

SISTEMAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICACIONES

JUAN ANDRÉS OVIEDO*
MARÍA DEL PILAR DUQUE**

RESUMEN

En este artículo se presenta un compendio del tema de los sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. Se realiza una presentación general del concepto físico de balance de energía en un sistema estructural, se identifican los diferentes tipos de energía y se relacionan los sistemas para el control de respuesta sísmica con el tipo de energía que disipan. Se presentan algunos ejemplos de los tipos de dispositivos comerciales más usados en el mundo para el control de respuesta sísmica de edificaciones.

PALABRAS CLAVE: control sísmico; disipadores; riostras, amortiguadores; aislantes sísmicos; balance de energía.

ABSTRACT

This paper corresponds to a summary of the common aspects of the state-of-the-art seismic response control techniques to buildings. It is presented an overview of the energy balance concept in a structural system; it is also discussed the types of energy and its role into the total energy dissipation. Besides, some examples of the most widely used devices for seismic response control techniques are presented.

KEY WORDS: seismic control; dissipators; braces; dampers; seismic isolators; energy balance.

* Ingeniero Civil, EIA. Especialista en Estructuras. Profesor e investigador del Grupo de Investigación Estructuras y Construcción, EIA. Ingeniero asociado, Control y Diseño de Estructuras Ltda. juanoviedo1@yahoo.com

** Ingeniera Civil, Máster en Ingeniería Civil, énfasis en Estructuras, Universidad de los Andes. Profesora EIA, Investigadora del Grupo de Investigación Estructuras y Construcción, EIA. pfmaduq@eia.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Más del 85% de la población colombiana se localiza en zona de convergencia de placas tectónicas, expuesta a una amenaza sísmica entre intermedia y alta. La amenaza sísmica no constituye un riesgo si no es acompañada por edificaciones vulnerables. Es sabido que el daño parcial o colapso de las construcciones durante y después de un sismo es la mayor causa de víctimas, disturbios sociales y pérdidas económicas [3]. De aquí que es indispensable diseñar y construir las edificaciones para que resistan eventos sísmicos grandes sin colapsar y eventos sísmicos recurrentes sin daños en la estructura y daños mínimos o nulos en los elementos no estructurales.

El Gobierno controla la calidad de las edificaciones por medio de las Normas Colombianas de Construcciones Sismo Resistentes, cuyo cumplimiento asegura que las estructuras tendrán una respuesta adecuada ante la demanda sísmica esperada.

Las técnicas convencionales estipuladas por la reglamentación actual para mitigar y controlar la respuesta de una edificación ante un evento sísmico se basan en la combinación de resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía en el rango inelástico de la estructura, tomando como condición su ductilidad. En estructuras de hormigón armado y otros materiales convencionales, estos métodos exigen una cuidadosa disposición del refuerzo, de la configuración estructural, de los tipos de conexiones y otros, que aumentan su costo frente a una estructura no sismorresistente, presentando, además, el inconveniente de que la estructura, por su mismo trabajo inelástico, sufre daños permanentes, muchas veces sin posibilidad de reparación.

En otros países, las técnicas convencionales de disipación de energía se han complementado con sistemas adicionales a los componentes estructurales de la edificación, los cuales modifican las características dinámicas de la estructura, controlando o disipando parte de la energía impuesta por el sismo. El uso de estas técnicas de control de respuesta sísmica tiene como objetivo reducir la demanda sísmica de la

propia estructura controlando su deformación y, por lo tanto, su daño.

Debido a las grandes ventajas que presenta esta metodología frente a la convencional y a la necesidad inminente de difundir el conocimiento en el medio colombiano, se considera de gran importancia realizar una revisión de los conceptos básicos de funcionamiento de estas técnicas, de los dispositivos disponibles comercialmente en el mundo y de los métodos de diseño.

En el presente artículo se presentan los resultados de un primer acercamiento al tema llevado a cabo por el Grupo de Investigación en Estructuras y Construcción de la EIA, y con el objetivo de implementar estas tecnologías en el país.

2. MODELO MATEMÁTICO

Con el fin de estudiar la respuesta de la estructura ante la imposición de cargas se utiliza un modelo matemático basado en la mecánica newtoniana. Toda estructura responde dinámicamente ante la acción de cargas o deformaciones, generando fuerzas inerciales iguales a su masa por la aceleración (segunda ley de Newton, ecuación dinámica de equilibrio). Para cargas o deformaciones aplicadas de una manera lenta, que es el caso de cargas muertas y vivas no dinámicas, las fuerzas inerciales pueden despreciarse, lo que hace posible un análisis estático de la estructura. Esta simplificación no es válida cuando la estructura se somete a cargas dinámicas o deformaciones rápidas como las causadas por viento, sismo, y vivas, dinámicas o con impacto, casos en los cuales las fuerzas inerciales no son despreciables y se hace necesario un análisis dinámico [23].

Considerando un sistema estructural idealizado en un modelo de un grado de libertad como el mostrado en la figura 1, se realiza el análisis dinámico para obtener la respuesta del sistema [10].

El modelo consta de una masa concentrada m soportada por un elemento de rigidez k , con un coeficiente de amortiguamiento viscoso c propio del

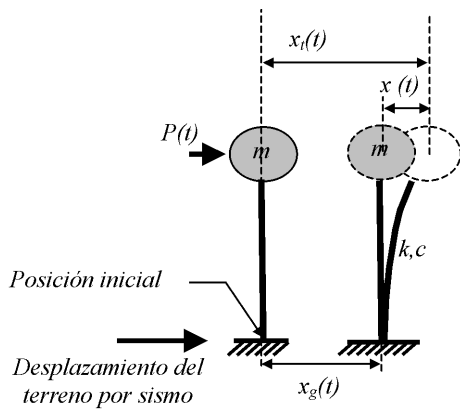
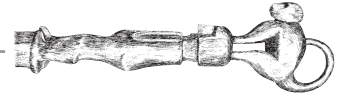


Figura 1. Sistema de un grado de libertad

sistema. El sistema se somete a una carga sísmica caracterizada por un desplazamiento del suelo $x_g(t)$ y una carga $P(t)$ que puede ser o no dependiente del tiempo. La respuesta del sistema consiste en determinar el desplazamiento de la masa en cualquier instante con respecto a su posición inicial general, $x_t(t)$. Este parámetro se calcula en función del desplazamiento del terreno y del desplazamiento de la masa con respecto a su base:

$$x_t(t) = x_g(t) + x(t) \quad (1)$$

Para estas condiciones, la ecuación de equilibrio dinámico se escribe como:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = -m \ddot{x}_g + p \quad (2)$$

Donde:

$m\ddot{x}$ representa la fuerza inercial de la masa de la edificación.

