

SITUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN COLOMBIA

JUAN ANDRÉS OVIEDO*
MARÍA DEL PILAR DUQUE**

RESUMEN

En este artículo se presenta un análisis del estado actual del uso de las técnicas de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas. Se identifican las principales tecnologías utilizadas en el mundo, se muestra el resultado de una encuesta realizada a ingenieros diseñadores de estructuras, con el fin de detectar el grado de aceptación de estas técnicas en Colombia, y se exponen las principales razones por las cuales no han tenido aplicación significativa en el país. Los resultados de la encuesta revelan que Colombia todavía está lejos de la vanguardia en el uso de técnicas de control de respuesta sísmica y que las entidades y profesionales involucrados en el proyecto de edificaciones desconocen estas técnicas o desconfían de sus ventajas tanto económicas como estructurales. Finalmente, se invita, por medio de experiencias en otros países, a considerar estas técnicas en el diseño estructural de edificaciones colombianas.

PALABRAS CLAVE: control de respuesta sísmica; sistemas de absorción de energía.

STATUS OF SEISMIC RESPONSE CONTROL TECHNIQUES IN COLOMBIA

ABSTRACT

This paper presents general aspects of the present situation of the use of seismic response-control techniques in Colombian buildings. The most prevalent techniques used worldwide are identified, and the results of a survey conducted among Colombian structural design engineers aimed at detecting some of the reasons why these techniques have not had a significant applicability in the country are presented. The results of the survey reveal

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

** Ingeniera Civil, Universidad Eafit. 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

that Colombia is still far from being a leading country in the application of seismic response control techniques, and that most entities and practitioners involved in building planning either do not know these techniques or are not well aware of economical benefits as well as improved structural performance. Finally, based on experiences gained in other countries, the use of these techniques in structural design for Colombia buildings is encouraged.

KEY WORDS: seismic response control; energy absorption systems.

SITUAÇÃO DAS TÉCNICAS DE CONTROLE DE RESPOSTA SÍSMICA NA COLÔMBIA

RESUMO

Neste artigo se apresenta uma análise do estado atual do uso das técnicas de controle de resposta sísmica em edificações colombianas. Identificam-se as principais tecnologias utilizadas no mundo, amostra-se o resultado de uma enquete realizada a engenheiros desenhistas de estruturas, com o fim de detectar o grau de aceitação destas técnicas na Colômbia, e expõem-se as principais razões pelas quais não tiveram significativa aplicação no país. Os resultados da enquete revelam que a Colômbia ainda está longe da vanguarda no uso de técnicas de controle de resposta sísmica e que as entidades e profissionais envolvidos no projeto de edificações desconhecem estas técnicas ou desconfiam de suas vantagens tanto econômicas como estruturais. Finalmente, se convida, por meio de experiências em outros países, a considerar estas técnicas no desenho estrutural de edificações colombianas.

PALAVRAS CÓDIGO: controle de resposta sísmica; sistemas de absorção de energia.

1. INTRODUCCIÓN

Aunque ya han transcurrido más de tres décadas desde que las técnicas de control de respuesta sísmica se empezaron a implementar como alternativa para aliviar los efectos de sismos y vientos a las edificaciones, en Colombia, país en el cual el 80% de su población vive en zonas de amenaza sísmica alta, todavía no tienen acogida.

La resistencia a la aplicación de estas técnicas no es un problema exclusivo de Colombia, también se presenta en otros países, incluso en unos técnicamente desarrollados. Algunas de las razones del rechazo radican en: (1) la falta de confianza en el comportamiento sísmico de edificaciones con técnicas de control de respuesta, (2) la desconfianza fundada en la incertidumbre del funcionamiento de los dispositivos de control que requieren alguna fuente de alimentación de energía externa o de algún tipo de mantenimiento durante su vida útil, (3) el posible sobrecosto inicial del proyecto, (4) el

desconocimiento por parte de los diseñadores de las metodologías de diseño estructural que se requieren cuando se utilizan técnicas de control de respuesta sísmica, y (5) la falta de normalización en los métodos de diseño y en especificaciones de los dispositivos de control. En los últimos años, la comunidad técnica internacional ha enfocado sus investigaciones en el mejoramiento de las técnicas de control de respuesta sísmica, con el fin de eliminar razones de rechazo, tales como la dificultad en los métodos de análisis y diseño, la redacción de normas para el control de calidad de los dispositivos y la efectividad del sistema durante la vida útil de la edificación. Las técnicas y metodologías actuales tienen todo su fundamento en la dinámica estructural y ofrecen una visión más clara del comportamiento de las estructuras y la disipación de la energía de vibración impuesta por los sismos.

