

Evaluación del Efecto Aisladores de Base Elastoméricos en el Comportamiento Dinámico de una
Edificación de Baja Altura

Silvia Nathalia Ayala Rangel, Luis Carlos Ramos Carreño

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Oscar Javier Begambre Carrillo
PhD en Ingeniería de Estructuras.

Co-Director

Jeffrey Guevara Corzo
Msc. en Ingeniería de Estructuras

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga

2021

Agradecimientos

A Dios, mi guía y refugio, en quien encuentro fuerza y paz.

A mis padres y hermana, por ser mi fortaleza en los días difíciles, por confiar en mis capacidades y nunca dejarme sola, son mi mayor motivación y la razón por la que siempre estoy de pie, persisto y nunca renuncio.

A mis compañeros, aquellos que se convirtieron en mi familia lejos de casa, gracias por acompañarme en este meta, por su incondicional ayuda, lealtad, compresión y resistencia.

A cada uno de los docentes que formaron parte de este proceso de formación, que con sus conocimientos y enseñanzas de vida aportaron a convertirme en una profesional integral.

Finalmente, a mi compañero Luis Carlos Ramos Carreño por su compromiso, responsabilidad y entrega en la elaboración de este proyecto.

Silvia Nathalia Ayala Rangel

Quiero agradecerle primero que todo a Dios quien me ha estado acompañando durante todo este trayecto de mi formación profesional y me ha ayudado a superar muchos obstáculos en el camino.

A mi familia la cual ha sido el pilar principal en mi formación como ser humano y profesional aportándome los principios y valores necesarios para poder mejorar día a día.

Agradecer también a la escuela de ingeniería civil de la universidad industrial de Santander y a todos los docentes que han aportado en mi desarrollo integral como profesional.

Por último, agradecer a mi compañera de proyecto Silvia Nathalia Ayala Rangel por su gran desempeño y esfuerzo en el desarrollo del proyecto.

Luis Carlos Ramos Carreño

Agradecer de manera especial a nuestro director el Ing. Oscar Javier Begambre y nuestro codirector el Ing. Jeffrey Guevara Corzo quienes, con su constante guía, ayuda y dedicación fueron pieza clave en el desarrollo del proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Objetivos	18
1.1. Objetivo general	18
1.2. Objetivos específicos.....	18
2. Marco teórico	19
2.1. Sismos y sus efectos en las estructuras	19
2.2. Sistema pasivo de aislamiento sísmico	19
2.3. Aisladores sísmicos de base	20
2.4. Tipos de aisladores sísmicos	21
2.4.1. Aisladores de deslizamiento.....	21
2.4.2. Aislador elastomérico	22
2.5. Modelo bilineal de un aislador sísmico.....	25
2.5.1. Modelo bilineal del aislador de núcleo de plomo (LRB).....	28
2.5.2. Modelo bilineal del aislador de alto amortiguamiento (HDRB).....	29
2.6. Antecedentes	31
2.6.1. Estados Unidos.....	32
2.6.2. Japón.....	33
2.6.3. Europa y Oceanía	35

2.6.4.	Colombia	36
2.7.	Fuerza horizontal equivalente (FHE)	45
2.7.1.	Periodo Fundamental de Vibración.....	46
2.7.2.	Fuerzas sísmicas horizontales equivalentes	47
2.8.	Análisis dinámico cronológico no lineal.....	48
2.9.	Estructura de baja altura	50
3.	Modelamiento de la estructura	50
3.1.	Materiales	52
3.2.	Elementos estructurales.....	53
3.3.	Evaluación de cargas	54
3.4.	Irregularidades de la edificación	55
3.4.1.	Irregularidades en planta	56
3.4.2.	Irregularidades en altura.....	56
3.5.	Coeficiente de capacidad de disipación de energía R	56
4.	Espectro de diseño.....	57
4.1.	Parámetros sísmicos de diseño	58
5.	Análisis estático de la estructura	61
5.1.	Consideraciones del análisis estructural.....	61
5.2.	Periodo fundamental de la edificación	62