$c\dot{x}$ es el amortiguamiento inherente del sistema.

kx es la fuerza elástica del sistema.

Housner [10] propone utilizar el concepto de energía como herramienta para determinar el comportamiento y la respuesta de una estructura ante cargas dinámicas. Debido a que la ecuación de equilibrio dinámico está planteada en términos de fuerzas, éstas se multiplican por el desplazamiento dx , expresado como $\dot{x}dt$, que es una función de la velocidad, para encontrar el trabajo realizado. Al

integrar la ecuación resultante respecto al tiempo de aplicación de la carga (sismo, viento u otras) se obtiene la ecuación de balance de energía desarrollado en el sistema estructural:

$$E_K + E_D + E_S = E_I \quad (3)$$

Donde:

$$E_K = \int m \dot{x} dx = \frac{m\dot{x}^2}{2} \quad \text{es la energía cinética} \quad (4)$$

de la masa m ;

$$E_D = \int c \dot{x} dx = \int c \dot{x}^2 dt \quad \text{es la energía disipada} \quad (5)$$

por el amortiguamiento inherente de la estructura;

$$E_S = \int k x dx = \frac{kx^2}{2} \quad \text{es la energía de} \quad (6)$$

deformación elástica del sistema;

E_I es la energía impuesta por las cargas dinámicas

$$E_I = E_{I_s} + E_{I_w} \quad (7)$$

y

$$E_{I_s} = -\int m \ddot{x}_g dx \quad \text{es la energía impuesta} \quad (8)$$

por el sismo

$$E_{I_w} = \int P_{(t)} dx \quad \text{es la energía impuesta} \quad (9)$$

por el viento

En el caso de que el sistema alcance a responder en el rango inelástico de los materiales, en el término E_s se debe incluir y distinguir la participación de la estructura dentro del rango elástico y el inelástico. Esto se logra introduciendo la función $f_s(x)$ que incluye la respuesta elástica y la inelástica histerética en el cálculo de la energía total proporcionada por la estructura, y quedan como:

$$E_s = \int f_s(x) dx = E_{s_s} + E_{s_p} \quad (10)$$

Donde E_{s_p} es la energía disipada por efectos histeréticos de deformación plástica y daño de los elementos estructurales, y el término E_{s_s} es la energía de deformación elástica no disipada (figura 2).

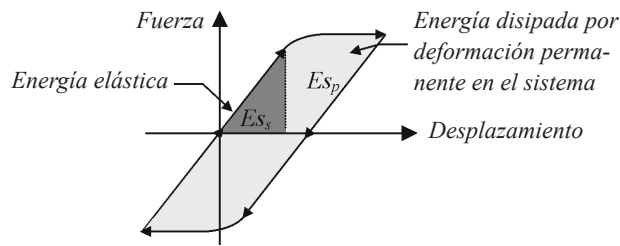


Figura 2. Ciclo de histéresis en un sistema estructural, energía elástica e inelástica

Cuando se utilizan dispositivos especiales disipadores o amortiguadores de energía (dependientes de la velocidad, la deformación o la aceleración), se debe introducir un término en la ecuación (3) que permita distinguir la participación de estos dispositivos en el balance de energía. Este término se identifica como E_p y se calcula por medio del operador de integro-diferenciación representativo de la disipación de energía proporcionada por dispositivos adicionales (ecuación 11).

$$E_p = \int \Gamma \bar{x} dx \quad (11)$$

La contribución de la energía obtenida por los disipadores o amortiguadores se suma al lado izquierdo de la ecuación de balance de energía, para quedar:

$$E_k + E_D + E_{S_s} + E_{S_p} + E_p = E_I \quad (12)$$

3. TÉCNICAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA EN EL BALANCE DE ENERGÍA

Las técnicas de control de respuesta sísmica, tanto las convencionales como las novedosas, tienen como objetivo aumentar la participación de los términos E_{S_p} , energía disipada por histéresis propia de la estructura, y E_p , energía disipada por dispositivos adicionales, al lado izquierdo de la ecuación (12). Debido al balance de energía, en la medida en que se aumente el término E_p , la disipación de energía por histéresis de la estructura disminuye y la participación

de los componentes estructurales es menor, el nivel de daño en la estructura se reduce y se concentra en los dispositivos adicionales, que son elementos totalmente identificados y fáciles de reemplazar.

Otra forma de disminuir la disipación de energía por histéresis de la estructura, término E_{S_p} , consiste en modificar la energía de entrada al sistema, término E_I , al lado derecho de la ecuación. Algunos sistemas de control de respuesta sísmica trabajan en este aspecto y se conocen con el término de aislamiento basal.

4. CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL DE RESPUESTA SÍSMICA

Las técnicas de control de respuesta sísmica se pueden clasificar según la forma como el sistema maneja la energía impuesta por el sismo, su absorción y disipación [8, 14]. Se conocen como sistemas de disipación de energía aquellos que aportan al término E_p en el balance de energía y se conocen como sistemas aisladores los que se enfocan a disminuir la energía de entrada al sistema estructural, término E_I .

Los japoneses y estadounidenses utilizan dos nomenclaturas diferentes de clasificación de acuerdo con el mecanismo de funcionamiento. Los japoneses los clasifican en cuatro categorías: sistemas aislados en la base, sistemas de absorción de energía, sistemas de efecto de masa y sistemas de control activo [14].

Los estadounidenses plantean tres categorías: sistemas aislados, sistemas de disipación pasiva de energía y sistema de control activo [8]. La diferencia entre las clasificaciones radica en que los estadounidenses incluyen los sistemas de efecto de masa dentro de los sistemas de control pasivo o activo de energía.

Ante estas diferencias, en la ISO 3010 International Standard "Basis for design of structures – Seismic action on structures" se plantea una clasificación



que pretende ser internacional, que consiste en tres sistemas de control de respuesta sísmica: control pasivo, control activo e híbrido y control semiactivo [9] (tabla 1).