En artículos recientes de los autores (Duque y Oviedo, 2006 y 2009), se mostraron aspectos favorables de las prácticas de construcción colombianas para la fabricación y uso de técnicas de control de



respuesta sísmica, particularmente disipadores histeréticos metálicos, en edificaciones. También se reportó la necesidad de investigar sobre el grado de aceptación de estas técnicas en el país, a fin de identificar las principales razones de su falta de aplicación.

En este artículo se revisa el estado de aceptación de las técnicas de control de respuesta sísmica en los países líderes en su desarrollo y aplicación, y se presentan los resultados de un estudio de utilización de estas técnicas en Colombia.

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 estas técnicas de control en nuestro país.

2. USO DE TÉCNICAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES

2.1 Situación mundial

La noción de control estructural, tal como se conoce actualmente, tiene sus raíces hace más de 100 años, cuando un profesor de ingeniería en Japón construyó una casa pequeña de madera sobre rodillos, con el fin de demostrar que se podía aislar la estructura de los sismos (Housner *et al.* 1997). Los conceptos modernos de aislamiento de vibración, absorción de vibración y amortiguamiento apenas fueron desarrollados y aplicados en las estructuras de las aeronaves en la Segunda Guerra Mundial, y sólo a partir de los años sesenta, se comenzó a pensar que estos conceptos también serían aplicables a estructuras civiles sometidas a la acción de viento o sismo.

Han pasado cerca de tres décadas desde que las técnicas de control de respuesta sísmica empezaron a ser ampliamente implementadas en las estructuras civiles con el propósito de reducir y controlar los daños producidos por los sismos o el viento. Según Kelly (1990), la primera edificación construida con gomas para aislamiento basal se

erigió en 1969 en Yugoslavia. Se instalaron grandes gomas en la base de un colegio de tres pisos para alargar su período fundamental de vibración y reducir la demanda sísmica. Para este tiempo en el Japón ya se habían realizado varias aplicaciones de aislamiento basal en templos, pero con otras técnicas, tales como el aislamiento con capas finas de arena.

Una clasificación aceptada internacionalmente para estas técnicas es la que presenta la ISO 3010:2001 “Basis for design of structures - Seismic actions on structures”, la cual se incluye en la tabla 1. Oviedo y Duque (2006) presentan una descripción de cada técnica.

La principal diferencia entre ellas radica en la forma como la energía de vibración impuesta a la estructura es disipada por los elementos de control; de allí su clasificación.

Los acercamientos al diseño de estructuras con tecnologías no convencionales sólo empezaron a presentar un mayor desarrollo en la década de los años ochenta cuando Japón promovió el estudio e implementación de técnicas de control de respuesta sísmica. Hoy en día Japón, Estados Unidos, Italia, Nueva Zelanda (Robinson, 1998) y China son los países que más han aportado al desarrollo de estas técnicas, y con sus avances y aplicaciones han hecho que otros países, como México, Chile y Argentina, empiecen también a contribuir.

2.1.1 Japón

En Japón, su alta amenaza sísmica ha generado la necesidad de implementar estas metodologías. Allí se han proyectado muchos edificios con estos dispositivos, cubriendo la mayoría de las técnicas de control disponibles y demostrando, hasta la fecha, una respuesta satisfactoria ante los eventos sísmicos. Se cuenta con una economía desarrollada y una cultura visionaria enfocadas a la investigación, lo que hace que tenga las facultades y oportunidades de estudiar más a fondo esta clase de tecnologías y su aplicación. El desarrollo de estas técnicas es muy alto y su uso en estructuras comunes está en aumento.

Tabla 1. Clasificación de las técnicas de control de respuesta sísmica (Oviedo y Duque, 2006)

Técnica de control	Tipo	Tipo	Dispositivo	
Control pasivo	Aislamiento sísmico	Mecanismos deslizantes o de rodillos	Apoyo de rodillos	
			Apoyo de placa deslizante, tipo péndulo, basculantes.	
			Capa deslizante	
			Otro	
		Elemento flexible	Elastómero de multicapas	
			Dispositivo flexible	
	Otros			
	Disipación de energía	De tipo histerético, HD	Acero	
			Plomo	
			Otros	
		De tipo friccionante		
		De tipo fluido	Hidráulico	
			Viscoso, VD	
			Otro	
	De tipo viscoelástico			
Efecto de masa adicional	De masa y resorte TMD			
	De tipo pendular			
	Vibración de líquido TLD			
	Otro			
Otro				
Control semiactivo	Control de amortiguamiento	Sistema de amortiguamiento variable	De tipo hidráulico	
			Otro	
	Control de rigidez	Sistemas de rigidez variable	Riostra	
			Otro	
Otro				
Control activo e híbrido	Efecto de masa	Amortiguamiento activo de masa, AMD		
		Amortiguamiento híbrido de masa, HMD		
	Control de fuerza	Tendón activo		
		Otro		
	Otro			

Se puede decir que no existe un patrón o forma de edificio para la aplicación del control de respuesta sísmica o de viento, y su utilización ha sido indiscriminada y masiva en estructuras con diferencias significativas en planta, número de pisos, sistema estructural y otros, además de rehabilitaciones sísmicas.

