

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO
VISCOSO PARA PROTECCIÓN SÍSMICA DE UNA ESTRUCTURA 2D CON
COMPORTAMIENTO ELÁSTICO**

LEIDY XIOMARA JAIMES VELASCO

KARIN DAYANNA ORTIZ CASTILLO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO
VISCOSO PARA PROTECCIÓN SÍSMICA DE UNA ESTRUCTURA 2D CON
COMPORTAMIENTO ELÁSTICO**

LEIDY XIOMARA JAIMES VELASCO

KARIN DAYANNA ORTIZ CASTILLO

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

Director

OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO

Ingeniero, MSc., PhD.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

A Dios que ha guiado mi camino, ha llenado mi vida de bendiciones y sabiduría permitiéndome llegar a este punto de mi vida.

A mi mami Yalexí Castillo por sus grandes esfuerzos, por su apoyo incondicional y sobre todo por creer en mí.

A mi padre Yurdi Ortiz por estar siempre presente a lo largo de mi vida.

A mi novio Sergio Peña por apoyarme día a día y darme el valor de continuar luchando.

A mi compañera de proyecto Leidy Velasco por confiar en mí y ser un apoyo en el desarrollo de este trabajo.

Y a todos mis familiares y amigos que de una u otra manera contribuyeron en mi formación personal y profesional.

Karin Dayanna Ortiz Castillo

DEDICATORIA

Este trabajo de grado se lo dedico a Dios en primer lugar que me ha dado lo que tengo y me ha formado según su voluntad.

A mi madre Marlene Velasco, a mi hermano Edinson Jaimes y a mi tía Dioselina Jaimes por el apoyo, amor y confianza que me brindaron a lo largo de mi formación como persona y como profesional.

A Karin Dayanna Ortiz quien fue la mejor compañera en el desarrollo del trabajo de grado, teniendo paciencia y consejo en todo momento.

A mis amigos y demás familiares que de alguna manera aportaron enseñanzas a mi vida y me acompañaron en todo momento, en especial a mi amiga Dayan Carreño por estar siempre presente para mí.

Leidy Xiomara Jaimes Velasco

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por ser el ente formador de nuestros conocimientos.

Al Ingeniero Oscar Javier Begambre Carrillo por la orientación, acompañamiento y confianza en el desarrollo del trabajo de grado.

Al excelente cuerpo docente de la escuela de ingeniería civil por aportar conocimientos y experiencias a nuestra formación integral y al Ingeniero Edgar de los Santos encargado de la plataforma MIDAS GEN que contribuyó con material de apoyo para el desarrollo de este.

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1. JUSTIFICACIÓN | 15 |
| 2. OBJETIVOS | 16 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL..... | 16 |
| 2.2. OBEJIVOS ESPECÍFICOS | 16 |
| 3. SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA | 17 |
| 3.1. CONTROL PASIVO..... | 18 |
| 3.2. CONTROL ACTIVO..... | 19 |
| 3.3. CONTROL SEMIACTIVO | 20 |
| 3.4. CONTROL HÍBRIDO | 20 |
| 4. DISPOSITIVOS PASIVOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA | 21 |
| 4.1. SISTEMAS DE AISLACIÓN..... | 21 |
| 4.2. DISIPADORES PASIVOS DE ENERGÍA | 21 |
| 4.3. DISIPADORES VISCOELÁSTICOS..... | 22 |
| 4.3.1. Disipadores viscoelásticos solidos | 22 |
| 4.3.2. Disipadores viscoelásticos fluidos..... | 23 |
| 4.4. DISIPADORES HISTERÉTICOS | 24 |
| 5. SISTEMAS DE CONTROL DE VIBRACIONES | 25 |
| 6. FUERZA DE AMORTIGUAMIENTO | 27 |
| 6.1. TIPOS DE AMORTIGUAMIENTO | 27 |
| 6.1.1. Amortiguamiento fluido..... | 28 |
| 6.1.2. Amortiguamiento por histéresis | 28 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 6.1.3. | Amortiguamiento por fricción seca | 28 |
| 7. | CASO DE ESTUDIO | 29 |
| 7.1. | EVALUACIÓN DE CARGAS..... | 29 |
| 7.1.1. | Cargas muertas | 29 |
| 7.1.2. | Cargas vivas requeridas..... | 30 |
| 7.2. | GENERALIDADES | 32 |
| 7.3. | MODELAMIENTO NUMÉRICO DEL PÓRTICO EN EL SOFTWARE MIDAS GEN® | 33 |
| 8. | ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL | 34 |
| 8.1. | DEFINICIÓN DE LOS ACELEROGRAMAS..... | 34 |
| 8.2. | ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA (ANÁLISIS DOMINIO DEL TIEMPO) | 35 |
| 9. | DISEÑO DE LOS AMORTIGUADORES VISCOSOS LINEALES | 37 |
| 10. | MODELAMIENTO DEL PÓRTICO CON AMORTIGUAMIENTO VISCOSO LINEAL | 41 |
| 11. | EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS | 60 |
| 11.1. | DESPLAZAMIENTOS Y DERIVAS | 60 |
| 11.2. | VELOCIDADES..... | 61 |
| 11.3. | FUERZAS Y ESFUERZOS CORTANTES | 63 |
| 11.4. | CAMBIO DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES | 66 |
| 11.4.1. | Comparación de área | 67 |
| 12. | CONCLUSIONES..... | 69 |
| | REFERENCIAS..... | 71 |
| | BIBLIOGRAFIA..... | 74 |
| | ANEXOS | 75 |

LISTA DE FIGURAS

Pág.

| | |
|---|----|
| Figura 1. Representación de un sistema de control pasivo [10]. | 18 |
| Figura 2. Representación de un sistema de control activo [10]. | 19 |
| Figura 3. Representación de un sistema de control híbrido [10]. | 20 |
| Figura 4. Configuración típica de un disipador viscoelástico sólido [12]. | 23 |
| Figura 5. Disipador Viscoelástico fluido [12]. | 24 |
| Figura 6. Acelerogramas del sismo los Santos Santander, Gorgona y Risaralda. | 34 |
| Figura 7. Interfaz gráfica del Software MIDAS GEN®. | 41 |
| Figura 8. Propiedades del material. | 42 |
| Figura 9. Propiedades de la sección | 43 |
| Figura 10. Creación de nodos. | 44 |
| Figura 11. Trasladar nodos. | 45 |
| Figura 12. Creación de elementos. | 46 |
| Figura 13. Pórtico creado mediante elementos. | 46 |
| Figura 14. Creación del diafragma rígido. | 47 |
| Figura 15. Definición de las condiciones de apoyo. | 47 |
| Figura 16. Definición de los casos de carga estática. | 48 |
| Figura 17. Asignar peso propio. | 49 |
| Figura 18. Creación de datos de masa en el pórtico. | 50 |
| Figura 19. Convertir cargas en masa. | 51 |
| Figura 20. Agregar casos de carga tiempo historia. | 52 |
| Figura 21. Función tiempo historia. | 53 |
| Figura 22. Asignar la aceleración al suelo. | 54 |
| Figura 23. Definición de los datos del control de análisis. | 55 |
| Figura 24. Definir respuesta a la función tiempo historia. | 56 |
| Figura 25. Definir las propiedades del General Link | 57 |
| Figura 26. Propiedades del amortiguador viscoso lineal. | 57 |
| Figura 27. Modelamiento del amortiguador viscoso lineal. | 58 |
| Figura 28. Pórtico con amortiguadores viscosos lineales. | 59 |
| Figura 29. Comparación de derivass. | 61 |
| Figura 30. Comparación de desplazamientos. | 61 |
| Figura 31. Comparación de velocidades. | 62 |
| Figura 32. Numeración de elementos estructurales (vigas y columnas) | 63 |
| Figura 33. Comparación de fuerzas. | 64 |
| Figura 34. Comparación de esfuerzos cortantes. | 65 |
| Figura 35. Comparación de áreas. | 67 |

LISTA DE TABLAS

Pág.

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Masa de los materiales..... | 29 |
| Tabla 2. Cálculo de la carga muerta..... | 30 |
| Tabla 3. Cargas vivas mínimas uniformemente distribuidas. | 31 |
| Tabla 4. Especificaciones del pórtico de estudio..... | 32 |
| Tabla 5. Redimensionamiento de las secciones transversales con amortiguadores. | 66 |

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO VISCOZO PARA PROTECCIÓN SÍSMICA DE UNA ESTRUCTURA 2D CON COMPORTAMIENTO ELÁSTICO*

AUTORES:

LEIDY XIOMARA VELASCO JAIMES **

KARIN DAYANNA ORTIZ CASTILLO **

PALABRAS CLAVE: sistema de protección sísmica, amortiguador viscoso lineal, análisis dinámico lineal de historias en el tiempo, control pasivo, amplificación dinámica.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de grado fue realizado con el propósito de fomentar la investigación en el uso de un sistema de amortiguamiento viscoso para protección sísmica de estructuras, de esta manera se busca incentivar la importancia que tiene el uso de estos sistemas en las estructuras dando lugar a la seguridad preservando la vida. Así, se hace un aporte a la bibliografía de la biblioteca de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER para el uso público con la visión de que se continúe con el estudio de estos sistemas y sobretodo en la implementación de estos en Colombia ya que nuestro país no se destaca en su uso.

Se realizó la evaluación del desempeño de un sistema de amortiguamiento viscoso (Viscoelastic Damper), para protección sísmica sobre un pórtico 2D con comportamiento elástico lineal por medio de un análisis dinámico tiempo-historia. El modelamiento numérico se realizó en el software MIDAS GEN®1 sometiendo el pórtico a tres acelerogramas diferentes: Los Santos-Santander, Gorgona-Pacífico y Risaralda-Caldas. Usando tres factores de amortiguamiento del 20%, 40% y 60% se hizo una comparación del modelo con y sin amortiguadores viscosos lineales. Además se realizó el redimensionamiento de las secciones para cada caso de amortiguamiento estudiado. La implementación del sistema de amortiguamiento dio como resultado la reducción de las derivas, desplazamientos, velocidades, fuerzas y esfuerzos cortantes. Como se esperaba evidencia la importancia que tiene la disipación de energía en las estructuras, la investigación confirma que el uso de dispositivos es importante para la búsqueda de evitar daños en estructuras.

* Graduate Project

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, Ingeniero Civil, Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: PERFORMANCE EVALUATION OF A VISCOUS DAMPING SYSTEM FOR SEISMIC PROTECTION OF A 2D STRUCTURE WITH THE ELASTIC BEHAVIOR *

AUTHOR:

LEIDY XIOMARA VELASCO JAIMES **

KARIN DAYANNA ORTIZ CASTILLO **

KEYWORDS: seismic protection system, linear viscous damper, linear time history analysis, passive control, dynamic amplification.

DESCRIPTION:

This degree work was conducted with the aim of promoting research in the use of a system of viscous damping for seismic protection of structures, thus it seeks to encourage the importance of the use of these systems in the structures resulting in the security preserving life. Thus, a contribution to the literature of the library of the UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, for public use is made; with the vision to continue with the study of these systems and especially in the implementation of these in Colombia, because our country is not highlighted in use. It took place performance evaluation of a system of viscous damping (Viscoelastic Damper) for 2D seismic protection on a porch, with linear elastic behavior through a dynamic time-history analysis. The numerical modeling was performed in the software called MIDAS GEN®1, subjecting the porch to three different accelerograms: Los Santos-Santander, Gorgona-Pacífico and Risaralda-Caldas. Using three factors buffer: 20%, 40% and 60%, a comparison was made with and without model linear viscous dampers. In addition, it was carried resizing sections buffer for each case studied. The buffer system implementation resulted in the reduction of drifts, displacements, velocities, forces and shear forces. As evidence expected the importance of energy dissipation structures, research confirms that the use of devices is important for finding avoid damage to structures.

* Graduate Project

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, Ingeniero Civil, Ph.D.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de disipación de energía se han convertido en un importante tema de estudio en las últimas décadas. El Servicio Geológico Colombiano afirma que Colombia es uno de los puntos más propensos a que ocurran sismos, debido a su posición geográfica [1], la alta sismicidad en la zona ha sido el responsable de hechos históricos que se registran en la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [2], hechos que han afectado a diversas poblaciones generando pérdidas humanas y económicas. Así, el principal objetivo de estudio se centra en reducir el daño causado en las estructuras civiles, buscando la protección sísmica por medio de dispositivos que aíslen y disipen la energía transmitida a las estructuras, disminuyendo así el comportamiento inducido por un sismo.

Como estrategia para el control pasivo se ha propuesto implementar dispositivos especiales que cumplan la función de disminuir, controlar o consumir por completo la energía generada por eventos sísmicos. La idea de estos sistemas es reducir la demanda sísmica y aumentar la disipación de energía principalmente, más que buscar que aumente la resistencia en la estructura [3]. En el mercado existen diversos sistemas de control pasivo en los que se encuentran los Amortiguadores viscosos lineales [4], estos dispositivos se han usado en la construcción y restauración de estructuras dando como resultado la reducción de comportamiento elástico, entre los países más destacados se encuentra Japón, Estados Unidos, Italia y China. El trabajo se realizó mediante el software MIDAS GEN® dónde se modeló un pórtico 2D, se procedió a cargar la estructura con los casos de carga viva y carga muerta y se sometió a la acción de tres sismos, se verificó el cumplimiento de derivas y posteriormente se diseñaron y colocaron los amortiguadores viscosos lineales, uno en cada piso. Se hizo el análisis dinámico lineal con cada uno de los sismos y se obtuvieron los resultados de comportamiento elástico. Seguidamente se realizó el redimensionamiento de las secciones para cada caso, y por último se presenta un análisis comparativo entre el sistema sin y con amortiguamiento.

1. JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas se han desarrollado diversos estudios que buscan disipar y aislar la energía en estructuras, para disminuir los esfuerzos y los desplazamientos ocasionadas por cargas dinámicas por ejemplo un sismo, diferentes registros históricos de poblaciones afectadas por sismos realizada por la Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica [5], han permitido evidenciar la importancia que ocupa el estudio y aplicación de sistemas de protección sísmica en estructuras de hormigón. En este contexto la razón primordial de este trabajo es evaluar el desempeño (en temas de comportamiento elástico) de un sistema de amortiguamiento viscoso para disminuir el efecto de las cargas sísmicas en las estructuras. “Los esfuerzos, aceleraciones y deformaciones inducidos por un sismo en una estructura con sistemas de disipación de energía, pueden ser entre un 15 a 40% menores que los correspondientes a una estructura sin disipadores, logrando reducir el daño producido a elementos estructurales y no estructurales” [6]. Lo anterior evidencia que existen resultados óptimos con la utilización de este sistema. Japón, Estados Unidos, Italia y China, han implementado durante más de 3 décadas sistemas de control de respuesta sísmica. En Latinoamérica países como México Chile y Argentina han aportado al desarrollo de la técnica, han demostrado que es posible implementar estas tecnologías en países subdesarrollados [7] Colombia no es destacada en la implementación de esta solución estructural, la falta de protección a los riesgos que representa un sismo, el viento y diversos factores que afectan una estructura, son motivo para el estudio riguroso en trabajos de grado y es otra razón para enfocarse en esta alternativa.

El estudio se hace con base a la implementación de un sistema de amortiguamiento viscoso lineal para protección sísmica que cumpla la función de disipar la energía de las estructuras excitadas por dos sismos. La estructura tiene comportamiento lineal lo que indica que las deformaciones serán mínimas y directamente proporcionales a las fuerzas producidas por un sismo.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el desempeño de un sistema de amortiguamiento viscoso para protección sísmica sobre un pórtico 2D con compartimiento elástico lineal.

2.2. OBEJIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar una estructura diseñada en hormigón armado con comportamiento elástico implementando un sistema de amortiguamiento viscoso para protección sísmica (amortiguador viscoso lineal).
- Comparar los resultados obtenidos (comportamiento elástico, desplazamientos, fuerzas, esfuerzos y velocidades) del modelamiento numérico del pórtico con y sin amortiguadores viscosos lineales en el Software Midas Gen.

3. SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

Los daños causados por los eventos sísmicos se han convertido en un tema de estudio muy importante en la búsqueda de la protección de estructuras, existen dos formas para llevarse a cabo el diseño sismo resistente, el primero es el diseño sismo resistente convencional en dónde se busca crear estructuras muy rígidas con la capacidad de deformación para entrar en el rango inelástico (estructuras dúctiles) y la segunda forma hace uso de sistemas de protección sísmica que permitan la disipación de energía que se trasmite a la estructura, disminuyendo así, derivas, desplazamientos, velocidades, fuerzas y esfuerzos. Entre la clasificación de estos sistemas de protección sísmica se encuentra el pasivo, activo, semiactivo e híbrido [8]:

- ✓ Sistema de control pasivo.
- ✓ Sistema de control activo.
- ✓ Sistema de control semiactivos
- ✓ Sistemas de control híbrido

Los sistemas de control pasivo son muy utilizados actualmente, ante un evento sísmico estos responden de forma inercial sin necesitar un aporte energético para su funcionamiento y disipando la energía comúnmente en forma de calor. Los sistemas activos, semiactivos e híbridos cuentan con un mecanismo de monitoreo en tiempo real de la respuesta estructural, con sensores instalados responden ante el sismo.