4.1 Sistemas de aislamiento sísmico

En el sistema de aislamiento sísmico en la base se instalan dispositivos, generalmente en el nivel más bajo del edificio, con el fin de que absorban, de for-

Tabla 1. Clasificación de las técnicas de control de respuesta sísmica [9]

Sistema de Control	Tipo	Tipo	Dispositivo	
Control pasivo	Aislamiento sísmico	Mecanismos deslizantes o de rodillos	Apoyo de rodillos	
			Apoyo de placa deslizante, tipo péndulo, basculante	
			Capa deslizante	
			Otros	
		Elemento flexible	Elastómero de multicapas	
			Dispositivo flexible	
	Otros			
	Disipación de energía	De tipo histerético	Acero	
			Plomo	
			Otros	
		De tipo friccionante		
		De tipo fluido	Hidráulico	
			Viscoso	
			Otros	
		De tipo viscoelástico		
Efecto de masa adicional	De masa y resorte			
	De tipo pendular			
	Vibración de líquido			
	Otros			
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		
		Amortiguamiento híbrido de masa		
	Control de fuerza	Tendón activo		
		Otro		
	Otro			

ma parcial, la energía impuesta por el sismo antes de que sea transmitida a la superestructura (figura 3). Entre los dispositivos empleados en la técnica de aislamiento sísmico en la base se cuenta con los aisladores flexibles y los aisladores de fricción deslizantes o basculantes, combinados con amortiguadores.

El trabajo de esta combinación de los aisladores como elementos flexibles que trabajan en el rango elástico y los amortiguadores como elementos rígidos con comportamiento elasto-plástico hace que la energía sísmica se atenúe, de forma parcial, antes de ser transmitida a la superestructura, término E_i a la derecha de la ecuación (12), haciendo que la energía total para balancear por amortiguamiento propio del sistema, energía elástica y energía cinética sea menor [8].

En el caso de los aisladores flexibles, la reducción de energía ocurre por el aumento del período de vibración de la estructura, alejándolo del período de vibración natural del suelo. Por otro lado, los aisladores de fricción reducen la energía por medio del deslizamiento entre el edificio y la cimentación [12]. Para edificios con períodos largos de vibración el uso de aisladores no es muy recomendado, ya que su presencia no implicaría un cambio drástico en las fuerzas de entrada a la superestructura.

Los amortiguadores adicionales se utilizan para disminuir la sensibilidad del sistema a las frecuencias de vibración del suelo y la vulnerabilidad a pulsos largos que ocurren en registros cercanos al epicentro del sismo [6]. La rigidez inicial proporcionada por los amortiguadores controla las vibraciones menores y da confort a los usuarios.

Los aisladores flexibles y los apoyos por fricción funcionan también como sistema de transmisión de cargas verticales a la fundación, por lo tanto, se

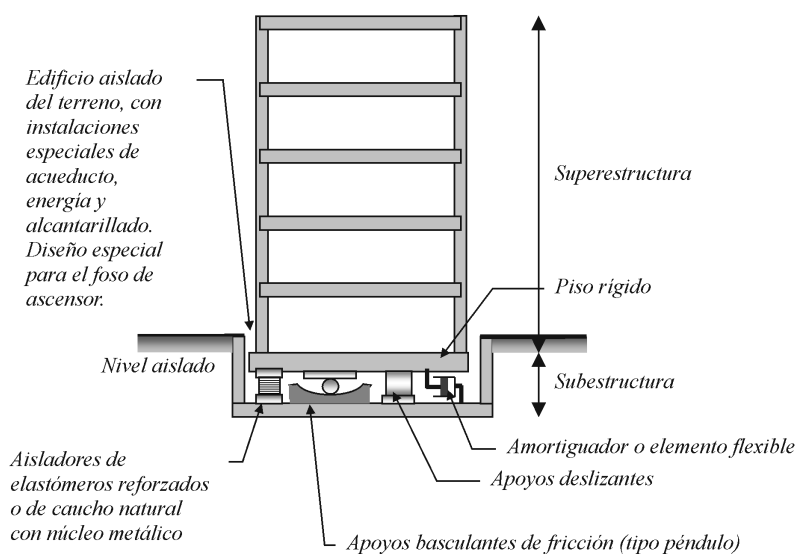


Figura 3. Técnica de aislamiento sísmico en la base

debe controlar su rigidez y resistencia vertical para evitar el colapso del edificio.

Los aisladores de elastómeros y los de caucho natural (figura 4) están compuestos por una serie de láminas de elastómeros o de caucho adheridas entre sí, intercaladas o no con láminas metálicas, con el fin de proveer capacidad para soportar cargas verticales y confinar el núcleo que, por lo general, es de plomo. Las principales características que debe cumplir este tipo de aisladores son la alta rigidez vertical, la flexibilidad horizontal, la rigidez torsional, la durabilidad, la resistencia a cambios de temperatura y la resistencia a fuerzas cortantes, propiedades que deben ser comprobadas en laboratorio antes de ser utilizados en un edificio. En [9] se encuentran ecuaciones con las cuales se pueden determinar estas características en función del tipo de material, forma del aislador y otros.

En cuanto a los aisladores de fricción se cuenta con los apoyos deslizantes y los apoyos basculantes tipo péndulo de fricción (figura 5). En los apoyos deslizantes las columnas descansan sobre elementos de deslizamiento de teflón o acero inoxidable y se genera amortiguamiento por fricción. Los apoyos



basculantes consisten en una base cóncava sobre la que se colocan un patín esférico articulado y una platina de cubierta. La base cóncava tiene la función de restaurar la posición original del sistema, mientras que las superficies deslizantes, esferas, disipan energía por fricción. El movimiento que se produce en el dispositivo durante la acción de un sismo es similar al movimiento de un péndulo.