Hasta agosto de 2004 se contaba con cerca de 500 estructuras proyectadas con control de respuesta sísmica, cubriendo los diferentes tipos de dispositivos e hipótesis de análisis y diseño. Ese gran número de casos aplicados se debe en gran parte al rápido desarrollo de dispositivos y de su aplicación después del terremoto de Hanshin Awaji



(Kobe) ocurrido en 1995. A partir de esa fecha, el número de edificaciones con dispositivos aumentó con rapidez, alcanzando un pico histórico en el 2002 (Higashino y Okamoto, 2006; Kitamura *et al.*, 2004).

Los dispositivos de control de respuesta sísmica de mayor uso en el Japón son los HD y VD, como se ilustra en la figura 1. Los dispositivos de tipo AMD, HMD, TMD y TLD se han utilizado con mayor frecuencia en edificaciones altas. Las edificaciones destinadas a hotelería, vivienda y oficinas son las clases de edificios en los cuales la aplicación de dispositivos ha sido mayor, con rangos de altura entre 30 m y 250 m. Las alturas con mayor número de casos de utilización de HD y VD están entre 60 m y 120 m, correspondiente a edificaciones de 20 a 40 pisos, como se puede ver en la figura 1. Estos dos tipos de sistemas cubren el 75% del total de las aplicaciones en Japón. Para edificaciones mayores de 120 m, los dispositivos de tipo AMD y HMD han sido más utilizados, donde el uso de HD y VD se reduce. Comparando entre el número de aplicaciones de HD y VD, el de HD es del orden de un 60 % a 70 % mayor que el de VD (Kitamura *et al.*, 2004).

En Japón la técnica de aislamiento en la base comenzó a desarrollarse con fuerza en los

años ochenta. Después del sismo de Kobe (1995), el número de edificios aislados en la base aumentó notablemente, de 10 edificios por año se llegaron a construir más de 150 en un año. El aislamiento en la base pasó de una etapa de experimentación a la de utilización masiva, donde el principal uso era en edificios de hasta 8 pisos. Antes de 1995 la disipación de energía era controlada por un solo dispositivo, pero en diseños más recientes es más frecuente encontrar la combinación de varias clases de dispositivos de control, de tal manera que se cuente con rigidez inicial para cargas de viento y un buen comportamiento en el caso de vibraciones por sismo (Nakashima *et al.*, 2004).

En cuanto a métodos de diseño estructural, el procedimiento general aplicable a cualquier edificación se divide en dos etapas: diseño y revisión. En la primera etapa se realiza un análisis elástico de la estructura y se procede a hacer el diseño por el método de esfuerzos de trabajo, se verifican derivas, excentricidades y distribución de rigidez. En la segunda etapa, que se considera más como un proceso de revisión que de diseño, se asegura la capacidad última de carga horizontal que tiene la estructura, se verifican derivas y se garantiza un buen balance de rigidez y excentricidades mediante métodos de

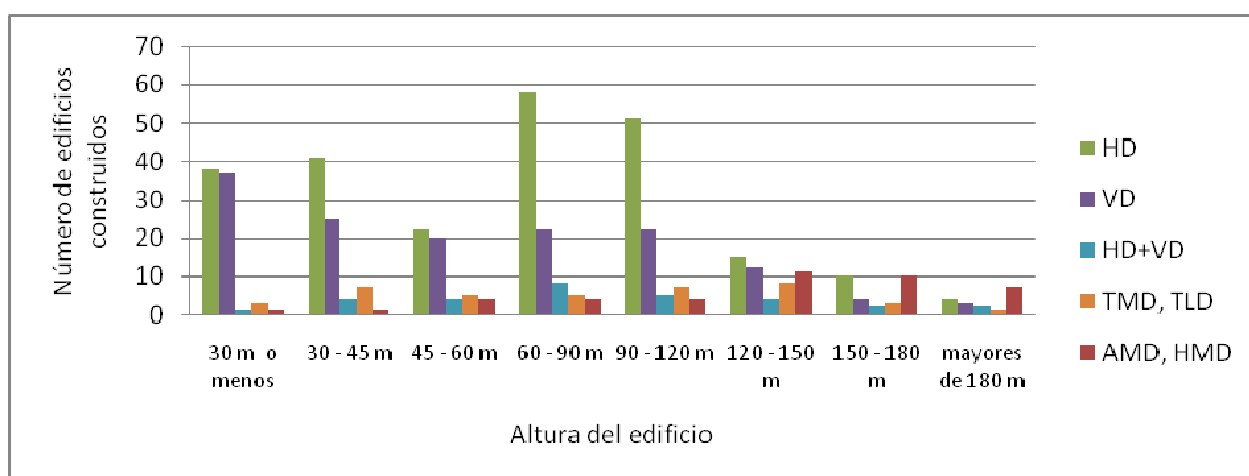


Figura 1. Número de casos de edificaciones con control de respuesta sísmica, según la altura y la técnica de control de respuesta, en Japón. Datos tomados de Kitamura *et al.* (2004)