Durante este trabajo se implementará un amortiguador viscoso lineal perteneciente al sistema de protección pasiva con disipadores de energía.

3.1. CONTROL PASIVO

Los disipadores de energía son dispositivos de control pasivo, están diseñados para reducir o consumir por completo la energía sísmica transmitida a las estructuras, evitando que esta se disipe por medio de deformaciones inelásticas en los elementos estructurales. Según su comportamiento se clasifican en Histerético que se basan en la fricción de superficies y la plastificación de metales su comportamiento depende del desplazamiento, el viscoelástico se basa en sólidos y fluidos viscoelásticos, su comportamiento depende de la velocidad y desplazamiento y el Viscoso tiene un comportamiento que dependen sólo de la velocidad [9].

Para efectos de este trabajo será usado el disipador de energía viscoso,

El amortiguamiento es definido como la capacidad que tiene un sistema para disipar energía en otro tipo de energía como el calor, cumpliendo la función de reducir la demanda sísmica en la estructura disminuyendo así, desplazamientos, velocidades, fuerzas y esfuerzos.

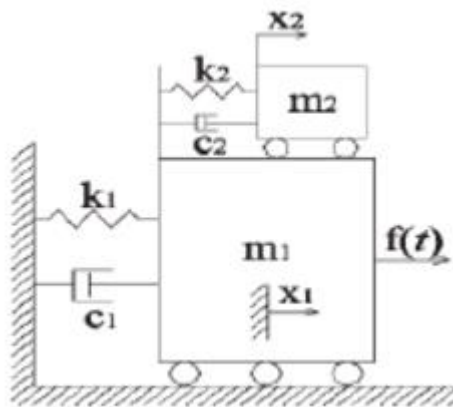


Figura 1. Representación de un sistema de control pasivo [10].

3.2. CONTROL ACTIVO

Los sistemas de protección sísmica de control activo son sistemas complejos que contienen control, procesamiento de datos, actuadores dinámicos y sensores de movimiento. Estos controlan la respuesta sísmica de la estructura inmediatamente, detectando movimientos y aplicando fuerzas para tratar de contrarrestar disminuir o disipar los efectos de las cargas dinámicas (figura 2).

Requieren de una fuerza externa para alimentarse, Actuadores tales como tendones activos, tirantes activos, y sistemas de amortiguadores de masa activos, que pueden emplear acción hidráulica, neumática, o electromagnética, son empleados para el control estructural activo.

Estos sistemas activos podrían mejorar la respuesta dinámica de una estructura pero también tiene desventajas una de ellas es que pueden empeorar ya que pueden volverse inestables y añadir energía cinética adicional al sistema. Otra limitación del control activo es que tiene dificultad de obtener un modelo adecuado de la estructura para el diseño del controlador [11].

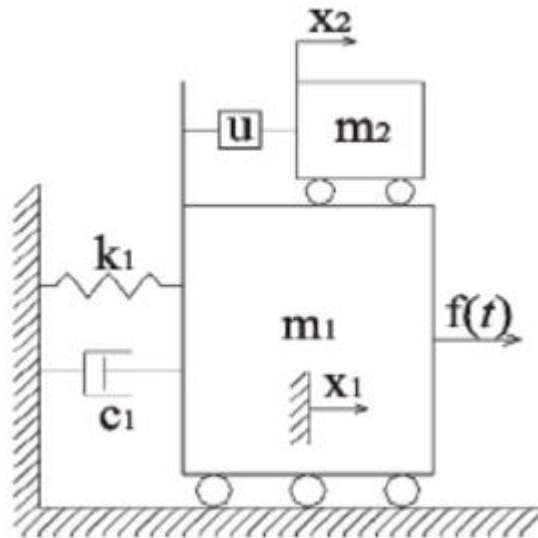


Figura 2. Representación de un sistema de control activo [10].

3.3. CONTROL SEMIACTIVO

Los sistemas semiactivos igual que los activos monitorean en tiempo real la respuesta estructural, pero no aplican fuerzas de control en el sistema estructural, a pesar de esto poseen propiedades variables que pueden ser controladas para reducir óptimamente la respuesta del sistema estructural.

Ofrecen la adaptabilidad de los sistemas activos sin la demanda de grandes fuentes de energía [11].

3.4. CONTROL HÍBRIDO

Los sistemas híbridos hacen una combinación entre dispositivos pasivos y dispositivos activos para aumentar la confiabilidad del control estructural, estos operan múltiples dispositivos de control, logrando niveles de rendimiento mayores [11].

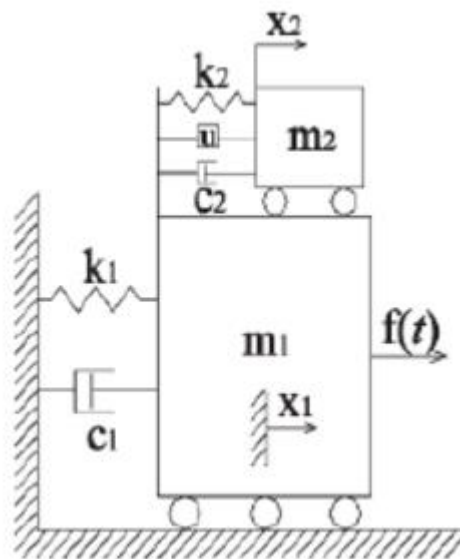


Figura 3. Representación de un sistema de control híbrido [10].

4. DISPOSITIVOS PASIVOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

4.1. SISTEMAS DE AISLACIÓN

Los movimientos horizontales del suelo bajo las cargas dinámicas de un sismo producen deformaciones que causan daño a las estructuras, si se pudieran aislar o separar las estructuras para que los movimientos del suelo pasaran por debajo de esta, se reduciría el daño de la estructura en gran medida.

El sistema de aislación de base reduce en un porcentaje la energía que reciben las estructuras durante la ocurrencia de las cargas dinámicas como por ejemplo los sismos. El concepto principal en la aislación de la base es reducir la frecuencia fundamental de la vibración estructural a un valor más bajo que las frecuencias que contiene la energía predominante de los movimientos sísmicos.

Otro objetivo de estos sistemas de aislación es proporcionar un medio para la disipación de energía, reduciendo así la aceleración transmitida a la estructura, también permiten reducir la rigidez del sistema.

Una de las desventajas de las aislaciones de base es que, en la mayoría de los casos, deben ejecutarse antes de la construcción del edificio, mientras que los sistemas de control de vibraciones se pueden colocar después si se dan las condiciones de espacio necesarias para su instalación [11].

4.2. DISIPADORES PASIVOS DE ENERGÍA

Los disipadores de energía son dispositivos diseñados para absorber la mayoría de la energía sísmica, evitando así que esta sea disipada mediante deformaciones inelásticas en los elementos estructurales.

Pueden ser clasificadas según su comportamiento como Histerético, Viscoelásticos y Viscoso. Los disipadores Histerético se basan en la plastificación de metales y la

fricción entre superficies. Estos dispositivos dependen básicamente del desplazamiento. Los disipadores Viscoelásticos pueden basarse en sólidos Viscoelásticos, fluidos Viscoelásticos y su comportamiento depende del desplazamiento y de la velocidad. Los dispositivos de fluidos Viscosos tienen un comportamiento que depende netamente de la velocidad [11].

4.3. DISIPADORES VISCOELÁSTICOS

Es un tipo de comportamiento que tiene la capacidad de disipar energía durante la deformación, un material viscoelástico es cuando su estado actual de tensiones depende de la historia y del tiempo.

Este grupo incluye disipadores viscoelásticos sólidos y disipadores viscoelásticos fluidos, en general, estos dispositivos exhiben amortiguamiento y rigidez, también para los dispositivos viscoelásticos, la respuesta es dependiente de la frecuencia [12].

4.3.1. Disipadores viscoelásticos sólidos

Son empleados en estructuras, usualmente son copolímeros o sustancias vídrias que disipan energía. Un disipador viscoelástico típico (VE), consiste en capas viscoelásticas entre platos de acero. Ver figura 4.

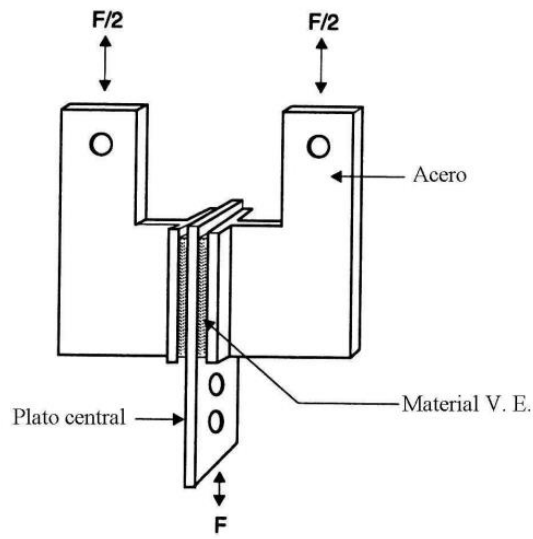


Figura 4. Configuración típica de un disipador viscoelástico sólido [12].

Cuando son montadas en una estructura, la deformación por corte y la disipación de energía ocurre cuando la vibración estructural induce el movimiento relativo entre las láminas de acero exteriores y el plato central.

4.3.2. Disipadores viscoelásticos fluidos

Los dispositivos pasivos viscoelásticos sólidos utilizan la acción de sólidos para mejorar el desempeño de la estructura a diversas acciones externas. Por otra parte los fluidos también pueden ser efectivamente empleados para obtener el nivel deseado de control pasivo.

Un esfuerzo significativo ha sido orientado recientemente al desarrollo de los disipadores de fluido viscoso para aplicaciones estructurales, primeramente hacia la conversión de la tecnología para la milicia y la industria pesada. Un ejemplo de disipador fluido se muestra en la figura 5.

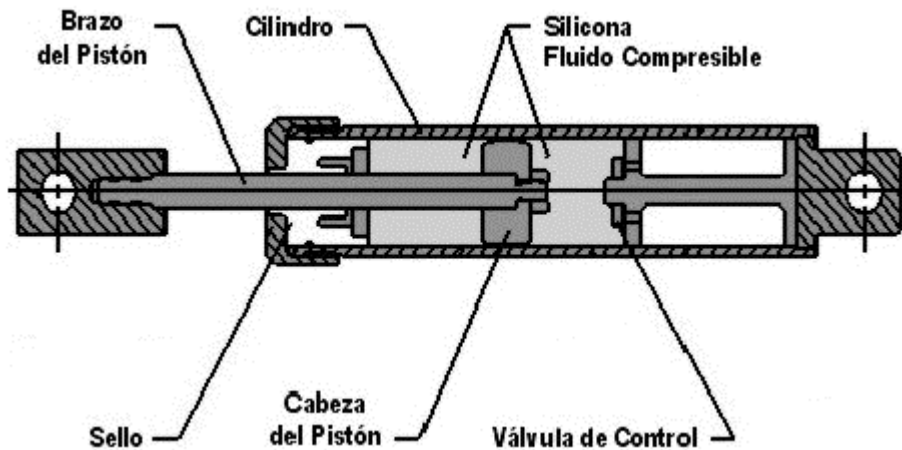


Figura 5. Disipador Viscoelástico fluido [12].

4.4. DISIPADORES HISTERÉTICOS

Los sistemas histeréticos, por definición, disipan energía a través de un mecanismo que es independiente del rango de aplicación de la carga. En este grupo están incluidos los disipadores metálicos que utilizan la plastificación de metales como el mecanismo disipativo y los disipadores friccionantes que generan calor a través de la fricción de deslizamiento [12].

5. SISTEMAS DE CONTROL DE VIBRACIONES

Los sistemas de control de vibraciones se colocan en la estructura, y no en la base de las columnas como los sistemas de aislación. En los sistemas de control de vibración, la diferencia principal entre los sistemas activos y pasivos es que los primeros necesitan energía eléctrica externa para comenzar a funcionar. Los amortiguadores histeréticos utilizan las características de amortiguamiento histerético de los materiales y sistemas.

Son los amortiguadores de acero, amortiguadores de plomo, amortiguadores friccionales y los amortiguadores viscoelásticos. Uno de los mecanismos más efectivos para la disipación de energía en una estructura metálica es a través de la deformación inelástica de sus componentes.

La idea de la utilización de amortiguadores metálicos es que la mayor disipación de la energía sísmica se produzca en los mismos, disminuyendo la adsorción en la estructura. Para los amortiguadores viscoelásticos, los materiales usados en aplicaciones estructurales son típicamente polímeros o sustancias vídriosas las cuales disipan energía cuando están sujetas a deformación por corte. El comportamiento mecánico de los amortiguadores viscoelásticos es dependiente de la frecuencia de excitación, la temperatura de operación y el nivel de deformación del material.

Estas variables deben ser consideradas dentro del análisis y diseño de una solución basada en amortiguadores viscoelásticos. Los sistemas de control se pueden dividir en 2 grandes grupos: los sistemas pasivos y los sistemas activos. Los sistemas activos, básicamente, registran la respuesta estructural y en tiempo real aplican fuerzas contrarias al movimiento, necesitando energía externa para funcionar, siendo ésta su principal desventaja. Los sistemas pasivos, en cambio, se ponen en funcionamiento utilizando la energía excitadora de la carga externa.

Existen otros amortiguadores que no son ni pasivos, ni activos son los llamados semiactivos o híbridos, que poseen los beneficios de los sistemas activos optimizados, pero no necesitan energía externa para comenzar a funcionar. Estos sistemas de control de vibraciones se instalan en todo el edificio o en el piso superior [12].

6. FUERZA DE AMORTIGUAMIENTO

El amortiguamiento es la capacidad que tiene un sistema para disipar energía cinética en otro tipo de energía. Los amortiguadores disipan la energía cinética en energía térmica y/o en energía plástica, es decir, la función de un amortiguador es recibir, absorber y reducir una fuerza, mediante dispersión o porque la energía se ha transformado quedando la fuerza inicial en menor cantidad.

El amortiguamiento es un parámetro necesario en el campo de las vibraciones, también en el desarrollo de modelos matemáticos que permiten el estudio y análisis de sistemas vibratorios, como lo son: estructuras metálicas, motores, maquinaria rotativa, automóviles, etc. Esto va encaminado a la teoría de que todo sistema vibratorio (regularmente sistemas mecánicos) tiene la capacidad de disipar energía. Para el control de vibraciones e impactos en maquinaria se utiliza el concepto de amortiguamiento como una técnica para disipar energía del sistema, manipulando así la amplitud de vibración en el sistema y otros parámetros de estudio.

Existen muchos inventos que aplican los principios de las fuerzas mecánicas los cuales tienen el objetivo de anular o disipar un impacto.

También, amortiguación es la disipación de energía en una estructura mecánica y su conversión en calor. Hay varios mecanismos de amortiguación, los más importantes son la amortiguación Coulomb y la amortiguación viscosa [12].

6.1. TIPOS DE AMORTIGUAMIENTO

Un sistema mecánico que posea masa y elasticidad tendrá una frecuencia natural y además la particularidad de llegar a vibrar; si se le proporciona energía al sistema éste tenderá a vibrar, o si una fuerza externa actúa en el sistema con cierta

frecuencia, el sistema podría entrar en un estado de resonancia y esto a su vez significaría una condición de alta vibración y el sistema se vuelve inestable y dispuesto a fallar.

En todo esto se fundamenta la importancia del estudio del amortiguamiento, principalmente en ingeniería mecánica.

Existen diferentes mecanismos o tipos de amortiguamiento, según sea su naturaleza:

6.1.1. Amortiguamiento fluido. Está representado por la resistencia de un fluido al movimiento de un cuerpo, el cual puede ser viscoso o turbulento. Un cuerpo que se encuentra en un fluido tiende a perder energía cinética debido a que su viscosidad se opone al movimiento, esta pérdida de energía es directamente proporcional a la velocidad del movimiento y también proporcional a la frecuencia de la vibración.

6.1.2. Amortiguamiento por histéresis. Se ocasiona por la resistencia al movimiento opuesta al roce, es independiente del movimiento y por ende se hace importante hacia el final de la vibración cuando los demás amortiguadores se toman despreciables.