5.3.	Verificación de derivas.....	65
6.	Modelamiento de los aisladores	65
6.1.	Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB).....	66
6.2.	Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB).....	67
6.3.	Definición de los aisladores en Midas Gen.....	69
6.4.	Distribución de los aisladores en la estructura	70
7.	Análisis dinámico cronológico.....	72
7.1.	Selección de sismos.....	73
7.2.	Ajuste de sismos.....	76
7.3.	Ajuste de resultados	79
8.	Resultados	80
8.1.	Análisis Diagramas de Pareto de efectos	81
8.2.	Ajuste del modelo.....	83
8.3.	Gráficas de residuos	84
8.3.1.	Gráfica de residuo vs orden.....	85
8.3.2.	Gráfica de probabilidad normal.....	86
8.3.3.	Gráfica de ajustes versus residuos.....	88
8.4.	Selección de la distribución optima de aisladores.....	90
8.4.1.	Minimizar Cortante basa	90

8.4.2.	Minimizar Derivas.....	92
8.4.3.	Minimizar desplazamientos horizontales	93
8.4.4.	Minimizar todos los parámetros de respuesta	94
9.	Conclusiones	96
	Referencias Bibliográficas	99

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Entrepisos edificación.....	51
Tabla 2. Elementos estructurales de la edificación.....	53
Tabla 3. Carga Muerta sobre la edificación.....	54
Tabla 4. Carga Viva sobre la edificación.....	55
Tabla 5. Parámetros sísmicos de la edificación.....	59
Tabla 6. Propiedades Aisladores LRB.....	66
Tabla 7. Propiedades Aisladores HDRB.....	68
Tabla 8. Distribución de aisladores.....	71
Tabla 9. Sismos seleccionados.....	73
Tabla 10. Valor P de los parámetros de respuesta.....	83
Tabla 11. Estadísticos de bondad de los parámetros de respuesta.....	84
Tabla 12. Resultados optimización cortante basal.....	91
Tabla 13. Resultados optimización Derivas.....	92
Tabla 14. Resultados optimización desplazamientos horizontales.....	93
Tabla 15. Resultados optimización en conjunto de los parámetros de respuesta.....	95

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Aislador sísmico de deslizamiento o FPS	22
Figura 2. Aislador elastomérico de alto amortiguamiento (HDRB)	24
Figura 3. Aislador elastoméricos con núcleo de plomo (LRB).	25
Figura 4. Modelo bilineal de un aislador de base	26
Figura 5. Edificio County Fire Command and Control Facility	33
Figura 6. Edificio West Japan postal Center, Sanda, Japan.....	35
Figura 7. The SIP Complex, Ancona, Italy.....	36
Figura 8. Viaducto Portachuelo Zipaquirá.....	37
Figura 9. Intersección Vial Redoma San Mateo, Cúcuta.....	38
Figura 10. Puentes del PR12 Y PR13, vía Bucaramanga-Cúcuta.....	39
Figura 11. Intersección El Rosal-Cundinamarca	40
Figura 12 . Intersección de la Cra. 44, Cali-Valle del Cauca.....	41
Figura 13. Clínica Comfandi.....	42
Figura 14. Clínica Imbanaco.....	43
Figura 15. Laboratorios de ciencia de la universidad EAFIT	43
Figura 16. Prototipo aislador elastomérico reforzado con fibras naturales.....	44
Figura 17. Aislador de resorte.....	45
Figura 18. Modelo Estructural en Midas Gen.....	52
Figura 19. Propiedades Material en Midas Gen.....	53
Figura 20. Espectro de diseño en Midas Gen	60
Figura 21. Espectro de diseño de la edificación	60

