



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**REVISION BIBLIOGRÁFICA DE SISTEMAS DE CONTROL
ACTIVO EN EDIFICACIONES**

Autor(es)
Daniela Toro Ramírez

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Posgrado Análisis y Diseño de estructuras
Medellín, Colombia
2021



**REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO EN
EDIFICACIONES**

Daniela Toro Ramirez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Especialización en análisis y diseño de edificaciones

Asesor (a):
Juan Fernando Velásquez Bedoya
I.C. M.Sc. Earthquake Engineering

Línea de Investigación:
Análisis de estructuras, dinámica de estructuras, disipación sísmica.

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería
Posgrado
Medellín, Colombia
2021.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	6
2	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	6
3	MODELO MATEMÁTICO	10
4	APLICACIONES REALES Y EXPERIMENTALES.....	12
5	EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	23
1.1	Definición del sistema de amortiguamiento.....	27
2	4.2. Modelación de los aisladores del amortiguador de masa sintonizada	31
3	4.3. Análisis Dinámico Cronológico	33
6	CONCLUSIONES.....	41

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Proceso del funcionamiento de un sistema de control activo aplicado a una estructura (7).	8
Figura 2. Sistema de control de masa activo (17).	9
Figura 3. Modelo en ETABS implementando un sistema de control activo (17).	9
Figura 4. Diagrama esquemático de sistema de tendón activo	10
Figura 5. Diagrama de iteración para definir algoritmo de control (2).	13
Figura 6. Geometría del puente atirantado (2).	13
Figura 7. Modelo en Midas del puente atirantado (2).	13
Figura 8. Modelo a escala experimental del sistema AMD (2).	14
Figura 9. Montaje del sistema AMD. a) Resortes. b) Caja de protección. c) Motor. d) Ensamblaje de todas las piezas (2).	15
Figura 10. Diagrama de cuerpo libre del modelo experimental (2).	15
Figura 11. Grafica de la aceleración en vibración libre de los sistemas (2).	16
Figura 12. Aceleración del sistema (2).	16
Figura 13. Desplazamientos obtenidos al activar el sistema AMD (2).	16
Figura 14. Comparación de la respuesta en la aceleración del sistema del modelo en Midas (2).	17
Figura 15. Comparación de los desplazamientos obtenidos del modelo en Midas. (2)	17
Figura 16. Comparación de la respuesta en la aceleración del sistema del modelo experimental (2).	17
Figura 17. Comparación de los desplazamientos obtenidos del modelo experimental (2)	18
Figura 18. Distribución en planta del edificio y ubicación del sistema AMD. (18)	19
Figura 19. Masa activa de amortiguamiento. (18)	20
Figura 20. Verificación de la aceleración del sistema. (18)	21
Figura 21. Registros del comportamiento observado del edificio durante el sismo Tohoku. (18)	21
Figura 22. Espectro de aceleraciones por el método de Fourier. (18)	22
Figura 23. Registros observados en el comportamiento del edificio durante el tifón. (18)	22
Figura 24. Registros observados en el comportamiento del edificio durante el sismo del 15 de Septiembre del 2011. (18)	23
Figura 25. Estructura en estudio, modelo en ETABS. (Elaboración propia)	24
Figura 26. Espectro de diseño NSR-10.	25
Figura 27. Ajuste dinámico antes de la aplicación del AMS.	25
Figura 28. FHE en X antes de la aplicación del AMS.	26
Figura 29. FHE en Y antes de la aplicación del AMS.	26
Figura 30. Desplazamientos en X-X debido al sismo en X.	27
Figura 31. Desplazamientos en Y-Y debido al sismo en Y.	27
Figura 32. Grafica de amplificación dinámica usando AMS en la dirección X-X	30
Figura 33. Grafica de amplificación dinámica usando AMS en la dirección Y-Y	31
Figura 34. Propiedades del aislador en ETABS.	32
Figura 35. Propiedades del aislador en ETABS.	32
Figura 36. Registro sismo de Armenia en dirección X-X.	33
Figura 37. Registro sismo de Armenia en dirección Y-Y.	34
Figura 38. Registro sismo de San Fernando en dirección X-X.	34
Figura 39. Registro sismo de San Fernando en dirección Y-Y.	35
Figura 40. Ajuste del espectro de diseño a los registros sísmicos de Armenia, en el eje X	35
Figura 41. Ajuste del espectro de diseño a los registros sísmicos de Armenia, en el eje Y	35

Figura 42. Ajuste del espectro de diseño a los registros sísmicos de San Fernando, en el eje X.....	35
Figura 43. Ajuste del espectro de diseño a los registros sísmicos de San Fernando, en el eje Y.....	36
Figura 44. FHE en X después de la aplicación del AMS.	36
Figura 45. FHE en Y antes de la aplicación del AMS.....	37
Figura 46. Desplazamientos en X-X debido al sismo de Armenia en X	37
Figura 47. Desplazamientos en Y-Y debido al sismo de Armenia en Y	38
Figura 48. Desplazamientos en X-X debido al sismo de San Fernando en X.....	38
Figura 49. Desplazamientos en Y-Y debido al sismo de San Fernando en Y	39

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Sistemas de control activo más usados. (10)	8
Tabla 2. Masa y frecuencia para el modelo a escala y prototipo en midas (2).....	14
Tabla 3. Resultados analíticos obtenido para el modelo experimental, luego de aplicar las fuerzas sísmicas. (2).....	18
Tabla 4. Características del edificio. (18)	19
Tabla 5. Frecuencia natural estima y factor de amortiguamiento obtenido por medio de pruebas de vibración. (18).....	20
Tabla 6. Especificaciones del sistema AMD. (18)	20
Tabla 7. Parámetros obtenidos del modelo.	28
Tabla 8. Parámetros para el diseño del amortiguador en el sentido X-X.	29
Tabla 9. Parámetros para el diseño del amortiguador en el sentido Y-Y.	30
Tabla 10. Resumen desplazamientos obtenidos.....	39
Tabla 11. Resumen fuerzas espectrales obtenidas.....	39

1 INTRODUCCIÓN

Cuando se piensa en una edificación o en un material, el concepto que se asocia es el de un objeto inanimado y cuando se menciona el término de infraestructura inteligente, se piensa que los automóviles se mueven y realizan maniobras automáticamente. En la literatura el término de estructuras inteligentes se relaciona principalmente con materiales avanzados y se relaciona también a las herramientas que pueden ser usadas durante el proceso constructivo. En menor proporción se encuentran referencias sobre las nuevas tendencias denominadas gestión de la salud estructural, las cuales consisten en dotar las edificaciones de “un sistema nervioso” conformado por sensores capaces de transmitir datos sobre su estado como deformaciones, vibraciones, temperatura, entre otros. La aplicación de estos sistemas sumado a mecanismos con la capacidad de actuar sobre las estructuras (actuadores, gatos) han permitido el surgimiento de nuevas técnicas de control como por ejemplo el pretensado dinámico que consiste en la aplicación de una fuerza de tensionamiento que varíe la magnitud de las fuerzas que se ejerce sobre un puente en función de las cargas que solicitan. Similarmente se han desarrollado técnicas como los sistemas de control sísmico de las edificaciones que pueden definirse como metodologías alternas de aislamiento o disipación de las solicitaciones dinámicas en una estructura, a partir del control de sus propiedades mecánicas usando sensores y actuadores. Los sistemas de control dinámico pueden clasificarse como sistemas activos, pasivos e híbridos, en función del nivel de incorporación y participación de elementos de control en adición a los sistemas de monitoreo. La aplicación de estas nuevas técnicas ha permitido entender el comportamiento de las estructuras desde nuevas perspectivas, habilitando nuevas filosofías para la realización de diseños optimizados y eficaces, en especial ante la ocurrencia de eventos sísmicos y abriendo la posibilidad de integrar a la ingeniería estructural otras ramas como la electrónica, mecánica y la automatización.

En este documento se presenta el resultado de la revisión bibliográfica como acercamiento inicial a los sistemas de control activo, debido a la utilidad que puede generarse al desarrollar y aplicar sistemas que relacionen la respuesta dinámica de una estructura en tiempo real con sistemas de aislamiento o disipación de energía. Adicionalmente, se presenta un ejemplo de aplicación en el que se compara la respuesta de dos (2) edificios, con y sin sistema de control activo, frente a eventos sísmicos.

2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

El desarrollo de conceptos como aislamiento y amortiguamiento de vibraciones, empezaron a desarrollarse durante la segunda guerra mundial como respuesta a la necesidad de mejorar las naves aeronáuticas, buscando potencializarse y salir victoriosos de la guerra. Después esta guerra, la carrera armamentista y la

conquista del espacio fomentaron el desarrollo de la teoría y aplicación del control estructural en problemas de estabilización y problemas relacionados con estructuras flexibles. Esta tecnología rápidamente fue adaptada a la ingeniería civil en aplicaciones de protección de puentes y edificios ante cargas extremas de sismos y vientos (5).

La primera edificación construida sobre cauchos para aislamiento en la base se fundó en 1969 en Yugoslavia (11). Se instalaron grandes cauchos en las fundaciones de un colegio de tres pisos para aumentar su período fundamental de vibración y así, reducir la demanda sísmica. Para este tiempo, en Japón, ya se habían realizado varias aplicaciones de aislamiento basal en templos, pero con otras técnicas, como el aislamiento con capas finas de arena.

Los acercamientos al diseño de estructuras con tecnologías no convencionales sólo empezaron a presentar un mayor desarrollo en la década de los años ochenta cuando Japón promovió el estudio e implementación de técnicas de control de respuesta sísmica. Hoy en día Japón, Estados Unidos, Italia y China son los países que más han aportado al desarrollo de estas técnicas, y con sus avances y aplicaciones han hecho que otros países, como México, Chile y Argentina, empiecen también a contribuir (11).

A pesar de que han transcurrido casi tres décadas en el desarrollo e investigación de sistemas alternativos para aliviar los efectos sísmicos, en la mayoría de países latino americanos no se tiene trascendencia debido al desconocimiento por parte de los ingenieros estructurales en el diseño de estas metodologías y en la aplicación de los mismas; la desconfianza fundada en la necesidad de usar en algunos casos una fuente de energía externa que puede ser desconectada durante un sismo; el sobre costos inicial; entre otros.

Un prometedor enfoque para el control de vibraciones en estructuras son los sistemas activos que miden en tiempo real dichas vibraciones externas, generando un conjunto de fuerzas de control que son aplicadas a por medio de dispositivos mecánicos, con el fin de reducir su respuesta. Estos sistemas son capaces de adaptarse automáticamente a las características de la excitación y alcanzar sus objetivos (Disipación de energía o aislamiento).

Un sistema de control estructural activo está compuesto por:

- Sensores situados en la propia estructura empleados para medir variables correspondientes a la excitación externa, o variables de la respuesta estructural, o de ambos tipos.
- Sistemas controladores que, basándose en las medidas de los sensores y a través de un algoritmo de control, calculan la fuerza a aplicar por los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos
- Actuadores, habitualmente alimentados por fuentes de energía externas, para ejercer las fuerzas iguales y contrarias a las que está siendo sometida

la edificación.

En la Figura 1 se presenta un esquema general del proceso de aplicación de un sistema de control activo, donde una estructura es sometida a una excitación, los sensores dispuestos leen las variables con las que responde el edificio, estas variables son enviadas por medio de señales a un controlador, el cual, por medio de algoritmos activos, acciona un actuador que permite modificar la respuesta sísmica de la estructura. Este proceso se repite hasta que la excitación externa finalice o hasta que se alcance nuevamente la condición de equilibrio.

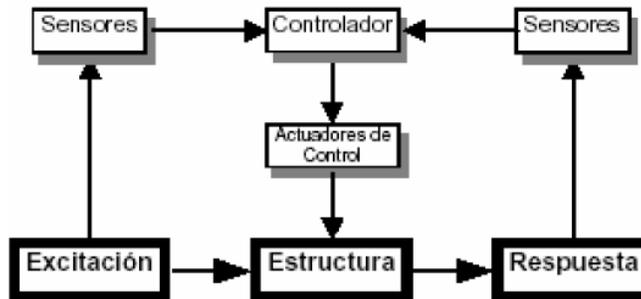


Figura 1. Proceso del funcionamiento de un sistema de control activo aplicado a una estructura (7).

Algunos de los sistemas de control activo más usados son los sistemas de amortiguamiento activo de masa (AMD) y los sistemas de tendón activo (11). En la Tabla 1 se presentan los sistemas de control activos más usados.

Tabla 1. Sistemas de control activo más usados. (10)

Sistemas de control activo	Efecto de masa	Amortiguamiento activo de masa AMD
		Amortiguamiento híbrido de masa HMD
	Control de fuerza	Tendón Activo

Los osciladores de masa activa (AMD) proporcionan una forma de aplicar fuerzas de control a una estructura. Estos son dispositivos que están conformados por una masa, conocida como masa secundaria, la cual se encuentra unida a la estructura por medio de dos elementos, uno elástico y otro amortiguador (este último diseñado con una frecuencia natural aproximadamente igual a la de la estructura), con el fin de atenuar las vibraciones, cuando se está sintonizado con la frecuencia de la estructura principal. En la Figura 2 se muestra un esquema

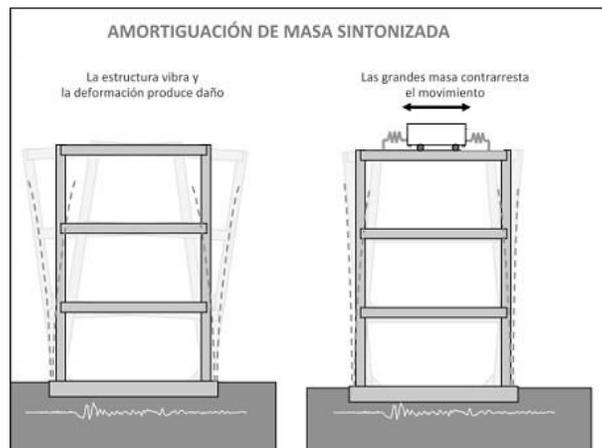


Figura 2. Sistema de control de masa

general de la respuesta de un edificio con control de masa activo y sin control de masa activo.