análisis no lineales, tales como el *pushover*, análisis límite o análisis contra el tiempo. Según la altura de la edificación, la segunda etapa del procedimiento de diseño estructural se hace obligatoria. El código de diseño japonés define tres grupos de edificaciones según su altura: edificaciones de menos de 31 m, edificaciones entre 31 m y 60 m y edificaciones mayores de 60 m. Cabe anotar que las alturas entre pisos normalmente usadas en Japón están entre 3 m y 4 m. Para edificios que cuentan con dispositivos de control de respuesta sísmica, la segunda etapa es obligatoria e independiente de la altura de la edificación, y existen especificaciones adicionales de análisis estructural, diseño y construcción.

2.1.2 Estados Unidos

En los Estados Unidos, el desarrollo de dispositivos, su estudio e implementación en estructuras también ha crecido a buenos pasos; sin embargo, no es comparable con los grandes pasos que ha venido dando Japón. Estados Unidos ha estado más interesado en la técnica de aislamiento de base, ya que en definitiva es la que proporciona mayor reducción de demanda sísmica para edificios de baja y mediana altura. Por otro lado, también ha incursionado en el estudio de las técnicas de control pasivo atendiendo la necesidad de las edificaciones altas donde el método de aislamiento sísmico no es muy eficiente, puesto que los períodos de vibración sin aislamiento basal son relativamente grandes y no se generaría una reducción relevante de la demanda al instalar aisladores, lo mismo que para edificios que experimenten grandes picos de velocidad como respuesta ante un sismo, lo que es normal en zonas cercanas a la falla. Para estas edificaciones, el uso combinado de disipadores y amortiguadores es más eficiente controlando vibraciones excesivas contra el sismo y el viento.

En edificios altos y flexibles, en particular los sometidos a vientos fuertes, se han empleado amortiguadores auxiliares, uno de ellos era el desaparecido Centro Mundial de Negocios (World Trade Center) y otros en Chicago y California.

El uso de técnicas híbridas de control de respuesta ha sido también investigado, con el fin de explotar su potencial de incrementar la confianza y la eficiencia en las técnicas de control de respuesta sísmica. Se plantea que esta técnica puede aliviar algunas de las restricciones y limitaciones que existen cuando se usa exclusivamente un solo sistema (Spencer y Nagarajaiah, 2003).

En Estados Unidos, el diseño de edificaciones con control de respuesta sísmica está regido por las disposiciones recomendadas para el diseño de edificios nuevos y otras estructuras, FEMA 450, The 2003 NEHRP recommended provisions for new buildings and other structures (BSSC, 2004) y el International building code, IBC, 2006 del International Code Council, ICC.

La FEMA 450 tiene especificaciones propias y diferentes si el edificio se diseña con aislamiento en la base o con un sistema de amortiguadores o disipadores de energía. Se especifica que cuando un edificio está aislado en su base o tiene un sistema de amortiguadores o disipadores de energía se debe realizar una revisión, tanto del diseño del sistema de aislamiento sísmico o del sistema de disipación de energía como de los dispositivos en sí, por un equipo independiente de los diseñadores originales de la estructura. La revisión debe incluir la verificación del criterio para la definición de las características sísmicas del sitio y del desarrollo del espectro y las historias contra el tiempo del movimiento del terreno. Adicionalmente, para aislamiento en la base se realiza la revisión de:

- Diseño preliminar incluyendo la determinación de los desplazamientos totales del sistema de aislamiento y el nivel de la fuerza horizontal de diseño
- Resultados generales de los ensayos sobre los prototipos de los dispositivos por utilizar
- Diseño final del sistema estructural completo con todos los soportes de análisis estructural
- Programa de ensayos para el control de calidad del sistema de aislamiento



Los valores de deformación y amortiguamiento usados en el análisis estructural deben basarse en los resultados de ensayos realizados a una muestra de los dispositivos de control utilizados en la construcción.

Para sistemas de amortiguamiento o disipadores, adicionalmente a la revisión de los criterios para la determinación de los espectros de diseño, se debe realizar la revisión de:

- Diseño preliminar del sistema resistente a fuerzas sísmicas como también del sistema de amortiguamiento, incluyendo los parámetros de diseño de los dispositivos amortiguadores
- Diseño final del sistema de resistencia sísmica y del sistema de amortiguamiento con todos los soportes del análisis estructural
- Requisitos de los dispositivos de control, control de calidad de fabricación y programa de mantenimiento e inspección

Las características mecánicas de los dispositivos de control y los niveles de amortiguamiento usados para el diseño estructural deben basarse en los resultados de ensayos realizados a prototipos de los dispositivos por utilizar.