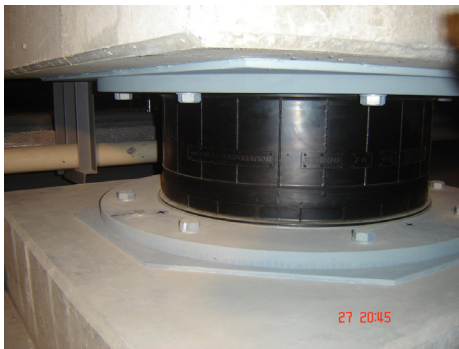
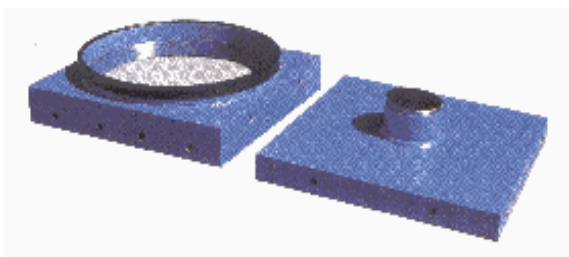


Figura 4. Aislador de caucho natural



Componentes del aislador
Fuente: www.earthquakeprotection.com

Figura 5. Aislador de fricción

Los tipos de amortiguadores más utilizados como complemento a los sistemas de aislamiento son los amortiguadores metálicos (figura 6).

4.2 Sistemas de efecto de masa

La técnica de efecto de masa consiste en adicionar una masa al edificio para que vibre con la misma frecuencia natural de vibración de la estructura. “Si la frecuencia del absorbedor adherido a la estructura coincide con la frecuencia de excitación, entonces la masa del sistema principal permanece quieta, y el absorbedor genera en todo instante sobre la estructura fuerzas iguales y contrarias a la excitación” (Frahm, 1909).

En los disipadores de masa sincronizada, la masa se adhiere a la estructura por medio de resortes y amortiguadores que inducen fuerzas contrarias a la excitación, reduciendo los movimientos y

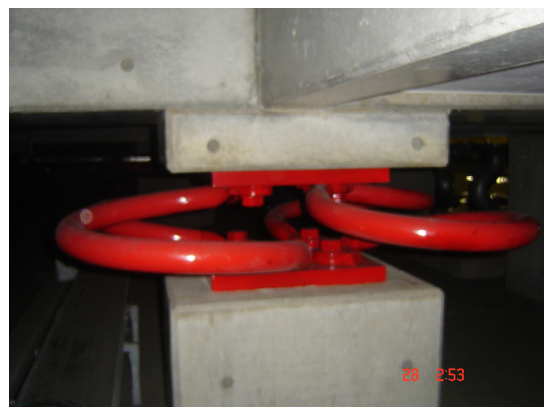


Figura 6. Amortiguadores metálicos

desplazamientos impuestos por el sismo (figura 7). En el Japón se han dotado varias edificaciones con esta técnica; la torre Landmark de Yokohama (75 pisos) posee en su último piso un amortiguador de masa sincronizada (*tuned mass damper*), para controlar las vibraciones debidas al viento y al sismo, evitar problemas estructurales y otorgar comodidad a los usuarios de la edificación.

Dentro de estos amortiguadores de masa sincronizada también se pueden considerar los de líquido sincronizado (*tuned liquid damper*). Estos son amortiguadores que aprovechan la frecuencia de vibración del oleaje de un líquido contenido en tanques u otros depósitos que se sitúan, generalmente, en el último piso de la estructura. El oleaje dentro del tanque produce una serie de frecuencias de vibración que reduce la respuesta de la estructura ante la excitación. Una variante de este tipo de amortiguadores es el amortiguador de columna de líquido sincronizado (*tuned liquid column damper*), que imparte amortiguamiento adicional al disipar energía mediante el paso del agua por unos orificios acompañado de una pérdida de cabeza, para mejorar el desempeño estructural de la edificación.

4.3 Sistemas de control pasivo con disipación de energía

Los sistemas de control pasivo con disipación de energía se clasifican en cuatro categorías: hysteréticos, de fluidos, viscoelásticos y de fricción (figura 8) [9]. Por lo general, se instalan en riostras diagonales dentro de los pórticos de la estructura o como complemento al sistema de aislamiento sísmico en la base, entre la fundación y la plataforma de aislamiento, como se mostró en la figura 3.

Entre los principales dispositivos para el control pasivo se resaltan por su economía y funcionalidad los disipadores metálicos, hysteréticos, basados en deformación plástica; especialmente los de acero que, debido a su homogeneidad, se convierten en un tipo de disipador de fácil caracterización mecánica. Algunos de los disipadores metálicos de acero usados en el mundo son las placas a flexión, los amortiguadores torsionales de barras, los anillos amortiguadores de fluencia y las riostras metálicas.

La figura 9 muestra un disipador de placas a flexión tipo ADAS, formado por un conjunto de placas en forma de I dispuestas a flexión fuera de su