De igual forma que el diseño tradicional, el sistema de control activo de masa es posible modelarlo en programas de diseño convencionales de estructuras como ETABS (4). En la Figura 3 se muestra un esquema de la idealización del edificio analizado en este trabajo, modelado aplicando el software ETABS con dos sistemas de control AMS.

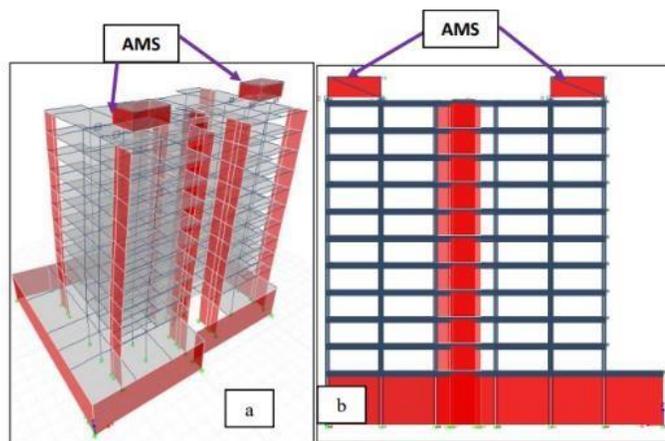


Figura 3. Modelo en ETABS implementando un sistema de control activo (17).

Otro de los dispositivos de control activo más usados es el dado por un tendón activo, el cual consiste en un conjunto de tendones presforzados sometidos a

fuerzas de tracción controlables bajo cargas de excitaciones sísmicas. Se producen derivas entre pisos que provocan el movimiento relativo entre el pistón actuador y el cilindro, lo que resulta en fuerzas de tracción variables en los tendones, que proporcionan las fuerzas de control deseables para lograr el control de respuesta en la estructura. En la Figura 4 se presenta un esquema representativo de lo explicado anteriormente.

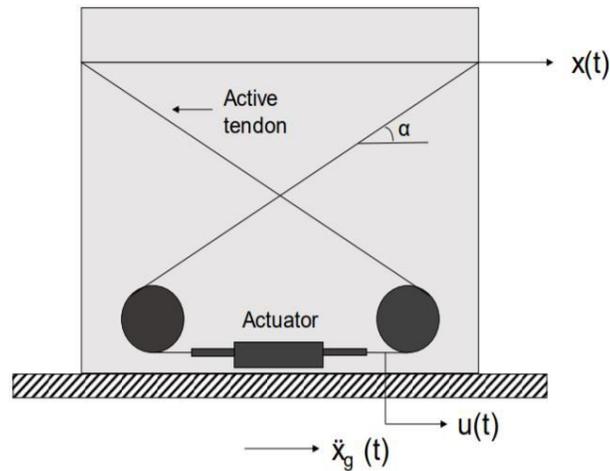


Figura 4. Diagrama esquemático de sistema de tendón activo

3 MODELO MATEMÁTICO

Un sistema dinámico de N grados de libertad sometida a aceleraciones en la base se rige por la ecuación de movimiento dinámico, en forma matricial.

$$M[X_s(t) + x(t)] + Cx(t) + Kx(t) = 0 \quad (1)$$

Esta ecuación matricial representa N ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden y gobierna la respuesta de la estructura sometida a la aceleración en la base $\ddot{x}_s(t)$. Las matrices M, C y K representan la matriz de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura, respectivamente.

Para un desplazamiento de la base, denotado por $x_s(t)$, se obtiene un desplazamiento total (absoluto) $x_j^T(t)$ para el j-ésimo nivel de la estructura, conformado por la adición de dos efectos (ecuación 2): el desplazamiento de la base $x_s(t)$, que produce un movimiento de cuerpo rígido, y el desplazamiento relativo x_j del nivel con respecto a la nueva posición.

$$X_j^T(t) = X_s(t) + X_j(t) \quad (2)$$

Expresando la ecuación (2) en forma vectorial, donde "1" es un vector de orden N con cada elemento igual a 1, suponiendo que todos los grados de libertad de la

estructura tienen la misma orientación que el desplazamiento de la base, se obtiene:

$$X^t(t) = X_s(t) + X(t) \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que las fuerzas elásticas y de amortiguamiento sólo actúan con el movimiento relativo de la estructura, mientras las fuerzas inerciales actúan con la aceleración total; y que no todos los grados de libertad tienen la misma orientación que el desplazamiento de la base; al incluir la ecuación 3 y su segunda derivada con respecto al tiempo en la ecuación 1, y reorganizando, se obtiene:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\ddot{x}_s(t) \quad (4)$$

Donde "1" se conoce como el vector de influencia y representa el desplazamiento de los grados de libertad resultante de la aplicación estática de un desplazamiento unitario en la base (5).

Para modificar la respuesta de la estructura se puede variar M, C o K. Alterando estos parámetros se modifica la respuesta (desplazamiento, velocidad y/o aceleración) de la edificación. Sin embargo, hay parámetros que son más fáciles de variar y de controlar que otros. Las estrategias de control estructural buscan alterar estos parámetros para minimizar las vibraciones, siendo las estrategias más utilizadas: variación de la masa y/o rigidez, aumento del amortiguamiento y aplicación de fuerzas inerciales contrarias (5).

Variar la masa de la estructura no es sencillo por efectos de costo y por el peso propio de los materiales utilizados en construcción. De otra parte, aumentarla para flexibilizar la estructura de tal manera que su periodo natural sea tal que la respuesta a un movimiento en la base sea casi nula (ver Figura 2), conlleva problemas de resistencia en los elementos estructurales. En estructuras muy flexibles, como rascacielos y puentes colgantes, la excitación sísmica no prima en el diseño estructural, siendo más grave el efecto del viento. Es por estas razones que en control estructural no se busca alterar la masa para disminuir la respuesta; además, este parámetro en estructuras civiles tiene gran incertidumbre y varía continuamente (5).

Modificar la rigidez es mucho más fácil. En la práctica actual es lo que se hace cuando se obliga a una estructura a cumplir con los límites establecidos por los diferentes códigos sísmicos para las derivadas; es decir, dotar a la edificación de una rigidez tal que cumpla con unos desplazamientos límites. Si se compara la cortante sísmica antes y después de reforzar la estructura, es posible darse cuenta de que al cumplir con el criterio de rigidez se está sometiendo a la estructura a mayor fuerza sísmica. Al reforzar la estructura usualmente el periodo natural disminuye, haciendo generalmente que la aceleración espectral, S_a , aumente, generando mayor cortante basal, V_s , para una misma masa (5).

El control estructural no busca rigidizar la edificación, de otro modo, al colocar elementos de rigidez variable que modifican el periodo natural de vibración - generalmente sólo para los primeros modos- se aleja la estructura de entrar en

condición de resonancia (5). La generación de fuerzas inerciales contrarias al movimiento de la estructura es una característica de algunos dispositivos de control. Al plantear equilibrio dinámico en el problema de movimiento en la base, incluyendo la fuerza que contrarresta el movimiento, se obtiene:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\ddot{x}_s(t) + f_c(t) \quad (5)$$

Donde $f_c(t)$ se conoce como la fuerza de control y es calculada a partir de la señal realimentada del sistema (5).

4 APLICACIONES REALES Y EXPERIMENTALES

Actualmente existen múltiples investigaciones en las que se ha estudiado el comportamiento de diferentes dispositivos de control activo en modelos a pequeña y mediana escala. Desde modelos de vigas hasta modelos de edificaciones y puentes. Todos estos análisis tienen como objetivo estudiar la respuesta de las edificaciones ante sismos, viento o vibraciones en las que interactúan sensores y actuadores como sistemas de disipación de dichas fuerzas. Particularmente, las investigaciones a los que se hace referencia a continuación, utilizaron específicamente un amortiguador de masa activa AMD para reducir la vibración estructural mediante fuerzas eléctricas producidas desde servomotores o actuadores.

Es el caso de la investigación realizada por Seongkyu Chang (2) en el que se desarrolla un sistema AMD para reducir las vibraciones verticales en un puente atirantado producidas por las fuerzas de viento y fuerzas sísmicas. Se fabricó un modelo a escala del puente y se desarrolló de forma numérica mediante el software Midas el sistema activo de masa amortiguada. En este documento, se describe la metodología desarrollada para definir el algoritmo de control y finalmente en esta investigación se presentan detalles del modelo a escala, resultados numéricos y experimentales que demuestran la efectividad del método.

Inicialmente se presentan las ecuaciones de movimiento que rigen el sistema analítico, seguido de esto se describe la metodología para calcular la fuerza de control, la cual necesita un algoritmo que se desarrolla mediante una serie de procesos para calcular el comportamiento del dispositivo que controla la respuesta del sistema, basado en las medidas obtenidas de los sensores instalados; allí se aplica la teoría lineal cuadrática gaussiana y se aplica un filtro por ruido de los sensores. En la Figura 5 se presenta gráficamente el proceso descrito (2).

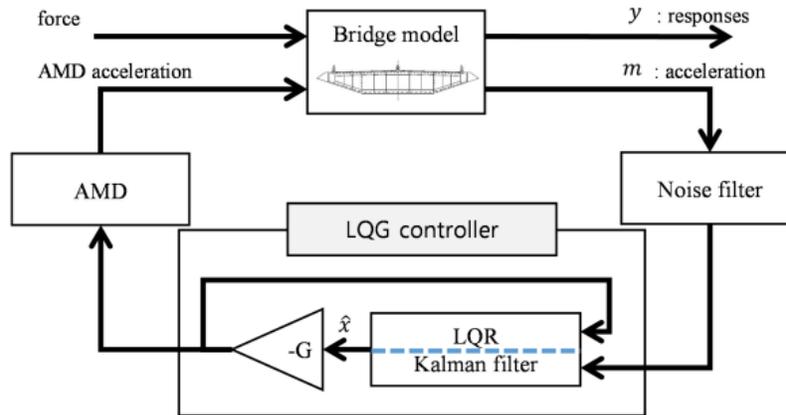


Figura 5. Diagrama de iteración para definir algoritmo de control (2).

Se definió como modelo analítico un puente atirantado, en un 95% de etapa de construcción, como objetivo para controlar las vibraciones verticales a las que será sometido. La luz entre apoyos es de 1200m, el ancho de la viga es de 29m, la profundidad de la viga es de 4m y la altura de las pilas de fundación de 282m. En la Figura 6 se presenta una imagen del puente a ser modelado (2).

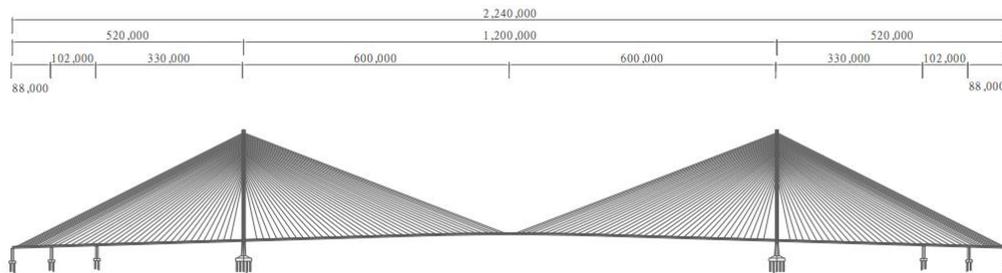


Figura 6. Geometría del puente atirantado (2).

Se utilizó el programa MIDAS para realizar el modelo de elementos finitos (Figura 7), el cual sirvió para determinar la masa de movimiento que debe usarse para el sistema AMD. Este proceso se realizó mediante el análisis de valores y vectores propios para calcular la frecuencia de la estructura y asumiendo que dicha masa estará en el borde extremo de la viga, se definió la masa modal que debe ser aplicada en dicho punto para controlar el sistema. En la Tabla 2 se presenta una tabla con las propiedades estimadas (2).

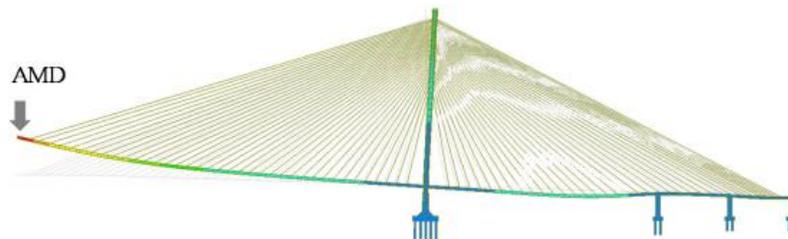


Figura 7. Modelo en Midas del puente atirantado (2).

Paralelamente se desarrolló un modelo a escala experimental que pudiera probar los resultados obtenidos numéricamente. El modelo fue construido mediante 2 vigas H450X300 de 6.1m, se instalaron 2 sistemas AMD, uno como fuente de vibración para simular las fuerzas de viento y/o sismo y otro que contrarresta estos efectos, el sensor instalado sirve como fuente de datos de entrada para el sistema AMD. En la Tabla 2 se resume las propiedades de masa y frecuencia estimadas para el modelo experimental. En la Figura 8 se presenta una imagen donde se observa el montaje realizado para el modelo a escala (2).

