

Técnicas para Protección Sísmica Mediante Aisladores en Puentes de Concreto.

María Angélica Sánchez Rueda

Trabajo de Grado para Optar el Título de Especialista en Estructuras

Director

Álvaro Viviescas Jaimes

Ph. D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Especialización en Estructuras

Bucaramanga

2017

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por haberme permitido alcanzar esta meta en mi vida.

Es un orgullo y placer poder expresar y dedicar este logro a mis padres, pues son quienes a través de mucho esfuerzo, perseverancia, amor y apoyo incondicional han hecho posible mis logros actuales.

Gracias a mi profesor supervisor, que tuvo siempre buena disposición y me apoyó durante el desarrollo del presente trabajo.

Y por último, agradezco a todas las personas que de una u otra forma me ayudaron durante el transcurso del curso; docentes, compañeros, amigos y familiares.

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Control Estructural.....	14
2. Tipos de sistemas de control.....	15
2.1 Sistemas activos de protección sísmica.....	15
2.1.1 Sistema de amortiguación de masa activa (AMD)	15
2.1.2 Sistema de rigidez variable (AVS)	17
2.2 Sistemas pasivos de protección sísmica.....	20
2.2.1 Disipadores de energía.....	20
2.2.2 Aisladores de base.....	21
2.2.3 Amortiguadores resonantes.....	22
3. Sistemas de asilamiento más utilizados	23
3.1 Amortiguadores histeréticos de acero.....	24
3.2 Amortiguadores de extrusión de plomo.....	25
3.3 Apoyos de goma-laminados.....	27
3.4 Apoyos laminados con corazón de plomo.....	28
4. Aplicación de los sistemas de control en puentes.....	29
4.1 Aplicación internacional.....	29
4.1.1 Puente Marga-Marga, Chile.....	30

4.1.2 Puente Golden Gate, San Francisco.....	31
4.1.3 Puente Vasco de Gama, Portugal.....	33
4.1.4 Puente Rion Antirion, Grecia.....	34
4.2 Aplicación nacional.	35
4.2.1 Viaducto Portachuelo, Zipaquirá.	36
4.2.2 Intersección vial Redoma San Mateo, Cúcuta.	38
4.2.3 Viaducto Helicoidal, Pereira.....	39
4.2.4 Puente La Estampilla, Manizales.....	41
5. Ventajas de los sistemas de protección sísmica.....	42
6. Conclusiones.....	43
Citas Bibliográficas.....	45
Referencias Bibliográficas.....	49

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama conceptual del sistema AMD.....	16
Figura 2. Edificio Kyobashi Seiwa.	17
Figura 3. Edificio de control del instituto de Investigación Técnica de Kajima.....	18
Figura 4. Amortiguador de fluido viscoso.	21
Figura 5. Movimientos generados por un sismo en una estructura con y sin aislación sísmica de base.	21
Figura 6. Aislador elastomérico con núcleo central de plomo en forma cilíndrica (Apoyo LRB).	22
Figura 7. Amortiguador de masa.	23
Figura 8. Amortiguador hysterético de acero.	24
Figura 9. Amortiguador de extrusión plomo tipo tubo contraído. Comportamiento Sísmico de Puentes sobre Apoyos Elastoméricos. (1996). 90th ed.....	25
Figura 10. Amortiguador de extrusión plomo tipo vástago pandeado. Comportamiento Sísmico de Puentes sobre Apoyos Elastoméricos. (1996). 90th ed.....	26
Figura 11. Apoyo de goma laminado típico.....	27
Figura 12. Apoyo elastomérico reforzado con corazón de plomo. Comportamiento Sísmico de Puentes sobre Apoyos Elastoméricos.	29
Figura 13. Puente Marga – Marga, Chile.....	30

Figura 14. Aisladores de goma de alto amortiguamiento con placas metálicas.	31
Figura 15. Puente Golden Gate, San Francisco.	32
Figura 16, Puente Vasco de Gama en Lisboa - Turismo Ociogo.....	33
Figura 17. . POT Bearing.....	34
Figura 18. Puente Rion Antirion.....	34
Figura 19. . Dispositivos de amortiguamiento de fluidos viscosos empleados en el puente Rion Antirion.....	35
Figura 20. Viaducto Portachuelo, Zipaquirá.....	37
Figura 21. Aisladores de bajo amortiguamiento en Viaducto Portachuelo.	38
Figura 22. . Puente sobre la redoma San Mateo	39
Figura 23. Viaducto Helicoidal, Pereira.	40
Figura 24. Viaducto helicoidal.....	40
Figura 25. Puente La Estampilla, Manizales. Bracamonte, J. and perfil,	41

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Sistema de control activo estructural en edificios de Japón.</i>	19

Resumen

Título: Técnicas para protección sísmica mediante aisladores en puentes de concreto.*

Autor: María Angélica Sánchez Rueda **

Palabras Clave: Sistemas de control, protección sísmica, diseño sismorresistente, control pasivo.

Descripción:

En el diseño estructural, la capacidad de disipación de energía en elementos que conforman los sistemas resistentes a fuerzas dinámicas, como lo son las fuerzas impartidas por la actividad de sismos o vientos, es suministrada por un minucioso detallado del acero de refuerzo y dimensiones en las secciones transversales de los elementos. Esto se desarrolla bajo muchas suposiciones que en algunos casos no corresponden a la realidad, y como es de esperarse, se producen resultados inexactos y un desconocimiento del desempeño de la estructura. Una alternativa de diseño sismorresistente diferente a la tradicional y que actualmente constituye una alternativa factible, es el diseño sismorresistente mediante sistemas de control de vibraciones; es por esto, que en este proyecto se presentan los sistemas de control de vibraciones, los cuales son una serie de dispositivos adaptados a las estructuras que absorben gran parte de la energía sísmica y liberan los elementos estructurales en gran porcentaje de la acción sísmica, logrando disminuir en ellas las sollicitaciones y las respuestas con el objetivo de conseguir un buen desempeño, limitar el daño y economizar los costos de reparación de fallas localizadas. Los sistemas de control que se analizarán en el presente artículo son los sistemas de control activo y control pasivo, haciendo énfasis en los últimos mencionados.

* Monografía.

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Especialización en Estructuras Director Álvaro Viviescas, Ing. Civil – Ph. D.

Abstract

Title: Techniques for seismic protection through isolators in concrete bridges.*

Author: Maria Angelica Sanchez Rueda**

Keywords: Control systems, seismic protection, seismic design, passive control.

Description:

In the structural design, the capacity dissipation of energy in elements that constitute the dynamic forces tolerant systems, as given by the seismic activity and wind power is supplied by a detailed minute of reinforcing steel. This practice is performed under many assumptions which sometimes do not correspond to reality and as expected produce inaccurate results and a lack of performance of the structure. An alternative of different earthquake-resistant design to the traditional and that at the moment constitute a feasible alternative, is the Earthquake-Resistant Design by means of Vibrations Control Device; this is the reason that in this project mentioned control systems vibration, which are a series of devices adapted to the structures that absorb much of the released seismic energy and structural elements in large percentage of the seismic action, decreasing the stresses on them and responses in order to achieve good performance, limiting the damage and lower repair costs to localized failures. The control systems are analyzed in this article are the active control systems and passive control, amphasizing the last mentioned.

* Monograph.

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Álvaro Viviecas, Ing. Civil – Ph. D.

Introducción

En la ocurrencia de un evento sísmico existe la posibilidad de que este destruya todo tipo de estructuras que no cumplan con el debido diseño para soportar estos movimientos, es por esto que cuando se presenta un sismo en un lugar en donde no se cuentan con estructuras para soportar estas grandes sollicitaciones, se tienen consecuencias catastróficas que ya se han podido evidenciar en diferentes partes del mundo, las cuales han dejado poblaciones con pérdidas tanto materiales como humanas. [1, 2, 3]

Esto nos lleva a que controlar la respuesta estructural frente a cargas dinámicas es un factor importante para mantener la seguridad de la edificación y de este modo mantener a salvo a los usuarios.

Así, pues, para poder lograr dicha seguridad se ha trabajado en el transcurso del tiempo en mejorar los elementos que son diseñados para tomar gran mayoría de los desplazamientos ocasionados por los sismos en una estructura, lo cual representa una disminución en las posibilidades de generar daños sobre las construcciones, puesto que estos elementos tienen la capacidad de hacer que la estructura se desplace como una unidad y de este modo evitar la generación de fallas en los elementos estructurales.

En la actualidad existen varias alternativas para reducir la vulnerabilidad estructural [4, 5], pero desafortunadamente algunos sistemas son poco empleados en nuestro país debido a los altos costos que implica su ejecución o por el desconocimiento que se tiene sobre el sistema, consecuencia de la escasa formación técnica en esta temática.