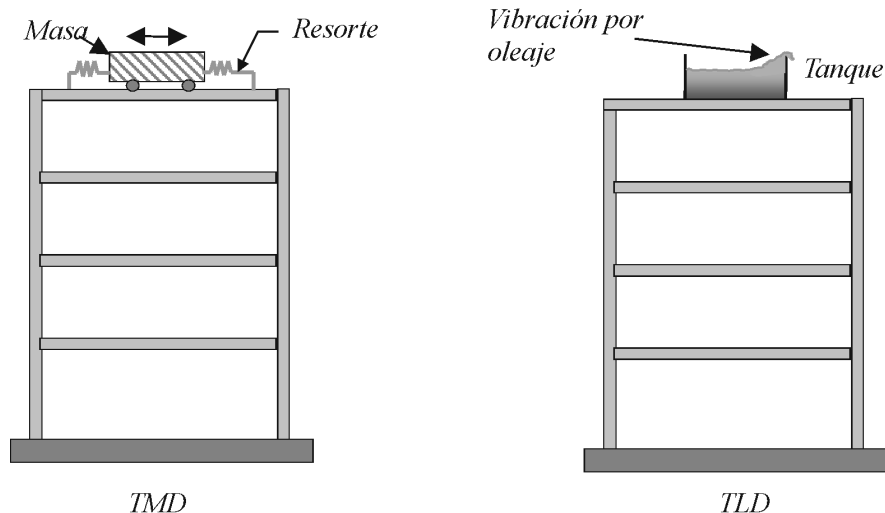


Figura 7. Técnica de masa adicional

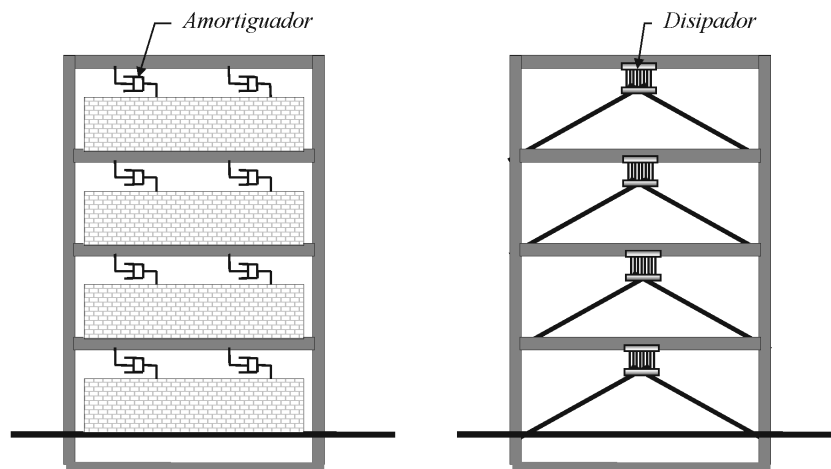


Figura 8. Técnica de control pasivo con disipadores de energía

plano donde concentran la energía por deformación plástica de la zona delgada. En la figura 10 se muestran el disipador tipo TADAS y el disipador tipo panel, constituido por placas alineadas que trabajan en su plano.

Otra clase de disipador histerético la forman las riostras metálicas (figura 11). Están constituidas

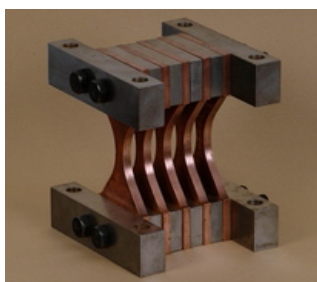


Figura 10. Disipadores histeréticos metálicos.
a) Tipo TADAS. b) Tipo panel



Figura 9. Disipador tipo ADAS.
(Tomado de Aiken *et al.*, 1993)

por un elemento rigidizador que contiene un dispositivo disipador compuesto por un núcleo de acero, restringido lateralmente al pandeo por medio de un material de confinamiento, y un tubo metálico externo. El núcleo de acero soporta las fuerzas transmitidas por la riostra, dándose la disipación de energía por fluencia, al verse sometido ya sea a efectos de flexión, cortante o deformación axial, dependiendo

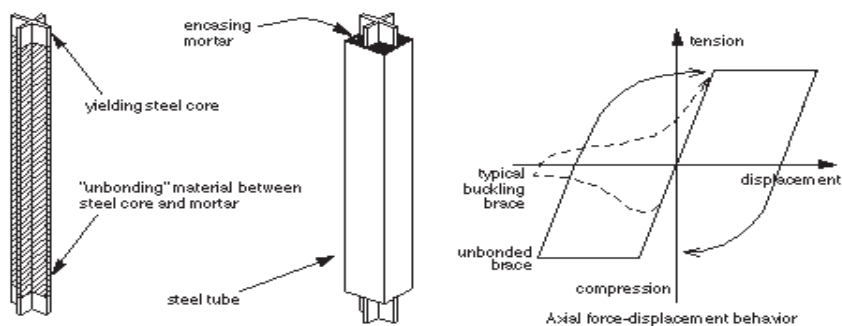


Figura 11. Disipador tipo riostra metálica con restricción al pandeo (tomado de www.corebraced.com).

de la forma geométrica de la riostra y de su instalación en los pórticos. Un modo de falla puede ser más eficiente que otro, de allí la correcta elección del dispositivo usado de acuerdo con el planteamiento estructural y arquitectónico de la edificación.

Para el adecuado funcionamiento de la riostra como disipador de energía se requiere que no haya adherencia entre el núcleo de acero y el material de confinamiento; de esta manera, sólo el núcleo toma y soporta las fuerzas. Como material de confinamiento se utiliza un mortero de cemento Portland.

Los disipadores viscoelásticos no sólo se han utilizado contra los sismos, sino también para el control de vibraciones inducidas por viento. Los materiales viscoelásticos son generalmente polímeros que,

al ser deformados por cortante, ofrecen capacidad de disipación de energía. La figura 12 muestra el esquema típico de estos dispositivos en los que la disipación tiene lugar cuando existe desplazamiento relativo entre las placas de acero externas y el material viscoelástico interno. En el diseño se deben tomar las previsiones necesarias contra los cambios fuertes de temperatura, deformaciones excesivas y frecuencia de vibración, ya que pueden modificar el comportamiento del dispositivo.

Los disipadores de fluidos viscosos se basan en la respuesta elástica de un líquido viscoso. Uno de los amortiguadores viscosos de mayor uso es el dispositivo compuesto por un pistón inmerso en un fluido viscoelástico. Al generarse un desplazamiento

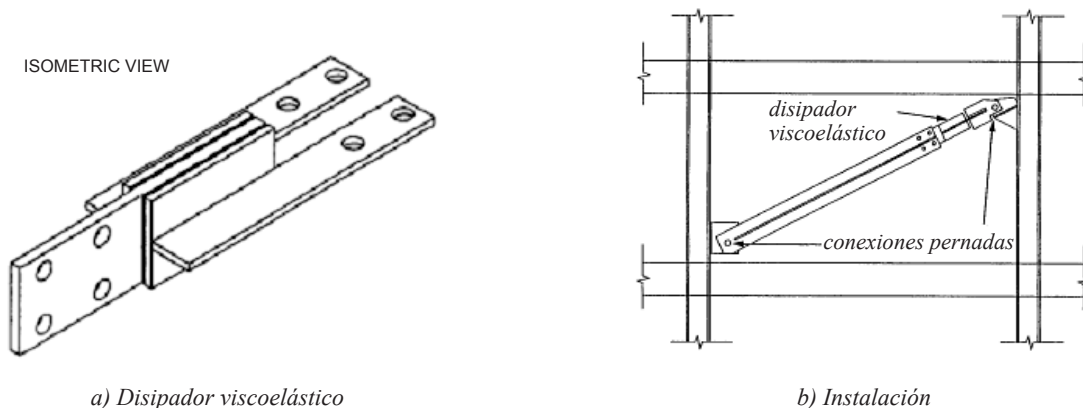
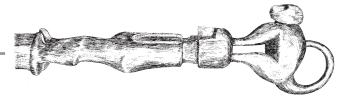


Figura 12. Disipadores viscoelásticos (tomado de Kitamura *et al.*, 1991)



interno del pistón, el fluido es forzado a pasar por un grupo de pequeños orificios, lo que da como resultado disipación de energía. Este dispositivo es muy eficiente, puesto que cubre un amplio rango de frecuencias, así que sirve para un mayor rango de sismos. La figura 13 muestra el esquema general de un disipador tipo viscoso.