Figura 22. Parámetros para cálculo de T_a	63
Figura 23. Definición de fuerza sísmica estática en Midas Gen.....	64
Figura 24. Definición de los aisladores en Midas Gen.	69
Figura 25. Ejes locales de los aisladores en Midas Gen	70
Figura 26. Acelerograma Sismo Helena	74
Figura 27. Acelerograma Mammoth Lake.....	74
Figura 28. Acelerograma Sismo Colainga	75
Figura 29. Acelerograma Sismo Whittier Narrow	75
Figura 30. Acelerograma Sismo Umbria-Marche.....	75
Figura 31. Verificación primer requisito de A.2.7.1 (c) de NSR-10	76
Figura 32. Verificación segundo requisito de A.2.7.1 (c) de NSR-10.....	77
Figura 33. Comparación sismo Helena real y escalado	78
Figura 34. Comparación sismo Mammoth Lake real y escalado.....	78
Figura 35. Comparación sismo Coalinga real y escalado	78
Figura 36. Comparación sismo Whittier Narrow real y escalado	79
Figura 37. Comparación sismo Umbria-Marche real y escalado.....	79
Figura 38 . Diagrama de Pareto Cortante Basal.....	81
Figura 39. Diagrama de Pareto Deriva	82
Figura 40. Diagrama de Pareto de desplazamiento horizontal	82
Figura 41. Gráfica de residuos Vs Orden de cortante basal.....	85
Figura 42. Gráfica de residuos Vs Orden de deriva.....	86
Figura 43 . Gráfica de residuos Vs Orden de desplazamiento	86
Figura 44 . Gráfica de probabilidad normal de cortante basal.....	87

Figura 45. Gráfica de probabilidad normal de deriva	87
Figura 46. Gráfica de probabilidad normal de desplazamiento	88
Figura 47. Gráfica de ajustes Vs residuos de cortante basal.....	89
Figura 48. Gráfica de ajustes Vs residuos de deriva	89
Figura 49. Gráfica de ajustes Vs residuos de desplazamiento	90
Figura 50. Gráfica de efectos principales cortante basal	91
Figura 51. Gráfica de efectos principales deriva	93
Figura 52. Gráfica de efectos principales desplazamiento.....	94
Figura 53. Esquema en planta de configuración óptima de aisladores	96

Lista de ecuaciones

	Pág.
(Ec. 1) Rigidez efectiva.....	26
(Ec. 2) Desplazamiento de fluencia	27
(Ec. 3) Amortiguamiento efectivo en función de ED	27
(Ec. 4) Amortiguamiento efectivo	27
(Ec. 5) Fuerza característica aislador LRB	27
(Ec. 6) Fuerza característica aislador LRB	28
(Ec. 7) Rigidez postfluencia aislador LRB	28
(Ec. 8) Desplazamiento postfluencia aislador LRB	28
(Ec. 9) Desplazamiento postfluencia aislador LRB	29
(Ec. 10) Amortiguamiento efectivo aislador LRB	29
(Ec. 11) Rigidez postfluencia aislador HDRB	29
(Ec. 12) Fuerza característica aislador HDRB	30
(Ec. 13) Fuerza de fluencia aislador HDRB	30
(Ec. 14) Rigidez elástica aislador HDRB	30
(Ec. 15) Rigidez efectiva aislador HDRB	30
(Ec. 16) Periodo Fundamental de Vibración.....	46
(Ec. 17) Coeficiente C_u	46
(Ec. 18) Periodo de vibración aproximado T_a	47
(Ec. 19) Cortante sísmico basal	47
(Ec. 20) Fuerza sísmica horizontal.....	47
(Ec. 21) Ecuación de análisis dinámico cronológico lineal para múltiples grados de libertad.....	48

Resumen

Título: Evaluación del efecto aisladores de base elastoméricos en el comportamiento dinámico de una estructura baja altura*

Autores: Silvia Nathalia Ayala Rangel**

Luis Carlos Ramos Carreño**

Palabras Clave: Aisladores elastoméricos, optimización sistema de aislación sísmico, análisis dinámico cronológico, análisis factorial, edificación de baja altura.