Por lo tanto en este documento se presenta una revisión y documentación de los sistemas de protección sísmica enfocados a puentes de concreto, con el objeto de comparar sus características, tipos y funcionalidades, entre sí, y verificar su implementación en algunas partes del mundo, colocando en contexto la realidad en la utilización y aceptación actual de estos sistemas.

1. Control Estructural

Existen varias razones por las que las estructuras sufren daños debido a los terremotos, algunas de ellas son la elección de los materiales, errores de diseño y/o construcción y diseño de cimentación no adecuada para el terreno establecido.

A través de los sistemas de protección sísmica o de control estructural se pueden disminuir los daños tanto de los elementos estructurales como de los no estructurales de los edificios y reducir el riesgo de accidentes de sus habitantes.

Los sistemas de control estructural son elementos que se acoplan a la estructura para reducir y controlar las vibraciones de la misma frente a una acción sísmica, absorbiendo gran parte de la energía integrada al sistema.

Emplear estos sistemas de control generan ciertas ventajas en la estructura como la reducción de la demanda sísmica debido a que se logran períodos de vibración de la estructura diferentes a los de la excitación, evadiendo así la resonancia; se aumenta el amortiguamiento de la estructura, disminuyendo deformaciones debido al sismo; se generan zonas de fallo y se crea la alternativa de reponer los elementos en estas zonas. [6]

2. Tipos de sistemas de control.

2.1 Sistemas activos de protección sísmica.

Estos sistemas monitorean la respuesta sísmica de la estructura en tiempo real, y eliminan las vibraciones mediante la aplicación de fuerzas externas. El movimiento, las excitaciones externas y la respuesta de la estructura se detectan utilizando sensores instalados en varias partes de la estructura; estos sensores envían señales a dispositivos (masa activa, tendones activos, dispositivo de fricción activo o apéndices dinámicos) que aplican fuerzas a la estructura para contrarrestar el movimiento [7]. Todos estos dispositivos tienen una desventaja, puesto que requieren de abastecimiento de energía externa para su buen funcionamiento, por lo tanto, en caso de falla en el suministro de energía dejan de funcionar; es por esto que sería recomendable diseñar su alimentación con sistemas autónomos de energía (paneles solares, carreteras con energía cinética, energía eólica).

2.1.1 Sistema de amortiguación de masa activa (AMD): Estos dispositivos son los mismos sistemas de amortiguación de masa pasiva adicionándoles actuadores hidráulicos que controlan el movimiento del bloque rígido respecto del edificio. Las fuerzas generadas por el bloque sobre el edificio cambian con la posición de los actuadores hidráulicos y controlando el movimiento de estos, se puede ejercer una acción efectiva de control sobre el edificio. En la figura 1 se ilustra de una forma conceptual este sistema; el cual no sólo controla la vibración lateral sino también la

vibración torsional del edificio. Adicional a esto, no es mayormente afectado por cambios en las características de vibración del edificio. [8]

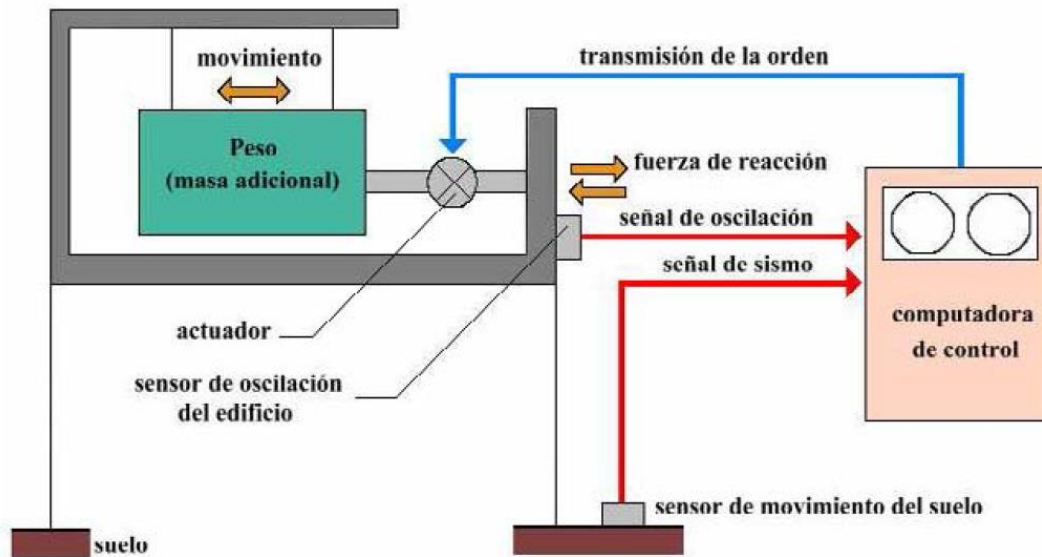


Figura 1. Diagrama conceptual del sistema AMD.

Nota: Adaptado de: Avilés, R. (2001). *Dispositivos para el control de vibraciones*. Ingeniero Civil en Obras Civiles. Universidad Austral de Chile.

El edificio Kyobashi Seiwa, Tokyo (Figura 2); fue el primer edificio o estructura real en la que se utilizó este sistema AMD, brindándole comodidad a los usuarios durante sismos moderados y fuertes.

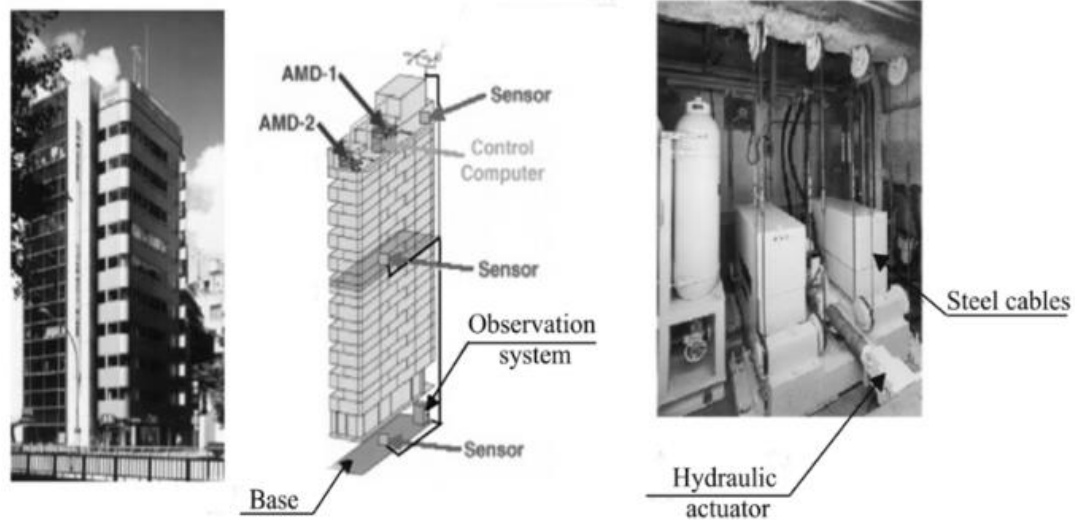


Figura 2. Edificio Kyobashi Seiwa.

Nota: Adaptado de: Researchgate https://www.researchgate.net/figure/38105972_fig1_Fig3-Controllability-of-Kyobashi-Seiwa-Building.

2.1.2 Sistema de rigidez variable (AVS): Este sistema puede afectar la rigidez de la estructura escogiendo una opción de un número de diferentes posibilidades, teniendo en cuenta las características específicas del movimiento del suelo; un sistema mecánico es impulsado por una cantidad pequeña de energía, logrando de este modo generar un cambio de rigidez en la estructura. La ventaja de este sistema es que puede realizar un efectivo control durante sismos extremadamente severos. [8]

Uno de los edificios del Instituto de Investigación Técnica de Kajima (Figura 3), cuenta con el sistema AVS. La estructura es de acero con una altura de tres niveles.



Figura 3. Edificio de control del instituto de Investigación Técnica de Kajima

Nota. Adaptado de: Avilés, R. (2001). *Dispositivos para el control de vibraciones*. Ingeniero Civil en Obras Civiles. Universidad Austral de Chile.

Los sistemas activos de protección sísmica son usualmente utilizados en Japón como mecanismo de control de vibraciones. En la tabla 1, se puede apreciar un listado de proyectos en donde se aplica el control estructural activo en Japón.

Tabla 1.

Sistema de control activo estructural en edificios de Japón.