Los disipadores de fricción trabajan por la fricción generada entre dos miembros mientras uno desliza contra el otro, disipando la energía sísmica por calor. El diseñador debe conocer el nivel de fuerza exacto en que se rompe la estática y comienza el deslizamiento entre las dos placas, tanto para sismos pequeños como para grandes.

4.4 Sistema de control activo e híbrido

En los sistemas de control activo (figura 14), se utilizan dispositivos que responden según las solicitaciones impuestas por el sismo, activándose por medio de una fuente externa de energía. Entre los dispositivos utilizados en esta técnica se cuenta con sistemas de efecto de masa y sistemas de control pasivo de disipación de energía.

5. INFLUENCIA DE LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL PASIVO EN UNA ESTRUCTURA

Oviedo y Kitamura (2005) muestran la influencia del uso de las riostras metálicas como disipadores

en un modelo analítico inelástico correspondiente a una edificación de pórticos de hormigón armado, diseñada y construida en Colombia (figura 15).

Para este estudio se consideraron las riostras como parte integral de la estructura, por lo tanto su participación en la ecuación (3) de energía está dada dentro del término E_s , el cual a su vez contiene los términos $E_{s,s}$, energía elástica del sistema, y $E_{s,p}$, energía disipada por efectos histeréticos de deformación plástica y daño de los elementos estructurales y, en este caso, de las riostras como parte de la estructura.

En las figuras 16 y 17 se grafica la energía total del sistema como una suma de energías en función del tiempo de respuesta del edificio.

Comparando las figuras 16 y 17 se aprecia la contribución de las riostras en la disipación de energía. En el modelo con riostras, el término E_s muestra una mayor participación dentro de la respuesta global de la estructura. En ambos modelos se analiza el mismo edificio, por lo tanto, la diferencia en el término E_s se debe a la acción de las riostras que dan protección a los elementos de la estructura. Se observa que, aunque en el edificio con riostras la energía de entrada es mayor, la energía cinética decrece con mayor rapidez que en el edificio sin riostras, la energía de amortiguamiento inherente y la energía elástica y plástica de la estructura se conservan y la diferencia de energía es asumida por la disipación en las riostras.

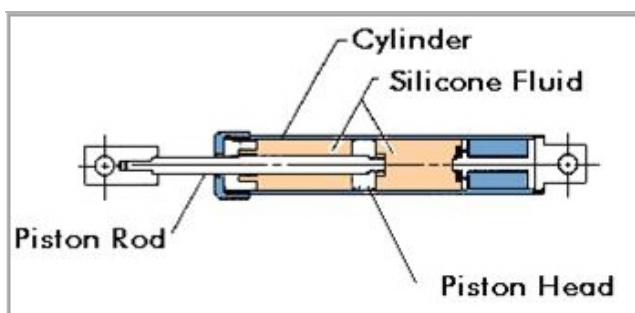


Figura 13. Disipadores viscosos (fuente: www.taylordevices.com)

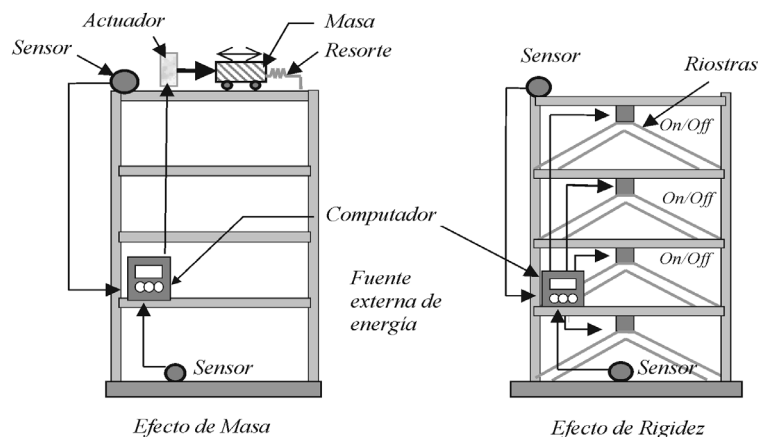


Figura 14. Técnica de control activo

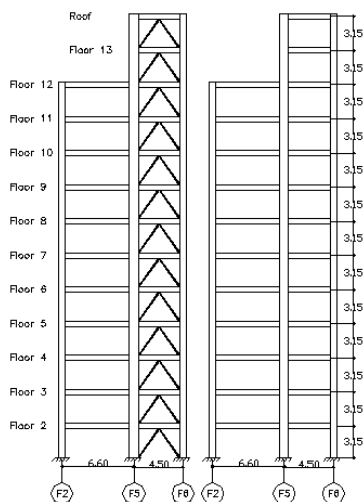


Figura 15. Modelo analítico de edificio de hormigón armado con riostras metálicas

En este modelo son evidentes las ventajas del uso de los dispositivos disipadores de energía en edificaciones. Algunas de ellas son: reducción de la demanda sísmica en la estructura principal, concentración del daño en puntos y elementos identificados y fáciles de sustituir después de un evento sísmico significativo y, en algunos casos, aumento de la rigidez de la edificación, lo que trae consigo la protección a los elementos no estructurales como muros y acabados.

6. MODELOS ANALÍTICOS

El concepto moderno de diseño dice que “para que una estructura esté bien diseñada, debe tener un número limitado de miembros que requieren ductilidad y el mecanismo de falla debe estar claramente definido” (Wilson, 2000).

De acuerdo con esto, para el diseño de edificaciones que utilicen sistemas de control de respuesta sísmica no convencionales debe contarse con un modelo de análisis que tenga en cuenta la respuesta dinámica inelástica, con el tiempo, del sistema estructural, compuesto por disipadores y estructura; de esta manera el mecanismo de falla queda claramente definido.