La FEMA 450 también especifica los procedimientos permitidos en el análisis estructural, de acuerdo con la clasificación de la estructura.

2.1.3 China y Taiwán

En la China, hasta hace 5 años, se contaba con más de 450 edificaciones con aislamiento en la base y con más de 50 edificaciones con disipadores pasivos de energía, principalmente con fines de rehabilitación o reforzamiento estructural. Dentro de los dispositivos pasivos, los disipadores viscosos son los más comunes, seguidos de los disipadores metálicos de tipo X (X-shaped) o placas triangulares (Higashino y Okamoto, 2007; Tsai *et al.*, 1993).

Taiwán, por su lado, también ha estado muy comprometido y activo en el desarrollo de nuevos

dispositivos de control, especialmente disipadores metálicos de tipo histerético y estructuras inteligentes. Hasta mediados de 2003 se contaba con cerca de 20 edificaciones con diferentes dispositivos de control pasivo y 50 con aislamiento basal. El mayor número de aplicaciones corresponde a puentes, colegios, centros médicos, viviendas y oficinas. Entre los dispositivos de acero más utilizados se destacan las riostras metálicas con pandeo restringido y placas triangulares (Higashino y Okamoto, 2006).

2.1.4 Latinoamérica

Países latinoamericanos como México, Chile y Argentina han demostrado a la comunidad ingenieril que soluciones técnicas como los disipadores de energía metálicos pueden ser desarrolladas y aplicadas en países en vías de desarrollo. México ha aplicado disipadores pasivos basados en deformación plástica, en especial dispositivos de tipo ADAS (added damping and stiffness) (Whittaker, Bertero y Alonso (1989). Martínez-Romero (1993) reportó aplicaciones de disipadores del tipo ADAS a construcciones de concreto reforzado en México con edificios de 5, 9 y 12 pisos. Estos dispositivos ADAS, por estar compuestos de láminas delgadas de acero común, acero A36 entre otros, y por tener una geometría sencilla de manejar, se han convertido en una opción llamativa y económica dentro de la práctica de la ingeniería en México, país que ha dado buen ejemplo en el desarrollo de dispositivos de control pasivo adaptándose a sus necesidades locales de economía y de ingeniería. También en México se han utilizado amortiguadores viscosos, este es el caso del edificio Torre Mayor, de 50 pisos, construido en Ciudad de México en el año 2003.

Por su parte, el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal en sus Normas Técnicas Complementarias, Diseño Sísmico de Edificios (2004) permite el uso de sistemas de control de respuesta sísmica siempre y cuando se “demuestre a satisfacción de la Administración, tanto la eficacia de los dispositivos o soluciones estructurales como

la validez de los valores del amortiguamiento y del factor de comportamiento sísmico que se proponga”.

Chile y Argentina se han destacado ante todo por sus aportes al desarrollo en la técnica de aislamiento sísmico basal de edificaciones. Argentina ha aplicado sistemas de aislamiento sísmico de base por medio de aisladores compuestos por cajas de resortes helicoidales y amortiguadores viscosos. Stuardi, Massa y Ruiz (2007) reportaron la aplicación de estos aisladores a una edificación de tres pisos de concreto reforzado y mampostería estructural en la residencia estudiantil de la Universidad Tecnológica Nacional en Mendoza, convirtiéndose en la primera edificación con aislamiento sísmico de base en Argentina (Stuardi, 2004). En Chile hasta el 2005 se contaba por lo menos con cuatro edificaciones aisladas en su base, de las cuales el Hospital Militar de Santiago en la comuna de La Reina está catalogado como uno de los diez mayores edificios del mundo con aisladores elastoméricos (Caseres, 2005). Además, Chile ha aplicado amortiguadores de masa sincronizada, como es el caso del edificio Parque Araucano, y ha desarrollado disipadores de energía metálicos como en la torre Titanium (Fondef, 2009). Se pretende además comercializar estas nuevas tecnologías desarrolladas en Chile a otros países latinoamericanos.

3. SITUACIÓN COLOMBIANA

Para determinar el estado de la utilización y aceptación de las técnicas de control de respuesta sísmica en Colombia, se optó por realizar una encuesta que fue enviada a los miembros de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, a los miembros de la Asociación de Ingenieros Estructurales de Antioquia, a calculistas y a profesores universitarios.

3.1 Descripción

La encuesta tenía como objetivo realizar un inventario de las edificaciones diseñadas con control de respuesta que permitiera determinar la situación

de uso de estas tecnologías en el país y así poder fijar objetivos hacia la reglamentación, construcción, capacitación, fabricación e implementación de estas tecnologías.