Building	Type	Stories Above/ Below	Height (m)	Mass of AMD or HMD (t)	Total Mass (t)	Period (s)	Control Type
Kyobashi Seiwa Building, Tokyo, Office, 1989	Steel	11/1	33	5	390	1.1 T 0.76 L	AMD
Kajima Research Institute, Tokyo, Laboratory, 1990	Steel	3/0	12		400	0.41 T 0.32 L	AVS
Sendagaya INTES, Tokyo, Office, 1992	SRC Steel	11/1	44	72	3,300		AMD
Applause Tower, Osaka, Hotel/Office, 1992	Steel	34/3	161	480	13,000	4.7 T 4.8 L	AMD
Kansai Airport Control Tower, Osaka, 1992	Steel	7/0	86	10	2,600	1.3 T 1.3 L	HMD
Osaka ORC200, Osaka, Office/Hotel, 1992	Steel	50/3	200	200	57,000	4.7 T 4.7 L	HMD
Ando Nishikicho Building, Tokyo, Office, 1993	Steel	14/2	54	24	2,500	1.4 T 1.4 L	HMD
Yokohama Landmark Tower, Yokohama, Hotel/Office, 1993	Steel	70/3	296	340	26,000	6.0 T 6.1 L	HMD
Long Term Credit Bank, Tokyo, Office, 1993	Steel	21/5	129	195	39,000	3.0 T 3.1 L	HMD
Porte Kanazawa, Kanazawa, Hotel/Office, 1994	Steel	29/2	121	100	27,000	3.2 T 3.4 L	HMD
Shinjuku Park Tower, Office/Hotel, 1994	Steel	52/5	232	330	120,000	5.2 T 4.5 L	HMD
RIHGA Royal Hotel, Hiroshima, Hotel, 1994	Steel	35/2	150		83,000	3.6 T 3.8 L	HMD
MHI Yokohama Building, Yokohama, Office, 1994	Steel	34/2	152			3.9 T 3.8 L	HMD
Hikarigaoka City Building, Tokyo, Office/Hotel, 1994	Steel	24/3	100	80	29,000	2.2 T 2.3 L	HMD
Hamamatsu ACT City, Hamamatsu, Office/Hotel, 1994	Steel	46/2	212	180	110,000	4.7 T 4.5 L	HMD
Riverside Sumida, Tokyo, Residential, 1994	Steel	33/2	134	30	52,000	3.5 T 3.5 L	AMD
Hotel Ocean 45, Miyazaki, 1994	Steel	43/2	154	240	80,000	3.6 T 3.9 L	HMD TMD
Osaka World Trade Center, Osaka, Office, 1995	Steel	52/3	252		75,000	5.3 T 5.8 L	HMD

Fuente: Nishitani, A.. Application of Active Structural Control in Japan. Progress in Structural Engineering and Materials, 1998 Vol 1, pg 301-307.

2.2 Sistemas pasivos de protección sísmica.

Estos sistemas tienen la capacidad de absorber un porcentaje de la respuesta dinámica de las estructuras, ya que son diseñados para disipar energía por medio de calor, logrando así que la fuerza que toman los elementos que conforman el sistema estructural sea menor.

Los principales sistemas de control pasivo son los disipadores de energía, los aisladores de base y los amortiguadores resonantes. [9, 10]

2.2.1 Disipadores de energía: Estos dispositivos permiten aumentar el amortiguamiento, rigidez y la capacidad estructural disipando la energía causada por sismos, vientos fuertes u otras sollicitudes de origen dinámico, protegiendo de este modo la estructura de daños en elementos estructurales y no estructurales. Pueden ser implementados tanto en el diseño de estructuras nuevas, como en la rehabilitación sísmica de una estructura existente [8, 11, 12]. Se pueden dividir en dos grupos: los que disipan energía histerética, como los amortiguadores por plastificación de metales (MD), amortiguadores por fricción (FD) y los amortiguadores por extrusión de plomo (LED); y los de carácter viscoso, como los amortiguadores viscoelásticos (VE) y los amortiguadores de fluidos viscosos (VF). En la figura 4, se puede ver el dispositivo VF empleado en el puente Rion-Antirion (Grecia) durante una prueba de laboratorio.



Figura 4. Amortiguador de fluido viscoso.

Nota: Adaptado de: Fipindustriale Recuperado de:

https://www.fipindustriale.it/public/S00_ANTISISMICA_esp.pdf

2.2.2 Aisladores de base: Son dispositivos que se colocan generalmente entre la estructura y su fundación, con el propósito de separar la superestructura del movimiento del terreno donde se ubica la misma logrando reducir la rigidez del sistema estructural (Figura 5), ya que se aumenta el periodo de vibración de la estructura aislada casi el triple de la que no lo está. Al igual que los disipadores de energía, estos dispositivos también pueden ser implementados tanto en estructuras nuevas como en las ya existentes que requieran de refuerzo o rehabilitación [13].

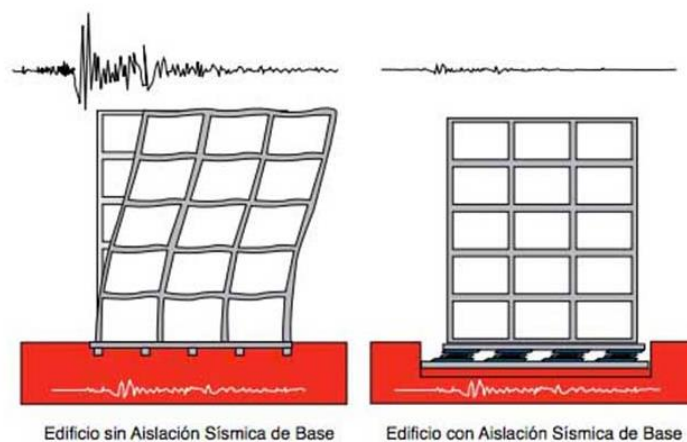


Figura 5. Movimientos generados por un sismo en una estructura con y sin aislación sísmica de base.

Nota: Adaptado de: <https://liberal.com.mx/que-son-los-sistemas-de-proteccion-sismica/>

Algunos dispositivos que hacen parte de este grupo de sistema son los apoyos laminados (RB), apoyos laminados de gran amortiguamiento (HDR), apoyos laminados con corazón de plomo (LRB), ilustrado en Figura 6 (aislador empleado en el Viaducto Cartagena); Apoyos laminados con disipadores de energía y apoyos deslizantes lubricados con disipadores de energía (SB).



Figura 6. Aislador elastomérico con núcleo central de plomo en forma cilíndrica (Apoyo LRB).

2.2.3 Amortiguadores resonantes: Estos dispositivos reducen la respuesta dinámica de la estructura; si el período de vibración del amortiguador resonante está ajustado para ser el mismo que el de la fuerza armónica perturbadora, se mantendrá inmóvil la masa principal (estructura) [14]. Usualmente estos dispositivos son instalados en la parte superior de las estructuras. Existen amortiguadores de masa (TMD) como se muestra en la figura 7, y amortiguadores de líquido (TLD); los primeros mencionados son en los que un elemento sólido de metal o de concreto actúa como masa secundaria; y los segundos son en los que se sustituye el elemento sólido por un tanque líquido, que cumpliría los mismos propósitos de la masa secundaria.

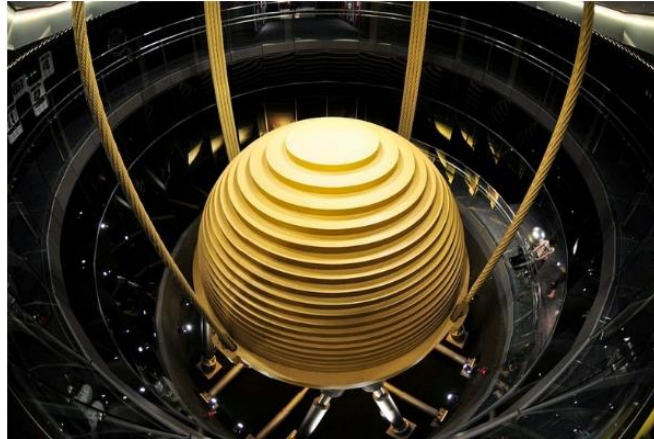


Figura 7. Amortiguador de masa.

Nota: Adaptado de: Fj-lasideasdejeugenio.blogspot.com.co. (2017). *El rascacielos Taipei 101 de Taiwán*. [online] Available at: <http://fj-lasideasdejeugenio.blogspot.com.co/2013/09/el-rascacielos-taipei-101-de-taiwan.html>

La principal función de un sistema aislador es soportar a la estructura permitiéndole un alto grado de flexibilidad horizontal; la vida útil esperada es entre 30 a 80 años, período durante el cual el aislador debe trabajar satisfactoriamente bajo todos los cambios de temperatura, incluyendo corrosión de los metales y deterioro del elastómero.