Tabla 2. Masa y frecuencia para el modelo a escala y prototipo en midas (2).

Table 2. Mass and frequency of the scale bridge model.

Item	Prototype	Scaled Model
Mass (ton)	1526	1.509
Frequency (Hz)	0.170	0.542

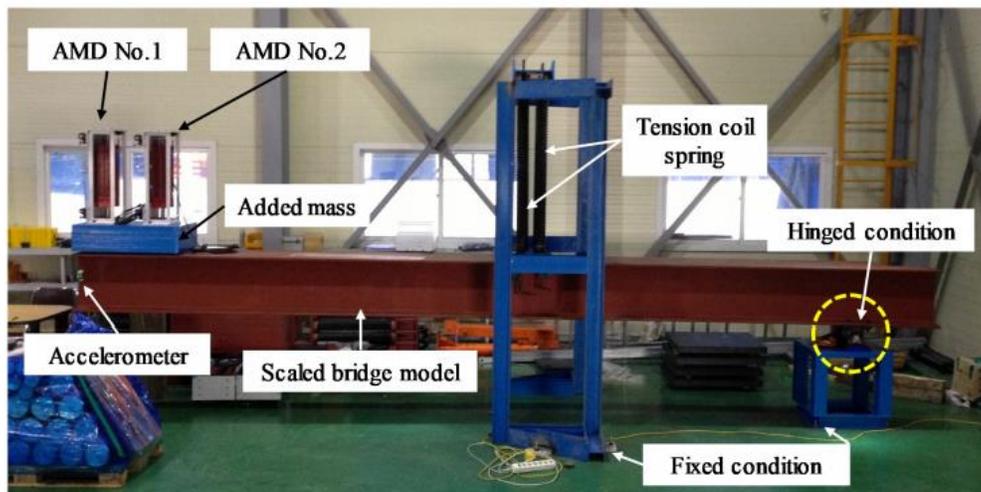


Figura 8. Modelo a escala experimental del sistema AMD (2).

El sistema AMD construido está conformado por una masa de 50kg, resortes de tensión y una caja de protección, la posición de la masa se ajustó mediante el uso de resortes de tensión para ayudar a la potencia del motor (2).

En la Figura 10 se presenta el diagrama de cuerpo libre del modelo experimental a escala para determinar las ecuaciones de movimiento del sistema, se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente para determinar la fuerza de control y la frecuencia del modelo experimental, mediante el cálculo de los valores y vectores propios y diseñando un algoritmo de control. (2)

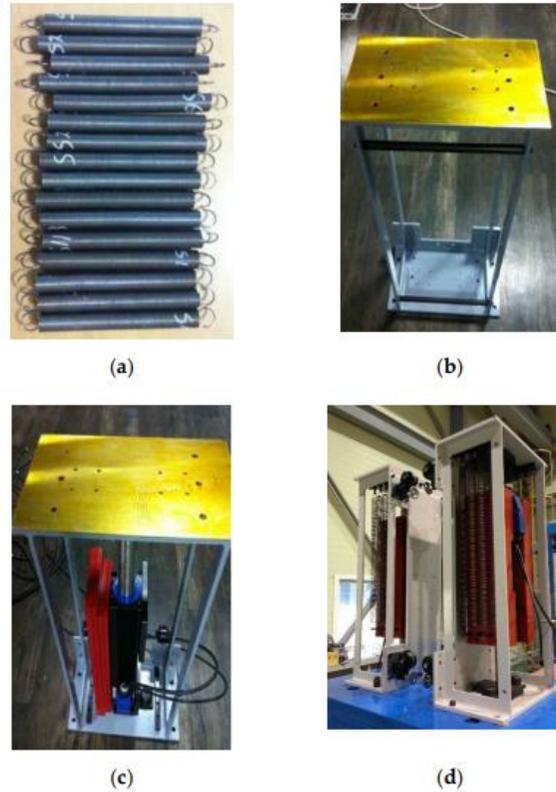


Figura 9. Montaje del sistema AMD. a) Resortes. b) Caja de protección. c) Motor. d) Ensamblaje de todas las piezas (2).

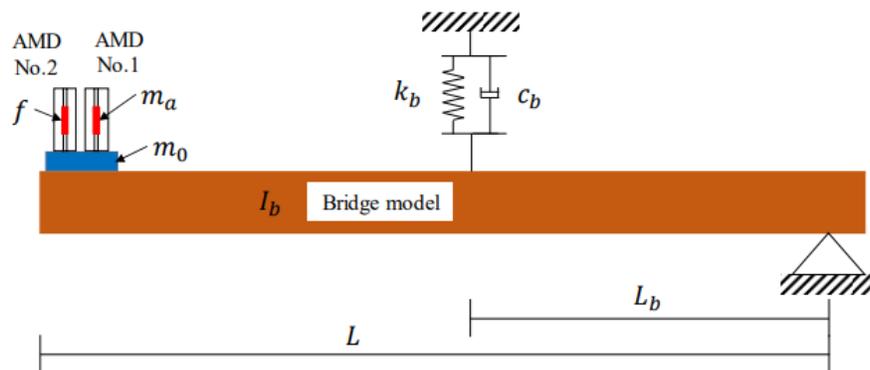


Figure 6. Block diagram of the entire system.

Figura 10. Diagrama de cuerpo libre del modelo experimental (2).

La aceleración de ambos sistemas se presenta en la Figura 11, se encontró que para ambos casos la aceleración del sistema es muy similar, lo que evidencia que el modelo experimental es una buena aproximación a las condiciones del modelo analítico. Para la definición de la función de respuesta, se realizó por medio de desarrollos numéricos programados en Matlab (2).

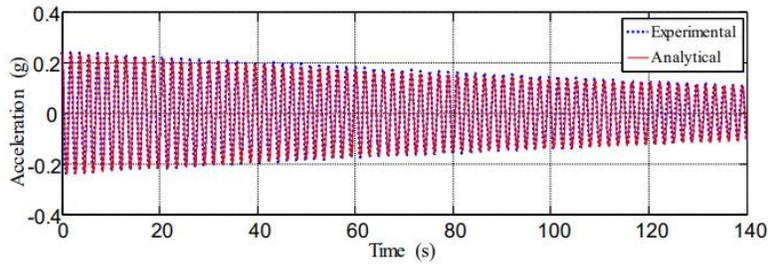


Figura 11. Grafica de la aceleración en vibración libre de los sistemas (2).

El modelo a escala fue sometido a una vibración por el sistema AMD 2 durante 27 segundos y el sistema AMD 1 operó durante 28 segundos, en la Figura 12 y Figura 13 se presenta el comportamiento exacto de ambos modelos, lo que valida el diseño del algoritmo de control realizado (2).

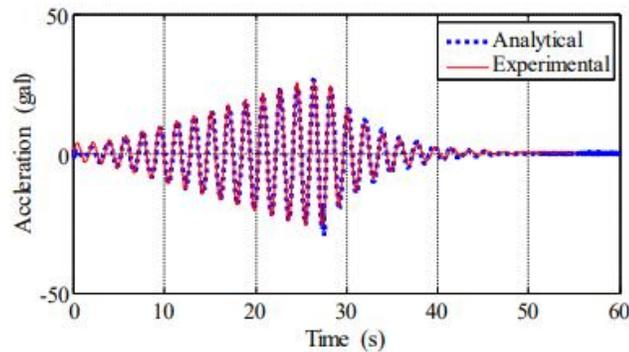


Figura 12. Aceleración del sistema (2).

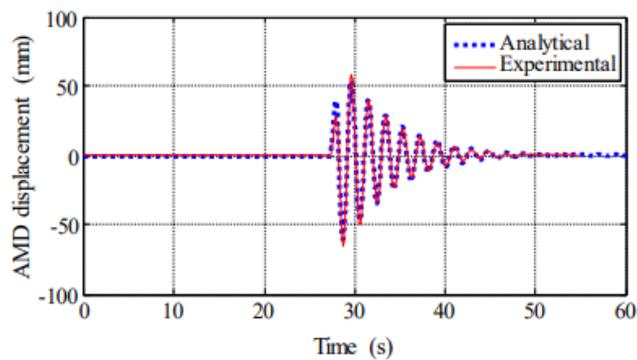


Figura 13. Desplazamientos obtenidos al activar el sistema AMD (2).

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos antes y después del control de vibración libre en el modelo de elementos finitos. La Figura 14 muestra la aceleración de respuesta del sistema sin control de la excitación y controlada; la Figura 15 muestra los desplazamientos obtenidos en el sistema con respuesta efectiva del sistema AMD y sin respuesta. Se encontró que el amortiguamiento del sistema aumento del 0.17% al 9.2% cuando el sistema AMD es activado (2).

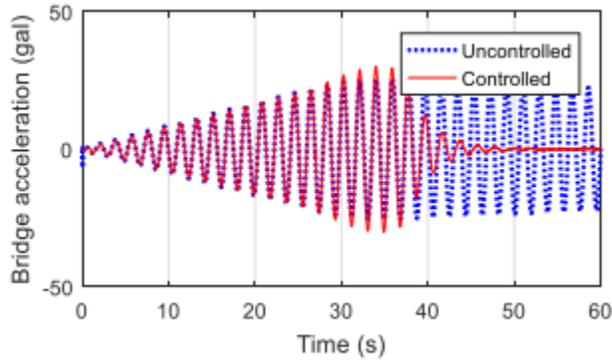


Figura 14. Comparación de la respuesta en la aceleración del sistema del modelo en Midas (2).

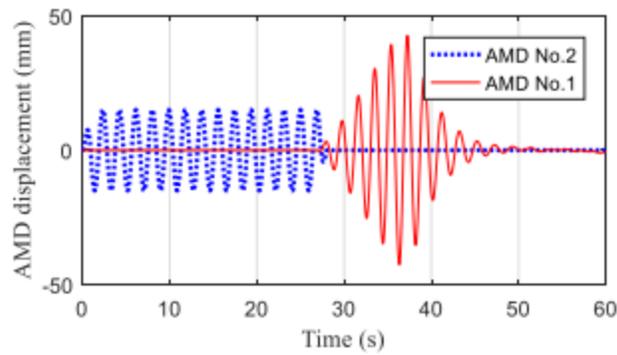


Figura 15. Comparación de los desplazamientos obtenidos del modelo en Midas. (2)

Para comprobar la respuesta del análisis numérico fue necesario hacer uso de las características mecánicas (espectro de respuesta) de los sismos El centro e Imperial Valley 2. Las siguientes figuras muestran el desplazamiento y la aceleración del sistema obtenida luego de aplicar las fuerzas sísmicas (2).

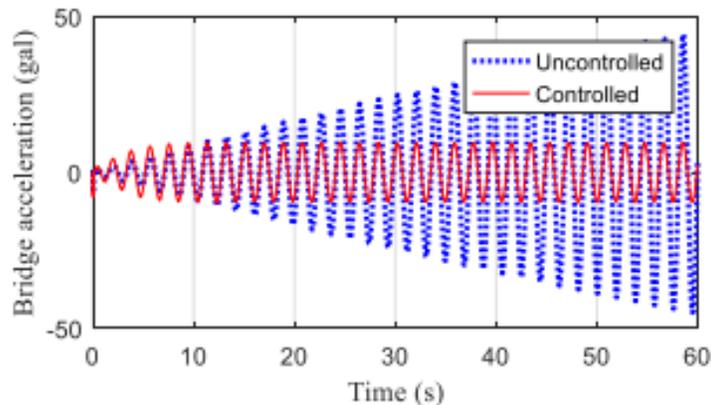


Figura 16. Comparación de la respuesta en la aceleración del sistema del modelo experimental (2).

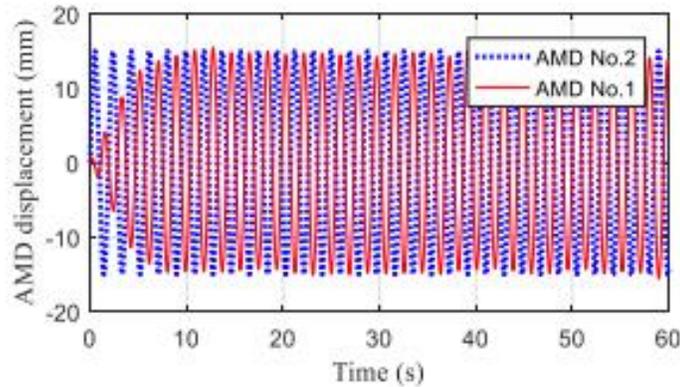


Figura 17. Comparación de los desplazamientos obtenidos del modelo experimental (2)

El desplazamiento máximo del puente atirantado durante el sismo del EL CENTRO se redujo un 36%, luego de que el sistema AMD fuera activado, la aceleración paso de 320 gal a 132 gal, lo que equivale a una reducción del 59%. Durante el sismo de IMPERIAL VALLEY el desplazamiento se redujo un 59%, luego de que el sistema AMD fuera activado, la aceleración paso de 73.5gal a 26.7 gal, lo que equivale a una reducción del 63%.

La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos luego de la aplicación de los sismos en el modelo (4).