6.1.3. Amortiguamiento por fricción seca. Es causado por la fricción cinética entre superficies deslizantes secas ($F = \mu N$)

7. CASO DE ESTUDIO

7.1. EVALUACIÓN DE CARGAS

7.1.1. Cargas muertas

Para los materiales que utilizan en el análisis de esta estructura, se hizo uso de la siguiente Tabla B.3.2-1 (Masas de los materiales) de la NSR-10:

Tabla 1 Masa de los materiales

| Material | Densidad (kg/m ³) | Material | Densidad (kg/m ³) |
|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| Acero | 7 800 | Mortero de inyección para mampostería | 2 250 |
| Agua | | Mortero de pega para mampostería | 2 100 |
| Dulce | 1 000 | Piedra | |
| Marina | 1 030 | Caliza, mármol, cuarzo | 2 700 |
| Aluminio | 2 700 | Basalto, granito, gneis | 2 850 |
| Arena | | Arenisca | 2 200 |
| Limpia y seca | 1 440 | Pizarra | 2 600 |
| Seca de río | 1 700 | Plomo | 11 400 |
| Baldosa cerámica | 2 400 | Productos bituminosos | |
| Bronce | 8 850 | Asfalto y alquitrán | 1 300 |
| Cal | | Gasolina | 700 |
| Hidratada suelta | 500 | Grafito | 2 160 |
| Hidratada compacta | 730 | Parafina | 900 |
| Carbón, aplacado | 800 | Petróleo | 850 |
| Carbón vegetal | 200 | Relleno de ceniza | 920 |
| Cemento pórtland, a granel | 1 440 | Tableros de madera aglutinada | 750 |
| Cobre | 9 000 | Teracota | |
| Concreto simple | 2 300 | Poros saturados | 1 950 |
| Concreto reforzado | 2 400 | Poros no saturados | 1 150 |
| Corcho, comprimido | 250 | Tierra | |
| Estaño | 7 360 | Arcilla húmeda | 1 750 |
| Grava seca | 1 660 | Arcilla seca | 1 100 |
| Hielo | 920 | Arcilla y grava seca | 1 600 |
| Hierro | | Arena y grava húmeda | 1 900 |
| Funcido | 7 200 | Arena y grava seca apisonada | 1 750 |
| Forjado | 7 700 | Arena y grava seca suelta | 1 600 |
| Latón | 8 430 | Limo húmedo consolidado | 1 550 |
| Madera laminada | 600 | Limo húmedo suelto | 1 250 |
| Madera seca | 450-750 | Vidrio | 2 600 |
| Mampostería de concreto | 2 150 | Yeso en tableros para muros | 800 |
| Mampostería de ladrillo macizo | 1 850 | Yeso suelto | 1 150 |
| Mampostería de piedra | 2 200 | Zinc en láminas enrolladas | 7 200 |

Fuente: Tabla B.3.2-1 de la Norma Sismo Resistente Colombiana del 2010.

El cálculo de la carga muerta se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de la carga muerta.

| Entrepiso | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Evaluación de carga | | | | | |
| Segmento de la placa | Material | Densidad [KN/m³] | Área [m²] | Longitud [m] | Carga [KN/m²] |
| Placa superior | Concreto reforzado | 24 | | 0.05 | 1.2 |
| Placa inferior | Concreto reforzado | 24 | | 0.02 | 0.48 |
| Nervio o Vigueta | Concreto reforzado | 24 | 0.033 | 0.9 | 0.88 |
| Friso Superior | Mortero | 21 | | 0.02 | 0.42 |
| Aligeramiento | | | | | 0.4 |
| | | | 2.96 | Total D1 | 3.38 |
| Acabados | | | | | 1.6 |
| Muros Divisorios | Arcilla | | | | 3 |
| | | | | Total D2 | 4.60 |
| | | | | D total | 7.98 |
| Pesos entrepisos método corto | | | | | |
| Área total | | | 47.67 | | m ² |
| D total | | | 7.98 | | KN/m ² |
| Peso | | | 380.41 | | KN |
| Carga muerta | | | 46.39104878 | | KN/M2 |

7.1.2. Cargas vivas requeridas

Las cargas vivas que se utilicen en el diseño de la estructura deben ser las máximas cargas que se espera ocurran en la edificación debido al uso que ésta va a tener. En ningún caso estas cargas vivas pueden ser menores que las cargas vivas mínimas que se dan en las tablas B.4.2.1-1 y B.4.2.1-2

Se determina el valor de la carga viva, teniendo en cuenta que la ocupación de la estructura es residencial.

Tabla 3. Cargas vivas mínimas uniformemente distribuidas.

| Ocupación o uso | | Carga uniforme (kN/m ²) m ² de área en planta | Carga uniforme (kgf/m ²) m ² de área en planta |
|--------------------|---|---|--|
| Reunión | Balcones | 5.0 | 500 |
| | Corredores y escaleras | 5.0 | 500 |
| | Silletería fija (fijada al piso) | 3.0 | 300 |
| | Gimnasios | 5.0 | 500 |
| | Vestíbulos | 5.0 | 500 |
| | Silletería móvil | 5.0 | 500 |
| | Áreas recreativas | 5.0 | 500 |
| | Plataformas | 5.0 | 500 |
| | Escenarios | 7.5 | 750 |
| Oficinas | Corredores y escaleras | 3.0 | 300 |
| | Oficinas | 2.0 | 200 |
| | Restaurantes | 5.0 | 500 |
| Educativos | Salones de clase | 2.0 | 200 |
| | Corredores y escaleras | 5.0 | 500 |
| | Bibliotecas | | |
| | Salones de lectura | 2.0 | 200 |
| Fábricas | Estanterías | 7.0 | 700 |
| | Industrias livianas | 5.0 | 500 |
| Industrias pesadas | Industrias pesadas | 10.0 | 1000 |
| | Cuartos de cirugía, laboratorios | 4.0 | 400 |
| Institucional | Cuartos privados | 2.0 | 200 |
| | Corredores y escaleras | 5.0 | 500 |
| | Minorista | 5.0 | 500 |
| Comercio | Mayorista | 6.0 | 600 |
| | Balcones | 5.0 | 500 |
| Residencial | Cuartos privados y sus corredores | 1.8 | 180 |
| | Escaleras | 3.0 | 300 |
| | Liviano | 6.0 | 600 |
| Almacenamiento | Pesado | 12.0 | 1200 |
| | Garajes para automóviles de pasajeros | 2.5 | 250 |
| Garajes | Garajes para vehículos de carga de hasta 2.000 kg de capacidad. | 5.0 | 500 |
| | Coliseos y Estadios | 5.0 | 500 |
| Escaleras | Graderías | 5.0 | 500 |
| | Escaleras | 5.0 | 500 |

Fuente: Tabla B.4.2.1-1 del título B de la Norma Sismo Resistente Colombiana.

$$W_L = 1.8 \left[\frac{KN}{m^2} \right] * 47.67 [m^2]$$

$$W_L = 85.81 [KN]$$

$$W_L = \frac{85.81}{8.2} = 10.4641 \left[\frac{KN}{m^2} \right]$$

La carga muerta se aproxima a $15 \left[\frac{KN}{m^2} \right]$ con la finalidad de aumentar la seguridad de la estructura.

7.2. GENERALIDADES

La estructura modelada es un pórtico de 4 pisos en dos dimensiones (2D), perteneciente al grupo de las estructuras de ocupación normal y su uso es residencial, de hormigón armado ($f'c=21$ MPa) con comportamiento elástico lineal, la altura de entrepiso es de 2.6 metros, se encuentra empotrado en su base, tiene una luz principal de 5.2 metros y otra de 3 metros.

Esta estructura tendrá las mismas dimensiones de luz y altura de entrepiso para el modelamiento sin y con amortiguamiento viscoso, y será sometido a tres acelerogramas diferentes que serán mencionados posteriormente.

Así, se espera obtener para cada caso las derivas, desplazamientos, velocidades, fuerzas y esfuerzos cortantes. En la tabla 4 se encuentran registrados los parámetros establecidos para cada caso de estudio: Sin amortiguamiento y con factores de amortiguamiento del 20%,40% y 60%.

Tabla 4. Especificaciones del pórtico de estudio.

| Parámetros | Pórtico 2D | | | |
|--------------------------------|------------|------------|-----|-----|
| | Sin Amort. | Con Amort. | | |
| | | 20% | 40% | 60% |
| <i>Luz principal [m]</i> | 5.2 | 5.2 | | |
| <i>Luz secundaria [m]</i> | 3 | 3 | | |
| <i>Altura de entrepiso [m]</i> | 2.6 | 2.6 | | |
| <i>F'c [Mpa]</i> | 21 | 21 | | |
| <i>Carga viva [kN/m]</i> | 15 | 15 | | |
| <i>Carga muerta [kN/m]</i> | 50 | 50 | | |

7.3. MODELAMIENTO NUMÉRICO DEL PÓRTICO EN EL SOFTWARE MIDAS GEN®

El modelamiento numérico del pórtico se realizó en el software MIDAS GEN® versión 2015. Inicialmente se hizo el modelo del pórtico convencional sin amortiguadores. Para esto se definieron las propiedades de los materiales y el dimensionamiento del pórtico, luego se cargó la estructura con los casos de carga estática (carga muerta=50kN/m y carga viva=15kN/m) y se sometió el pórtico a cada uno de los tres acelerogramas. Para cada uno de ellos se definieron mediante la verificación de derivas, las secciones transversales tanto para las vigas como para las columnas y se vieron los resultados de derivas, desplazamientos, velocidades, fuerzas y esfuerzos.

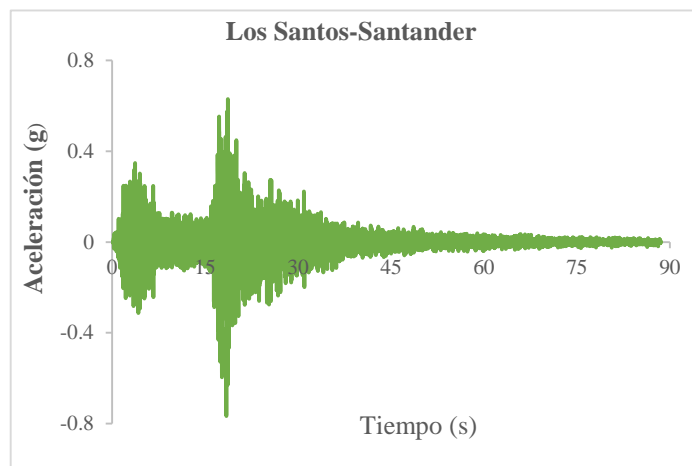
Luego se hizo el modelamiento del pórtico con los factores de amortiguamiento asumidos y se obtuvo nuevamente resultados de derivas, desplazamientos, velocidades, fuerzas y esfuerzos cortantes para así ser comparados con los datos obtenidos del pórtico sin amortiguamiento.

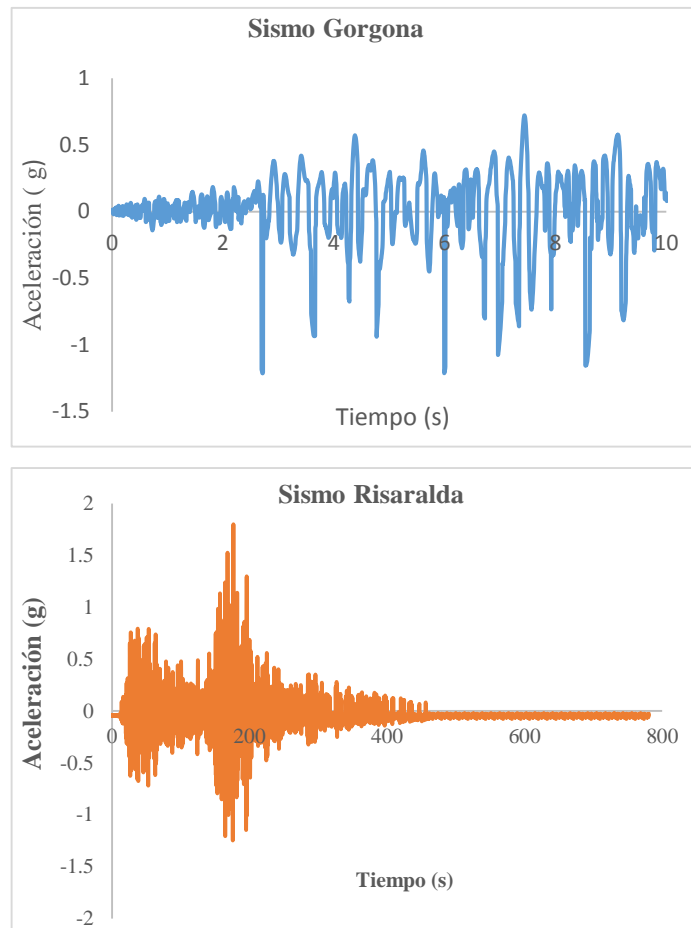
8. ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL

8.1. DEFINICIÓN DE LOS ACELEROGRAMAS

Para el análisis dinámico lineal se hizo uso del número mínimo de acelerogramas permitidos en la NORMA SISMO RESISTENTE COLOMBIANA (NSR-10) [12], por lo tanto la estructura fue sometida a la acción de tres sismos diferentes mediante un análisis de tiempo historia. El registro se obtuvo mediante el Servicio Geológico Colombiano [13]. Los acelerogramas para el caso de estudio fueron: El sismo registrado en Los Santos-Santander el día 10 de marzo de 2015 a las 3:55 pm; el sismo con epicentro en Gorgona ocurrido el 10 de septiembre del 2007 a la 1:49 am, y el sismo con epicentro en Risaralda registrado el 19 de septiembre del 1995 a las 8:43 pm. En la figura 6 se muestran los acelerogramas de cada uno de los sismos mencionados.

Figura 6. Acelerogramas del sismo los Santos Santander, Gorgona y Risaralda.





8.2. ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA (ANÁLISIS DOMINIO DEL TIEMPO)

Por medio del análisis de tiempo historia, el pórtico convencional y el pórtico con amortiguamiento viscoso fueron sometidos a cada uno de los sismos anteriormente mencionados, el caso de carga se definió como un tipo de análisis lineal por el método modal, se ingresaron los valores de tiempo y aceleración en un Δt de 0.005 s. Para reducir la complejidad del análisis se consideró que la estructura consta de diafragma rígido en cada piso. Se realizó el análisis dinámico lineal, excitando el pórtico modelado en 2D con el sismo, se hizo una verificación del cumplimiento de derivas y así se definieron las secciones definitivas para el pórtico sin amortiguamiento. La información detallada de cada uno de los sismos y el

dimensionamientos de las secciones transversales pertenecientes a los análisis se encuentra registrados en la tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones de las secciones transversales para cada sismo y su localización para el pórtico sin amortiguamiento

| Sismo | Dimensiones [m] | | | | Localización | |
|-------------------|-----------------|------|---------|------|--------------|----------|
| | Viga | | Columna | | Profundidad | Magnitud |
| | b | h | b | h | Km | |
| Los Santos | 0.55 | 0.6 | 0.65 | 0.75 | 160.0 | 6.4 MW |
| Gorgona | 0.65 | 0.65 | 0.76 | 0.85 | 4.0 | 6.2 ML |
| Risaralda | 0.50 | 0.50 | 0.65 | 0.75 | 120.9 | 6.5 ML |

9. DISEÑO DE LOS AMORTIGUADORES VISCOSOS LINEALES

Los amortiguadores viscosos lineales se ubicaron uno en cada piso del pórtico en la luz más larga de la viga debido a que se presenta mayor deflexión, para que el pórtico pierda velocidad gracias a la fuerza del amortiguador que es proporcional a su velocidad y se calcula con la ecuación 1.

$$F = C\dot{U} \quad (1)$$

Dónde, C es el amortiguamiento efectivo del dispositivo y \dot{U} es la velocidad del dispositivo.

Para este trabajo se estudió el Amortiguador viscoso lineal, que en MIDAS GEN® se encuentra como “Viscoelastic Damper”, conformado por propiedades lineales y no lineales. En las propiedades lineales se definen la rigidez y el amortiguamiento efectivo y las propiedades no lineales se basan en tres modelos: el modelo de Maxwell, el modelo de Kelvin-Voigt y la combinación de los dos modelos (Maxwell+ Kelvin-Voigt).

El modelo viscoelástico de Maxwell, está formado por un resorte conectado en serie con un amortiguador. La fuerza es dependiente de la velocidad y el desplazamiento (Ver ecuación 2).

$$f = c_d \cdot \text{sign}(\dot{d}_d) \cdot \left| \frac{\dot{d}_d}{v_o} \right|^s = k_b * d_b \quad (2)$$

Dónde c_d es el amortiguamiento del dispositivo; \dot{d}_d es la velocidad relativa entre ambos extremos de los dispositivos; v_o es la velocidad de referencia; sign es la función signo; s es el coeficiente exponencial característico de la velocidad del comportamiento del amortiguador, y k_b es la rigidez de arriostamiento del resorte.

El modelo de Kelvin Voigt, se conforma de un resorte y un amortiguador conectados en paralelo. La fuerza es dependiente de la velocidad y el desplazamiento y se expresa en la ecuación (3).

$$f = k_a d_a + c_a \cdot \text{sign}(\dot{d}_a) \cdot \left| \frac{\dot{d}_a}{v_o} \right|^s \quad (3)$$

Por último la combinación de los dos modelos (Maxwell+ Kelvin-Voigt). La fuerza se describe mediante la ecuación (4).

$$f = k_a d_a + c_a \cdot \text{sign}(\dot{d}_a) \cdot \left| \frac{\dot{d}_a}{v_o} \right|^s = k_b d_b \quad (4)$$

Como se mencionó anteriormente el caso de estudio presentado es el modelamiento de un amortiguador viscoso lineal, para lo cual se tuvieron en cuenta sólo las propiedades lineales del dispositivo presentado en MIDAS GEN® como “Viscoelastic Damper”, definiendo los parámetros de rigidez efectiva y amortiguamiento efectivo para la dirección en el eje x. El peso propio del dispositivo fue despreciado.

El cálculo de los parámetros lineales se realizó por medio de lo estipulado en la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) [14].