3. Sistemas de asilamiento más utilizados

Actualmente, los sistemas de aislamiento más implementados son los amortiguadores histeréticos de acero, amortiguadores de extrusión de plomo, apoyos de goma-laminados y apoyos laminados

con corazón de plomo [15]. Por consiguiente, se describirán las características y funciones principales de cada uno de estos sistemas.

3.1 Amortiguadores histeréticos de acero.

Desde un principio el acero se manejó como un material amortiguador, y aunque ocasionalmente presentara fallas por fatiga en la soldadura y concentraciones de esfuerzo, no presentaba inconvenientes respecto al diseño, construcción y mantenimiento. La utilización de estos amortiguadores producía una disminución en las fuerzas y con esto una mejora en el comportamiento de estructuras de acero diseñadas por sismo.

Este tipo de amortiguadores emplean la deformación histerética de los elementos de acero de diferentes formas como fuente de energía de disipación, programados para garantizar distintos ciclos de histéresis estables [16]. En puentes, los elementos de acero más empleados son la luna creciente y el pin simple o doble, y los amortiguadores histeréticos de acero (figura 8) pueden combinarse con unidades de transmisión de choque.



Figura 8. Amortiguador histerético de acero.

Nota: Adaptado de: (2016). Available at:

https://www.fipindustriale.it/public/S00_ANTISISMICA_esp.pdf

3.2 Amortiguadores de extrusión de plomo.

Estos sistemas son adaptados para absorber la energía del movimiento de una estructura en un sismo; en ellos la energía mecánica se transforma en calor por la extrusión del plomo dentro del tubo.

El proceso de extrusión se lleva a cabo por medio de un émbolo que extrae el plomo a través de un orificio.

Estos amortiguadores por lo general son usados como parte del sistema de aislamiento basal.

Existen dos tipologías, el “tubo contraído” y el “vástago pandeado”.

El tipo tubo contraído consiste básicamente como se muestra en la figura 9, de un tubo con una flecha en la que corren dos pistones, donde por medio de una contracción entre los pistones se fuerza al plomo a ocupar el espacio libre.

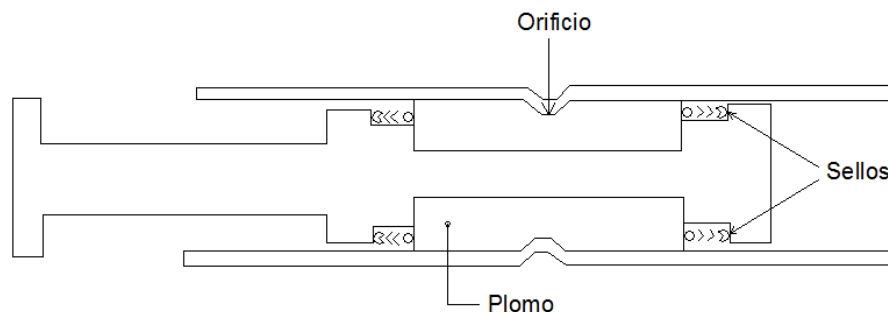


Figura 9. Amortiguador de extrusión plomo tipo tubo contraído. Comportamiento Sísmico de Puentes sobre Apoyos Elastoméricos. (1996). 90th ed.

En la figura 10 se puede apreciar el tipo vástago pandeado, en el que un vástago pandeado como su nombre lo indica, es empujado mediante un cilindro de plomo, convirtiéndolo en la tipología más fácil para fabricar en la práctica.

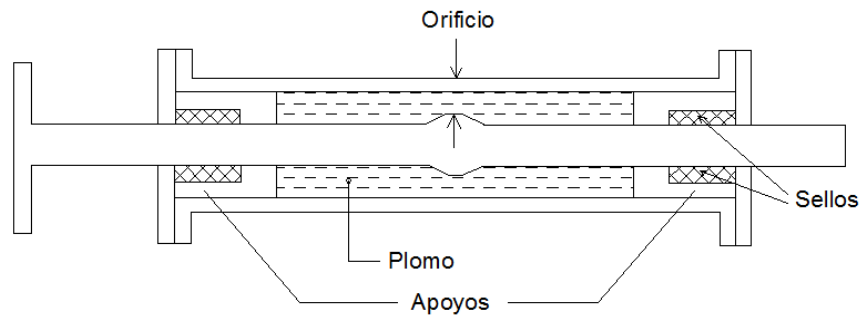


Figura 10. Amortiguador de extrusión plomo tipo vástago pandeado. Comportamiento Sísmico de Puentes sobre Apoyos Elastoméricos. (1996). 90th ed.

Los amortiguadores de extrusión de plomo tienen las siguientes propiedades:

- Su ciclo de histéresis fuerza-desplazamiento es aproximadamente rectangular y depende de las frecuencias de la excitación.
- Por el proceso interrelacionado de recuperación, recristalización y crecimiento de partículas que ocurren durante y después de la extrusión del plomo, la energía absorbida no está alterada por trabajo de endurecimiento, a cambio de esto el plomo siempre vuelve a su estado no deformado inicial. Es por esto que este tipo de amortiguador tiene un período de vida largo y es necesario reemplazarlo luego de ocurrido un sismo importante.
- Es estable en su marcha y no ocurre un daño en su sistema por el posible incremento de las fuerzas en la estructura. Si la temperatura aumenta durante su operación, las fuerzas de extrusión se reducen conduciendo a que la absorción de energía y generación de calor disminuyan. [15]

3.3 Apoyos de goma-laminados.

Es el dispositivo más sencillo en el mundo, el cual se utiliza principalmente para aislar puentes. Está conformado por capas de goma y láminas de acero alternadas y unidas entre sí (figura 11); son diseñados para soportar cargas verticales y proporcionar una resistencia moderada a desplazamientos horizontales, y en algunos casos para controlar la inclinación de la superficie de la superestructura de un puente. [17]

El espesor de las capas de goma es el que define la rigidez del apoyo, por lo tanto, para la rigidez horizontal entre más gruesas sean estas capas, más flexible es el apoyo en esta dirección, mientras que la rigidez vertical se incrementa aumentando el área y reduciendo el espesor de las capas de goma.

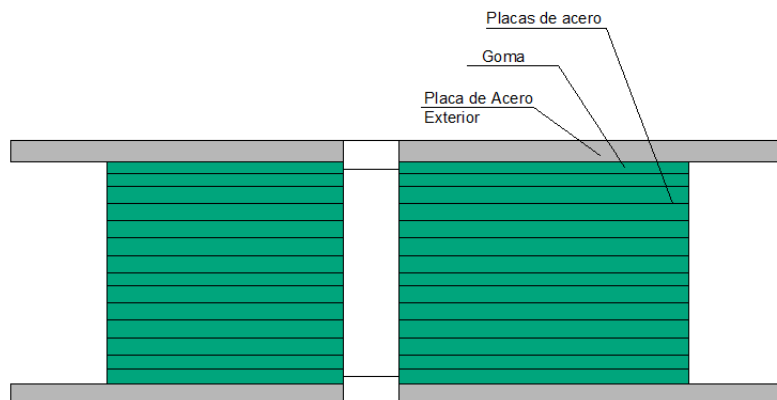


Figura 11. Apoyo de goma laminado típico.

Nota: Adaptado de: Avilés, R. (2001). *Dispositivos para el control de vibraciones*. Ingeniero Civil en Obras Civiles. Universidad Austral de Chile.

Paralelamente, la goma tiene ciertas ventajas sobre otros materiales, ya que cuenta con las siguientes características: Alta resistencia a la compresión, a la fatiga, erosión y corrosión, puede

sufrir grandes deformaciones, cuenta con buena absorción de energía y aislación eléctrica, es relativamente barata y puede ser moldeada a gusto.

Siendo esta empleada en trabajos de ingeniería, puede ser usada en un amplio rango de aplicaciones, como lo son apoyos de puentes, sistemas de aislación acústica, de suspensión y de vibración.

3.4 Apoyos laminados con corazón de plomo.

Este apoyo consiste en capas de goma natural y acero intercaladas, con un núcleo de plomo fijo en su centro en donde el elemento flexible y el disipador de energía se unen como una unidad física (figura 12). El núcleo de plomo se deforma plásticamente en cortante por las placas de acero, haciendo que este trabaje como un amortiguador de histéresis interno y que cumpla la función de proporcionar mayor rigidez para deformaciones pequeñas.