Tabla 3. Resultados analíticos obtenido para el modelo experimental, luego de aplicar las fuerzas sísmicas. (2)

		El Centro		Imperial Valley-02	
		Displacement (mm)	Acceleration (gal)	Displacement (mm)	Acceleration (gal)
AMD	Uncontrolled	54.9	320.5	49.1	73.5
	Controlled	35.1	132.0	19.9	26.7
	Decreasing rate	36.1%	58.8%	59.4%	63.7%
TMD	Uncontrolled	54.9	320.5	49.1	73.5
	Controlled	48.4	318.3	21.1	35.6
	Decreasing rate	11.8%	0.7%	57.1%	51.6

El sistema AMD propuesto muestra un excelente comportamiento ante el control de vibraciones en ambos sismos, el comportamiento de este sistema también fue verificado por el modelo de elementos finitos. Los resultados demuestran que el sistema de masa amortiguada puede reducir satisfactoriamente las vibraciones producidas por fuerzas de viento o sismo (2).

Otra investigación desarrollada y aplicada a la vida real, fue puesta a prueba en un sismo ocurrido en el año 2011 en la ciudad de Tohoku (Japón). Se trata de los sistemas AMD instalados en edificios de gran altura en dicha ciudad de Japón, donde fueron puestos a prueba durante los sismos de marzo y septiembre del 2011 en la costa pacífica de la ciudad en mención, realizada por Masashi Yamamoto y

Takayuki Sone (18). En este documento se describe que el objetivo principal del sistema era brindar mayor confort a las personas que se encuentran dentro del edificio, reduciendo las vibraciones provocadas por vientos fuertes; para mejorar las condiciones de respuesta ante sismos fuertes, la edificación contaba con sistemas redundantes de amortiguamiento, también desarrollaron un sistema regenerativo para ahorrar energía incluida en el sistema AMD (18).

Específicamente, uno de estos sistemas de masa amortiguada fue instalado al finalizar la construcción de una edificación en el año 2010, en un edificio de 24 pisos construido en estructura de acero en la ciudad de Tohoku. Frente a sismos y un fuerte tifón ocurridos en el año 2011, el sistema pudo reaccionar a las vibraciones relativamente fuertes producidas por estos eventos naturales, funcionando con éxito el dispositivo AMD diseñado; también se evidenció que el sistema de regeneración de energía ahorro entre un 35% y un 65% la energía que se consumiría. El edificio, además del sistema de control activo, también tenía instalado paredes de amortiguamiento viscoso para aumentar la seguridad frente a un 8sismo. Algunas características de la edificación estudiada se presentan en la Tabla 4 (18)

Tabla 4. Características del edificio. (18)

Table I. Overview of the building.	
Main usage	Office
Structure	Steel, 24 Fl + 2 Fl (penthouse)
Height	114 m
Total floor space	16,712 m ²
Site	Tokyo, Japan
Completion	March 2010
Design and construction	Takenaka corporation

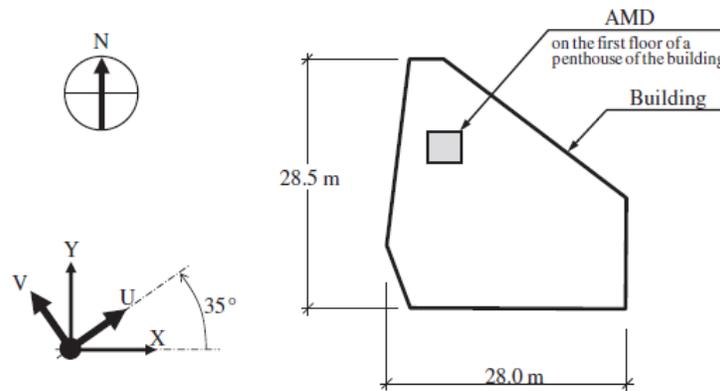


Figura 18. Distribución en planta del edificio y ubicación del sistema AMD (18).

Tabla 5. Frecuencia natural estima y factor de amortiguamiento obtenido por medio de pruebas de vibración. (18)

	U direction	V direction	Torsional direction
Frequency (Hz) (designed value [Hz])	0.35 (0.27)	0.41 (0.33)	0.52 (0.35)
Damping factor	0.016	0.015	0.017

Se estimó una masa de 38000 kg para el sistema AMD, instalado en unos rieles para movimiento lateral, se usó servomotores como actuadores y no fue necesario usar resortes o amortiguadores de otro tipo. El torque del motor se transfirió mediante un tornillo de bolas, convirtiendo dicho torque en una fuerza horizontal en X y Y, permitiendo así el control de movimientos torsionales. La masa fue instalada en el primer piso del pent house de dos niveles (18).



Figura 19. Masa activa de amortiguamiento. (18)

Tabla 6. Especificaciones del sistema AMD. (18)

	X direction	Y direction
Movable mass (kg)	41,000	38,000
Controllable stroke displacement (m)	±0.55	±0.55
Allowable stroke displacement (m)	±0.70	±0.70
Peak control force (kN)	80	80
Braking force (kN)	150	150

Por medio de sensores se lee la respuesta de la estructura, se define el algoritmo de control que calcula la respuesta modal de la estructura y se aplica igual que en el ejemplo anterior un filtro a los datos recogidos por medio del filtro de Kalman (18).

Se obtiene como resultado el torque de respuesta para cada modo asignando directamente la frecuencia modal y el factor de amortiguamiento modal con el que debe responder el sistema AMD, por simplificación se definió el primer modo como objetivo de control

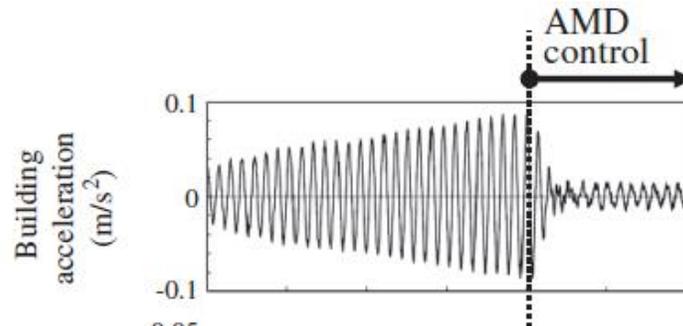


Figura 20. Verificación de la aceleración del sistema. (18)

En la Figura 20 se observa la respuesta en la aceleración de la edificación frente a una excitación cuando es activado el sistema AMD. (18) Disminuyendo considerablemente la aceleración, pasando de un sistema susceptible a otro menos susceptible a daños debido a la eficiencia del sistema de amortiguamiento.

El sismo del 11 de marzo del 2011 fue catalogado nivel 4 en la escala sísmica de Japón, el movimiento se caracterizó por tener un largo periodo. La máxima aceleración registrada fue de 1.97 m/s^2 observada en la dirección "V" como se muestra en la Figura 21 (18).

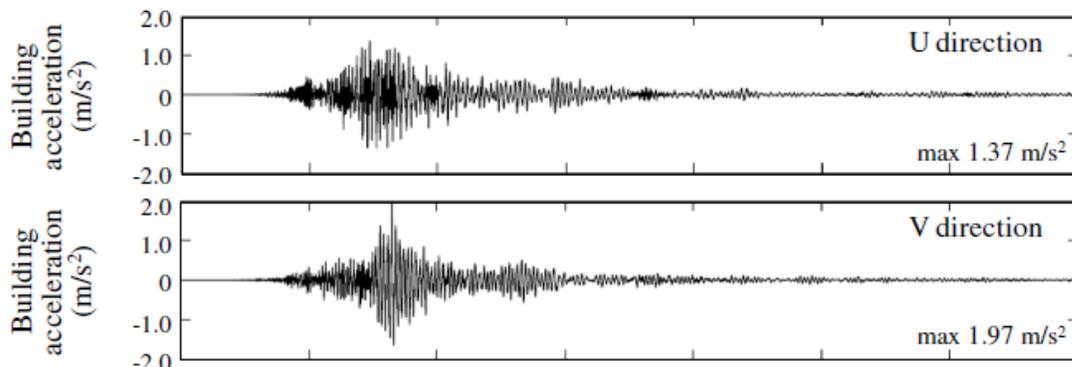


Figura 21. Registros del comportamiento observado del edificio durante el sismo Tohoku. (18)

Se utilizó la teoría de Fourier para definir espectro de aceleración y las frecuencias de resonancia presentadas en la Tabla 5 en paréntesis.

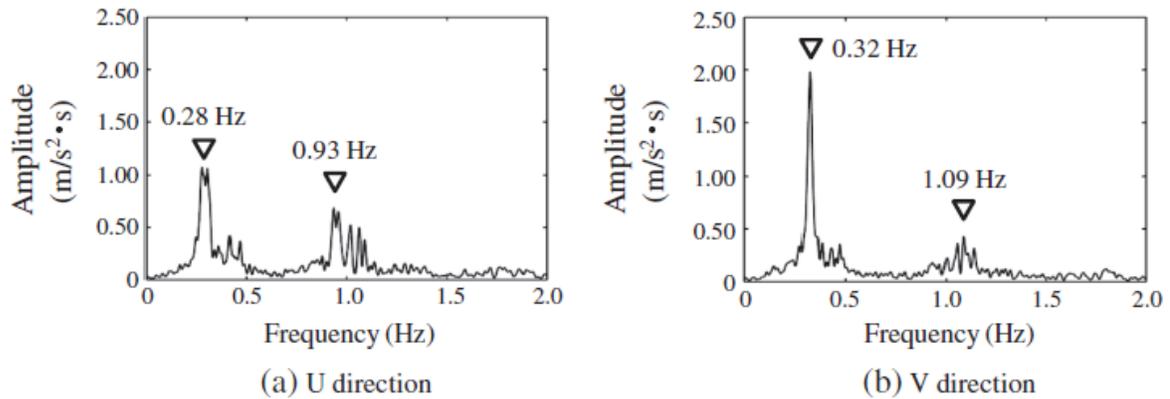


Figura 22. Espectro de aceleraciones por el método de Fourier. (18)

El 21 de septiembre de 2011 ocurrió un tifón que presentó 16.9 m/s como velocidad máxima durante aproximadamente 10 min, se consideró como un viento de 10 años de retorno, el sistema AMD estaba diseñado para vientos de 1 año de retorno. El sistema AMD controló las vibraciones durante 7 horas. En la Figura 23 se presenta una gráfica de las aceleraciones con las que respondió la edificación implementando el sistema AMD y se compara con la respuesta del edificio sin el sistema de disipación. El amortiguamiento de masa activa redujo la aceleración en un 60% (18).

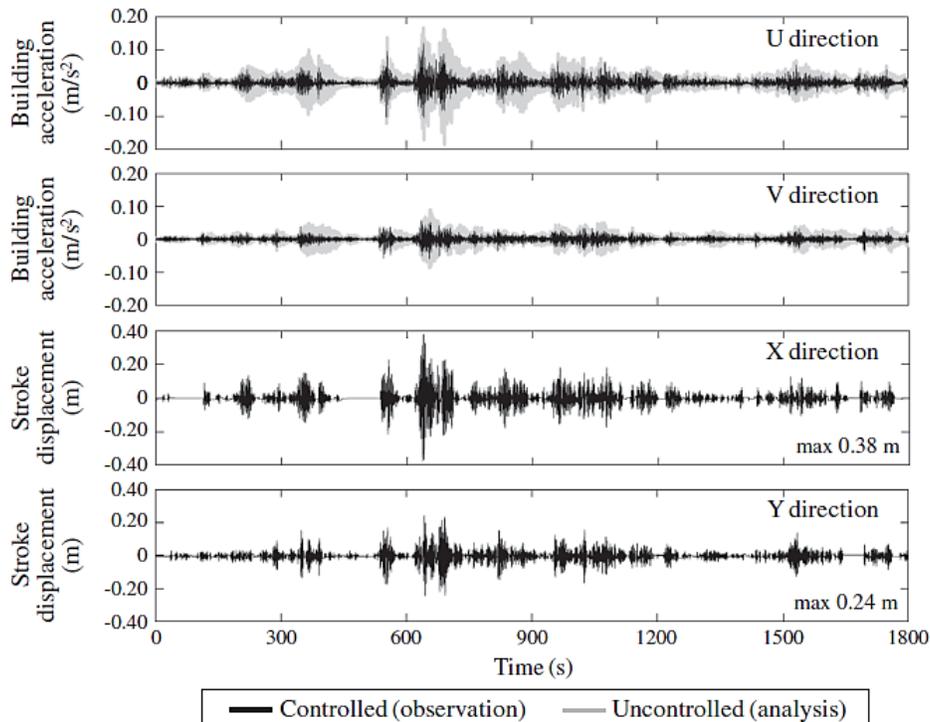


Figura 23. Registros observados en el comportamiento del edificio durante el tifón. (18)

El 15 de septiembre del 2011 ocurrió otro sismo catalogado nivel 2 en la escala sísmica de Japón, la Figura 24 muestra la aceleración durante el sismo, las vibraciones fueron controladas por el sistema diseñado y se estimó una reducción de la aceleración en un 75% (18)

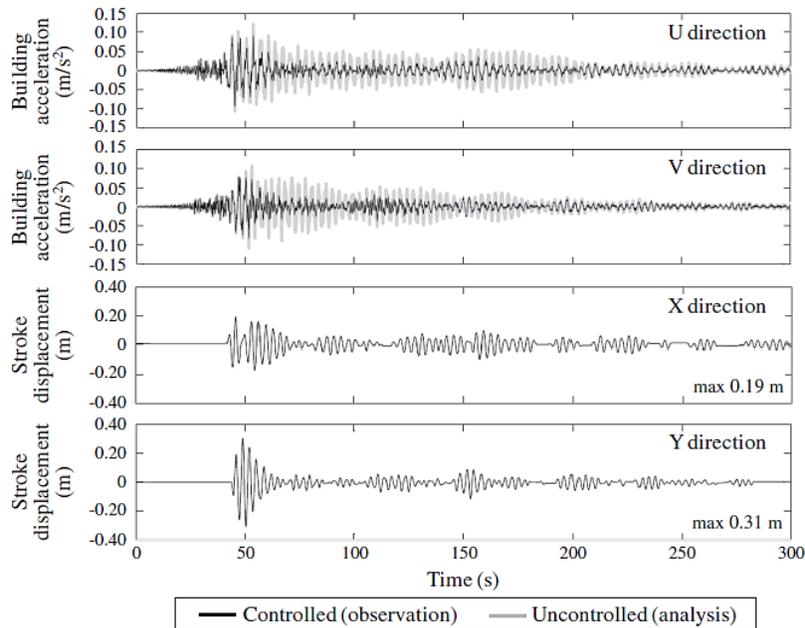


Figura 24. Registros observados en el comportamiento del edificio durante el sismo del 15 de septiembre del 2011. (18)

- En ambas investigaciones se concluye que los sistemas AMD diseñados disminuyen la aceleración de las edificaciones desde un 50% como respuesta a las vibraciones producidas por sismo o por movimientos sísmicos y aumentan el amortiguamiento hasta en un 9%.
- En todos los casos se hace necesario diseñar un algoritmo de control que servirá para activar el actuador según sea la fuerza de la excitación.
- Se puede crear diferentes configuraciones implementando variedad de dispositivos que conformen un sistema AMD según las características de la edificación.
- Se evidencia la efectividad de los sistemas de control activo.