Descripción:

Los aisladores sísmicos de base son un sistema de protección sísmico pasivo empleado mundialmente que se caracteriza por desacoplar la estructura de la cimentación logrando una discontinuidad en la transmisión de cargas reduciendo así la demanda al momento del sismo y preservando la vida. Según sus características y propiedades existen dos tipos de aisladores: de deslizamiento y elastoméricos, siendo estos últimos los más usados en sistemas de protección sísmica en el mundo ya que aportan alta flexibilidad horizontal y gran rigidez vertical. En este contexto, la presente investigación tiene como finalidad establecer la distribución optima de aisladores elastoméricos de tipo LRB y HDRB en una edificación de baja altura ubicada en una zona de amenaza sísmica alta, siendo este tipo de edificación la más característica en Colombia. Se establecieron como factores la posición y tipo de aisladores evaluando la respuesta dinámica con un análisis dinámico cronológico no lineal a través de los parámetros de fuerza cortante basal, derivas y desplazamientos. De acuerdo con los resultados obtenidos a través de un análisis factorial, se determinó que ubicar aisladores HDRB de rigidez media en todos los apoyos permite obtener un óptimo rendimiento del sistema y por tanto un diseño estructural más seguro.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Oscar Javier Begambre Carrillo. Codirector Jeffrey Guevara Corzo.

Abstract

Title: Evaluation of the elastomeric-based insulating effect on the dynamic behavior of a low-rise structure*

Authors: Silvia Nathalia Ayala Rangel**

Luis Carlos Ramos Carreño**

Keywords: Elastomeric insulators, seismic isolation system optimization, dynamic chronological analysis, factorial analysis, low-rise building.

Description:

The base seismic isolators are a passive seismic protection system used worldwide that is characterized by decoupling the foundation structure, achieving a discontinuity in the transmission of loads, thus reducing demand at the time of the earthquake and preserving life. According to their characteristics and properties, there are two types of insulators: sliding and elastomeric, the latter being the most used in seismic protection systems in the world since they provide high horizontal flexibility and great vertical rigidity. In this context, the present research aims to establish the optimal distribution of LRB and HDRB elastomeric insulators in a low-rise building located in an area of high seismic threat, this type of building being the most characteristic in Colombia. The position and type of insulators were established as factors, evaluating the dynamic response with a non-linear chronological dynamic analysis through the parameters of basal shear force, drifts and displacements. According to the results obtained through a factorial analysis, it was determined that placing HDRB insulators of medium stiffness in all the supports allows to obtain an optimal performance of the system and therefore a safer structural design.

* Degree Work

** Physico-mechanical Engineering Faculty. School of civil engineering. Director Oscar Javier Begambre Carrillo. Codirector Jeffrey Guevara Corzo.

Introducción

Colombia está ubicada en una de las zonas con mayor actividad sísmica en la Tierra. Gran parte de la sismicidad del país se debe a la convergencia de las placas tectónicas de Nazca y del Caribe con la placa suramericana, causando que cerca del ochenta y siete por ciento de las edificaciones del país se encuentren expuestas a amenaza sísmica intermedia y alta. Surgiendo así la necesidad de implementar códigos de diseño sismo resistente para establecer unos criterios mínimos de diseño. En Colombia el marco normativo está establecido en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) el cual indica los criterios necesarios para realizar un diseño estructural de edificaciones que ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud esta no colapse y permita salvaguardar la integridad física de las personas.

En consecuencia y con el fin de reducir los niveles de daños, se han desarrollado durante los últimos cincuenta años nuevas tecnologías de protección sísmica. Estos dispositivos han demostrado que es posible alcanzar diseños estructurales más exigentes, logrando no solamente preservar la vida y seguridad de las personas, sino también reducir los daños de la estructura, lo que garantiza su operatividad luego de un sismo.