Todos los mecanismos basados en el plomo tienen un proceso rápido de recuperación de las propiedades mecánicas durante y después de la deformación plástica, gracias al proceso interrelacionado de recuperación, recristalización y crecimiento granular de este material. [18]

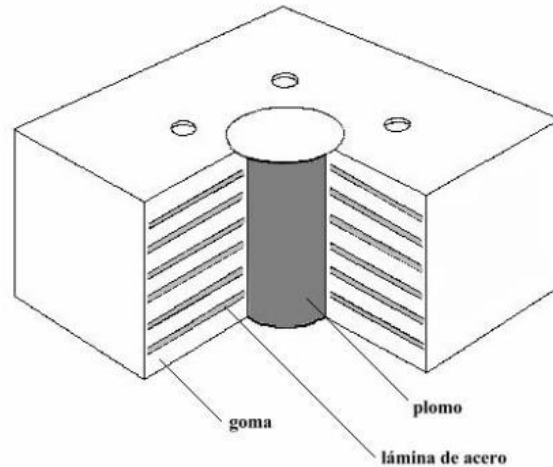


Figura 12. Apoyo elástico reforzado con corazón de plomo. Comportamiento Sísmico de Puentes sobre Apoyos Elastoméricos.

Nota: Adaptado de: (1996). Available at:
<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt90.pdf>

4. Aplicación de los sistemas de control en puentes

4.1 Aplicación internacional.

A lo largo de los años sesenta fue en donde se empezó a pensar que los conceptos de aislamiento de vibración, absorción de vibración y amortiguamiento podrían aplicarse a estructuras civiles sometidas a la acción de viento o sismo, ya que estos estaban siendo desarrollados en la Segunda Guerra Mundial en las estructuras de las aeronaves. En Japón, un profesor de ingeniería construyó una pequeña casa de madera sobre rodillos, para demostrar de esta forma que se podía aislar la estructura de los sismos. [19]

En la década de los años ochenta, Japón inició el estudio y la implementación de técnicas de control estructural haciendo que el diseño de estructuras con tecnologías no convencionales empezara a tener un mayor desarrollo.

En la actualidad, Estados Unidos, China, Japón, Nueva Zelanda e Italia son los países que han hecho más aportes al avance en los sistemas de protección sísmica, impulsando de esta forma a otros países como lo son Chile, México y Argentina a apoyar con el desarrollo. [19]

4.1.1 Puente Marga-Marga, Chile. Ubicado sobre la calle Limache y en el kilómetro 7 de la vía Las Palmas, en Viña del Mar.

El viaducto (figura 13) tiene una longitud de 383m, y se conforma por un tablero continuo con vigas metálicas; el tablero se apoya sobre 36 aisladores sísmicos que se encuentran distribuidos en dos estribos y siete cepas, y está constituido por una losa de hormigón armado continua de 0.27m x 18m la cual se apoya sobre cuatro vigas continuas de acero.



Figura 13. Puente Marga – Marga, Chile.

Nota: Adaptado de: <http://www.jlsingenieria.cl/inspecciones/>

Los aisladores son de goma de alto amortiguamiento con placas metálicas (figura 14), y son de 3 tamaños, los cuales varían de acuerdo al nivel de carga axial.

Debido al sistema de aislación del puente se pueden presentar dos eventos, que las vibraciones ocasionadas por el tránsito sobre la losa de concreto disminuyan por los apoyos, y que los movimientos que llegan desde las cepas no sean transferidos a la losa. [20]

El viaducto cuenta con una red de acelerógrafos que permite monitorear de manera permanente el comportamiento dinámico de la estructura. Esta red está formada por una secuencia de sensores de aceleración, situados en lugares establecidos del puente, conectados a un equipo de registro principal el cual recoge la información procedente de 3 acelerógrafos triaxiales y 9 acelerógrafos distribuidos en el puente.



Figura 14. Aisladores de goma de alto amortiguamiento con placas metálicas.

Nota: Adaptado de: <http://www.jlsingenieria.cl/inspecciones/>

4.1.2 Puente Golden Gate, San Francisco. El puente Golden Gate está ubicado en San Francisco, Estados Unidos, frente al Océano Pacífico y a 20km de una gran falla. Fue construido entre 1933-1937, cuenta con una longitud total de 2740m y una altura de 227m, dejando 67m de altura para el paso de barcos a través de la bahía. El tablero tiene un ancho aproximado de 27m, el cual se divide en 6 carriles para el tráfico de vehículos. El puente además cuenta con dos cables

principales como se pueden observar en la figura 15.a, los cuales sostienen la calle suspendida y adicionalmente transmiten compresión a las torres y a los amarres del puente a cada extremo, la longitud de cada cable es de 2332m y están formados por 25000 cables individuales o alambres de acero galvanizado. [21]

En el reacondicionamiento de los aisladores sísmicos se implementaron dos estrategias en ciertas partes del puente; la primera fue el fortalecimiento de las piezas del puente para soportar las fuerzas de los terremotos fuertes, y la segunda fue hacer el puente más flexible ante el impacto de un terremoto.

Los aisladores sísmicos utilizados fueron apoyos de goma-laminados mostrados en la figura 15.b, con un diámetro de un metro aproximadamente. [22]



a)



b)

Figura 15. Puente Golden Gate, San Francisco.

Nota: Adaptado de: Goldengate.org. (2017). *Preservación Histórica: Reacondicionamiento de los Aisladores Sísmicos.* [online] Available at:

<http://goldengate.org/exhibits/spanish/exhibitarea3b.php>

4.1.3 Puente Vasco de Gama, Portugal. El puente Vasco de Gama ilustrado en la figura 16, está ubicado en el río Tajo, Lisboa – Portugal. Fue construido entre 1995-1998; es el puente más largo de Europa, con 17.20km de longitud total. El tablero es de 30m de ancho, con 6 carriles, y la luz del tramo atirantado es de 420m. Las torres principales resisten cargas hasta de 250km/h de viento. En general, todo el conjunto de la estructura está apto para resistir terremotos superiores al del 1755. [23]



Figura 16, Puente Vasco de Gama en Lisboa - Turismo Ociogo.

Nota: Adaptado de: <http://lisboa.ociogo.com/guia/puente-vasco-de-gama/>

Los dispositivos empleados para soportar estas cargas fueron los apoyos POT (figura 17), ya que estos cumplen el principio de elastómero confinado, y además cuenta con junta de dilatación modular tipo LR9. [24]

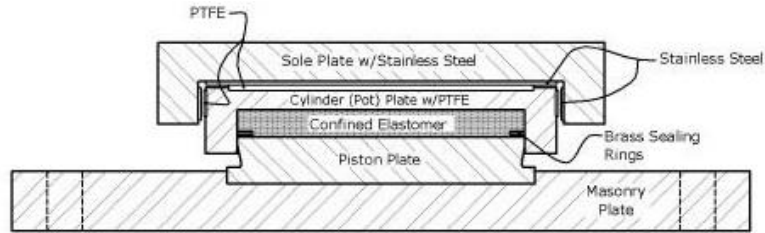


Figura 17. . POT Bearing.

Nota: Adaptado de: Cosmecinc.com. (2012). *Les appuis à pot*. [online] Available at: <http://www.cosmecinc.com/es/Les%20appuis%20%C3%A0%20pot>

4.1.4 Puente Rion Antirion, Grecia. El puente Rion Antirion o bajo su nombre oficial Puente Charilaos Trikoupis (figura 18), está ubicado en el Estrecho de Corinto, empalmando las ciudades de Rio y Antirio en Grecia. Fue construido entre 1998-2004. Cuenta con una longitud total de 2.90km aproximadamente, y un ancho de 28m divididos en un total de 6 carriles. [25, 26]



Figura 18. Puente Rion Antirion.

Nota: Adaptado de: <http://www.skyscrapercity.com>

El puente fue diseñado para resistir fuerzas de viento de hasta 250km/h, soportar terremotos de hasta 7° en la escala de Richter y absorber desplazamientos entre sus pilas; se emplearon dispositivos de amortiguamiento de fluidos viscosos (figura 19), los cuales se encargan de que la

el tablero se pueda desplazar frente a la ocurrencia de un terremoto, pero no frente a las fuerzas de viento evitando de este modo el daño de las torres. [27]

Los materiales empleados para la construcción del puente fueron el acero y el hormigón, puesto que estos son los que mejor comportamiento tienen ante un terremoto, y también son los más usados en la construcción de este tipo de puentes.



Figura 19. . Dispositivos de amortiguamiento de fluidos viscosos empleados en el puente Rion Antirion.

Nota: Adaptado de: FIP INDUSTRIALE (2002). [image] Available at: https://www.fipindustriale.it/public/soluzioni/schede/ITA_RionAntirion_Bridge.pdf

4.2 Aplicación nacional.

Colombia cuenta con una alta amenaza sísmica la cual es especialmente elevada en las regiones Andina, Pacífica y Caribe, sitio por el cual cruzan los tres ramales de la cordillera de los Andes y donde se agrupan más de dos tercios de la población nacional. Las principales fallas geológicas activas son paralelas a las cordilleras, y cruzan el país de norte a sur. Es por esto que las primordiales vías y centros urbanos del país están en constante exposición a movimientos telúricos.