Se debe tener control sobre el momento en que empiezan a actuar los dispositivos, ya sea que estos trabajen en forma proporcional a la velocidad o al desplazamiento de la estructura, y la forma en que va respondiendo la edificación a lo largo del sismo.

Las nuevas metodologías de diseño por desempeño especificadas en las normas internacionales y las opciones de análisis que presentan los programas comerciales hacen posible realizar este tipo de estudios.

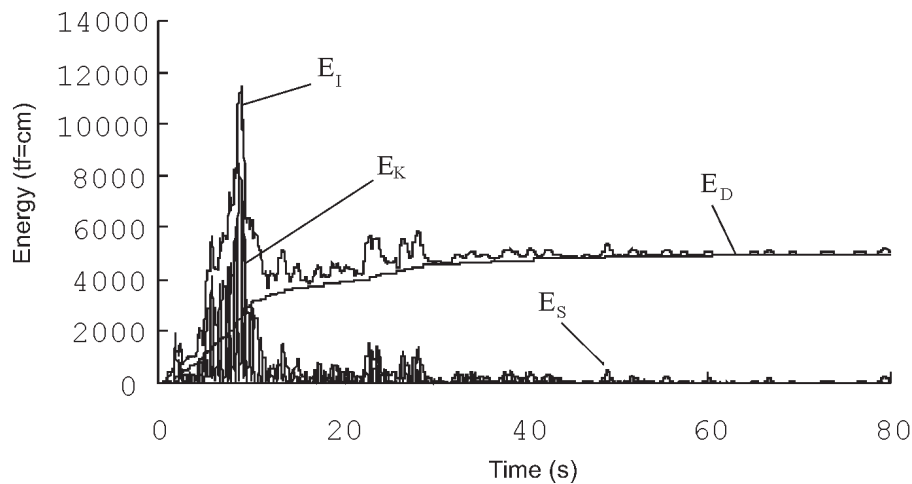


Figura 16. Respuesta de la distribución de energía en el modelo analítico sin riostras

El programa SAP2000, a partir de su versión 7, ofrece la posibilidad de llevar a cabo un análisis que combina los métodos de superposición modal e incremental para sistemas estructurales con una pequeña cantidad de miembros no lineales. De esta manera, no se requiere un análisis paso a paso en el que se deban variar las propiedades mecánicas de la estructura completa en cada iteración, sino solamente las propiedades de los elementos no lineales, en este caso los dispositivos. Este método

se conoce como método rápido no lineal, FNA (*fast nonlinear analysis*).

Otro método que se puede utilizar es el método del incremento de carga (*push over*), en el cual se lleva a cabo un análisis estático de la estructura para cada incremento de carga o desplazamiento. En cada iteración se detectan los puntos que entran en fluencia y se modifican sus propiedades para la siguiente iteración.

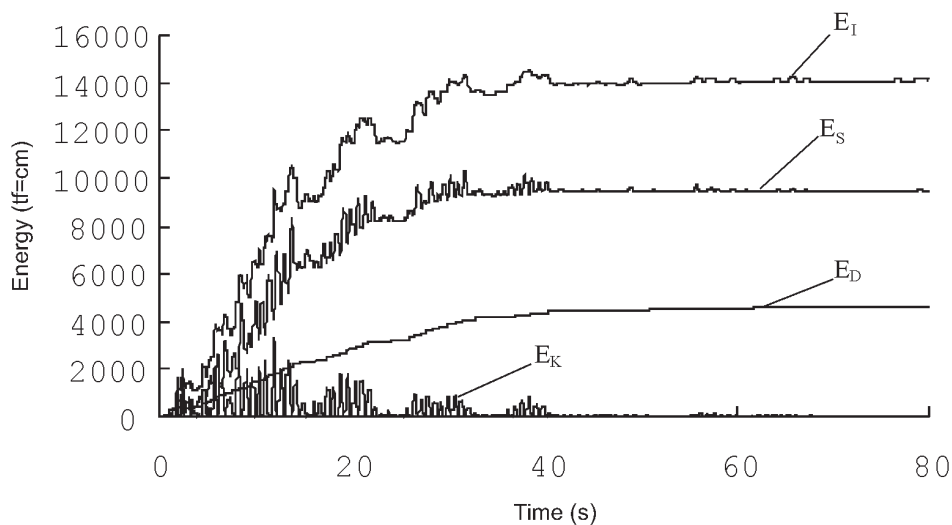


Figura 17. Respuesta de la distribución de energía en el modelo analítico con riostras

7. COMPENDIO SOBRE LOS SISTEMAS DE CONTROL SÍSMICO

La comprensión del concepto físico de conservación de energía es básica para el planteamiento de innovaciones en cualquier sistema estructural. Los tres tipos de elementos que forman los sistemas vibratorios son: elementos de inercia, que almacenan y liberan energía cinética y están asociados con la aceleración del sistema; elementos de rigidez, que almacenan y liberan energía potencial y están asociados con la deformación o desplazamientos; y elementos de disipación, que representan la pérdida de energía en el sistema y están asociados con la velocidad y desplazamiento. La energía de respuesta de estos elementos iguala la energía externa provocada por una excitación del sistema por fuerzas y momentos externos, o por alteraciones externas provenientes de desplazamientos iniciales prescritos o de velocidades iniciales.

Los sistemas de control de respuesta sísmica trabajan la disipación de energía por medio de amortiguamiento viscoso, fricción seca, fricción interna en los materiales, calor, sonido, amortiguamiento material o sólido o histerético, o amortiguamiento de fluido, y disminución de la energía de excitación con aisladores.

Una de las recomendaciones para un buen diseño estructural consiste en minimizar la energía mecánica en la estructura, que se compone de la energía cinética y la energía potencial o de deformación. Para una estructura completamente rígida, la energía cinética es máxima y la energía potencial o deformación es cero. Por otro lado, para un sistema ideal, completamente aislado en la base, se tendrá cero de energía cinética y cero de energía potencial o de deformación. Si la energía de deformación es cero, la estructura no tendría forma de fallar (Wilson, 2000). Con este razonamiento simple, se confirma la validez del uso de los sistemas de control de respuesta sísmica en el diseño de edificaciones.