Dentro de las tecnologías de protección sísmica, los sistemas de pasivos son uno de los más populares, específicamente los aisladores sísmicos de base. Estos dispositivos permiten desacoplar la estructura de su cimentación generando una discontinuidad en la transmisión de cargas, por lo que la estructura sufre pequeñas deformaciones y se limitan los daños estructurales y no estructurales durante un sismo, de manera tal que los costos de reparación sean bajos (Genatios & Lafuente, 2016).

Estos dispositivos de aislamiento sísmico se clasifican en dos tipos: el primero conocido

como péndulo de fricción (FPS) que desacopla la estructura de la fundación, desarrollando al momento del sismo una fuerza de fricción lateral producto del peso de la estructura con la superficie de apoyo (generalmente esta superficie es grande y cóncava), permitiendo grandes desplazamientos y que, finalmente, la estructura retorne a su posición original; el segundo tipo son los elastoméricos, que corresponde a los dispositivos más implementados, consisten en capas intercaladas de goma y acero, obteniendo así alta rigidez vertical, manteniendo la flexibilidad lateral permitiendo grandes deformaciones laterales. A su vez estos se subdividen en HDRB los cuales poseen mayor porcentaje de amortiguación debido a que la goma es tratada con aditivos, y en LRB que cuentan con un núcleo de plomo en el centro para brindar mayor rigidez, amortiguamiento y disipación de energía (Rico Pradilla & Chio Cho, 2012).

Algunos países que actualmente están usando aisladores de base en sus estructuras con mayor frecuencia son Japón, Estados Unidos, Chile, entre otros, donde las cifras estadísticas demuestran que se está convirtiendo en una práctica común (Piscal & López-Almansa, 2016).

Sin embargo, en Colombia no se ha prestado la suficiente atención a este tipo de dispositivos. Aunque estas tecnologías se han implementado en algunos puentes y centros médicos, es necesario centrarse en el estudio y análisis del comportamiento de estos dispositivos en estructura de ocupación normal ya que en estas son la más comunes en el país. (Madera Sierra et al., 2019).

En este contexto, la presente investigación estudia la influencia que tiene un sistema de aislamiento sísmico de base elastoméricos de tipo LRB y HDRB, en la respuesta dinámica de una edificación de concreto reforzado con pórticos resistentes a momentos de baja altura ubicada en Bucaramanga, Colombia. Para lo cual se realizará un análisis cronológico no lineal donde la edificación de interés estará sometida a la influencia de cinco eventos sísmicos del estudio de

microzonificación sísmica de Bucaramanga elaborado por el Servicio Geológico Colombiano. Haciendo uso del programa Minitab se proponen diferentes configuraciones de aisladores empleando un diseño de experimentos factorial, con el que evalúan los factores más relevantes dentro de la respuesta sísmica y la distribución óptima a través de un modelo computacional que permite el ensamblaje de los aisladores con la estructura realizado en el software de elementos finitos Midas Gen, en el cual se obtienen valores de desplazamientos, fuerza cortante y derivas de la estructura estudiada para el posterior análisis de resultados.

1. Objetivos

1.1.Objetivo general

Evaluar la respuesta dinámica y la influencia de diferentes configuraciones de aisladores de base en una estructura de concreto reforzado de baja altura

1.2.Objetivos específicos

Definir las posibles configuraciones de aisladores elastoméricos en la estructura a partir de un diseño factorial.

Comparar la respuesta dinámica de la estructura original y con diferentes configuraciones de aisladores de base.

Determinar la distribución óptima de aisladores de base elastoméricos para la estructura de baja altura estudiada.