La pregunta ¿Ha diseñado o propuesto como alternativa de diseño el uso de técnicas de control de respuesta sísmica en edificaciones, en alguno de los edificios diseñados por usted? determina si estas técnicas son acogidas o no por los mismos calculistas. Se preguntó por información general de los edificios controlados sísmicamente y confirmación de las técnicas preferidas y los métodos de análisis y diseño estructural empleados.

Con el fin de recoger la información de una forma sistemática, se clasificaron las técnicas de control de respuesta sísmica como se muestra en la tabla 1, a la cual se le adiciona la pregunta sobre el número de dispositivos de cada tipo utilizados en el edificio. Adicionalmente, para determinar el método de análisis y diseño estructural utilizado se realizó la clasificación mostrada en la tabla 2.

3.2 Resultados

En total se recibieron 14 respuestas de calculistas de diferentes regiones del país, de las cuales 12 fueron negativas a la primera pregunta. Aunque el número total de respuestas fue poco, las personas que respondieron lo hicieron a nombre de la empresa consultora donde laboran, respuestas que corresponden a empresas que manejan un alto volumen de los diseños estructurales en el país.

De las dos respuestas positivas recibidas, una correspondía a un ingeniero que ejerce como docente fuera del país y la otra correspondía a la rehabilitación de una edificación industrial de dos pisos localizada en Barranquilla por medio de disipadores de energía de acero, de tipo histerético. En este edificio se tomó la decisión de recurrir a un diseño de disipador metálico histerético argentino para controlar el movimiento lateral relativo entre dos torres adyacentes del mismo proyecto y



Tabla 2. Formulario para la determinación de los métodos de análisis sísmico

Tipo de análisis			Factor de reducción R	
Análisis elástico	Estático	Fuerza horizontal equivalente (FHE)		
		Métodos simplificados		
	Dinámico	Respuesta espectro		
Análisis inelástico	Estático	Pushover		
		Forma de distribución vertical de fuerzas:		
		Proporcional al 1 ^{er} modo		
		Según Cvx del FHE		
	Dinámico	Respuesta tiempo historia		
		Intensidad del registro usado: (PGV= Peak Ground Velocity)		
		PGV < 25 cm/s		
		25 cm/s < PGV < 50 cm/s		
		50 cm/s < PGV < 100 cm/s		

en las cuales se presenta el problema de golpeteo, que afecta directamente las columnas de uno de ellos. Después de estudiar varias posibilidades de rigidización se llegó a la conclusión, teniendo en cuenta economía y facilidad de ejecución del reforzamiento, que la opción más eficiente era unir los dos edificios por medio de elementos horizontales que cuenten con sistemas de control de respuesta sísmica. Rigidizar cada edificio con el fin de disminuir sus desplazamientos laterales traía el inconveniente de que aumentaba las fuerzas en el nivel de cimentación y se tendría que proceder a reforzar. Con la solución de unir los edificios se obviaba este costo. Los disipadores horizontales entre los dos edificios se combinan con vigas de concreto reforzado para suplir los efectos de compresión en la dirección perpendicular a éstos. Esta propuesta se estudió hace algunos años, pero todavía no se ha ejecutado.

En la figura 2 se muestra el esquema de la solución para este proyecto en particular.

Otra edificación rehabilitada con estas técnicas, pero que no se detectó en la encuesta, corres-

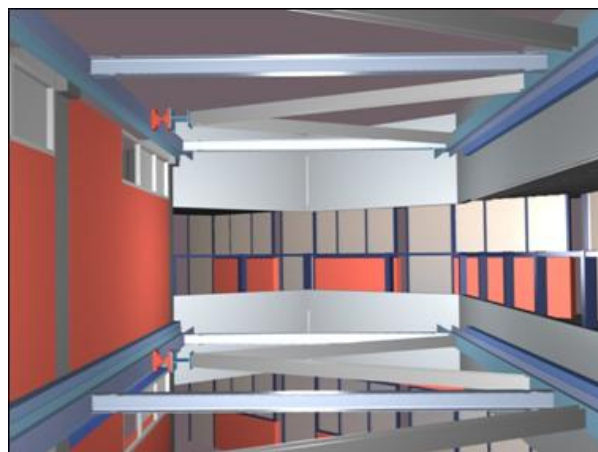


Figura 2. Isométrico de la propuesta de rigidización con disipadores histeréticos metálicos. Cortesía de Interservicios, Giovanni Gélvez

ponde al Hospital El Tunal en Bogotá en 1999, que utilizó en su reforzamiento disipadores de energía pasivos, específicamente disipadores de fricción de acero, convirtiéndose así en el primer centro hospitalario del país en utilizar control de respuesta sísmica en su reforzamiento. Los principales objetivos de la propuesta de rehabilitación fueron: reducir las

derivas de piso; asegurar la disipación de energía sísmica con los diferentes mecanismos de la estructura; disminuir el nivel de daño en sismos de intensidad superior; garantizar la resistencia de la estructura y ajustar la estructura lo más posible a la norma vigente. Todo esto se hizo cumpliendo con unos requisitos funcionales de ningún tipo de mantenimiento y que las fuerzas cortantes y momentos se disminuyeran en por lo menos el 40 % (Hospital El Tunal, 2009).