El factor de amortiguamiento efectivo β_{eff} , para dispositivos dependientes de la velocidad, se definió mediante la ecuación (5).

$$\beta_{eff-m} = \beta_m + \frac{\sum_i W_{mj}}{4\pi W_{mk}} \quad (5)$$

Dónde el amortiguamiento modal en la estructura es β_m , el trabajo realizado por el dispositivo en un ciclo completo correspondiente a desplazamientos modales de

piso es W_{mj} que se calcula con la ecuación (6) y la máxima energía en la estructura es W_{mk} .

$$W_{mj} = \frac{2\pi^2}{T_m} C_j \delta_{mr}^2 \quad (6)$$

En la ecuación 6 T_m es el periodo de cada modo de vibración, C_j es el amortiguamiento efectivo para el dispositivo, δ_{mrj} es el desplazamiento relativo entre los extremos a lo largo del eje del dispositivo.

W_{mk} (Ecuación 5) es la máxima energía en la estructura y se calcula con la ecuación (7).

$$W_{mk} = \frac{1}{2} \sum F_{mi} \delta_{mi} \quad (7)$$

Dónde, la fuerza horizontal inercial en el nivel de piso i es F_{mi} . el modo de desplazamiento horizontal a nivel del piso i es δ_{mi} .

Las ecuaciones (6) y (7) fueron reemplazadas en la ecuación (5), se asumieron diferentes factores de amortiguamiento β_{eff-m} , y así se obtuvo el amortiguamiento efectivo C_j para cada uno.

El amortiguador de diseño es un amortiguador viscoso, dónde la fuerza es dependiente sólo de la velocidad. Para poder modelar este dispositivo usando el modelo viscoelástico de MIDAS GEN[®], se debe considerar que la rigidez efectiva es grande infinita. En este caso la elección de la rigidez se debe hacer mediante el criterio de que el cociente entre el amortiguamiento efectivo y la rigidez efectiva debe ser del valor igual al paso de la fuerza de entrada al sistema, según se muestra en la ecuación (8).

$$i = \frac{C_j}{K} \quad (8)$$

Dónde, i es el paso de la fuerza de entrada al sistema, C_j el amortiguamiento efectivo y K es la rigidez efectiva del dispositivo.

Los datos usados en las ecuaciones (5), (6), (7) y (8) fueron obtenidos del análisis dinámico lineal del pórtico convencional anteriormente mencionado.

Los valores de amortiguamiento efectivo y rigidez efectiva para cada uno de los factores de amortiguamiento asumidos se encuentran registrados en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de amortiguamiento y rigidez efectiva.

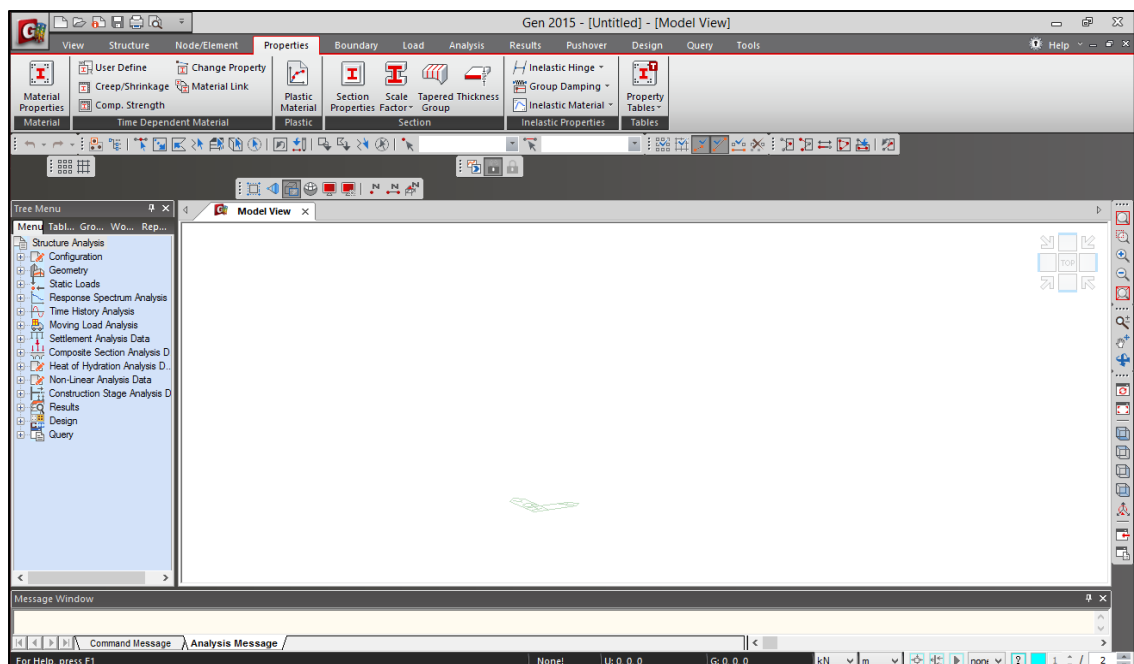
| <i>Sismo Los Santos-Santander</i> | | |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------------|
| $\beta_{\text{eff-m}}$ | C_j [KN*s/m] | K_{eff} [KN/m] |
| 20% | 436.56 | 87312.37 |
| 40% | 1018.64 | 203728.86 |
| 60% | 1600.73 | 320145.36 |
| <i>Sismo Gorgona-Pacífico</i> | | |
| $\beta_{\text{eff-m}}$ | C_j [KN*s/m] | K_{eff} [KN/m] |
| 20% | 475.82 | 95164.41 |
| 40% | 1110.25 | 222050.29 |
| 60% | 1744.68 | 348936.17 |
| <i>Sismo de Risaralda</i> | | |
| $\beta_{\text{eff-m}}$ | C_j [KN*s/m] | K_{eff} [KN/m] |
| 20% | 219.52 | 43903.57 |
| 40% | 512.21 | 102441.66 |
| 60% | 804.90 | 160979.75 |

10. MODELAMIENTO DEL PÓRTICO CON AMORTIGUAMIENTO VISCOSO LINEAL

Se hizo el modelamiento de los amortiguadores viscosos lineales para cada uno de los sismos, por medio de la propiedad de General Link del tipo Viscoelastic Damper en MIDAS GEN®, el proceso de modelamiento se realizó por medio de los siguientes pasos:

1. Abrir el programa.
2. Crear un nuevo documento y definir las unidades de medida.
 - ✓ Para crear un nuevo documento se dirige a New project que se encuentra en la parte superior izquierda.
 - ✓ La definición de la unidades de medida de hace en la parte inferior derecha. [kN] y [m].

Figura 7. Interfaz gráfica del Software MIDAS GEN®.



Así, se ingresan las propiedades del nuevo material, anteriormente definidas.

- ✓ Material ID: Número del material en creación: 1.
- ✓ Type of Design: Se selecciona el tipo de material a elegir (Steel, Concrete, SRC y User defined): Concrete
- ✓ Estándar: Se selecciona la norma a utilizar: ASTM(RC)
- ✓ DB: se selecciona el grado o resistencia del concreto: Grade C3000.
- ✓ Damping ratio: 5%

Figura 8. Propiedades del material.

Material Data

General
Material ID: 1 Name: Grade C3000

Elasticity Data
Type of Design: Concrete
Steel
Standard: [] DB: []
Concrete
Standard: ASTM(RC) Code: [] DB: Grade C3000

Type of Material
 Isotropic Orthotropic

Steel
Modulus of Elasticity: 0.0000e+000 kN/m²
Poisson's Ratio: 0
Thermal Coefficient: 0.0000e+000 1/[F]
Weight Density: 0 kN/m³
 Use Mass Density: 0 kN/m³/g

Concrete
Modulus of Elasticity: 2.1759e+007 kN/m²
Poisson's Ratio: 0.2
Thermal Coefficient: 5.0000e-006 1/[F]
Weight Density: 23.56 kN/m³
 Use Mass Density: 2.403 kN/m³/g

Plasticity Data
Plastic Material Name: NONE

Thermal Transfer
Specific Heat: 0 Btu/kN*[F]
Heat Conduction: 0 Btu/m*hr*[F]

Damping Ratio: 0.05

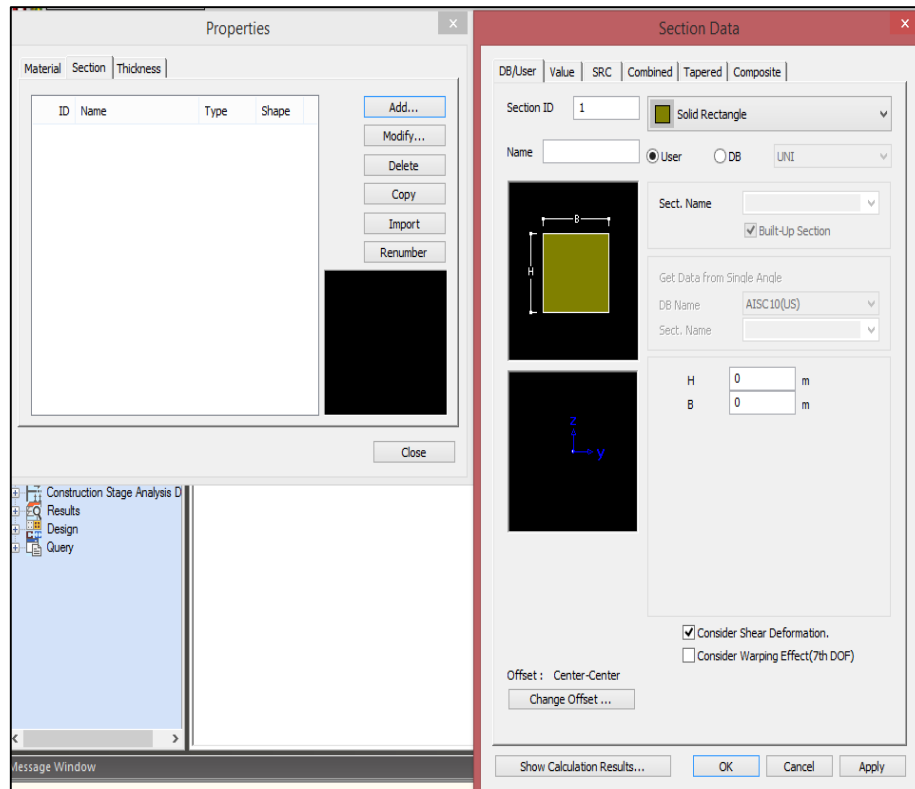
OK Cancel Apply

3. Definir las propiedades de las secciones.

Se hace por medio de la siguiente ruta

Properties > Section > Section Properties.> Add

Figura 9. Propiedades de la sección



Se ingresan las secciones iniciales asumidas anteriormente.

- ✓ Section ID: es el número de la sección: (1,2,3, etc)
- ✓ Name: Nombre de la sección (Viga o Columna).
- ✓ Se selecciona User y se añaden las medidas en H y B. Para el caso de estudio se ingresan las dimensiones de 0.6mX0.6m para columnas y 0.4mX0.4m para vigas.
- ✓ Ok

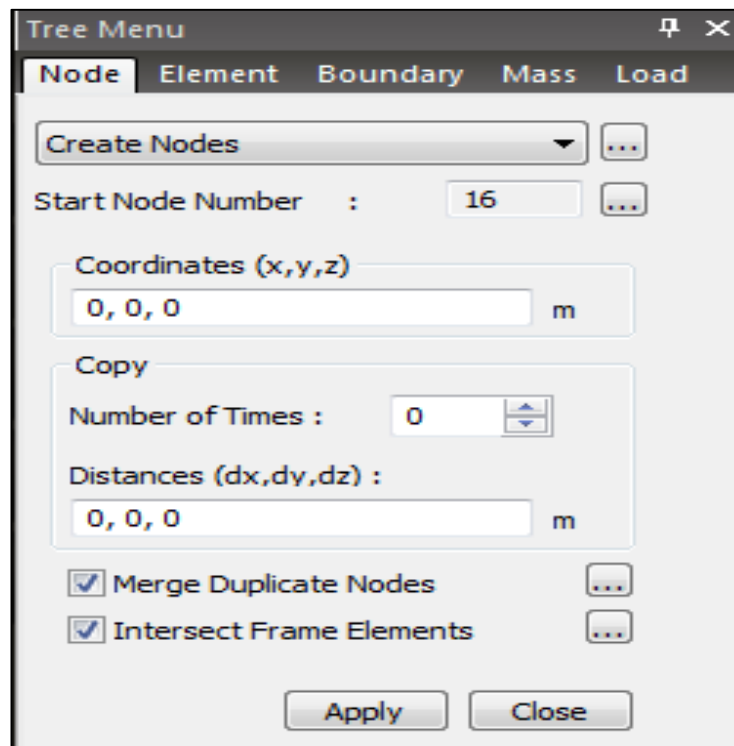
4. Creación de nodos.

Para la creación de nodos se sigue la siguiente ruta:

Node/Element > Create Nodes

- ✓ En Coordinates (x,y,z) se ingresa las coordenadas en la que se desea crear el primer nodo: 0,0,0
- ✓ Number of Times: Se ingresa el número de veces que desea copiar el nodo creado.(Si se desea copiar): 0
- ✓ Distances (dx,dy,dz) se ingresan las distancias a la cual se desea copiar el nodo.
- ✓ Apply.

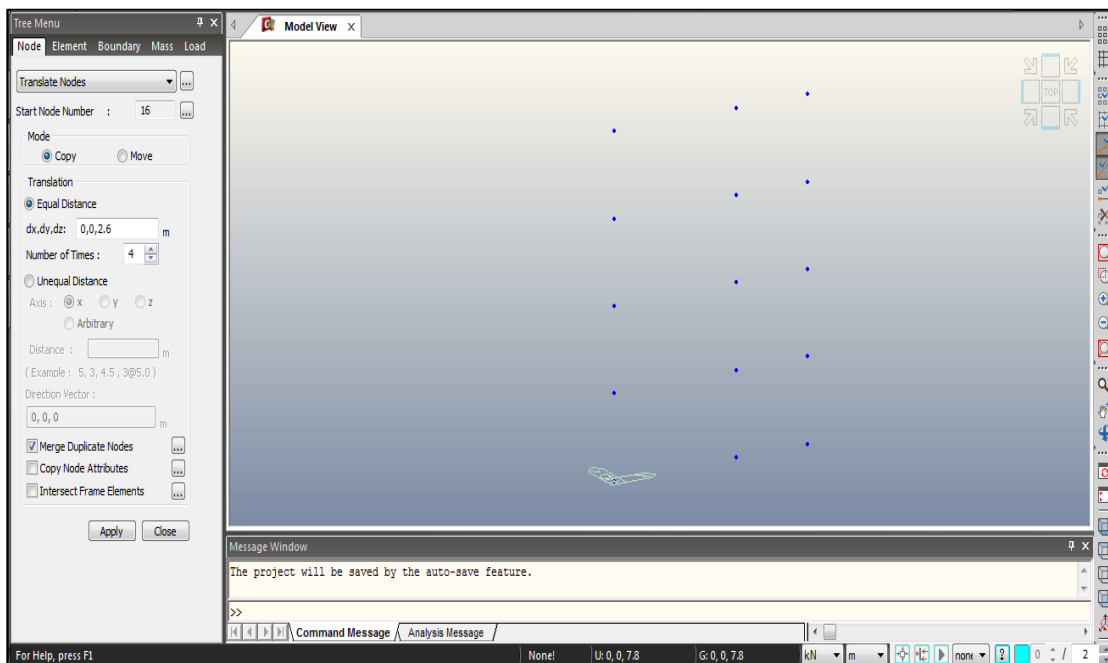
Figura 10. Creación de nodos.



Para trasladar el nodo se despliega la opción Translate Nodes y se ingresan los siguientes datos:

- ✓ Mode: Copy
- ✓ Traslación:
 - Equal Distance.
 - dx,dy,dz: 0,0,2.6
- ✓ Number of times: 4.
- ✓ Apply.