Estas condiciones de hacen que sea de interés evaluar la aplicación de los sistemas de protección en puentes. [10, 13, 28]

En la historia del país se han presentado fuertes sismos que han cobrado muchas vidas y valiosas pérdidas materiales, comprobando de esta forma la alta amenaza sísmica en la que se encuentra. Entre estos sismos se destacan el sismo de Tumaco que se presentó en el año 1906, generando un tsunami devastador ya que alcanzó una magnitud de momento de 9.20, el sismo de Popayán el cual sucedió en el año 1983 destruyendo por completo esta ciudad, y el sismo de Armenia el ocurrió en 1999 devastando parcialmente la ciudad y el cual causó 1185 muertes. El más reciente presentado fue el de Quetame en el 2008 que se sintió en la capital del País. [29]

A continuación, se mencionaran las ventajas de utilizar elementos de aislamiento sísmico en puentes sometidos a diferentes escenarios de la sismicidad colombiana mostrando algunos de los principales proyectos en los cuales los aisladores sísmicos se emplearon con éxito, demostrando la validez de utilizar la protección sísmica en los proyectos de infraestructura del país.

4.2.1 Viaducto Portachuelo, Zipaquirá. El viaducto Portachuelo ilustrado en la figura 20, fue construido en el 2009 y es uno de los primeros proyectos en donde se aplica el sistema de aislación sísmica en Colombia; está ubicado en zona de amenaza sísmica intermedia, exactamente a 30km al norte de la ciudad de Bogotá. Lo conforman dos puentes paralelos de 363m de longitud y estos están compuestos con un tablero de 10.30m de ancho, el cual incluye dos carriles más dos impostas laterales prefabricadas. El tablero fue construido por el método tramo a tramo y se fundió en 5 etapas de hormigonado, este cuenta con losa pos-tensada aligerada. La infraestructura consta de 13 pilas, cada una con dos columnas de 1.40m de diámetro. Las cimentaciones son profundas, con pilotes de 0.60m de diámetro. [30]



Figura 20. Viaducto Portachuelo, Zipaquirá.

Nota: Adaptado de:
<http://www.civilia.com.co/reconocimientos.php?id=MCw2NA==&name=Viaducto%20Portachuelo%20-%20Zipaquir%C3%A1,%20Cundinamarca>

Debido a que la estructura se encuentra en una amenaza sísmica intermedia y teniendo en cuenta la diferencia de rigideces entre las pilas, se utilizaron aisladores de bajo amortiguamiento (LDRB), ya que estos se encargan de darle flexibilidad a la estructura, pero no inducen ninguna disipación de energía adicional al sistema (figura 21). Se ubicaron 4 apoyos rectangulares de 0.70mx0.80mx0.21m (2 en cada estribo), 14 apoyos circulares de 0.75m de diámetro y 0.21m de altura y 12 apoyos circulares de 0.80m de diámetro y 0.25m de altura.

La implementación de los aisladores disminuyó la ocurrencia de los modos torsionales, normalizó el comportamiento dinámico de la estructura y aumentó el período fundamental en ambos sentidos, siendo este 4 veces mayor al que se obtendría en la misma estructura con pilas empotradas a la superestructura.

En términos de aceleración espectral, de tener una aceleración de 0.50g se pasó a obtener una de 0.20g, esto, es decir, un 60% menos. [31]



Figura 21. Aisladores de bajo amortiguamiento en Viaducto Portachuelo.

Nota: Adaptado de:
<http://www.civilia.com.co/reconocimientos.php?id=MCw2NA==&name=Viaducto%20Portachuelo%20-%20Zipaquir%C3%A1,%20Cundinamarca>

El diseño de los aisladores está controlado por las combinaciones de desplazamientos por sismo y servicio, presentando de esta forma mayores desplazamientos a comparación de los aisladores de núcleos de plomo o de goma de alto amortiguamiento; pero los aquí utilizados tienen un menor costo.

4.2.2 Intersección vial Redoma San Mateo, Cúcuta. La intersección Vial Redoma San Mateo (figura 22), está ubicada en Cúcuta, en el centro de la ciudad, ubicada en una zona de amenaza sísmica alta. Fue construida en el 2007 y cuenta con una longitud total de 228m divididos en 6 luces continuas. El tablero tiene 19m de ancho, incluyendo cuatro carriles de 4.10m de ancho, una barrera tipo new jersey la cual hace de separador vial y dos impostas laterales que dan un toque estético a la estructura, además de servir como barreras laterales. El tipo de losa es aligerada postensada con canto constante y fue construida con el método vano a vano en 6 etapas de hormigonado. [30]



Figura 22. . Puente sobre la redoma San Mateo

Nota: Adaptado de: Dronestagram. Available at: <http://www.dronestagr.am/puente-sobre-la-redoma-san-mateo/>

La infraestructura es con pilas individuales de sección rectangular, las cuales por medio de dos apoyos elastoméricos de bajo amortiguamiento soportan el tablero, estos son usados como aisladores sísmicos.

En total se cuentan con 12 apoyos para las pilas y los estribos.

Gracias a la implementación de estos apoyos, los períodos fundamentales en cada sentido alcanzan los 2.50 seg, correspondiendo a una aceleración espectral de diseño de 0.22g. [31]

4.2.3 Viaducto Helicoidal, Pereira. El viaducto Helicoidal se encuentra ubicado en la doble calzada que conduce a Manizales desde Pereira. Fue construido entre 2006-2010. El puente tiene en total una longitud de 395.3m, y de ancho 10m.



Figura 23. Viaducto Helicoidal, Pereira.

Nota: Adaptado de: Available at: <http://www.eje21.com.co/site/wp-content/uploads/2010/04/puente%20helicoidal%20cuatro.jpg>

Al puente se le instalaron múltiples barras de alta resistencia a lo largo de las columnas hasta la cimentación, para que absorbieran las tracciones y compensaran los momentos generados por la excentricidad del proyecto en la construcción de los voladizos.

También se emplearon aisladores sísmicos de péndulo por fricción en donde se presentan los desplazamientos entre las partes de la estructura, liberando así energía en alguna ocurrencia de sismo. [32]



Figura 24. Viaducto helicoidal.

Nota: Adaptado de: Available at: https://www.youtube.com/watch?v=a3ZQbPh_IBg&list=PLhtsP1cMXRd4-4SeoBd6pHK7a3sKje_4h&t=284s&index=7

4.2.4 Puente La Estampilla, Manizales. El viaducto La Estampilla (figura 25.b) está ubicado en la vía que conduce a Chinchiná Caldas, a cinco minutos de Manizales. Fue terminada su construcción en el 2007, y obtuvo el premio nacional de ingeniería en el 2009.

Está conformado por dos puentes curvos paralelos los cuales cuentan con dos carriles cada uno. Tienen una longitud total de 250.4m, y un ancho del tablero de 9.70m. Cada puente está apoyado sobre tres pilas y dos estribos [33]. La superestructura de viga cajón con voladizos sucesivos está apoyada sobre los capiteles que cuentan con aisladores sísmicos tipo péndulo por fricción invertido. Estos aisladores cuentan con una capacidad de desplazamiento lateral de 35cm a cada lado.

Cada puente está apoyado sobre 6 aisladores (figura 25.a), 4 en las pilas los cuales pesan 6000 lb cada uno, y 4 en los estribos con un peso de 2200 lb para cada uno. [34]



a)



b)

Figura 25. Puente La Estampilla, Manizales. Bracamonte, J. and perfil,

Nota: Adaptado de: V. (2017). *AUTOPISTAS DEL CAFE S.A.*. [online] Megaconstrucciones-jlopez.blogspot.com.co.

5. Ventajas de los sistemas de protección sísmica

Un sistema de protección sísmica eficiente debe garantizar la seguridad de la población mediante puentes y edificios firmes, incluso cuando estén bajo condiciones sísmicas riesgosas. Los sistemas de protección sísmica actualmente utilizados en el mercado de la construcción han sido probados a lo largo de los años comprobando que se logran asegurar primeramente las vidas humanas, seguido de que se reducen los daños en los elementos estructurales.

Una de las principales características de cualquiera de estos sistemas, es la capacidad de recentrado, la cual permite volver a la estructura a su posición original incluso luego de eventos sísmicos moderados o severos. [35]

A continuación, se describirán una serie de beneficios que presentan los sistemas de protección sísmica en las estructuras:

DISPOSITIVOS DE AISLAMIENTO SÍSMICO

Aislador con núcleo de plomo:

- Eficaz solución para el reequipamiento o mejora de estructuras existentes
- Su capacidad de recentrado después de un evento sísmico permite mantener la funcionalidad de la estructura. [36]

Aislador deslizante de péndulo:

- Reducción del impacto dinámico en los elementos estructurales, posibilitando estructuras más ligeras y económicas
- Aumento significativo de la seguridad sísmica de la estructura y de sus usuarios.