3.3 Regulación para el uso de estructuras controladas sísmicamente

Las nuevas Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente, NSR-09 (AIS, 2008) permitirán el uso de estructuras aisladas sísmicamente en su base y el uso de elementos disipadores de energía, siempre y cuando se cumplan los respectivos requisitos exigidos en los Estados Unidos para las construcciones con control de respuestas sísmica, de uno de los dos siguientes documentos:

NEHRP recommended provisions and commentary for seismic regulations for new buildings and other structures, 2003 edition. Federal Emergency Management Agency, FEMA 450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences, Washington, D. C. USA, 2004.

Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-05, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 2006.

El calculista debe demostrar que la estructura cumple con los propósitos de seguridad, durabilidad y resistencia, especialmente sísmica, y debe presentar además “de los documentos necesarios para la obtención de la licencia, la evidencia demostrativa y un memorial en el cual inequívocamente acepta la responsabilidad sobre las metodologías de análisis y diseño, como también presentar el diseño a aceptación de la Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismorresistentes”, Artículo 10°, Capítulo II, Ley 400 de 1997 (AIS, 1998).

Por lo tanto, para Colombia esto constituye un primer acercamiento hacia la regulación de las técnicas de control de respuesta sísmica, y la tendencia en este momento es asumir directamente la normativa de los Estados Unidos en algunos capítulos de la nueva versión de la norma colombiana. Sin embargo, se requieren unas disposiciones más expeditas en el control de respuesta sísmica, donde las técnicas de control y los procedimientos de diseño estructural se adapten a las condiciones locales colombianas.

4. ACCIONES PREVENTIVAS PARA LAS EDIFICACIONES COLOMBIANAS

La etapa de diseño estructural sólo toma una pequeña parte del tiempo de la vida de un proyecto, por eso se debe pensar en las implicaciones de la solución estructural sobre la inversión inicial de los proyectistas, pero también sobre la economía y el impacto de reparación y mantenimiento a los usuarios durante toda la vida de servicio de la edificación.

El diseño estructural tiene como objeto obtener una estructura económica, durable, segura y en armonía con el medio ambiente. Debe también otorgar soluciones prácticas para la construcción y escoger la mejor solución para las características individuales de cada proyecto. Estas cualidades de un buen diseño estructural deben mantenerse durante toda la vida útil de la edificación.

Todas las edificaciones sufren ciertos niveles de deterioro estructural debido a diferentes agentes externos. Entre los agentes de deterioro naturales están el viento, terremoto, huracán, inundación, alud, fatiga, ataque químico, entre otros; y hay agentes artificiales como incendio y vibración ambiental.

Ante cualquier nivel de deterioro de las edificaciones se puede optar por dos tipos de mantenimiento: correctivo o preventivo. El correctivo incluye actividades remediadoras tales como reparación, inspección intensiva, suspensión del funcionamiento



y del uso continuo de la edificación y, como última medida, demolición inminente. El mantenimiento preventivo incluye actividades como aumento de los niveles de seguridad y resistencia, durabilidad, facilidad de mantenimiento, medidas de mantenimiento con bajo impacto sobre el medio ambiente, entre otras. Las acciones preventivas son aceptadas cuando se prevé y se tiene conciencia del potencial de deterioro futuro durante la vida útil del proyecto. El mantenimiento correctivo es por lo general más costoso que el preventivo.

El mayor obstáculo para poder llegar a una vasta aplicación de acciones preventivas radica en cómo convencer a los proyectistas de hacer una inversión de mantenimiento cuando no hay signos visibles de daño estructural. En Colombia, aunque la historia ha puesto en alarma a toda la sociedad del peligro y desastre asociado a los terremotos, hay todavía personas que piensan que en el país no hay necesidad de mejorar la defensa de nuestras estructuras ante una alta amenaza sísmica existente.

Es un gran reto y responsabilidad para los ingenieros y todas las personas involucradas en el desarrollo de la infraestructura del país colaborar para la búsqueda de soluciones acordes con nuestras condiciones locales que otorguen una protección adicional a la infraestructura y a la comunidad.