5 EJEMPLO DE APLICACIÓN.

En este capítulo se desarrolla la aplicación de un sistema de masa sintonizada AMS en la cubierta de un edificio. Se realizó una modelación matemática de elementos finitos usando el software ETABS (4), realizando el diseño de los actuadores del sistema y algunas otras modificaciones de dichos dispositivos.

El paso inicial consiste en realizar un modelo para un diseño convencional cumpliendo con las características de predimensionamiento, definición de materiales, definición de cargas, chequeo de derivas y ajuste basal para el sismo

de diseño del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Seguido de esto se realizará un análisis tiempo historia a partir de los registros sísmicos de Armenia de 1999 y San Fernando de 1971. Finalmente se presentará un análisis comparativo de los resultados obtenidos.

La estructura consiste en un edificio de cuatro (4) niveles en pórticos de concreto, ubicado en la ciudad de Medellín para uso residencial. Las vigas se definieron con una sección de 40 cm x 60 cm y las columnas de 40 cm x 40 cm, la losa se estableció tipo "Shell".

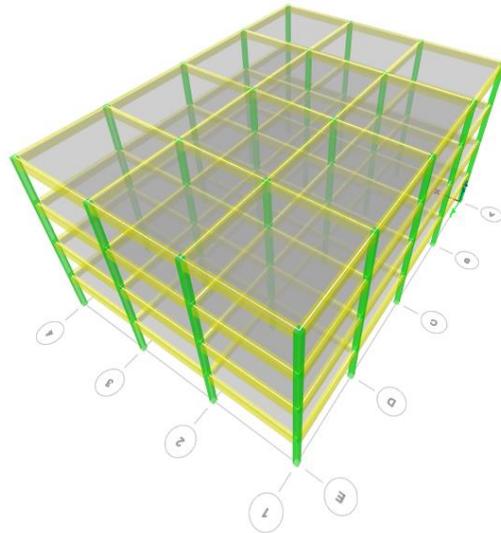


Figura 25. Estructura en estudio, modelo en ETABS. (Elaboración propia)

Los parámetros sísmicos para el cálculo del espectro de diseño de acuerdo con los lineamientos de NSR-10 se presentan a continuación:

$$\begin{aligned} A_a &= 0.15 \\ A_v &= 0.2 \\ F_a &= 1.2 \\ F_v &= 1.6 \\ I &= 1.0 \end{aligned}$$

Con esto parámetros se obtiene el espectro mostrado en la *Figura 26*

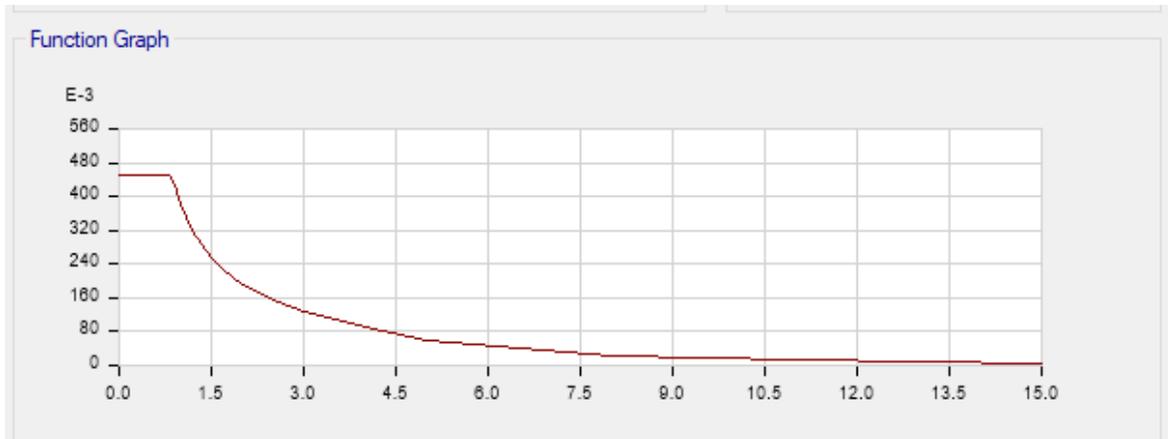


Figura 26. Espectro de diseño NSR-10.

Para hallar el valor de la fuerza cortante basal, para cada dirección, se realiza la combinación de las fuerzas cortantes de los modos de vibración considerados por el método de combinación cuadrática completa (CCC). En cada dirección del análisis se consideran aquellos modos de vibración cuyas sumas de masas efectivas es por lo menos el 90% de la masa de la estructura.

Con estos modos de vibración se hallaron los siguientes resultados de fuerzas cortantes en la base del edificio. Las figuras 27 y 28 muestran las fuerzas cortantes por piso sin la aplicación del AMS, obteniendo como valor máximo 2384.13 kN en el eje “x” y un valor máximo de 2384.13kN en el eje “Y”, luego de reducir las con un factor de disipación de respuesta igual a $R=5$ y sin aplicar el sistema de masa amortiguada.

ET Base Reactions

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None

Filter: None

	Output Case	Case Type	Step Type	FX tonf	FY tonf
▶	Dead	LinStatic		0	0
	FX	LinStatic		-612.5629	0
	FY	LinStatic		0	-612.5629
	SX	LinRespSpec	Max	551.2985	2.8456
	SY	LinRespSpec	Max	2.8424	551.3007
	Live	LinStatic		0	0

Figura 27. Ajuste dinámico antes de la aplicación del AMS.

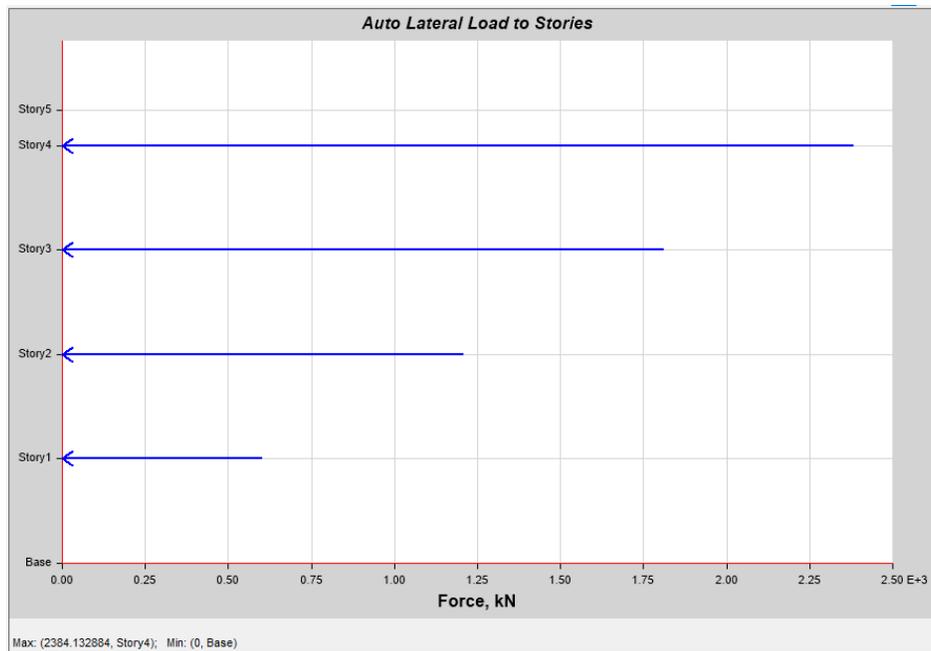


Figura 28. FHE en X antes de la aplicación del AMS.

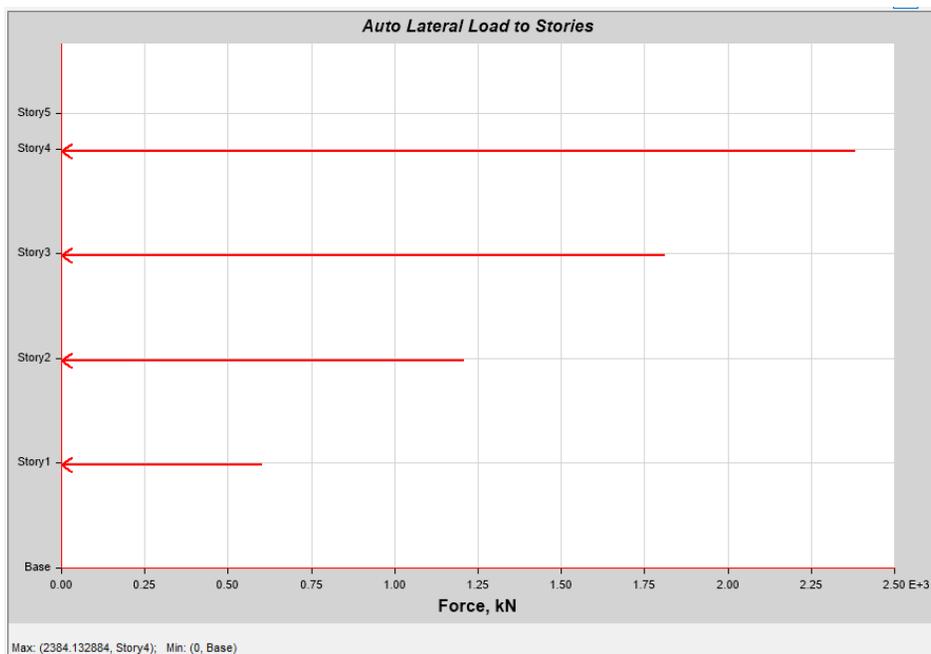


Figura 29. FHE en Y antes de la aplicación del AMS.

El desplazamiento máximo obtenido debido al sismo de diseño de la NSR-10 es de 0.15 m y se presenta en el eje "x" y el desplazamiento máximo en el eje "y" es de 0.1475m, tal como se muestra en las *Figura 30* y *Figura 31*.



Figura 30. Desplazamientos en X-X debido al sismo en X

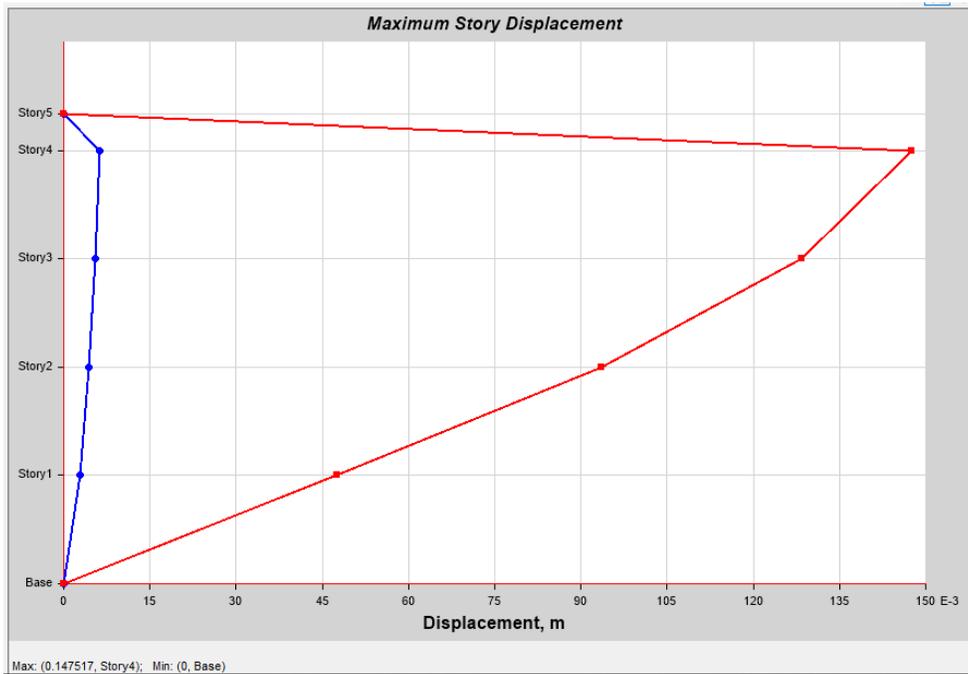


Figura 31. Desplazamientos en Y-Y debido al sismo en Y

5.1 Definición del sistema de amortiguamiento

Para realizar la definición del sistema de activación AMS se debe conocer previamente el peso de la estructura y su periodo fundamental.