Figura 11. *Trasladar nodos.*



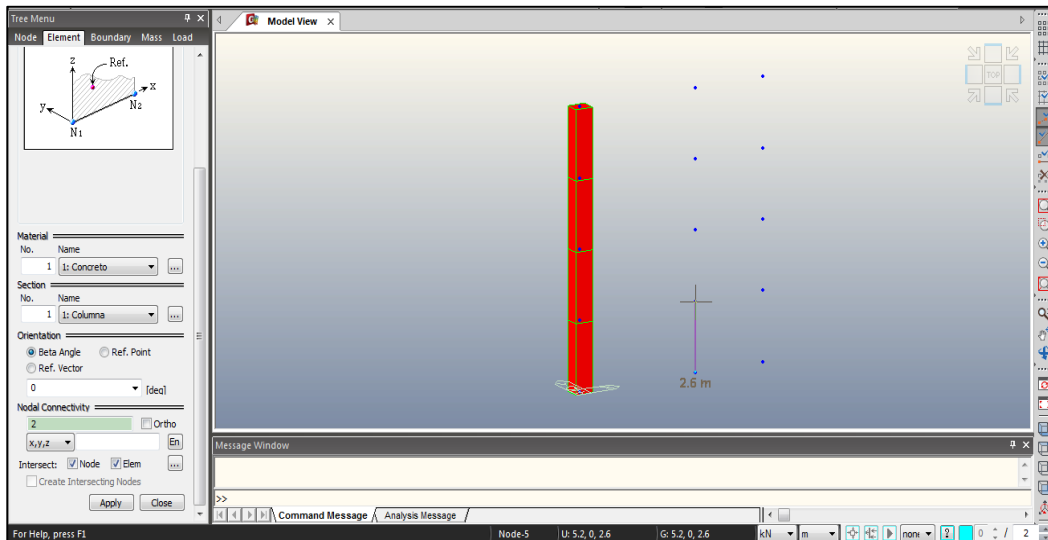
De esta forma se trasladan los nodos en el sentido que se requiera, de acuerdo a la estructura que se desee modelar, para este caso se requiere trasladar el nodo 4 veces hacia arriba y cada uno de estos 2 veces hacia la derecha esta es una de las muchas formas que tiene MIDAS GEN para crear una estructura, existen muchas más que pueden consultar en el manual de MIDAS GEN [15]

5. Creación de elementos.

Se hace por medio de la siguiente ruta:

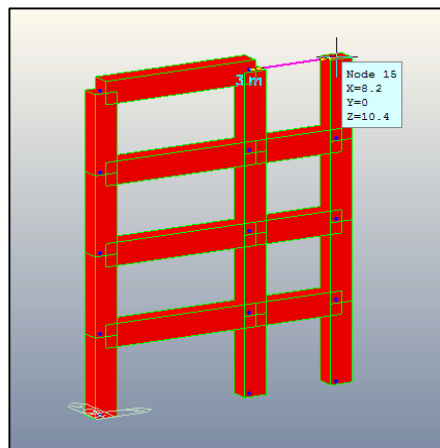
Node/Element> create elements

Figura 12. Creación de elementos.



- ✓ Material> Name: Concreto.
- ✓ Sección>Name: Se selecciona en la opción desplegable Viga o columna de acuerdo a la necesidad.
- ✓ Nodal Connectivity: Se conectan los nodos donde se quiere crear el elemento.
- ✓ Apply

Figura 13. Pórtico creado mediante elementos.

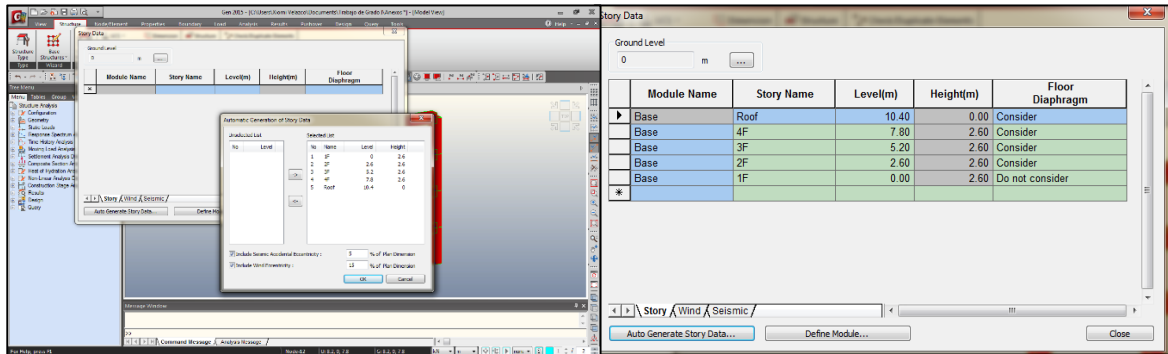


6. Asignar datos de piso.

En la siguiente ruta se crea el diafragma rígido de cada piso.

Structure > Building > Control Data > Story > click en Auto Generate Story Data y

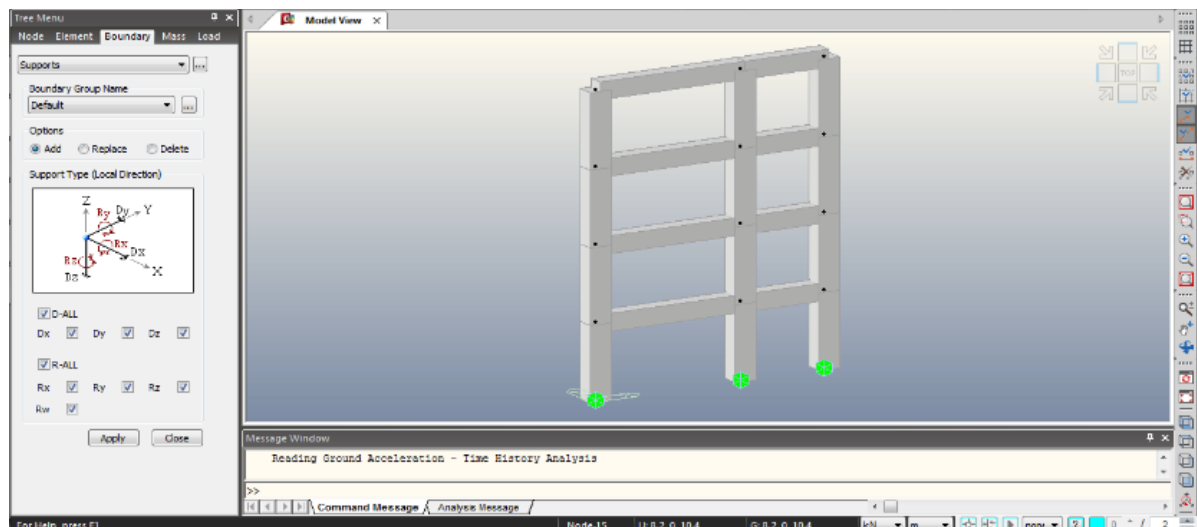
Figura 14. Creación del diafragma rígido.



7. Asignar las condiciones de apoyo.

Ruta: Boundary > Supports > Define Supports

Figura 15. Definición de las condiciones de apoyo.



Se seleccionan las Casillas D-ALL y R-ALL, y se seleccionan los puntos de apoyo para empotrar la estructura. Y se le da en aplicar.

8. Definir los casos de carga estática.

Para definir los casos de carga se hace por medio de la siguiente ruta:

Load > Static Load > Create Load Cases > Static Load Cases.

Se ingresan los siguientes datos

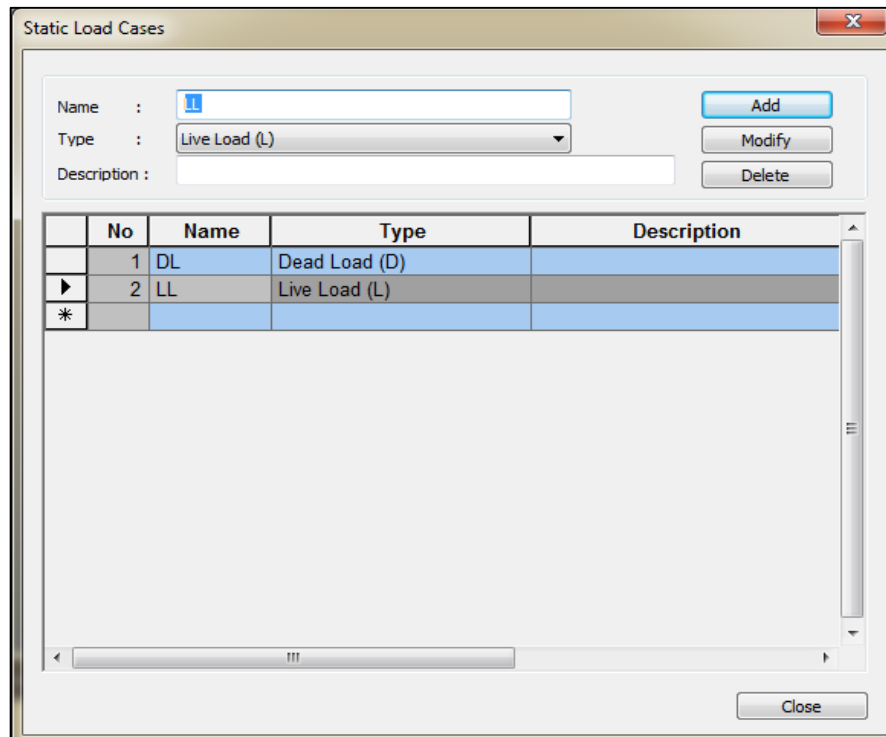
Para crear la Carga muerta:

- ✓ Name: Dead Load .
- ✓ Type: Dead Load (D).
- ✓ Add

Para crear la Carga Viva:

- ✓ Name: Live Load
- ✓ Type: Live Load (L)
- ✓ Add

Figura 16. Definición de los casos de carga estática.

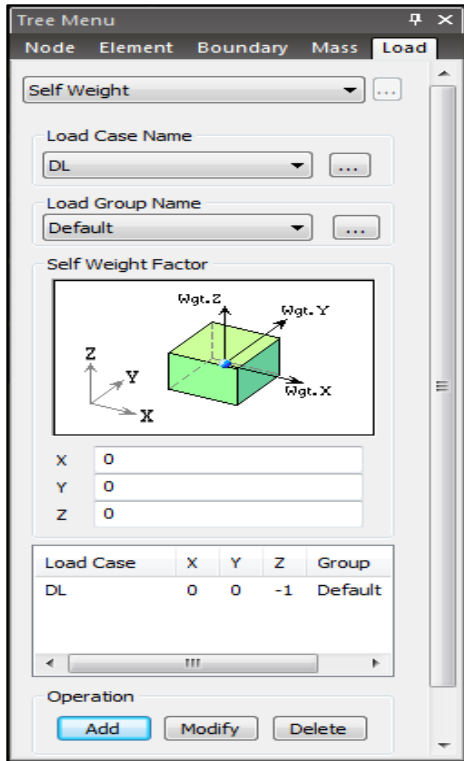


9. Asignar peso propio.

Para asignar el peso propio de la estructura se sigue la siguiente ruta:

Load > Structure Loads/Masses > Self Weight

Figura 17. Asignar peso propio.



Se ingresan los siguientes datos:

✓ Load Case Name: DL

✓ Self-Weight Factor:

X=0

Y=0

Z=-1

✓ Add.

✓ Close.

10. Crear los datos de masa del pórtico.

Por medio de la siguiente ruta se convierte el peso propio en masa.

Structure > Type > Structure Type

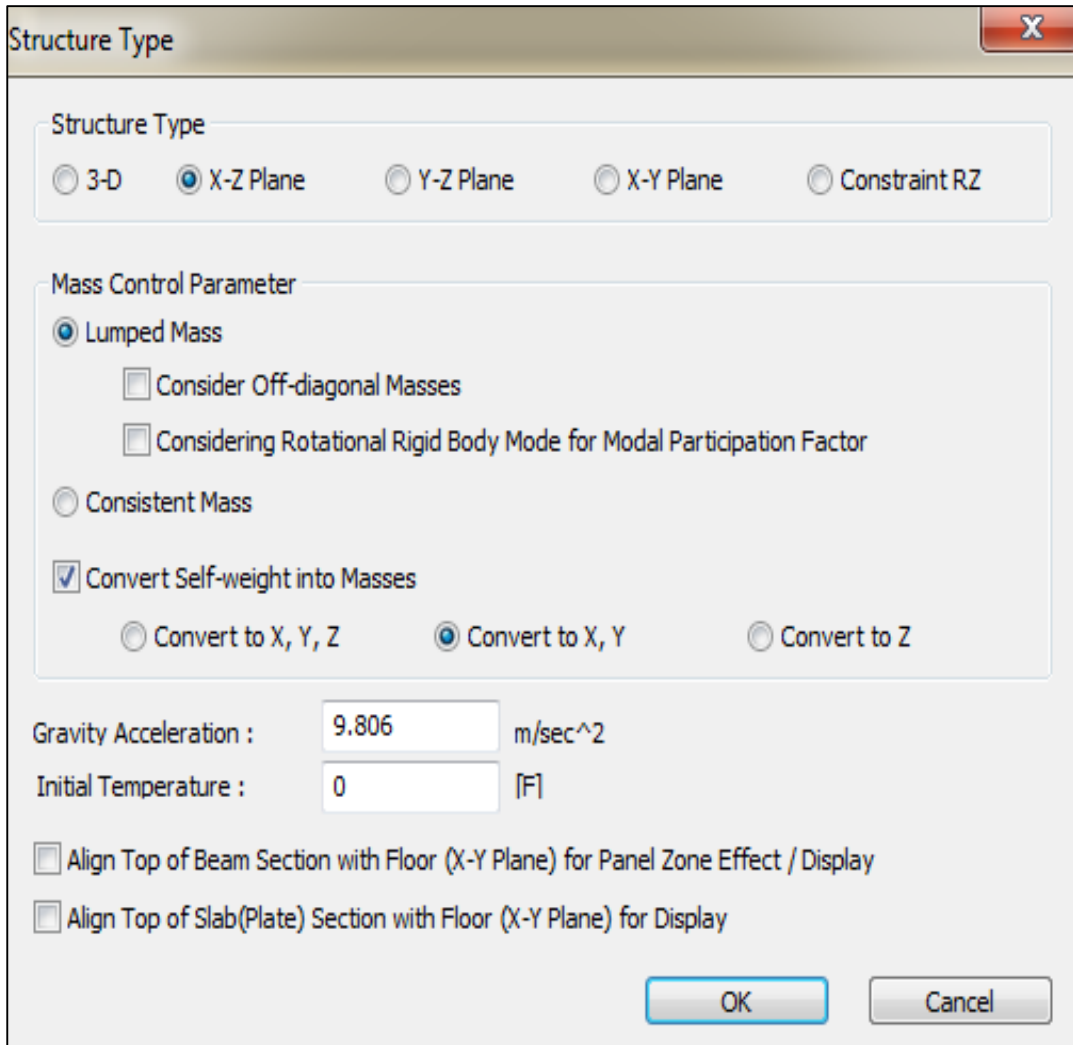
Se ingresan los siguientes datos:

✓ Structure Type: X-Z Plane

✓ Mass Control Parameter: Lumped Mass y Convert Self-weight into Masses

- ✓ Gravity Acceleration: 9.806
- ✓ Ok

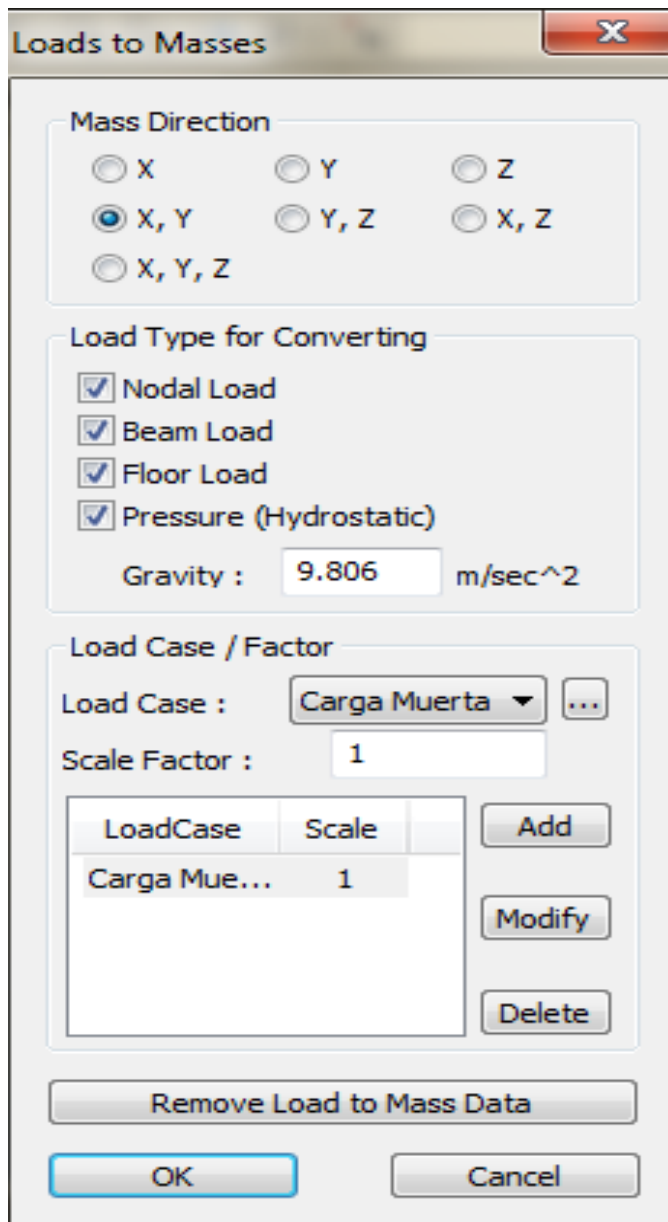
Figura 18. Creación de datos de masa en el pórtico.



Para convertir la carga muerta en masa se sigue la siguiente ruta:

Load> Struture Loads/Masses> Loads to Masses.

Figura 19. Convertir cargas en masa.



- ✓ Mass direction: x,y
- ✓ Gravity:9.806
- ✓ Load Case: Carga muerta
- ✓ Scale factcor: 1
- ✓ Add
- ✓ Ok

11. Definir caso de carga de historias en el tiempo.

Ruta: Load > Seismic > Time History Analysis Data > Time History Load Cases.

Figura 20. Agregar casos de carga tiempo historia.