- Capacidad de re-centrado permitiendo a la estructura retornar a su posición inicial tras desplazamientos excesivos.
- Aplicable tanto a estructuras nuevas como a existentes.
- Libre de mantenimiento debido a la alta durabilidad de la protección anticorrosión y a las altas prestaciones del material deslizante. [37]

DISPOSITIVOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Amortiguadores viscosos:

- Aumento significativo de la seguridad de la estructura y de sus usuarios
- Dispositivos adaptados a las necesidades del cliente.
- Aplicable tanto a estructuras nuevas como a existentes.

6. Conclusiones

El uso de los sistemas de protección sísmica es cada vez más común en el mundo y constituye una técnica indispensable en las estructuras modernas.

Los tipos de sistemas de control de vibraciones que se dividen en pasivos, activos e híbridos; tienen en su implementación ventajas y desventajas, más sin embargo, el sistema de control más empleado es el pasivo debido a su eficiencia, confiabilidad, facilidad de manejo o empleo y practicidad en su mantenimiento.

Sin embargo, los sistemas de control activos se utilizan en su mayoría en estructuras altas, ya que su principal ventaja es la de adaptarse automáticamente a las características de la excitación, mejorando

de este modo principalmente el diseño resistente de las estructuras. Al contrario a esto, su desventaja es que requiere gran cantidad de energía para controlar las vibraciones causadas por terremotos fuertes, y adicional a esto son complejos y requieren de mantenimiento.

Los dispositivos de aislamiento basal, los cuales hacen parte del sistema de control pasivos, son una técnica de diseño sismo resistente que implica agregar un elemento de apoyo de alta flexibilidad o baja resistencia separando a la estructura del movimiento ocasionado por el suelo donde esta se funda. Estos dispositivos son unos de los más prominentes por el buen comportamiento que han presentado estructuras aisladas que los contienen durante terremotos recientes.

Hay que tener en cuenta que la aislación basal y la disipación de energía son dos técnicas complementarias; destacando que la aislación basal es más efectiva en estructuras de mayor rigidez, esto quiere decir, en edificios de baja y mediana altura; mientras que la disipación de energía es más efectiva en estructuras más flexibles, es decir, edificios altos o de mayor elevación. –sin embargo, ambas técnicas pueden ser utilizadas en estructuras nuevas, como en el mejoramiento o rehabilitación de estructuras ya existentes.

La implementación de estas técnicas puede implicar un costo inicial alto, pero a cambio de esto el beneficio y la economía se reflejan en el momento de ocurrencia de un sismo, ya que la estructura diseñada con un sistema de control no sufrirá los daños que sufre una estructura convencional, en donde los costos de la rehabilitación son desmesuradamente altos, o en el peor de los casos, su demolición es inevitable.

En este artículo se presentaron varias clases de dispositivos de control que están en el mercado de la construcción para reducir la energía en la estructura, ¿por qué en Colombia aún no se consideran como solución estructural, siendo que hay diversidad y el uso a nivel mundial son amplios?

Citas Bibliográficas

- [1] Elnashai, A., Jig Kim, S., Jin Yun, G. and Sidarta, D. (2006). *The Yogyakarta Earthquake of May 27, 2006*. [ebook] p.5. Available at: <http://mae.cee.illinois.edu/>
- [2] Elnashai, A., Hurtado, J., Pineda, O. and Sung Kwon, O. (2008). *The Pisco-Chincha Earthquake of August 15, 2007*. [ebook] p.3. Available at: <http://mae.cee.illinois.edu/>
- [3] Elnashai, A., Gencturk, B., Kwon, O. and Al-Qadi, I. (2010). *The Maule (Chile) Earthquake of February 27, 2010. Consequence Assessment and Case Studies*. [ebook] p.3. Available at: <http://mae.cee.illinois.edu/>
- [4] Patiño, J. (2015). Dispositivos de control de respuesta sísmica para estructuras en concreto. [Blog] *Blog 360° en concreto*. Available at: <http://blog.360gradosenconcreto.com/dispositivos-de-control-de-respuesta-sismica-para-estructuras-en-concreto/>
- [5] Protección Sísmica de Estructuras. (2011). Corporación de Desarrollo Tecnológico, CDT. Available at: http://descargas.coreduc.cl/Proteccion_Sismica_de_Estructuras_-_Febrero_2012_CLR_v4.1.pdf
- [6] Gatica Lagos, V. (2012). *Respuesta sísmica de un edificio de estructura metálica con aisladores. Alternativas de diseño*. Máster en Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Madrid.
- [7] THOMSON, P., Sistemas de control estructural. Memorias del Primer Encuentro del Acero en Colombia, Cartagena, 2001.

- [8] Avilés, R. (2001). *Dispositivos para el control de vibraciones*. Ingeniero Civil en Obras Civiles. Universidad Austral de Chile.
- [9] Ahumada Villafañe, J. (2010). *Sistemas de Control en Estructuras*. 6th ed. Barranquilla.
- [10] Garcia Kong, M., Gómez Martínez, R. and Escobar Sánchez, J. (2017). *Comportamiento sísmico de puentes con sistemas disipadores de energía*. México, D.F.
- [11] Uliarte, R. 1998. Sistemas pasivos de disipación de energía para la reducción de vibraciones en estructuras: análisis y diseño. Tesis Mag. IEG. Santiago. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [12] Vidal, M. 2008. Análisis y diseño de estructuras con disipadores de energía metálicos en base a criterios de desempeño. Tesis Ing. Civil en Obras Civiles. Valdivia. Universidad Austral de Chile.
- [13] Gómez, D., Marulanda, J. and Thomson, P. (2007). Sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas. *DYNA*, [online] (Volumen 75, Número 155). Available at: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/1742/11580>
- [14] Yasser M. Al-Anany, Michael J. Tait. (2016). *Fiber reinforced elastomeric isolators for the seismic isolation of bridges*. Dept. of Civil Engineering, McMaster Univ., 1280 Main St. West, Hamilton, ON L8S 4L7, Canada.
- [15] Comportamiento Sísmico de Puentes sobre Apoyos Elastoméricos. (1996). 90th ed. Querétaro: Instituto Mexicano del transporte, pp.22, 23. Available at: <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt90.pdf>
- [16] Fipindustriale.it. (2017). *Amortiguadores Histeréticos de Acero - Fip Industriale*. [online] Available at: <https://www.fipindustriale.it/index.php?area=106&menu=74&lingua=5>

- [17] Jara, M. and Casas, J. (2002). *Criterios de diseño de puentes con aisladores y disipadores de energía*. Monografía CIMNE IS-49.
- [18] Pinzón, N. and Martínez, E. (2014). *Estado del arte y modelo didáctico-descriptivo de amortiguadores y aisladores sísmicos*. Ingeniería Civil. Universidad Católica de Colombia.
- [19] Oviedo, J. and Duque, M. (2009). *Situación de las Técnicas de Control de Respuesta Sísmica en Colombia*. Medellín: Revista EIA.
- [20] Cec.uchile.cl. (2017). *Viaducto Marga-Marga*. [online] Available at: <http://www.cec.uchile.cl/~dicesco/marga.html>
- [21] WikiArquitectura. (2017). *Golden Gate - Ficha, Fotos y Planos - WikiArquitectura*. [online] Available at: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/golden-gate/>
- [22] Goldengate.org. (2017). *Preservación Histórica: Reacondicionamiento de los Aisladores Sísmicos*. [online] Available at: <http://goldengate.org/exhibits/spanish/exhibitarea3b.php>
- [23] Puentemania.com. (2017). *Puente Vasco de Gama | Puentemania*. [online] Available at: <http://www.puentemania.com/148>
- [24] Sistemas de Protección Sísmica. (2011). [ebook] Available at: <http://www.mageba.ch>
- [25] Arqhys.com. (2017). *Puente Rio-Antirio – Grecia*. [online] Available at: <http://www.arqhys.com/articulos/puente-rio-antirio.html>
- [26] La formación de posgrado española, e., El turismo latinoamericano, c., Las infraestructuras españolas, c., viaductos., L. and El Puente de Salginatobel, p. (2017). *El asombroso puente griego Rion Antirion*. [online] Structuralia.com. Available at: <https://www.structuralia.com/es/blog/23-carreteras/10001620-el-asombroso-puente-griego-rion-antirion>
- [27] *Megaestructuras: El puente Rion Antirion en Grecia*. (2011). [video] National Geographic.