Del modelo se obtuvieron las siguientes características:

Tabla 7. Parámetros obtenidos del modelo.

Peso (w)	18757.87	KN
Perio Fund. (T)	1.195	seg
Masa (M)	1912.12	Kg
Frec. Nat (wn)	5.258	rad/s
Rigidez (K)	52861.38	kN/m

Se define la relación de masa como el porcentaje de masa del total de la edificación que servirá para diseñar el amortiguador. Se recomienda que sea menor al 10% del peso total, en este caso considerando el peso total de la estructura, la redundancia y la homogeneidad, se seleccionó un 5% del peso para el diseño del amortiguador. (17). La relación de masa indica que a mayor masa entonces se obtiene mayor eficiencia del sistema AMD.

$$Mm = \mu * M \quad (6)$$

Realizando una gráfica que represente la variación de la frecuencia en la excitación puede tolerar el amortiguador (Ver *Figura 32* y *Figura 33*), entonces se puede definir cuál es la razón de amortiguamiento óptimo según las condiciones de la estructura en estudio, para esto se realizó la siguiente formulación (17):

- Relación de frecuencias:

Describe la eficiencia de un elemento disipador o absorbedor.

$$f = \frac{1}{1 + \mu} = \frac{1}{1 + 0.05} \quad (7)$$

- Razón del amortiguamiento optimo:

Se determina haciendo la curva de la figura *Figura 32* y *Figura 33* lo más plano posible en los puntos A y B, la ecuación que define la pendiente de la curva en este punto está dada por la ecuación (8).

$$\xi = \sqrt{\frac{3 * \mu}{8 * (1 + \mu)^3}} \quad (8)$$

- Amortiguamiento crítico:

$$C_{cr} = 2 * m * wn \quad (9)$$

Tabla 9. Parámetros para el diseño del amortiguador en el sentido Y-Y.

Peso (w)	18757.873	18757.873	18757.873	18757.873	18757.873	18757.873
Perio Fund. (T)	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191
Masa (M)	1912.117	1912.117	1912.117	1912.117	1912.117	1912.117
Frec. Nat (wn)	5.276	5.276	5.276	5.276	5.276	5.276
Rigidez (K)	53217.049	53217.049	53217.049	53217.049	53217.049	53217.049
μ	0.020	0.050	0.170	0.127	0.250	0.300
Rel masa (m)	38.242	95.606	325.060	242.839	478.029	573.635
Rel frec. (f)	0.980	0.952	0.855	0.887	0.800	0.769
Razon amort.(zi)	0.084	0.127	0.200	0.182	0.219	0.226
Amor. Cri (Ccr)	403.499	1008.748	3429.743	2562.220	5043.740	6052.488
Frec. Nat amort (wna)	5.172	5.024	4.509	4.681	4.220	4.058
Rigi amort. (Ka)	197.794	480.356	1465.702	1136.744	2017.496	2327.880
Coef amort. AMS ©	33.921	128.381	684.263	467.356	1105.028	1369.604
Rel frec.(g)	3555.621	3555.621	3555.621	3555.621	3555.621	3555.621

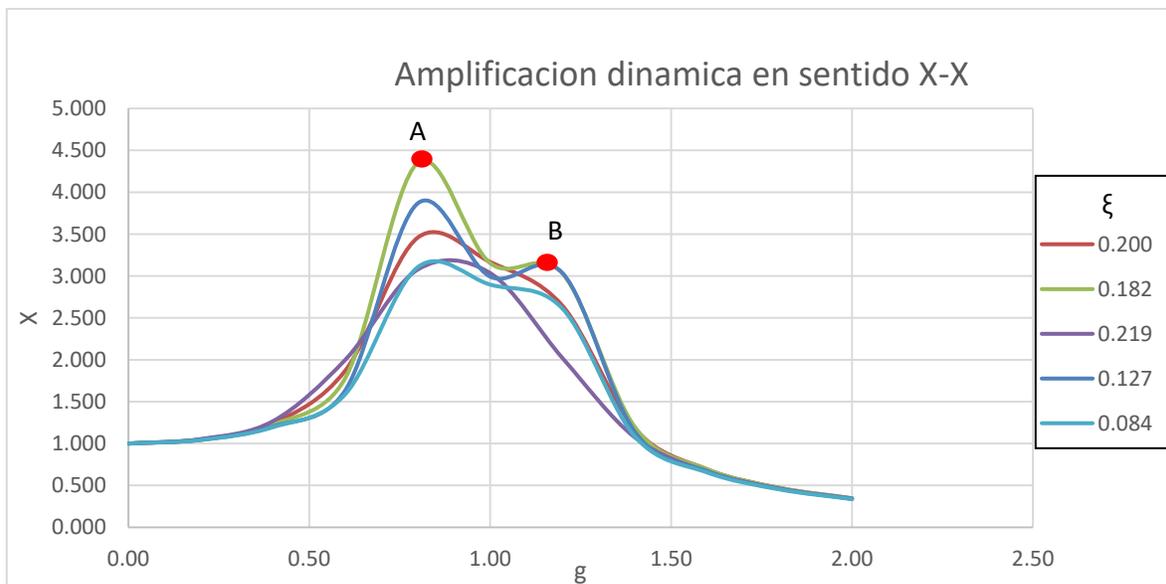


Figura 32. Grafica de amplificación dinámica usando AMS en la dirección X-X

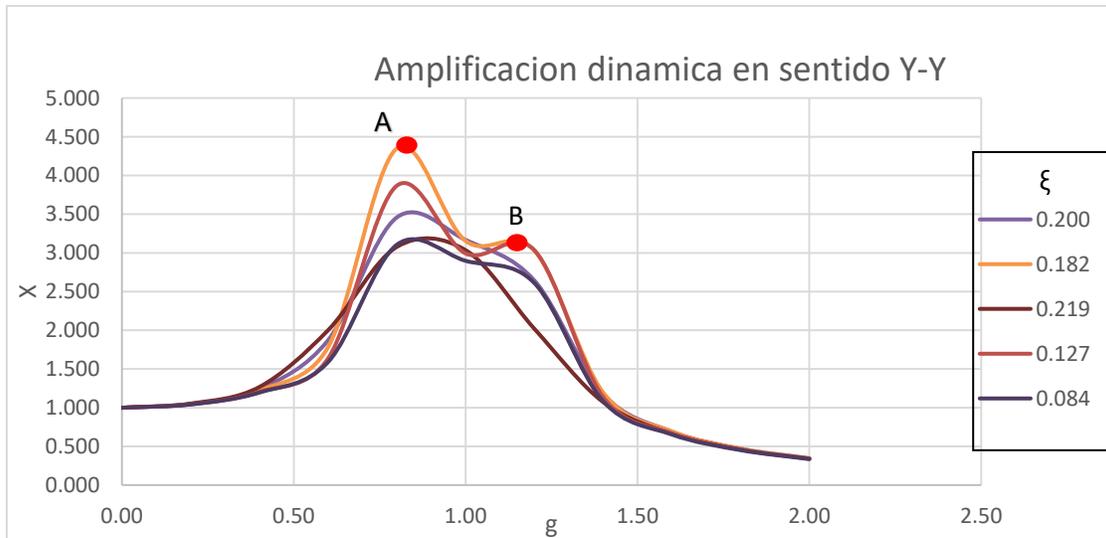


Figura 33. Grafica de amplificación dinámica usando AMS en la dirección Y-Y

En la Figura 32 y Figura 33 se observa que se puede obtener diferentes magnitudes de amplificación dinámica para diferentes razones de amortiguamiento y como se tiene diferente rigidez para cada dirección, se debe usar la rigidez de la dirección más flexible y con mayores desplazamientos en esa dirección, sin embargo como se puede observar en las gráficas, los desplazamientos son muy parecidos debido a la homogeneidad de la edificación, es decir no tiene irregularidades en planta ni altura, por lo tanto cualquier razón de amortiguamiento que se escoja servirá para ambas direcciones.

5.2 Modelación de los aisladores del amortiguador de masa sintonizada

La ubicación del amortiguador en el modelo matemático de ETABS corresponde a la línea de acción del centro de masa, en el nivel superior de la estructura, para evitar posibles excentricidades. La aplicación se realiza por medio de la función "*link property*" que utiliza un resorte como elemento de transferencia a la estructura. Se utilizan las siguientes propiedades en las direcciones x, y (Figuras 34 y 35).

Identification

Property Name: AISLADOR

Direction: U2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: Yes

Linear Properties

Effective Stiffness: 72569.211 kN/m

Effective Damping: 0 kN-s/m

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0.25 m

Nonlinear Properties

Stiffness: 6173.286 kN/m

Yield Strength: 154.3322 kN

Post Yield Stiffness Ratio: 0.174

Figura 34. Propiedades del aislador en ETABS.

General

Link Property Name: AISLADOR

Link Type: Rubber Isolator

Link Property Notes: Modify/Show Notes...

P-Delta Parameters: Modify/Show...

Acceptance Criteria: Modify/Show...
None specified

Total Mass and Weight

Mass: 0 ton

Weight: 0 kN

Rotational Inertia 1: 0 ton-m²

Rotational Inertia 2: 0 ton-m²

Rotational Inertia 3: 0 ton-m²

Factors for Line and Area Springs

Link/Support Property is Defined for This Length When Used in a Line Spring Property: 0 m

Link/Support Property is Defined for This Area When Used in an Area Spring Property: 0 m²

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties	Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...	<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...	<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

Fix All Clear All

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases: Effective Stiffness from Zero, Else Nonlinear

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping: Initial Stiffness (K0)

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor: 1

OK Cancel

Figura 35. Propiedades del aislador en ETABS.

5.3 Análisis Dinámico Cronológico

Para el caso presentado en esta investigación, se hará uso de un análisis dinámico tiempo historia mediante dos (2) registros acelerográficos: el sismo de Armenia de 1999 y el sismo de San Fernando de 1971.

El sismo de **Armenia** ocurrió el 25 de enero de 1999 en el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia a las 13:19 hora local con epicentro en el Departamento del Quindío, el cual alcanzó una magnitud de 6.2 en la Escala de Richter (MS). La gran pérdida de vidas humanas (2.000 muertos) y las graves consecuencias económicas y sociales hacen que este sismo sea considerado como uno de los más desastrosos para la historia sísmica de Colombia y en especial para los departamentos de Quindío, Caldas y Risaralda. En total fueron detectadas 14 réplicas del terremoto; la primera ocurrida a las 17:40 de magnitud 5,4 en la escala de Richter, otras réplicas que causaron pánico entre los habitantes ocurrieron el día 29 de enero a las 23:33 hora local, de magnitud 4,2 (MS) y el día 31 de enero a las 03:03 hora local, de magnitud 3,5 (MS).

A continuación, se presentan los registros sismológicos del terremoto de **Armenia** con el que se va a realizar el análisis no lineal para evaluar el desempeño sísmico de la estructura, el cual cuenta con 3983 registros cada 0.005 segundos en la dirección X y 3597 registros cada 0.005 segundos en la dirección Y; cabe resaltar que los análisis matemáticos se hicieron tomando 4000 registros en la dirección X y 3600 registros para la dirección Y, para un total de 20 y 18 segundos, respectivamente.

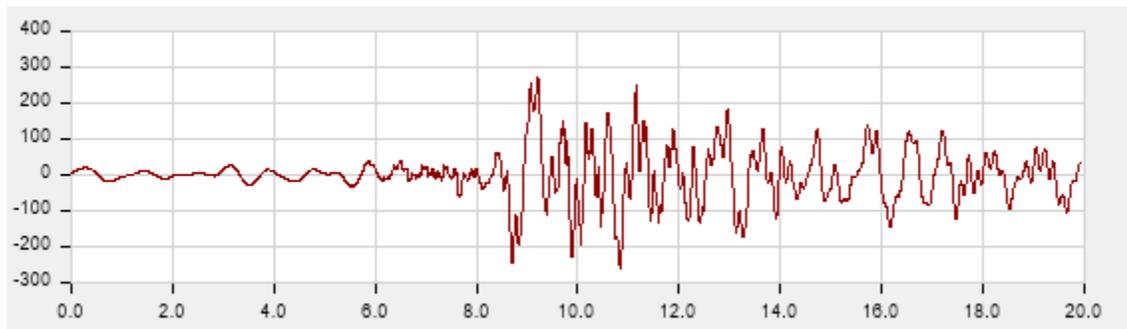


Figura 36. Registro sismo de Armenia en dirección X-X.

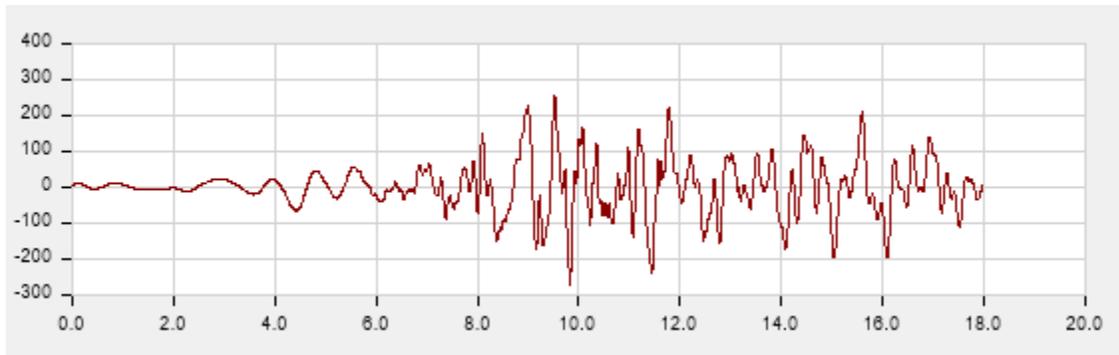


Figura 37. Registro sismo de Armenia en dirección Y-Y.

