácticas de diseño estructural y construcción colombianas y se compare el costo de materiales estructurales y el desempeño sísmico de edificaciones diseñadas sin disipadores y con disipadores de energía tipo riostras con pandeo restringido. Además, se necesita investigar sobre procedimientos de diseño estructural para edificaciones con estos dispositivos, susceptibles de ser implementados dentro del marco de diseño tradicional contemplado en la norma colombiana sismorresistente o como procedimientos innovadores de diseño (métodos basados en desplazamiento o en balance de energía) que permitan el uso eficiente de los dispositivos, que alarguen la vida útil de las edificaciones y otorguen mayores niveles de confiabilidad e integridad estructural.

En el caso de edificaciones de concreto reforzado, se necesitan estudios sobre el comportamiento y diseño de las conexiones entre la estructura principal y los componentes necesarios para instalar los disipadores de energía. Esto debido a que el comportamiento de los dispositivos está altamente condicionado por el daño en los elementos estructurales del sistema principal donde los disipadores están instalados [6, 7]. Por lo tanto, es indispensable que los desplazamientos del sistema principal sean estrictamente controlados. Se necesitan estudios sobre el control de daño en elementos no estructurales y en el contenido de las edificaciones, estableciendo

límites de deriva consistentes con el propósito de uso de las técnicas de control de respuesta sísmica.

También se plantea la necesidad de seguir investigando sobre nuevas alternativas de restricción al pandeo, con el fin de aligerar las riostras y facilitar su manipulación e instalación.

6. CONCLUSIONES

En el presente artículo se presentaron algunas de las razones por las que se considera que el uso de disipadores de energía metálicos por deformación es la opción de control de respuesta sísmica que más se acomoda a las características locales actuales de Colombia. Entre los dispositivos metálicos de disipación por deformación, el disipador tipo riostra con pandeo restringido sería el más apto, teniendo en cuenta la experiencia con la que cuentan las empresas constructoras y de diseño estructural en el país.

Independiente del tipo de técnica de control y del dispositivo para ser usado, se necesita que se lleven a cabo estudios sobre los principios de diseño estructural, el costo de implementación de estas técnicas, la verificación del desempeño estructural de los dispositivos y el comportamiento de las edificaciones, teniendo en cuenta las condiciones locales colombianas.

Finalmente, cabe preguntarse por qué no utilizar dispositivos de control sísmico (p. ej. disipadores histeréticos metálicos), así representen un sobre costo inicial, considerando que la protección que se les está otorgando a las edificaciones es mayor y que este sobre costo puede ser compensado con la reducción del daño y reparaciones postsismo en comparación con la inversión necesaria para reparar estructuras convencionales. La respuesta a esta pregunta depende mucho de la idiosincrasia de los proyectistas y constructores en el país. Se debe, entonces, crear una conciencia más enfocada a la seguridad e integridad estructural que a una economía que oculta verdaderos objetivos: salvaguardar las vidas de los ocupantes, estructuras durables para la atención a



la comunidad tras un sismo y reducción de pérdidas materiales.

REFERENCIAS

- [1] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. *Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sísmorresistente, NSR-98*. Bogotá, 2008.
- [2] Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency (FEMA). *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA450)*, 2003.
- [3] Calado, Luís; Proença, Jorge Miguel; Panão, Andreia; Nsieri, Emad; Rutenberg, Avigdor and Levy, Robert. Buckling-restrained braces. PROHITECH WP5, Innovative Materials and Techniques, 2008.
- [4] Clark, Peter; Aiken, Ian; Kasai, Kazuhiko; Ko, Eric and Kimura, Isao. Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices. Proceedings, 68th Annual Convention, Structural Engineers Association of California, Santa Barbara, 1999.
- [5] Higashino, Masahiko and Okamoto, Shin. *Response control and seismic isolation of buildings*. Taylor & Francis, 2006. 416 p.
- [6] Ishii, T.; Mukai, T.; Kitamura, H.; Shimizu, T.; Fujisawa, K. and Ishida, Y. Seismic retrofit for existing R/C building using energy dissipative braces. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004; Paper No.1209.
- [7] Izumi, N.; Chiba, O.; Takahashi, K. and Iizuka, S. Earthquake resistant performance of reinforced concrete frame with energy dissipation devices. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004; Paper N° 2498.
- [8] Kagami, Hiroshi. *Reconnaissance Report on the 1999 Quindío, Central Western Colombia, earthquake and its disasters*. Graduate School of Engineering, Hokkaido University, 1999.
- [9] Montiel O., M. A. y Terán G., Amador. Evaluación y comparación de la confiabilidad de edificios de 24 niveles estructurados con contravientos tradicionales y con contravientos restringidos contra Pandeo. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz, México, 2008.
- [10] Oviedo A., Juan Andrés y Duque U., María del Pilar. Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. *Revista EIA*, vol. 6, pp. 105-120, 2006.
- [11] Oviedo A., Juan Andrés; Mitsumasa, Midorikawa and Tetsuhiro, Asari. Optimum strength ratio of buckling-restrained braces as hysteretic energy dissipation devices installed in R/C frames. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008; Paper No. 05-03-0235.
- [12] Oviedo A., Juan Andrés; Midorikawa Mitsumasa and Asari Tetsuhiro. Optimum strength ratio of hysteretic energy dissipating devices in R/C frames. *Journal of Structural Engineering*, vol. 54B, pp. 571-580, 2008.
- [13] Romero M., Enrique. Experiences on the use of supplementary energy dissipators on building structures. International Post-SMiRT Conference Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibrations of Structures, Capri (Naples), Italy, August, 1993.
- [14] Terán G., Amador. El papel de la innovación dentro del contexto de la ingeniería estructural mexicana: el caso de los contravientos restringidos contra pandeo. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz, México, 2008.
- [15] Tsai, K. C. and Hong, C.P. Steel triangular plate energy absorber for earthquake resistant buildings. Proceedings of the 1st World Conference on Constructional Steel Design, Acapulco, 345-355, 1992.
- [16] Uang, Chia-Ming and Nakashima, Masayoshi. Steel buckling-restrained braced frames (Chapter 16). En: *Earthquake engineering: recent advances and applications*, CRC Press, 2004.
- [17] Wada, A.; Huang, Y. and Bertero V. V. Innovative strategies in earthquake engineering (Chapter 10). En: *Earthquake engineering: recent advances and applications*, CRC Press, 2004.
- [18] Wada, Akira and Nakashima, Misayoshi. From infancy to maturity of buckling restrained braces research. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 2004; Paper No. 1732.
- [19] Whittaker, A.; Bertero, V. V. and Alonso, J. Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements. Report No. UCB/EERC-89/02. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 1989.