General

Name : Sismo Description :

Analysis Type: Linear Nonlinear

Analysis Method: Modal Direct Integration Static

Time History Type: Transient Periodic

Geometric Nonlinearity Type: None Large Displacements

End Time : 112 sec Time Increment : 0.005 sec

Step Number Increment for Output : 22400

Order in Sequential Loading

Subsequent to Load Case Initial Element Forces (Table) Initial Forces for Geometric Stiffness

Cumulate D/N/A Results Keep Final Step Loads Constant

Damping

Damping Method : Modal

Direct Specification of Modal Damping

Damping Ratio for All Modes : 0.05

Modal Damping Overrides

| | Mode | Damping Ratio |
|---|------|---------------|
| 1 | | |

Time Integration Parameters

Newmark Method : Gamma 0.5 Beta 0.25

Constant Acceleration Linear Acceleration User Input

Nonlinear Analysis Control Parameters

Perform Iteration Iteration Controls...

OK Cancel Apply

- ✓ Analysis Type: Linear
- ✓ Analysis Method: Modal
- ✓ Time History Type: Transient.
- ✓ En Time: 112
- ✓ Time Increment: 0.005
- ✓ Step Number Increment for Output: 22400.
- ✓ Damping Method: Modal.
- ✓ Ok

12. Crear la Función de historias en el tiempo.

Se ingresan los parámetros de la función tiempo-historia por medio de la siguiente ruta:

Load > Dynamic Loads > Time History Analysis Data > Time History Functions.

Figura 21. Función tiempo historia.

The image shows two overlapping software dialog boxes. The top one is titled 'Time History Functions' and contains a table with columns 'Forcing Function', 'Function Type', and 'Data Type'. The bottom one is titled 'Add/Modify/Show Time History Functions' and contains a 'Function Name' field with 'santos', a 'Time Function Data Type' section with 'Acceleration' selected, a 'Scale Factor' of 9.806, and a 'Gravity' of 9.806 m/sec^2. It also features a table of time history data and a graph of the function.

| | Time (sec) | Function (m/sec^2) |
|----|------------|--------------------|
| 1 | 0.0050 | 0.0001 |
| 2 | 0.0100 | 0.0001 |
| 3 | 0.0150 | -0.0001 |
| 4 | 0.0200 | -0.0001 |
| 5 | 0.0250 | -0.0000 |
| 6 | 0.0300 | 0.0002 |
| 7 | 0.0350 | 0.0002 |
| 8 | 0.0400 | -0.0001 |
| 9 | 0.0450 | 0.0002 |
| 10 | 0.0500 | 0.0001 |
| 11 | 0.0550 | -0.0001 |
| 12 | 0.0600 | -0.0001 |
| 13 | 0.0650 | 0.0001 |
| 14 | 0.0700 | -0.0001 |

The graph shows 'Time History Data' on the y-axis (ranging from -0.9 to 0.7) versus 'Time (sec)' on the x-axis (ranging from 0 to 105). The plot displays a red signal that starts with a peak of approximately 0.6 at 15 seconds, followed by a sharp drop to -0.8, and then continues as a decaying oscillation around zero.

Para agregar la función del acelerograma, se copian los datos de la Función aceleración vs tiempo de un archivo excel, en las casillas de de la función aceleración vs tiempo.

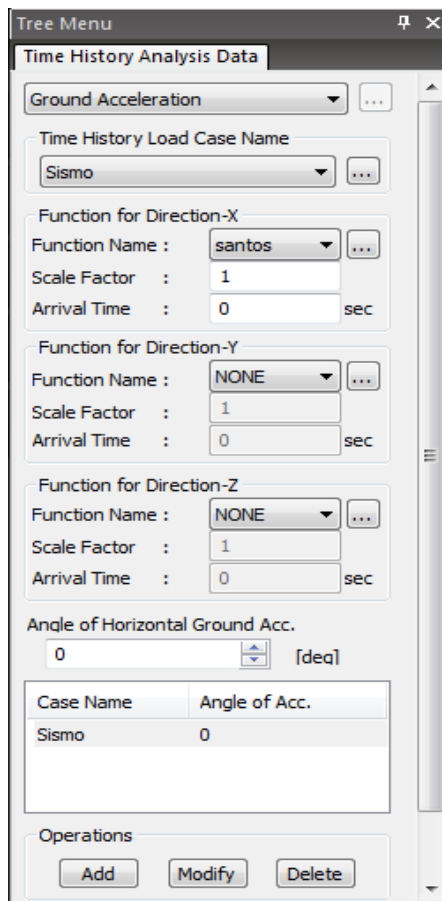
- ✓ Funtión Name: Los Santos Santander
- ✓ Scale Factor: 9.806
- ✓ OK

13. Crear aceleración del terreno.

La aceleración del terreno se asigna mediante la siguiente ruta:

Load > Dynamic Loads > Time History Analysis Data > Ground Aceleration

Figura 22. Asignar la aceleración al suelo.



Se ingresan los datos del análisis tiempo historia.

- ✓ Time History Load Case Name: Sismo

- ✓ Function for Direction-X

Function Name: Los Santos
Scale Factor: 1

- ✓ Add

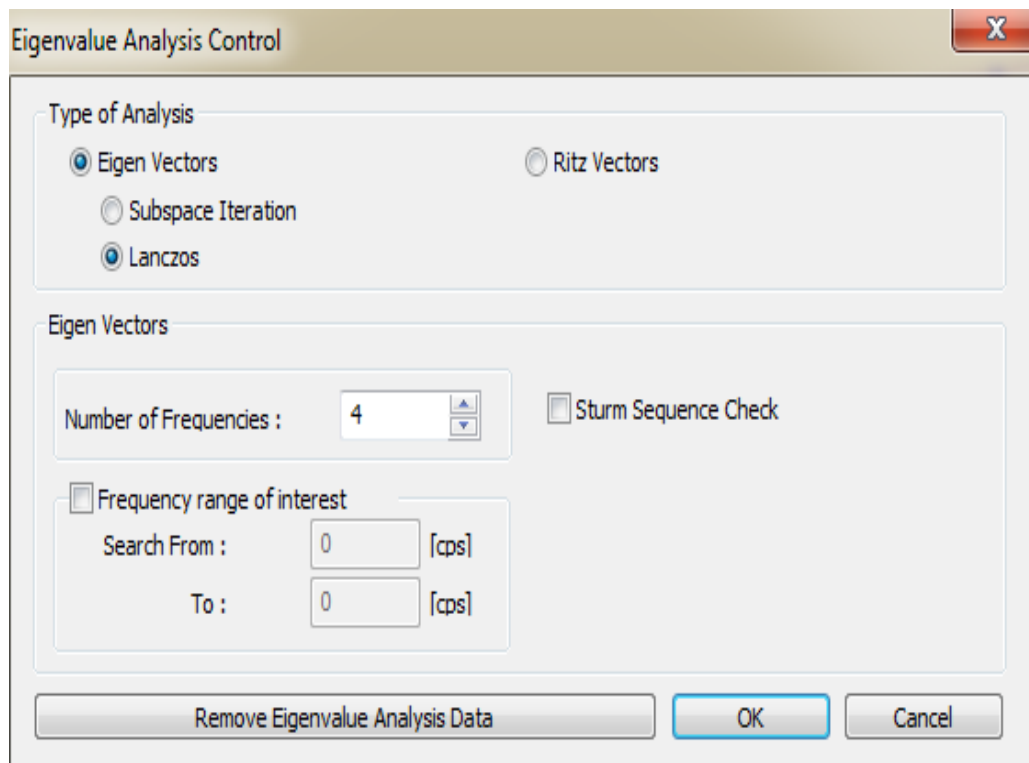
14. Definir los datos de control de análisis.

Se define los datos por medio de la siguiente ruta

Analysis > Analysis Control > Eigenvalue Analysis

- ✓ Type of Analysis: Eigen Vectors y Lanczos.
- ✓ Numero of frecuencies: 4 que equivalen al número de modos de vibración que se van a considerar.
- ✓ Ok.

Figura 23. Definición de los datos del control de análisis.



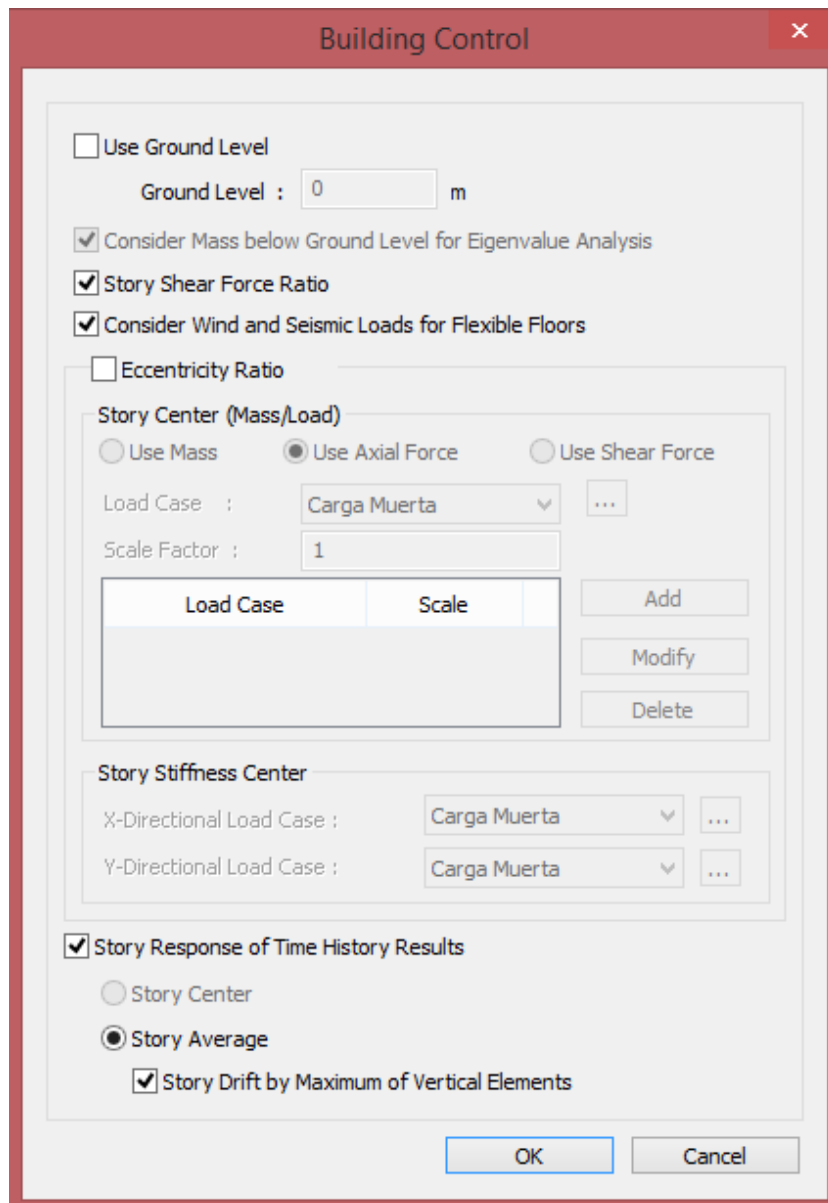
15. Definir respuesta al Time history.

Se realiza mediante la siguiente ruta:

Structure> Building> Control Data>Control data

Seleccionar la casilla de : Story Response of Time History Results.

Figura 24. Definir respuesta a la función tiempo historia.



16. Definir las propiedades del amortiguamiento viscoso lineal.

Por medio de la siguiente ruta se definen las propiedades.

Boundary>Link> General Link> General Link

Figura 25. Definir las propiedades del General Link

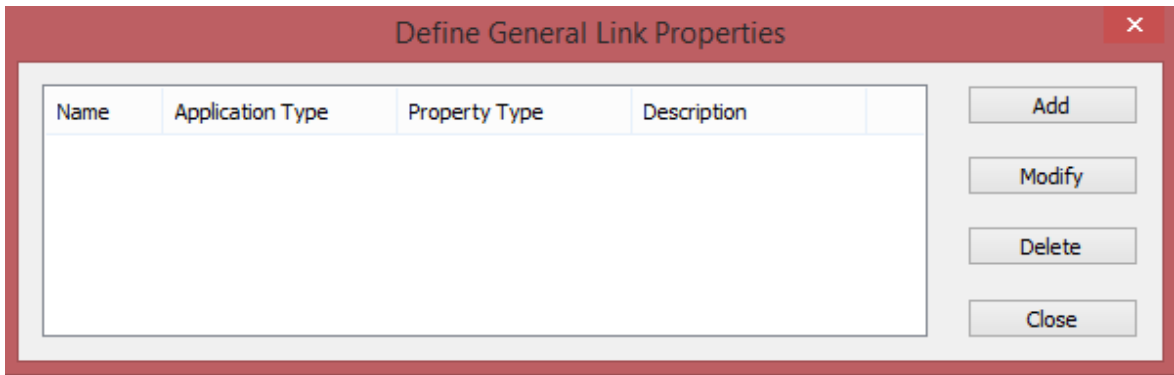
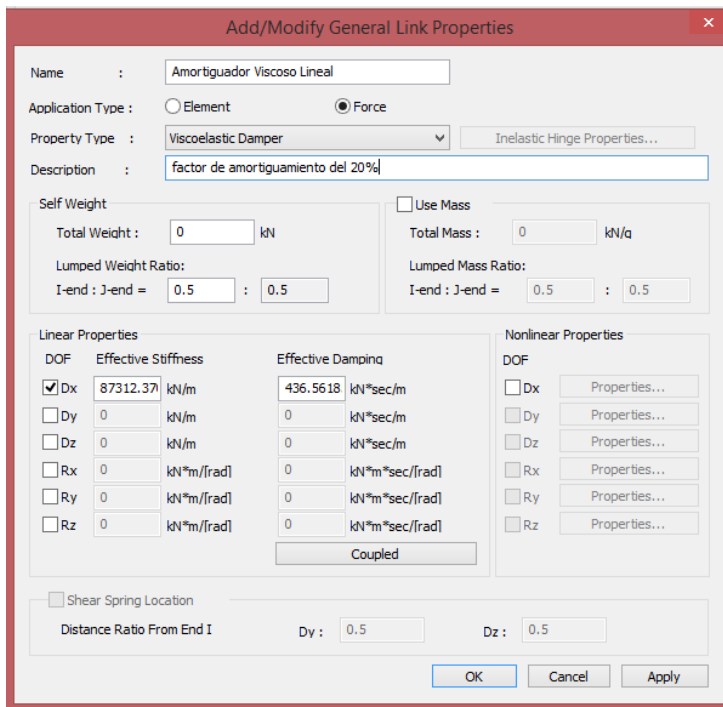


Figura 26. Propiedades del amortiguador viscoso lineal.



- ✓ Name: Amortiguador Viscoso Lineal
- ✓ Application Type: Force.
- ✓ Property Type: Viscoelastic Damper.
- ✓ Linear Properties. Seleccionar la casilla Dx, y definir los datos de:
Effective Stiffness: 87312.37
Effective Damping: 436.562
- ✓ Ok

17. Crear el amortiguamiento viscoso lineal.

- ✓ Options: Add
- ✓ Name: Amortiguador _Viscoso_Lineal
- ✓ Type: Viscoelastic Damper.
- ✓ Reference Coordinate System: Element
- ✓ 2 nodes: Conectar los nodos a interes.
- ✓ Apply.

Figura 27. Modelamiento del amortiguador viscoso lineal.

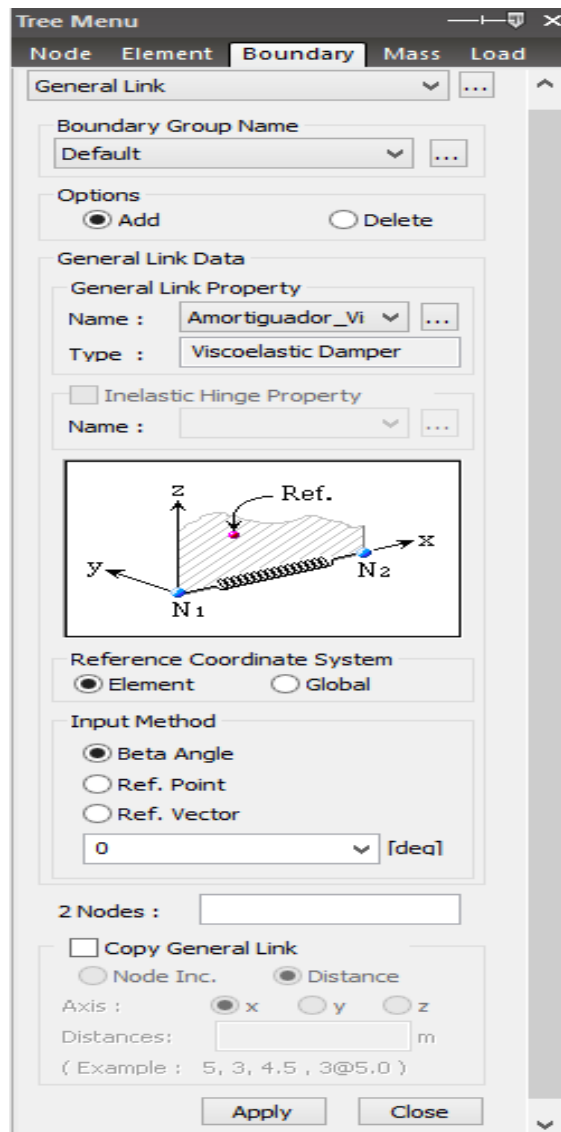
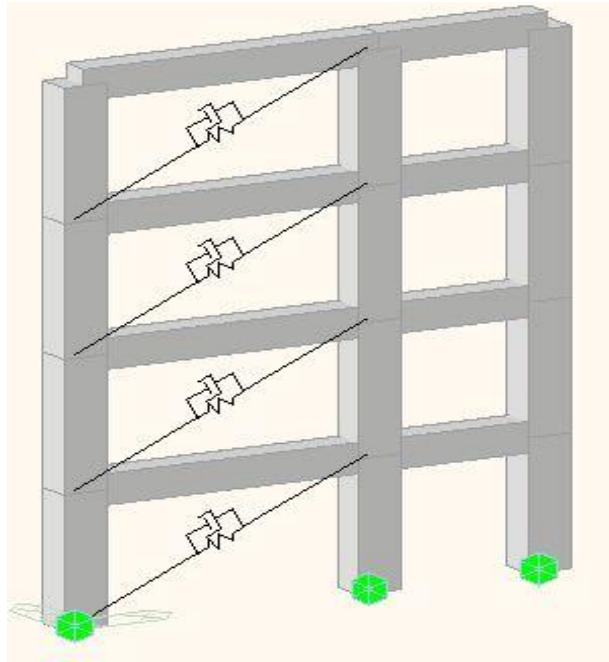


Figura 28. Pórtico con amortiguadores viscosos lineales.