El sismo de **San Fernando** se produjo el 9 de febrero de 1971 a las 06:00 hora local, en las estribaciones de las montañas de San Gabriel en el sur de California, Estados Unidos, con epicentro a 5 millas al norte del Valle de San Fernando. El terremoto tuvo una magnitud de 6,5 en la escala de Richter (MS) y una duración aproximada de 12 segundos. Los daños fueron severos a nivel local en el norte del Valle de San Fernando, lo que provocó agrietamiento superficial al sur del epicentro en las montañas, así como los entornos urbanos a lo largo de las calles y barrios, además de levantamiento y otros efectos que perjudicaron viviendas y empresas, dejando más de 50 muertos y más de 200 personas heridas.

Se registraron 200 réplicas de magnitud 3.0 (MS) o mayor y cuatro réplicas de magnitud 5.0 (MS) o mayor. Durante la primera hora de actividad, las réplicas más grandes fueron eclipsando los eventos más pequeños.

El registro sismológico del terremoto de **San Fernando** utilizado para realizar el análisis no lineal, cuenta con 6018 registros cada 0.01 segundos en ambas direcciones ortogonales; cabe resaltar que los análisis matemáticos se hicieron tomando en ambas direcciones ortogonales 6020 registros para un total de 60.2 segundos.

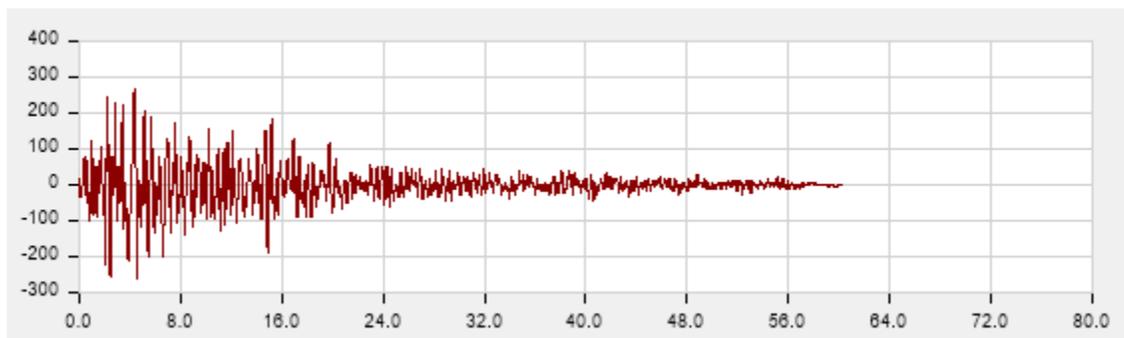


Figura 38. Registro sismo de San Fernando en dirección X-X.

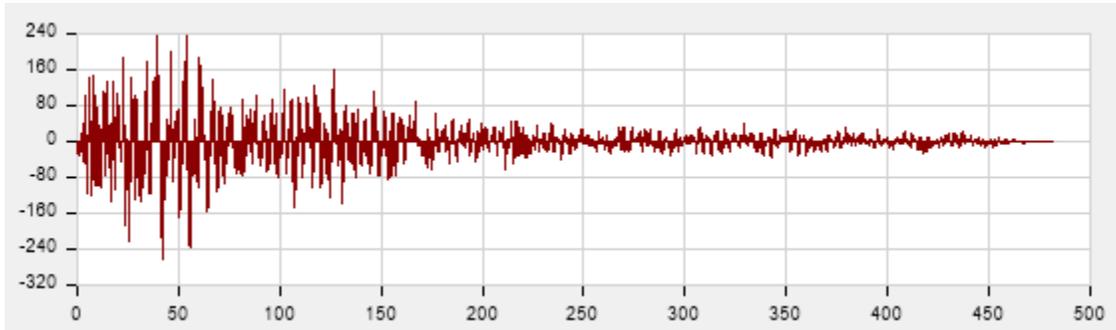


Figura 39. Registro sismo de San Fernando en dirección Y-Y.

Los resultados de este análisis se compararán con un análisis modal espectral para el cual, dichos registros se ajustaron al espectro de la NSR-10 con las características del sitio mencionadas anteriormente.

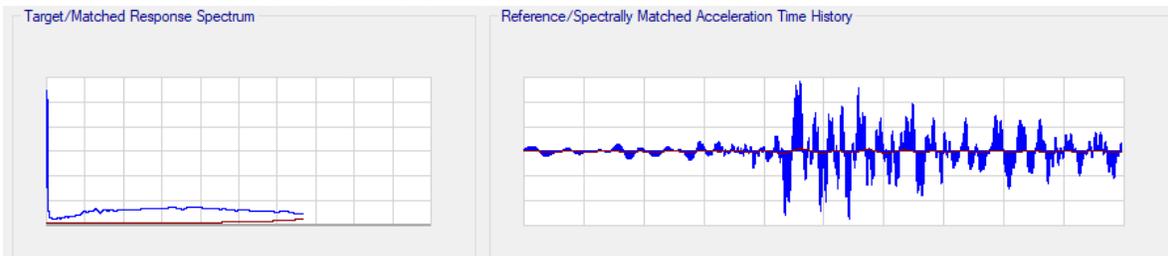


Figura 40. Ajuste del espectro de diseño a los registros sísmicos de Armenia, en el eje X

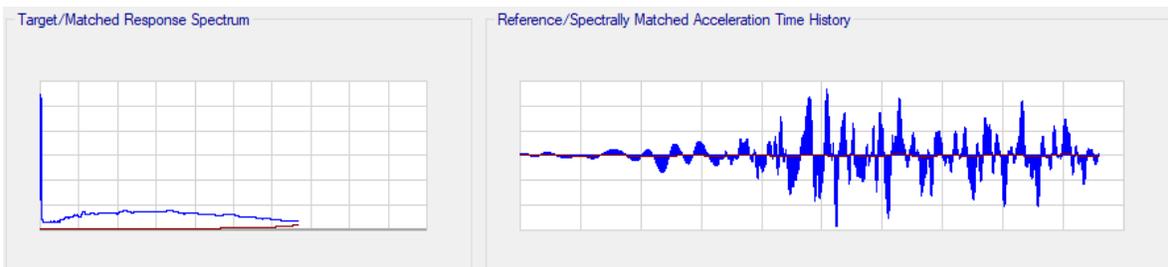


Figura 41. Ajuste del espectro de diseño a los registros sísmicos de Armenia, en el eje Y

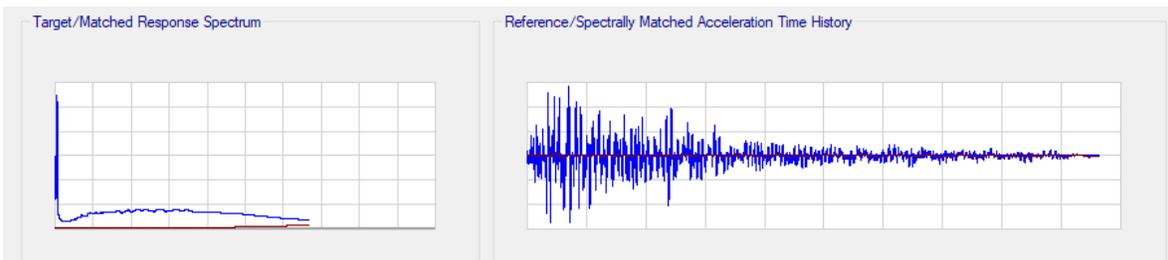


Figura 42. Ajuste del espectro de diseño a los registros sísmicos de San Fernando, en el eje X

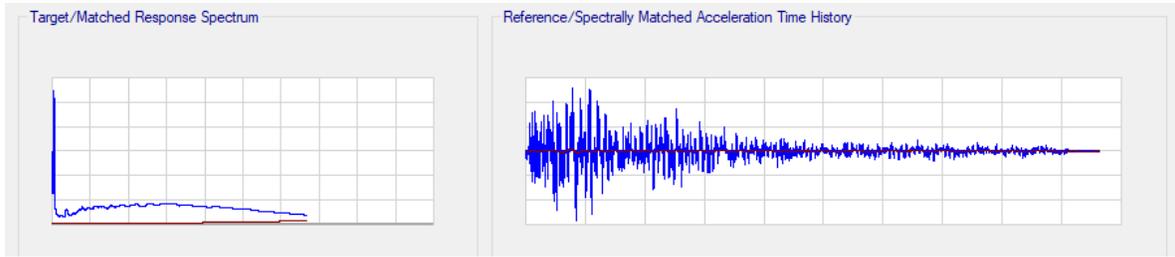


Figura 43. Ajuste del espectro de diseño a los registros sísmicos de San Fernando, en el eje Y

A partir de la figura Figura 40 a la Figura 43 se realiza el análisis dinámico tiempo historia. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las fuerzas del análisis espectral.

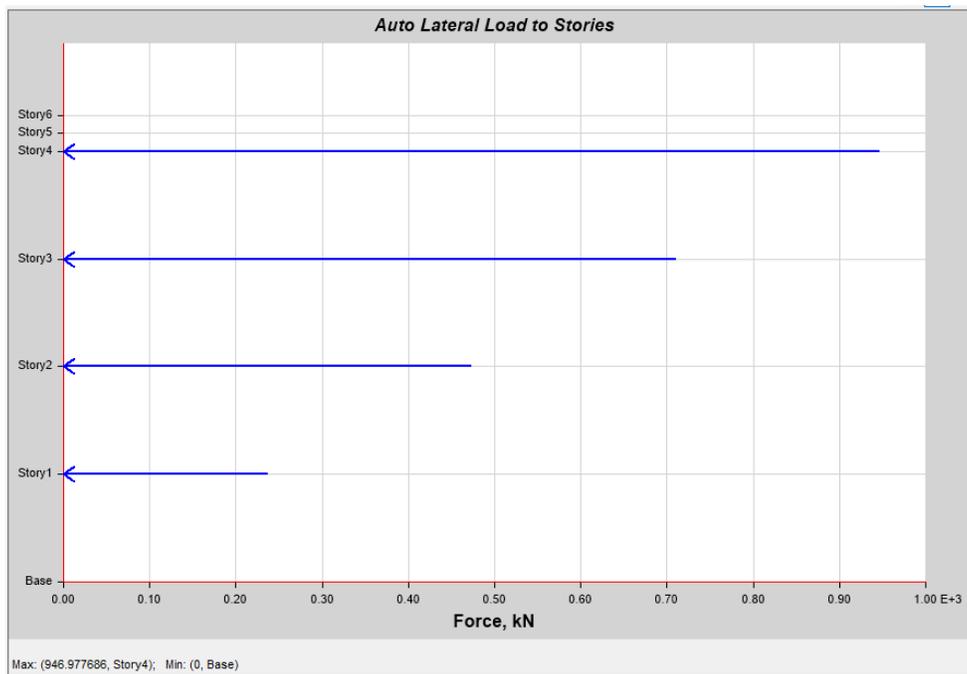


Figura 44. FHE en X después de la aplicación del AMS.

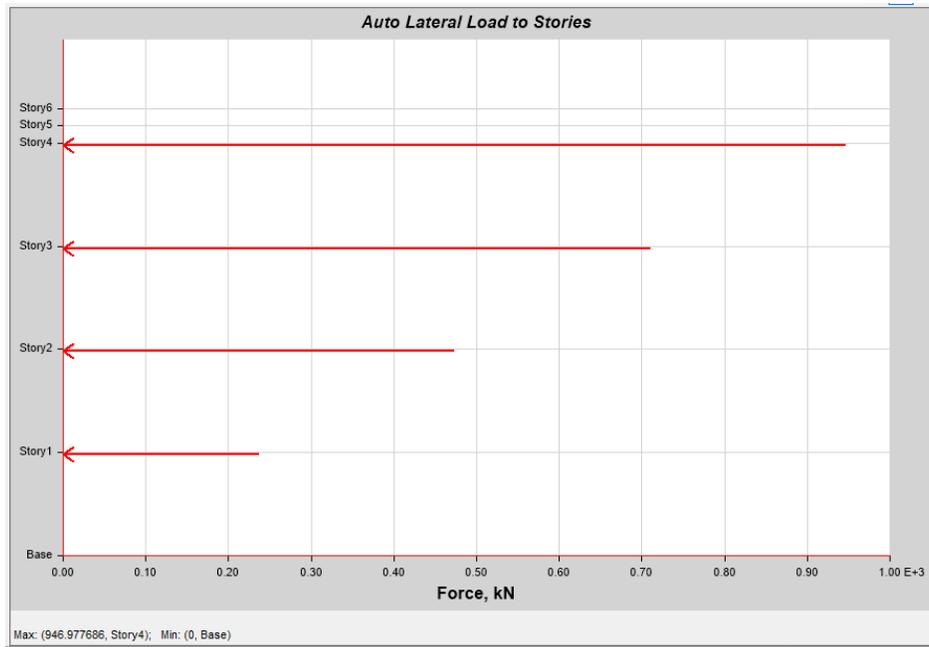


Figura 45. FHE en Y antes de la aplicación del AMS.