- [28] COMITÉ AIS-300., Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, 2009, pp. 23-30
- [29] Sarria L. A., Terremotos e infraestructura, Universidad de los Andes, Bogotá, 2008, 542 pp.
- [30] Pedelta.com. (2017). *Pedelta* /. [online] Available at: <http://www.pedelta.com>
- [31] Pedelta, C., Galvis, F., Rosillo, L. and Betancour, N. (2014). *Experiencias sobre aislamiento sísmico en Colombia*.
- [32] Oonstrudata (2014). *Viaducto Helicoidal*. [ebook] Available at: https://issuu.com/legissa/docs/puente_viaducto_helicoidal
- [33] Lopez, J. (2010). Autopistas del Café S.A. [Blog] *Megaconstrucciones*. Available at: <http://megaconstrucciones-jlopez.blogspot.com.co/2010/09/autopistas-del-cafe-sa.html>
- [34] Grisacol (2010). *Viaductos de la Estampilla*. [ebook] Available at: <http://grisacol.com/pdfs/laestampilla.pdf>
- [35] Mendez Galindo, C, Spuler, T, Moor, G, & Stirnimann, F. (2012). Design, full-scale testing and CE-certification of anti-seismic devices according to the new European norm EN 15129: Elastomeric Isolators. Proc. 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, Portugal.
- [36] Protección antisísmica mageba - preservación fiable de estructuras. (2017). [ebook] p.3. Available at: <http://www.mageba-group.com/data/docs/es/2574/PROSPECT-LASTO-LRB-int-es.pdf?v=1.0>
- [37] *Beneficios y Ventajas de los Sistemas de Protección Sísmica* Available from: https://www.researchgate.net/publication/282413508_Beneficios_y_Ventajas_de_los_Sistemas_de_Proteccion_Sismica

Referencias Bibliográficas

Ahumada Villafañe, J. (2010). *Sistemas de Control en Estructuras*. 6th ed. Barranquilla.

Arqhys.com. (2017). *Puente Rio-Antirio – Grecia*. [online] Available at: <http://www.arqhys.com/articulos/puente-rio-antirio.html>

Avilés, R. (2001). *Dispositivos para el control de vibraciones*. Ingeniero Civil en Obras Civiles. Universidad Austral de Chile.

Beneficios y Ventajas de los Sistemas de Protección Sísmica Available from: https://www.researchgate.net/publication/282413508_Beneficios_y_Ventajas_de_los_Sistemas_de_Proteccion_Sismica

Cec.uchile.cl. (2017). *Viaducto Marga-Marga*. [online] Available at: <http://www.cec.uchile.cl/~dicesco/marga.html>

COMITÉ AIS-300., Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, 2009, pp. 23-30

Comportamiento Sísmico de Puentes sobre Apoyos Elastoméricos. (1996). 90th ed. Querétaro: Instituto Mexicano del transporte, pp.22, 23. Available at: <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt90.pdf>

Elnashai, A., Gencturk, B., Kwon, O. and Al-Qadi, I. (2010). *The Maule (Chile) Earthquake of February 27, 2010. Consequence Assessment and Case Studies*. [ebook] p.3. Available at: <http://mae.cee.illinois.edu/>

Elnashai, A., Hurtado, J., Pineda, O. and Sung Kwon, O. (2008). *The Pisco-Chincha Earthquake of August 15, 2007*. [ebook] p.3. Available at: <http://mae.cee.illinois.edu/>

Elnashai, A., Jig Kim, S., Jin Yun, G. and Sidarta, D. (2006). *The Yogyakarta Earthquake of May 27, 2006*. [ebook] p.5. Available at: <http://mae.cee.illinois.edu/>

Fipindustriale.it. (2017). *Amortiguadores Histeréticos de Acero - Fip Industriale*. [online] Available at: <https://www.fipindustriale.it/index.php?area=106&menu=74&lingua=5>

García Kong, M., Gómez Martínez, R. and Escobar Sánchez, J. (2017). *Comportamiento sísmico de puentes con sistemas disipadores de energía*. México, D.F.

Gatica Lagos, V. (2012). *Respuesta sísmica de un edificio de estructura metálica con aisladores. Alternativas de diseño*. Máster en Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Madrid.

Goldengate.org. (2017). *Preservación Histórica: Reacondicionamiento de los Aisladores Sísmicos*. [online] Available at: <http://goldengate.org/exhibits/spanish/exhibitarea3b.php>

Gómez, D., Marulanda, J. and Thomson, P. (2007). Sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas. *DYNA*, [online] (Volumen 75, Número 155). Available at: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/1742/11580>

Grisacol (2010). *Viaductos de la Estampilla*. [ebook] Available at: <http://grisacol.com/pdfs/laestampilla.pdf>

Jara, M. and Casas, J. (2002). *Criterios de diseño de puentes con aisladores y disipadores de energía*. Monografía CIMNE IS-49.

La formación de posgrado española, e., El turismo latinoamericano, c., Las infraestructuras españolas, c., viaductos., L. and El Puente de Salginatobel, p. (2017). *El asombroso puente griego Rion Antirion*. [online] Structuralia.com. Available at: <https://www.structuralia.com/es/blog/23-carreteras/10001620-el-asombroso-puente-griego-rion-antirion>

Lopez, J. (2010). Autopistas del Café S.A. [Blog] *Megaconstrucciones*. Available at: <http://megaconstrucciones-jlopez.blogspot.com.co/2010/09/autopistas-del-cafe-sa.html>

Megaestructuras: El puente Rion Antirion en Grecia. (2011). [video] National Geographic.

Mendez Galindo, C, Spuler, T, Moor, G, & Stirnimann, F. (2012). Design, full-scale testing and CE-certification of anti-seismic devices according to the new European norm EN 15129: Elastomeric Isolators. Proc. 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, Portugal.

Oonstrudata (2014). *Viaducto Helicoidal*. [ebook] Available at: https://issuu.com/legissa/docs/puente_viaducto_helicoidal

Oviedo, J. and Duque, M. (2009). *Situación de las Técnicas de Control de Respuesta Sísmica en Colombia*. Medellín: Revista EIA.

Patiño, J. (2015). Dispositivos de control de respuesta sísmica para estructuras en concreto. [Blog] *Blog 360° en concreto*. Available at: <http://blog.360gradosenconcreto.com/dispositivos-de-control-de-respuesta-sismica-para-estructuras-en-concreto/>

Pedelta, C., Galvis, F., Rosillo, L. and Betancour, N. (2014). *Experiencias sobre aislamiento sísmico en Colombia*.

Pedelta.com. (2017). *Pedelta* /. [online] Available at: <http://www.pedelta.com>

Pinzón, N. and Martínez, E. (2014). *Estado del arte y modelo didáctico-descriptivo de amortiguadores y aisladores sísmicos*. Ingeniería Civil. Universidad Católica de Colombia.

Protección antisísmica mageba - preservación fiable de estructuras. (2017). [ebook] p.3. Available at: <http://www.mageba-group.com/data/docs/es/2574/PROSPECT-LASTO-LRB-int-es.pdf?v=1.0>

Protección Sísmica de Estructuras. (2011). Corporación de Desarrollo Tecnológico, CDT. Available at: http://descargas.coreduc.cl/Proteccion_Sismica_de_Estructuras_-_Febrero_2012_CLR_v4.1.pdf

Puentemania.com. (2017). *Puente Vasco de Gama* / *Puentemania*. [online] Available at: <http://www.puentemania.com/148>

Sarria L. A., Terremotos e infraestructura, Universidad de los Andes, Bogotá, 2008, 542 pp.

Sistemas de Protección Sísmica. (2011). [ebook] Available at: <http://www.mageba.ch>

THOMSON, P., Sistemas de control estructural. Memorias del Primer Encuentro del Acero en Colombia, Cartagena, 2001.

Uliarte, R. 1998. Sistemas pasivos de disipación de energía para la reducción de vibraciones en estructuras: análisis y diseño. Tesis Mag. IEG. Santiago. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Vidal, M. 2008. Análisis y diseño de estructuras con disipadores de energía metálicos en base a criterios de desempeño. Tesis Ing. Civil en Obras Civiles. Valdivia. Universidad Austral de Chile.

WikiArquitectura. (2017). *Golden Gate - Ficha, Fotos y Planos - WikiArquitectura*. [online] Available at: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/golden-gate/>

Yasser M. Al-Anany, Michael J. Tait. (2016). *Fiber reinforced elastomeric isolators for the seismic isolation of bridges*. Dept. of Civil Engineering, McMaster Univ., 1280 Main St. West, Hamilton, ON L8S 4L7, Canada.