18. Realizar análisis.

Se corre el modelo mediante la siguiente ruta:

Analysis> Perform> Perform Analysis

19. Sacar tablas y resultados.

Results> Tables> Results Tables

11. EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

11.1. DESPLAZAMIENTOS Y DERIVAS

Los desplazamientos y derivas son variables muy importantes para determinar las consecuencias que ocasiona la excitación de una estructura en un evento sísmico de magnitud considerable, la deformación aumenta al tiempo que ocurre la actividad sísmica, por tanto se implementan dispositivos de amortiguamiento para la disminución de derivas y desplazamientos en dicha estructura.

En las figura 29 y 30 se muestra las derivas y desplazamientos respectivamente, para cada piso del pórtico sin sistema de amortiguamiento y con el sistema de amortiguamiento usado para cada factor de amortiguamiento efectivo asumido. De igual manera en el Anexo 1 y 2 se encuentran registrados los datos.

Se evidencia una disminución en la magnitud de las derivas de piso con la aplicación de un amortiguador viscoso en cada piso, la reducción se encuentra en un rango de 30% a 60%.

La mayor deriva del pórtico en los tres sismos se presenta en el piso dos, y el mayor porcentaje de disipación de energía por medio de los disipadores que reducen las derivas se presenta en el piso cuatro. Por ejemplo para el sismo de Los Santos Santander con un factor de amortiguamiento del 20% el porcentaje de disminución es de 41.98%, reduciéndose la deriva de 0.131 a 0.0076, este comportamiento se presenta igualmente para cada uno de los factores de amortiguamiento asumido.

Los desplazamientos se reducen considerablemente, la implementación del amortiguamiento evidencia una reducción importante en los desplazamientos, en el piso cuatro el porcentaje de disminución es mayor, por ejemplo en Los Santos-Santander se ve una reducción de 4.98% con un factor de amortiguamiento del 20%, reduciéndose de 0.06919 m a 0.044499m.

Figura 30. Comparación de derivas.

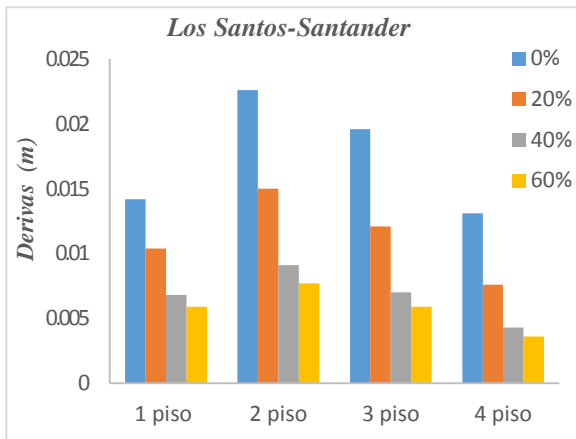
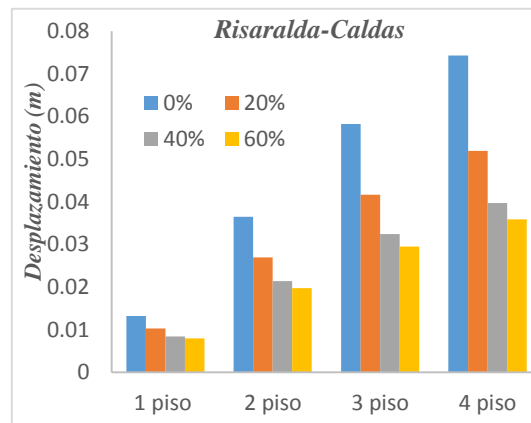
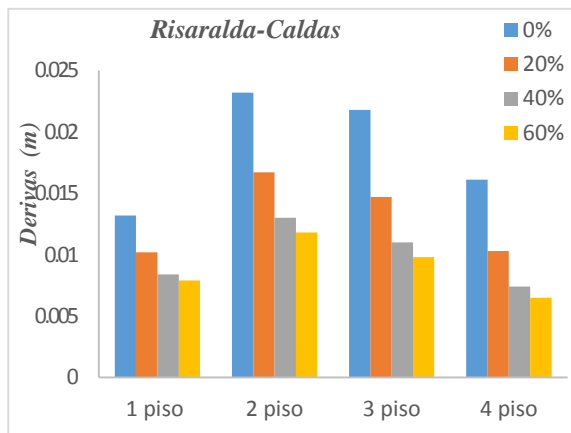
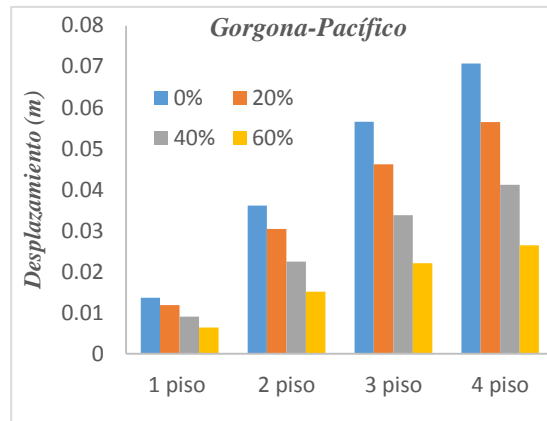
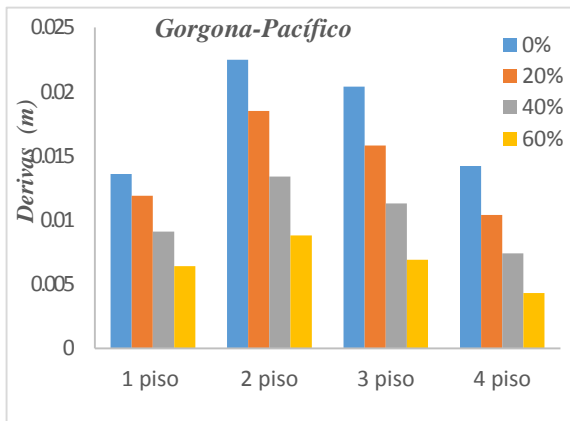
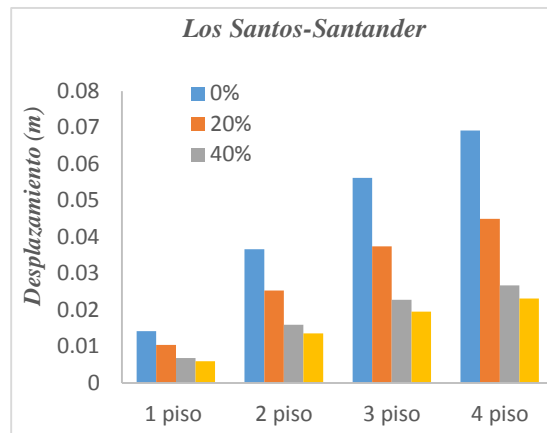


Figura 29. Comparación de desplazamientos.



11.2. VELOCIDADES

Las velocidades aumentan cuando la estructura es afectada por un evento sísmico, para aumentar la seguridad de las estructuras deben disminuirse estas magnitudes disipando la energía por medio de un amortiguador. En la figura 31 se encuentran registradas las velocidades del pórtico sin amortiguamiento viscoso lineal y con amortiguamiento viscoso lineal. También en el Anexo 3 se encuentran registrados los datos haciéndose una comparación se muestra el porcentaje de disminución entre ellas.

Las velocidades disminuyen su magnitud considerablemente, de igual manera como sucede con las derivas y desplazamientos a medida que el factor de amortiguamiento aumenta las velocidades tienden a disminuir. La disminución de estos hace que la estructura sufra menos cambios estructurales y no estructurales, protegiéndose la estructura para dar seguridad a la vida, lo que indica que se cumple con el objetivo principal del uso de amortiguadores.

Figura 31. Comparación de velocidades.

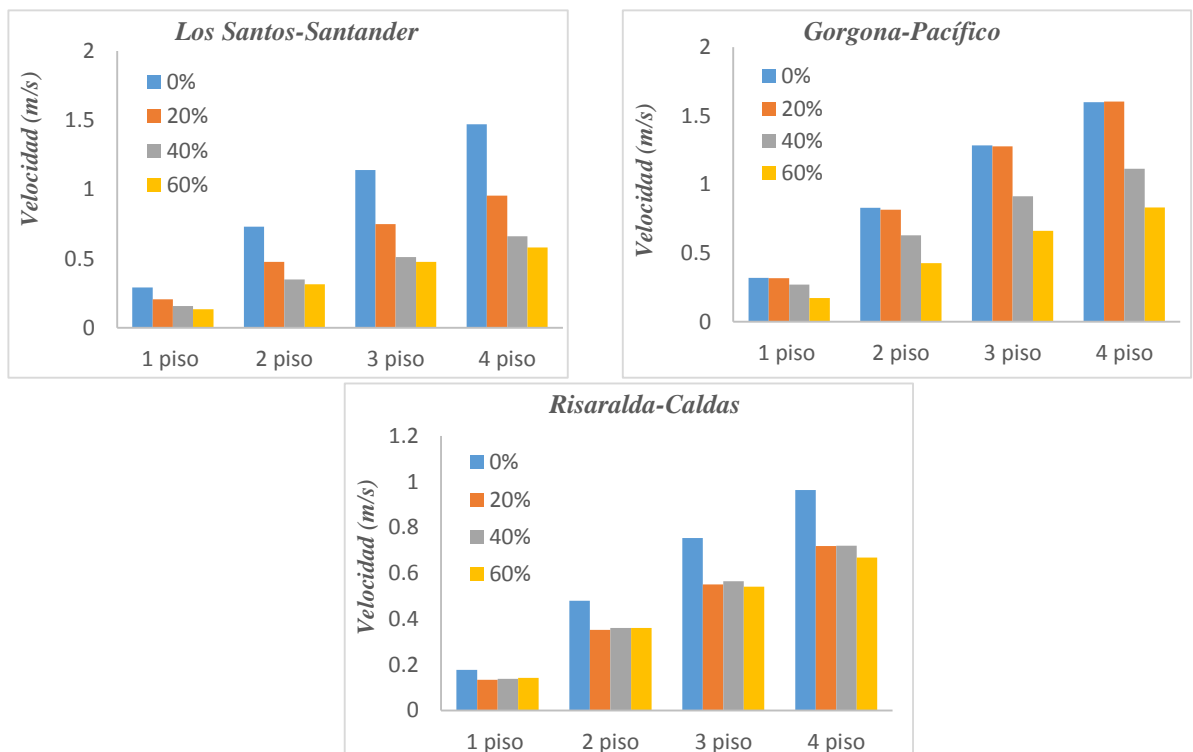


Figura 33. Comparación de fuerzas.

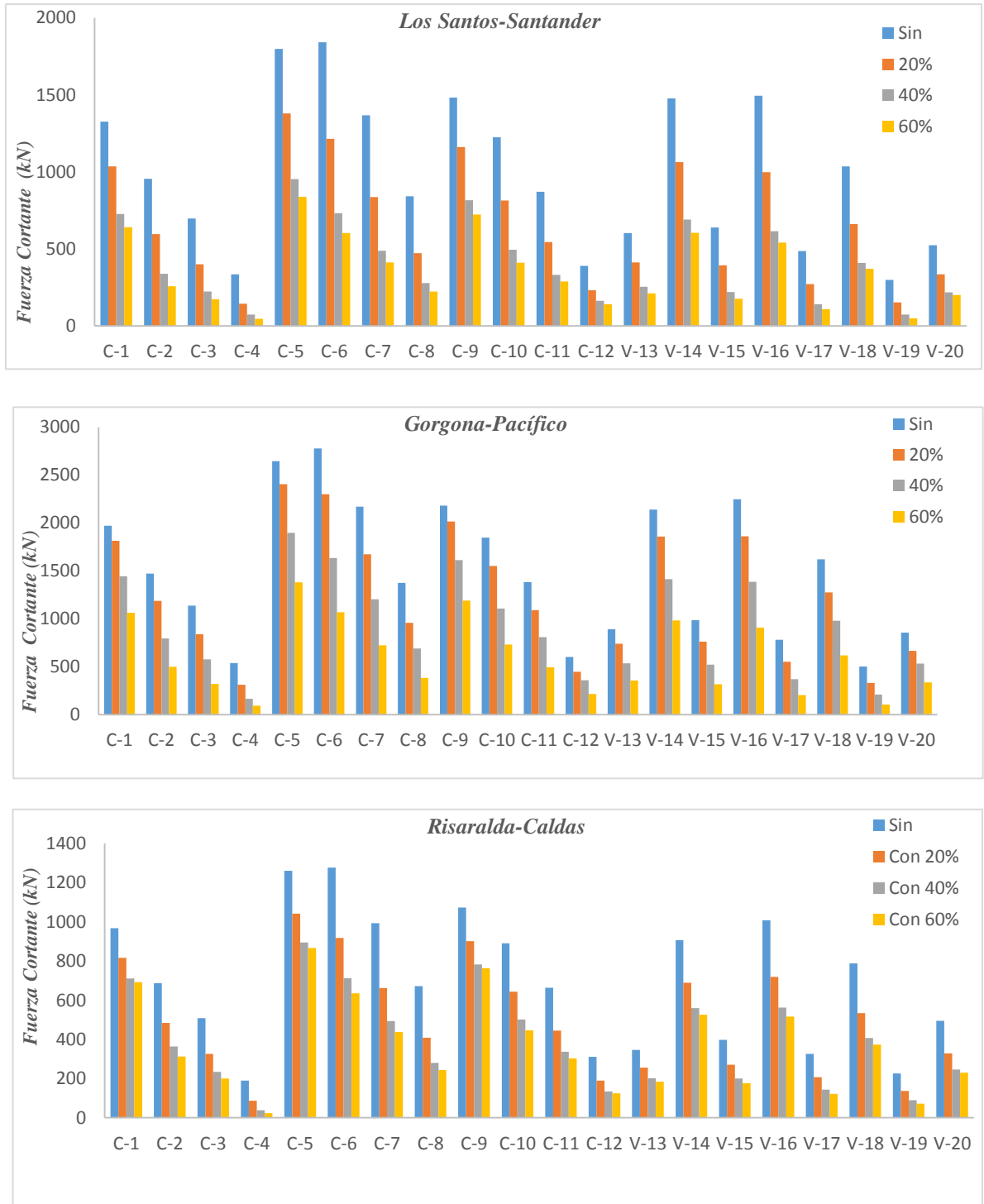
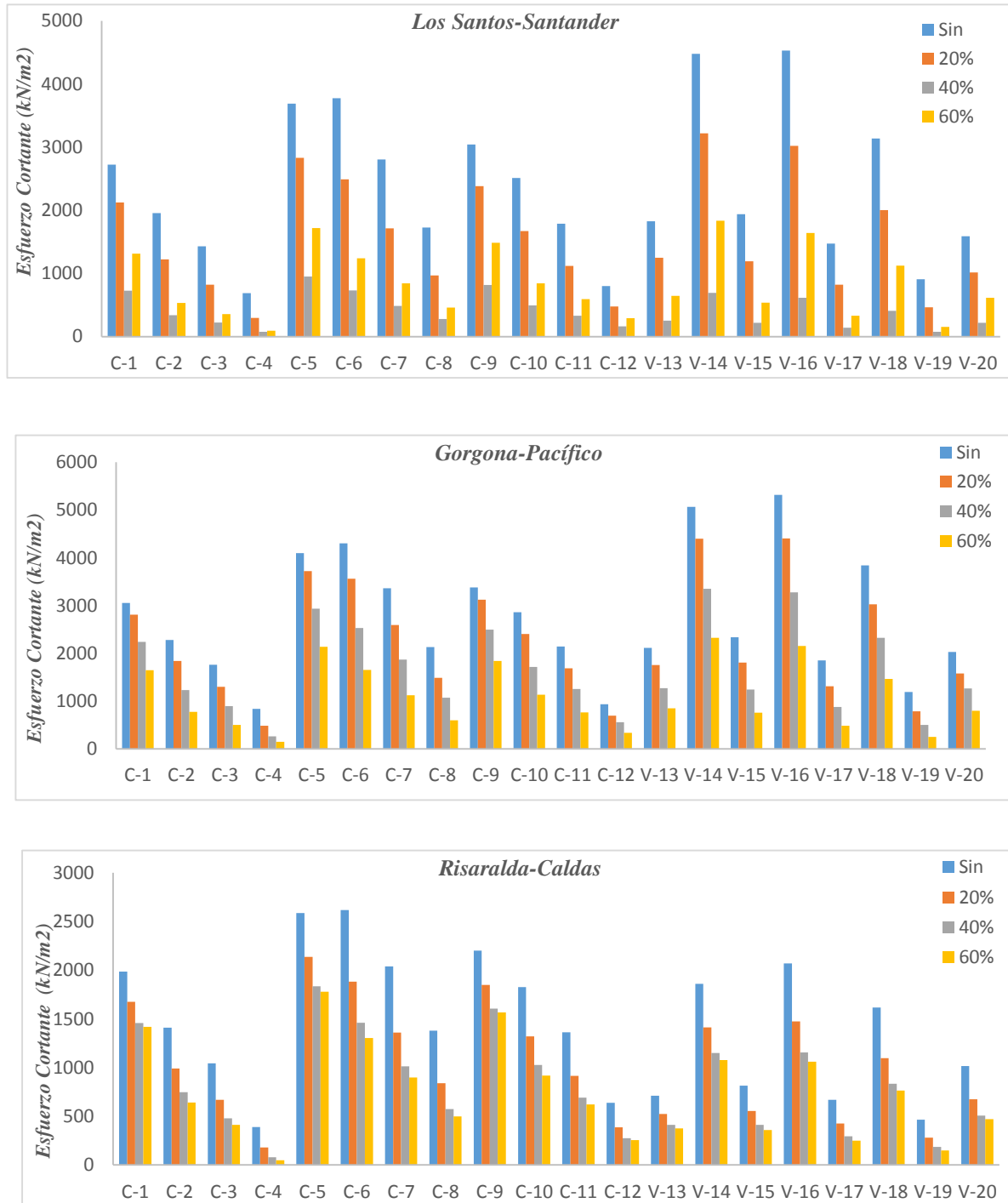


Figura 34. Comparación de esfuerzos cortantes.