Algunas de las ventajas estructurales del uso de estos dispositivos son: reducción de fuerzas cortantes, aceleraciones y derivas en cada nivel, y reducción de daños en elementos estructurales y no estructurales. Además de estas ventajas mecánicas se cuenta con los beneficios arquitectónicos: espacios más grandes y limpios, implementación y uso de nuevos materiales para elementos no estructurales, confort y seguridad a los usuarios.

8. CONCLUSIONES

El uso de los sistemas no convencionales de control de respuesta sísmica es cada vez más común en el mundo y constituye una técnica imprescindible en las edificaciones modernas.

Aunque la implantación de estas técnicas puede implicar un costo inicial mayor, el beneficio y la economía se cumplen en el momento de un sismo. La estructura complementada con un sistema de control de respuesta sísmica no sufrirá los daños que sufre una estructura convencional, en la que el costo de la rehabilitación es excesivamente alto o, en el peor de los casos, su demolición es inevitable. Considerando el gran número de edificios en el mundo que han sido construidos utilizando estas técnicas, se puede concluir que se está frente a una tecnología del presente y del futuro, que no puede dejarse pasar de largo.

En este artículo se presentaron diferentes clases de dispositivos que existen en el mercado para reducir la energía en la estructura. ¿Por qué si el mercado, la diversidad y el uso en el mundo de estas técnicas son bien amplios, en Colombia todavía no se consideran como solución estructural?

Algunos de estos dispositivos son fáciles de construir y se podría implementar su tecnología en el país, sin embargo, se debe tener cuidado a la hora de caracterizar sus propiedades dinámicas y mecánicas, indispensables para llevar a cabo un diseño estructural seguro. Esta caracterización implica la realización de ensayos de los dispositivos y de las



edificaciones con los dispositivos para tener criterios confiables para el diseño.

Algunas universidades e investigadores nacionales ya han empezado a realizar ensayos de modelos de edificaciones con control de respuesta sísmica, por lo cual se espera que, en un futuro no muy lejano, se disponga de elementos de juicio para utilizar estos sistemas en el diseño de edificaciones reales.

En futuros artículos se presentarán los resultados de las investigaciones que desarrolla el coautor Juan Andrés Oviedo Amézquita sobre la influencia de la aplicación de un tipo especial de dispositivo en edificaciones colombianas.

REFERENCIAS

- [1] Aiken, Ian D. Testing of seismic isolators and dampers: considerations and limitations. Proceedings, Structural Engineering World Congress, San Francisco, California, July 1998.
- [2] Aiken, Ian D.; Nims, Douglas K.; Whittaker, Andrew S. and Kelly, James M. Testing of passive energy dissipation systems. *Earthquake Spectra* Vol. 9, No. 3, 1993.
- [3] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente. NSR-98. 1998.
- [4] Architectural Institute of Japan. Recommendation for the design of base isolated building, 3 ed., Sep, 2001.
- [5] Bonett, Ricardo L. Protección pasiva de estructuras aporticadas de concreto reforzado con el sistema Knee-Bracing. III Congreso Colombiano de Ingeniería Sísmica, 2005.
- [6] Bozzo R., Luis y Ordóñez O., Daniel. Disipadores mecánicos de energía. *Revista Bit*, marzo 2001. Chile.
- [7] Clark, Peter; Aiken, Ian; Tajirian, Fred; Kasai, Kazuhiko; Ko, Eric and Kimura, Isao. Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices. Proceedings, 68th Annual Convention, Santa Barbara, California, Structural Engineers Association of California, October 1999.
- [8] Dargush, G. F. and Soong, T. T. Recent structural applications of passive energy dissipation in North America. Workshop Technical Papers. ATC-15-5.
- [9] Higashino, Masahiko and Okamoto, Shin. (eds). Response control and seismic isolation of buildings. CIB/TG44. Taylor and Francis. September 2006.
- [10] Housner, G. W. (1956). Limit design of structures to resist earthquakes. Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.
- [11] Japan Structural Engineer and Consultant Association. Recommendation for design of structural controlled buildings, Dec. 2002.
- [12] Kelly, J. M.; Skinner, R. I. and Heine, A. J. (1972). Mechanism of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures. *Bull. N. Z. Nat. Soc. for Earthquake Engineering*, 5(3), p. 63-88.
- [13] 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.
- [14] Kitamura, Haruyuki; Teramoto, Takayuki and Kobori, Tohru. Advanced technology in response control of high-rise buildings. Second Conference on Tall Building in Seismic Regions. Los Angeles, May, 1991.
- [15] Moncayo, Hever; Gómez, Daniel y Thomson, Meter. Aspectos del modelamiento de estructuras para la implementación de sistemas de control activo. III Congreso Colombiano de Ingeniería Sísmica, Cali, 2005.
- [16] Newell, James; Uang, Chia-Ming and Benzoni, Gianmario. Subassemblage testing of Corebrace buckling-restrained braces (G series), Final report to Corebrace, University of California. San Diego, Jan. 2006.
- [17] Oviedo, Juan A. and Kitamura, Haruyuki. Application of seismic response control technique to a building designed under Colombian regulations. *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering yearbook*, Publication No. 44, 2005.
- [18] Reyes, J. C.; Moreno, D. M. y Yamin, L. E. Estudio experimental de aisladores sísmicos tipo péndulo de fricción en modelos a escala reducida. III Congreso Colombiano de Ingeniería Sísmica, Cali, 2005.

- [19] Reyes, J. C.; Toro, G.; Turga, M. C.; Tejeiro, S. y Mariño, R. Respuesta experimental de edificios a escala con disipadores pasivos histeréticos y viscosos. III Congreso Colombiano de Ingeniería Sísmica, Cali, 2005.
- [20] Sabelli, Rafael; Mahin, Stephen and Chang, Chunho. Seismic demands of steel braced frame buildings with buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, vol. 25 N° 5, 2003.
- [21] Skinner, R. I.; Tyler, R. G.; Heine, A. J. and Robinson, W. J. (1980). *Hysteretic dampers for the protection of structures from earthquake*. Bull. N. Z. Nat. Soc. for Earthquake Engineering, 13.
- [22] Whittaker, A. S.; Bertero, V. V.; Thompson, C. L. and Alonso, L. J. (1991). Seismic testing of steel plate energy dissipation devices. *Earthquake Spectra*, 7(4), 563-604.
- [23] Wilson, Edward L. *Three dimensional static and dynamic analysis of structures*. 3 ed. Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA. 2000.