Las técnicas de control de respuesta sísmica constituyen acciones preventivas, ya que se le está dando un mejor manejo y control al deterioro estructural causado por posibles terremotos futuros. Se prevé una reducción de trabajos de remoción de escombros y contaminación ambiental y se disminuyen las acciones remediadoras que pueden llevar a grandes inversiones para asegurar de nuevo el desempeño requerido por las edificaciones. En estructuras de concreto, con la reducción de trabajos de reparación o reconstrucción, se prevé también una reducción de la energía de producción y de emisiones de CO₂, productos de la industria de cemento.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un análisis de la situación actual del grado de aceptación de las técnicas de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas, por medio del resultado de una encuesta realizada a entidades y profesionales involucrados en el proyecto y diseño de edificaciones en el país.

A diferencia de países latinoamericanos como México, Chile y Argentina, los cuales han demostrado que nuevas tecnologías de protección sísmica pueden ser desarrolladas y aplicadas en países latinoamericanos, Colombia todavía está lejos de ser considerado un país de vanguardia en el uso de sistemas de control de respuesta sísmica. Muchos promotores desconocen las técnicas, otros desconfían de sus ventajas tanto económicas como estructurales, por lo tanto, hacen falta proyectos de investigación y aplicación donde se diseñen edificaciones con los mismos criterios sísmicos, con control de respuesta sísmica y sin él y se haga una comparación económica y técnica que permita verificar o derrumbar estos preconceptos. Además se necesita de programas de capacitación para los calculistas y constructores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a las entidades, empresas y profesionales miembros de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica y de la Asociación de Ingenieros Estructurales de Antioquia que suministraron información y dieron respuesta a la encuesta realizada.

REFERENCIAS

1. AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica). Borradores de la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismorresistente, NSR-09. Bogotá, 2008.
2. AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica). Normas colombianas de diseño y construcción sismorresistente, NSR-98. Ley 400 de 1997. Bogotá, 1998.

3. BSSC. Building Seismic Safety Council, National Institute of Buildings Sciences. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings-Provisions and commentary, 2003 Edition, Federal Emergency Management Agency, FEMA 450. Washington, D.C. USA, 2004.
4. Caseres, Marcelo. Hospital Militar: "un ejército de innovaciones". *Revista BiT: La Revista Técnica de la Construcción*, vol. 40, pp. 22-28, 2005.
5. Chile. Fondef (Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico). Disponible en: <http://www.fondef.cl/content/view/460/284/> (consultado el 12 de febrero de 2009).
6. Higashino, Masahiko and Okamoto, Shin. *Response control and seismic isolation of buildings*. Taylor & Francis, 2006.
7. Hospital El Tunal. Disponible en: <http://www.hospitaleltunal.gov.co/boletin.htm> (consultado el 11 de febrero de 2009).
8. Housner, G. W.; Bergman, L. A.; Caughey, T. K.; Chasiakos, A. G.; Claus, R. O.; Masri, S. F.; Skelton, R. E.; Soong, T. T.; Spencer, B. F. and Yao, J. T. P. Structural control: past, present, and future. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 123, No. 9. September 1997, pp. 897-971.
9. Kelly, James M. Base isolation: linear theory and design. *Earthquake Spectra*, vol. 6, No. 2, pp. 223-244, 1990.
10. Kitamura, Haruyuki; Kitamura, Yoshihisa; Ito, Masaru and Sakamoto, Mitsuo. Analysis of the present situation of response control systems in Japan based on building survey database. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, special issue, August, 2004.
11. Martínez, 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.
12. México. Departamento del Distrito Federal. Reglamento de construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias, Diseño Sísmico de Edificios. 2004.
13. Nakashima, Masayoshi; Pan, Peng; Zamfirescu, Dan and Weitzmann, Ruediger. Post-Kobe approach for design and construction of base-isolated buildings. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, special issue, August, 2004.
14. Oviedo, Juan Andrés y Duque, María del Pilar. Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. *Revista EIA*, vol. 6, pp. 105-120, 2006.
15. Oviedo, Juan Andrés y Duque, María del Pilar. Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas. *Revista EIA*, vol. 11, pp. 51-63, 2009.
16. Robinson, W. H. Passive control of structures, the New Zealand experience. *ASET Journal of Earthquake Technology*, paper No. 375, vol. 35, No. 4, December 1998, pp. 63-75.
17. Spencer, B. F. and Nagarajaiah, S. State of the art of structural control. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol. 129, issue 7, July 2003, pp. 845-856.
18. Stuardi, José Enrique. Dispositivos viscoelásticos para protección sísmica. *Revista BiT: La Revista Técnica de la Construcción*, vol. 10, No. 34, pp. 58-61, 2004.
19. Stuardi, José E.; Massa, Julio C. y Ruiz, Miguel E. Eficiencia de sistemas de aislamiento sísmico basados en resortes helicoidales y amortiguadores viscosos. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, vol. 7, No. 2, pp. 177-196, 2007.
20. Tsai, K. C.; Chen, H. W.; Hong, C. P. and Su, Y. F. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake Spectra*, vol. 9, No. 3, pp. 505-528, 1993.
21. 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.