11.4. CAMBIO DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES

Debido a la reducción esperada de derivas y desplazamientos producidos por la implementación del dispositivo de amortiguamiento, se realizó un redimensionamiento de las secciones de vigas y columnas teniendo como objetivo determinar los posibles cambios de su geometría. Las secciones se redimensionaron teniendo en cuenta las secciones mínimas permitidas en la Norma Sismo Resistente (NSR-10) [15], la reducción de la sección se hace aumentando la deriva obtenida para los sismos de Los Santos, Gorgona y Risaralda, se observan en la tabla 7.

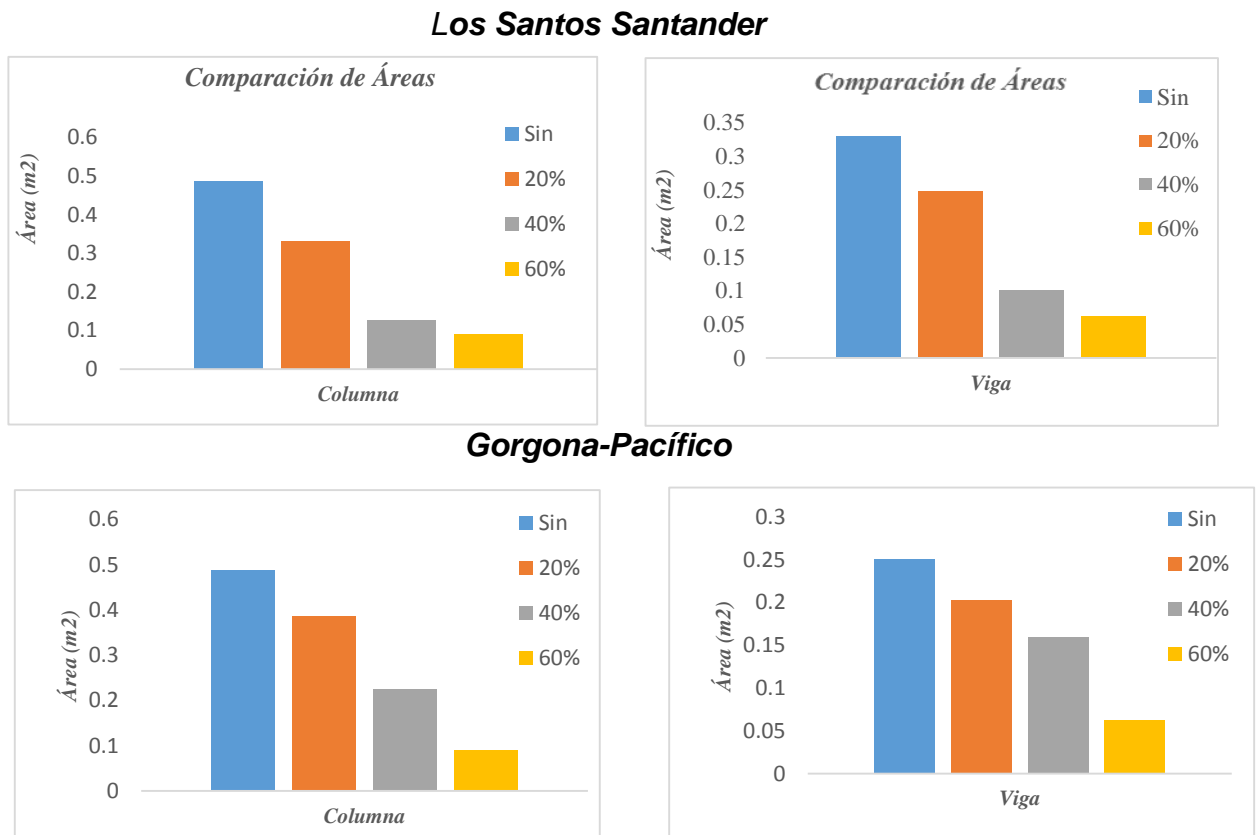
Tabla 7. Redimensionamiento de las secciones transversales con amortiguadores.

| Sismo Los Santos-Santander | | | | | | |
|-----------------------------------|---------|-------|------------------------|-------|-------|------------------------|
| β_{eff-m} | Columna | | | Viga | | |
| | b [m] | h [m] | Área [m ²] | b [m] | h [m] | Área [m ²] |
| 20% | 0.55 | 0.6 | 0.33 | 0.45 | 0.55 | 0.2475 |
| 40% | 0.3 | 0.42 | 0.126 | 0.25 | 0.40 | 0.100 |
| 60% | 0.3 | 0.3 | 0.09 | 0.25 | 0.25 | 0.0625 |
| Sismo Gorgona-Pacífico | | | | | | |
| β_{eff-m} | Columna | | | Viga | | |
| | b [m] | h [m] | Área [m ²] | b [m] | h [m] | Área [m ²] |
| 20% | 0.70 | 0.70 | 0.490 | 0.65 | 0.50 | 0.325 |
| 40% | 0.55 | 0.70 | 0.385 | 0.38 | 0.45 | 0.171 |
| 60% | 0.35 | 0.50 | 0.175 | 0.30 | 0.30 | 0.090 |
| Sismo Risaralda- Caldas | | | | | | |
| β_{eff-m} | Columna | | | Viga | | |
| | b [m] | h [m] | Área [m ²] | b [m] | h [m] | Área [m ²] |
| 20% | 0.55 | 0.7 | 0.385 | 0.45 | 0.45 | 0.203 |
| 40% | 0.45 | 0.5 | 0.225 | 0.4 | 0.4 | 0.160 |
| 60% | 0.3 | 0.3 | 0.090 | 0.25 | 0.25 | 0.0625 |

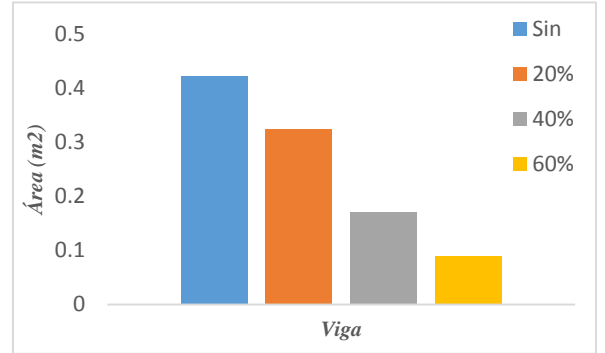
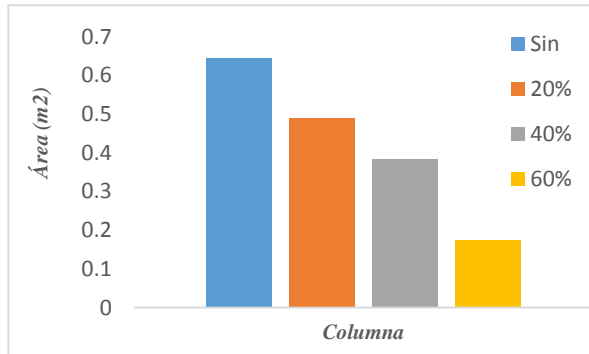
11.4.1. Comparación de área

Se realizó una comparación entre las áreas de las secciones transversales sin amortiguamiento y con amortiguamiento viscoso. En la figura 35 se muestra la disminución que se obtuvo en las secciones transversales de las vigas y columnas teniendo en cuenta que dichas secciones no cambian para ningún piso del pórtico. Se obtiene una reducción en el área mediante los factores de amortiguamiento teniendo por ejemplo para los Santos Santander un porcentaje de disminución del 25% para vigas y 32.3% para columnas con el factor de amortiguamiento del 20%. Para el amortiguamiento de 40% se disminuye un 70% en vigas y en columnas 74% y para el 60% de amortiguamiento el área se reduce en vigas 81% y en columnas 81%.

Figura 35. Comparación de áreas.



Risaralda-Caldas



12. CONCLUSIONES

El uso de amortiguadores viscosos lineales cambió la respuesta dinámica del pórtico en cuanto a derivas, desplazamientos y velocidades con respecto al pórtico sin amortiguadores, redujeron en un porcentaje considerable las derivas del pórtico en cada piso, ya que en los tres sismos evaluados (Los Santos, Gorgona, Risaralda) las derivas fueron cambiando al aumentar el factor de amortiguamiento, esto proporcionó una reducción en el área necesaria para vigas y columnas, los desplazamientos, las velocidades, las fuerzas y esfuerzos cortantes de cada simulación al poner más amortiguamiento, lo que es favorable para que una estructura no falle inmediatamente permitiendo la evacuación de personas o no quede con fisuras en sus elementos estructurales.

El mayor porcentaje de disipación de energía se presenta en el piso cuatro donde se hace más visible la reducción de derivas y desplazamientos

En cuanto a los tres factores de amortiguamiento se puede ver que con el 60% las secciones de vigas y columnas, las derivas, los desplazamientos, las velocidades, fuerzas y esfuerzos disminuyen más que con el 20% generando mayor seguridad para el pórtico, para lo cual el factor de amortiguamiento depende de la seguridad que se quiera aportar a la estructura.

El objetivo General de este trabajo era evaluar el desempeño de un sistema de amortiguamiento viscoso para protección sísmica sobre un pórtico 2D con compartimiento elástico lineal, este se desarrolló en el capítulo 11 de este trabajo de grado.

El primer objetivo específico fue modelar una estructura diseñada en hormigón armado con comportamiento elástico implementando un sistema de amortiguamiento viscoso para protección sísmica (amortiguador viscoso lineal), se realizó en el capítulo 10 de este trabajo de grado.

Y el segundo objetivo específico era comparar los resultados obtenidos (comportamiento elástico, desplazamientos, fuerzas, esfuerzos y velocidades) del modelamiento numérico del pórtico con y sin amortiguadores viscosos lineales en el Software Midas Gen[®] que se desarrolló en el capítulo 11.

REFERENCIAS

[1] Servicio Geológico colombiano. SGC RSNC [videograbación], 2014, 5:52 min., 14 pulgadas. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=94H8YuqOWJk>. [Consultado el 18 de abril de 2016]

[2] Comité AIS-300. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, ESTUDIO GENERAL DE AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA, Universidad de los Andes, 1997. Disponible en: [http://www.understandrisk.org/sites/default/files/EstudioGeneraldeAmenazaSsmicadeColombia2009_UR%20\(1\).p](http://www.understandrisk.org/sites/default/files/EstudioGeneraldeAmenazaSsmicadeColombia2009_UR%20(1).p) [consultado el 15 de julio de 2015]

[3] R.P Leocadio y CH.CH Gustavo, "Uso de aisladores de base en puentes de concreto simplemente apoyados," Tecnura, vol. 16, No. 34, Octubre-diciembre 2012, pp. 103-124.

[4] Corporación de Desarrollo Tecnológico CDT, PROTECCIÓN SÍSMICA DE ESTRUCTURAS: Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía, En: Revista EMB CONSTRUCCIÓN. (5 de may., 2015). Disponible en: <http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=2495> > [consultado en 2 febrero de 2016]

[5] Comité AIS-300. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, ESTUDIO GENERAL DE AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA, Universidad de los Andes, 1997. Disponible en: [http://www.understandrisk.org/sites/default/files/EstudioGeneraldeAmenazaSsmicadeColombia2009_UR%20\(1\).p](http://www.understandrisk.org/sites/default/files/EstudioGeneraldeAmenazaSsmicadeColombia2009_UR%20(1).p)>[consultado en 15 de julio de 2015]

[6] Corporación de Desarrollo Tecnológico CDT, PROTECCIÓN SÍSMICA DE ESTRUCTURAS: Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía, En:

Revista EMB CONSTRUCCIÓN. (5 de may., 2015). Disponible en: <<http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=2495> > [consultado en 2 de mayo de 2015]

[7] Oviedo Juan Andrés, Duque María del Pilar. Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. No. 6 (Diciembre, 2006); p. ISSN 105-120 1794-1237 [consultado el 3 de febrero del 2016]

[8] THOMSON, P. shape memory alloys for Structural Control [Ph.D Thesis]. Minneapolis, MN: University of Minnesota, 1997. [[Links](#)]

[9] EERC National Information Service for Earthquake Engineering. Available: <http://nisee.berkeley.edu> (accessed July 4, 2007).

[10] RICCIARDELLI, F., PIZZIMENTI, D., MATTEL, M., Passive and active mass damper control of the response of tall building to wind gustiness, Engineering Structures, 2003. [[Links](#)]

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

[12] VILLARREAL CASTRO, Genner, SARMIENTO OVIEDO, Ricardo. Edificaciones con disipadores de energía. Lima Perú, 2009, p. 22-59

[13] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10), Título A: Familias de acelerogramas. Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica, Bogotá enero del 2010. . pp. A-29.

[14] F Hejazi, J Noorzaei, M.S. Jaafar. "Application of Nonlinear Damper in Reinforced Concrete Structure Control," Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction, September 2009, pp. 25-30.

[15] Federal Emergency Management Agency (FEMA), NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings and NEHER Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, [Reports No. FEMA-273], Building Seismic Safety Council, Washington, DC, 1997.

[16] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10), Título C: Dimensiones de diseño para elementos a compresión (columnas): Elementos sometidos a flexión en pórticos especiales resistentes a momento con capacidad especial de disipación de energía (DES) y Elementos sometidos a flexión y carga axial pertenecientes a pórticos especiales resistentes a momento con capacidad especial de disipación de energía (DES), Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica, Bogotá enero del 2010. . pp. A-29.

BIBLIOGRAFÍA

Comité AIS-300. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, ESTUDIO GENERAL DE AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA, Universidad de los Andes, 1997. Disponible en: <[http://www.understandrisk.org/sites/default/files/EstudioGeneraldeAmenazaSsmicadeColombia2009_UR%20\(1\).p](http://www.understandrisk.org/sites/default/files/EstudioGeneraldeAmenazaSsmicadeColombia2009_UR%20(1).p)>[consultado en 15 de julio de 2015]

Corporación de Desarrollo Tecnológico CDT, PROTECCIÓN SÍSMICA DE ESTRUCTURAS: Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía, En: Revista EMB CONSTRUCCIÓN. (5 de may., 2015).Disponible en: <<http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=2495> > [consultado en 2 de mayo de 2015]

F Hejazi, J Noorzai, M.S. Jaafar. "Application of Nonlinear Damper in Reinforced Concrete Structure Control," Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction, September 2009, pp. 25-30.

RICCIARDELLI, F., PIZZIMENTI, D., MATTEL, M., Passive and active mass damper control of the response of tall building to wind gustiness, Engineering Structures, 2003. [[Links](#)]

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

VILLARREAL CASTRO, Genner, SARMIENTO OVIEDO, Ricardo. Edificaciones con disipadores de energía. Lima Perú, 2009, p. 22-59

ANEXOS

Los Anexos se encuentran en la carpeta adjunta en el CD.

El modelo de Midas Gen se encuentra en la carpeta adjunta en el CD