Los desplazamientos máximos obtenidos se presentan a continuación en la *Figura 46* y *Figura 47*

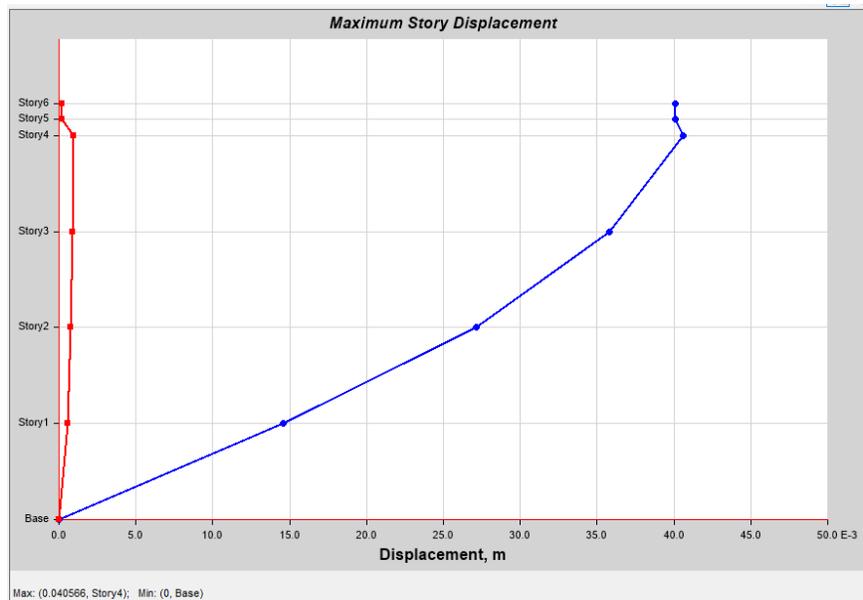


Figura 46. Desplazamientos en X-X debido al sismo de Armenia en X

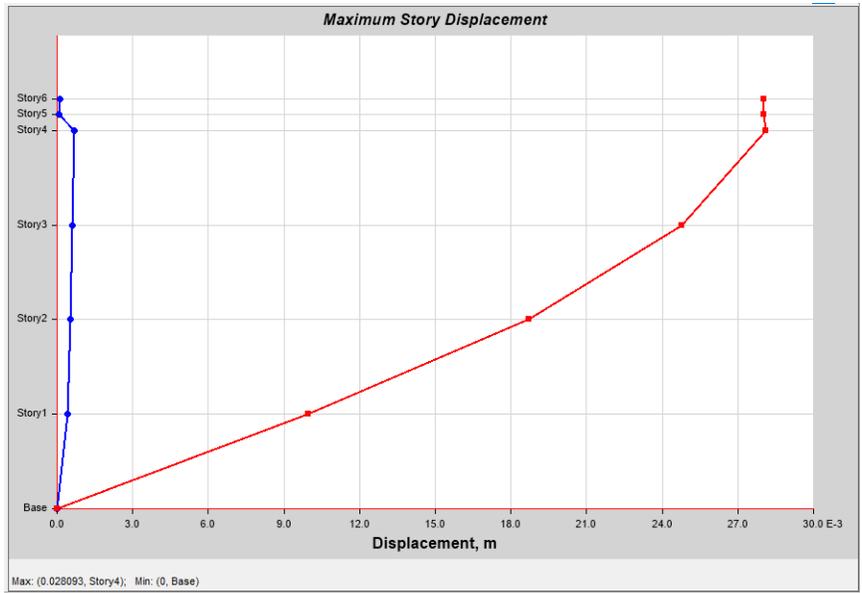


Figura 47. Desplazamientos en Y-Y debido al sismo de Armenia en Y

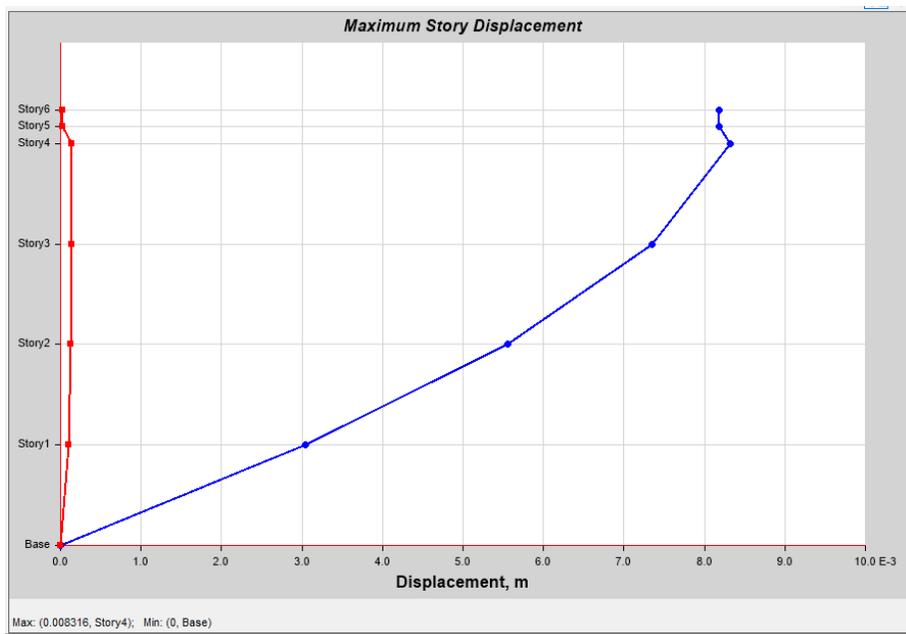


Figura 48. Desplazamientos en X-X debido al sismo de San Fernando en X

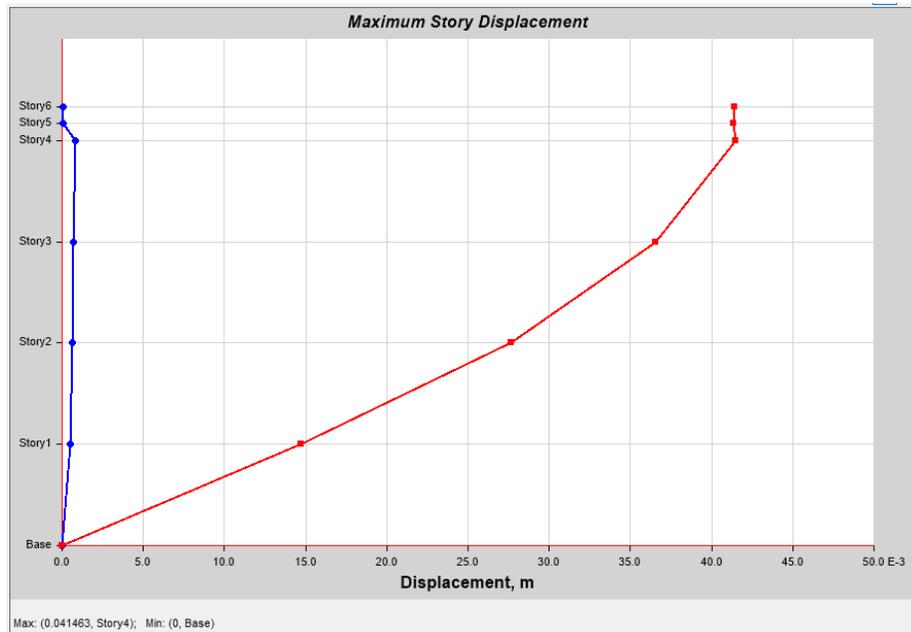


Figura 49. Desplazamientos en Y-Y debido al sismo de San Fernando en Y

Tabla 10. Resumen desplazamientos obtenidos.

Sismo	Desplazamientos
SX	0.1518
SY	0.1475
SX+AMS	0.06293
SY+AMS	0.06130
ARM X	0.0405
ARM Y	0.0281
SAN FDO X	0.08361
SAN FDO Y	0.0414

Tabla 11. Resumen fuerzas espectrales obtenidas.

Sismo	Fuerza sísmica
FX	2384.13
FY	2384.13
FX+AMS	948.97
FY+AMS	948.97

Según la Tabla 10 y *Tabla 11* se observa la reducción en la respuesta sísmica de la edificación. Dependiendo de la fuerza a la que está sometida el edificio, entonces así mismo es su comportamiento, por eso ante fuerzas sísmicas diferentes se obtienen desplazamientos diferentes. Sin embargo, independiente de esto, el sistema de amortiguamiento es capaz de “leer” la magnitud de la excitación para responder en igual proporción y así lograr la reducción de las fuerzas y los

desplazamientos. Los desplazamientos obtenidos para cada registro sísmico dependen de factores como la irregularidad de la edificación, el número de pisos, la ubicación geográfica del edificio, entre otros. Para el caso en estudio se evidencia que los sismos generan mayores desplazamientos en el eje "X" lo que puede interpretarse como mayor masa a ser excitada en esta dirección, lo cual es coherente con la geometría de la estructura presentada en la Figura 25.

I have to see

6 CONCLUSIONES

- En el mundo existe variedad a de sistemas de disipación de energía y amortiguamiento, que en la actualidad están implementados con éxito y se encuentran documentados a lo largo del tiempo; sin embargo, para escoger uno de ellos dependerá de las condiciones del proyecto que se quiere realizar por ejemplo lugar dónde se desarrollará el proyecto, número de pisos, uso de la edificación, magnitud de las fuerzas, desplazamientos y derivas que se quieren reducir, entre otros.
- Los mecanismos de control activo son algunos de los sistemas de disipación de energía que más proyección tiene en cuanto al desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías, pues es posible aplicarlos en cualquier tipo de estructuras como puentes y edificios, entre otros. No obstante, en la actualidad estos sistemas siguen siendo poco implementados en comparación a los sistemas pasivos debido a la dependencia de energía eléctrica, grandes espacios para su aplicación e instalación y altos costos de construcción.
- La posición en planta de los AMS (Amortiguadores de Masa Sintonizada) en la estructura, que da la mejor respuesta dinámica es donde, la línea que une los AMS intercepta lo más cerca posible al centro de masa de la estructura.
- El cortante del análisis dinámico espectral en el edificio sin AMS es de 2384 kN en ambas direcciones; mientras que, con la incorporación de AMS en el edificio, en “X” y “Y”, es de 948.97 kN; implicando una reducción con el uso de AMS del 39.8%.
- La respuesta estructural depende tanto de la masa como de la de rigidez. Sin embargo, la ubicación del dispositivo AMS definirá la rigidez torsional de la estructura.
- Los desplazamientos laterales de la edificación obtenidos en la estructura se redujeron un 41.5% para las fuerzas espectrales después de usar el amortiguador de masa sintonizada; un 20% para las fuerzas del sismo en Armenia en comparación con el análisis espectral y un 30% para el sismo de San Fernando en comparación con el análisis espectral, en todos los casos después de aplicar el AMS.
- Los efectos en la reducción de los resultados al implementar cualquier sistema de amortiguamiento, depende no solo de las características de la edificación, sino también de las características físicas del sismo o fuerza externa que interactúa con la edificación.

7 BIBLIOGRAFIA.

1. Andrade, R. (1993). *Control predictivo en sistemas de protección sísmica de estructuras*. Barcelona: A.H Barbat
2. Chang, S. (2020). Active Mass Damper for Reducing Wind and. Gwangju, Korea: Actuators, MDPI.
3. DATA, T. (2003). A state-of-the-art review on active control of structures. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 17. (6)
4. ETABS (version 18.1.1) {software}. (1984). Computers and Structures. Inc.
5. Gomez , D., Marulanda, J., & Thomson, P. (2007). Sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas. Cali: Revistas Universidad Nacional.
6. Iguarin Lopez, C. A., & Moreno, J. F. (2006). Factibilidad del uso de amortiguadores de masa sintonizados. Santa Marta.
7. Martínez, J. (2019). *Análisis de la Presencia de Actuadores en Sistemas de Amortiguamiento Activo*. Huixquilucan.
8. Moreno, F. E. (2015). Sistema de control activo resonante integral para vibraciones en una viga en voladizo. *Revista Colombiana de Tecnología*
9. Nazarimofrad E, F. S. (2018). *Multiobjective optimal placement of active tendons to control irregular*. Irán.
10. Oviedo, J. A., & Duque, M. D. (2006). Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. *Revista EIA*, 5.
11. Oviedo, J. A., & Duque, M. D. (2009). Situación de las técnicas de control de respuesta sísmica en Colombia. *Revista EIA*, 13.
12. Ponce Méndez, A. V., & Moya de la Torre, E. (2019). *Control activo de vibraciones en estructuras civiles esbeltas*. Coruña
13. Pastia, C., Lucca, S. G., Chira, F., & Octavian, V. (s.f.). *Structural control systems implemented in civil*.
14. Poncela, A., & Moya de la Torre, E. (s.f.). *Control activo de vibraciones en estructuras civiles esbeltas*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
15. Perezza Fadon, S. (5 de Mayo de 2011). Ferrovial blog. Obtenido de Estructuras inteligentes: <https://blog.ferrovial.com/es/2011/05/estructuras-inteligentes/>
16. Ruiz Gorrindo, F., & Llorens García, A. (2013). Aplicación de las nuevas tecnologías para la gestión de la salud estructural de las construcciones. Cimbra.
17. TURPO, R. P. (2017). ANALISIS DE UN EDIFICIO ASIMETRICO DE 10 NIVELES DE CONCRETO ARMADO CON AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADA. Arequipa, Perú.
18. Yamamoto, M., & Sone, T. (2013). Behavior of active mass damper (AMD) installed in high-rise building during 2011 earthquake off Pacific coast of

Tohoku and verification of regenerating system of AMD based on monitoring.
Chiba, Japón.