2. Marco teórico

2.1.Sismos y sus efectos en las estructuras

Los sismos son movimientos generados por el reajuste de las placas de la corteza terrestre que producen deformaciones y tensiones que se acumulan generando una ruptura brusca en la falla. Este proceso libera energía que se transmite a las estructuras a través del suelo y la roca en forma de ondas con diferentes amplitudes, frecuencias y tiempos de duración, afectando la fundación de la edificación. Se genera así una oscilación caracterizada por desplazamientos, velocidades y aceleraciones en diferentes puntos de la estructura que afectan la estabilidad y propiedades mecánicas, teniendo como resultado fuerzas que pueden superar la capacidad de los elementos estructurales, llegando a producir altos niveles de daño, el colapso parcial o total de la estructura. Por esta razón y con el fin de reducir los niveles de energía que induce el sismo a la estructura se hace uso de sistemas de aislamiento sísmico. (Genatios & Lafuente, 2016)

2.2.Sistema pasivo de aislamiento sísmico

Durante los últimos cincuenta años se han desarrollado y perfeccionado los sistemas de protección sísmica, lo que permite que actualmente contemos con dispositivos más sofisticados y seguros apoyado en la gran cantidad de análisis teóricos y experimentales que se realizan. Dentro de estos sistemas de protección sísmica, los sistemas de control pasivo se han convertido en una alternativa eficiente para poder controlar la respuesta dinámica de las estructuras, este concepto esta orientado a reducir la demanda sísmica y aumentar la capacidad de disipación de energía.

Dentro de los sistemas de control pasivo se encuentran los disipadores de energía y aisladores sísmicos de base. (Rico Pradilla & Chio Cho, 2012)

2.3. Aisladores sísmicos de base

Los aisladores sísmicos son dispositivos de disipación de energía pasivos que se ubican entre la estructura y la fundación. Estos, se caracterizan por ser rígidos al someterse a carga axial y ser flexibles al cortante, lo que permite que se genere una discontinuidad en la transmisión de vibraciones a la estructura al momento de un evento sísmico. Al incorporar estos dispositivos, se modifican las propiedades dinámicas de la estructura ya que contribuyen en el aumento del periodo fundamental de vibración, obteniéndose así valores bajos de aceleraciones y por tanto las fuerzas inducidas a los elementos estructurales disminuyen. Si bien, las deformaciones horizontales se incrementan, estas se concentran en mayor porcentaje en los aisladores, lo que permite a la estructura experimentar deformaciones pequeñas en comparación a un sistema estructural convencional, ya que los aisladores poseen mayores niveles de amortiguamiento que aumentan la capacidad de disipación de energía. Como resultado de implementar este sistema se reducen al mínimo las deformaciones de la estructura (que podrían generar fallas por grandes esfuerzos), y los desplazamientos (que podrían generar el colapso de la estructura por inestabilidad y efectos de segundo orden). Además, como los daños se concentran en los aisladores la reparación se hace más sencilla. (Genatios & Lafuente, 2016)

Los diseños de aisladores sísmicos de base se centran en aislar la edificación de movimientos horizontales y no en los movimientos verticales, a causa de que las estructuras están diseñadas para resistir cargas gravitacionales contando con alta rigidez y resistencia a sollicitaciones verticales, además de que las vibraciones verticales inducidas por los sismos son

generalmente más bajas a las vibraciones horizontales.

Cabe resaltar que, si bien son múltiples las ventajas de los sistemas de aislación sísmica, es necesario considerar los efectos secundarios que pueden causar problemas diferentes a los que se presentan en una estructura convencional. Por lo tanto, es necesario verificar los efectos torsionales de la estructura sobre los aisladores, que puede restringir el uso de los aisladores; las variaciones de las vibraciones en los puntos cercanos a la interacción suelo estructura, lo que puede incluir fenómenos asociados a la cercanía de una falla y movimientos de periodos largos; el envejecimiento del aislador; la temperatura y la posible tracción de los aisladores por efectos de volcamiento en la estructura. (Genatios & Lafuente, 2016)

2.4. Tipos de aisladores sísmicos

Existe una variedad de aisladores sísmicos de base, que se diferencian por sus mecanismos de funcionamientos, materiales, entre otros. Sin embargo, es posible agruparlos en dos grandes grupos: aisladores de base elastoméricos y los aisladores de deslizamiento.

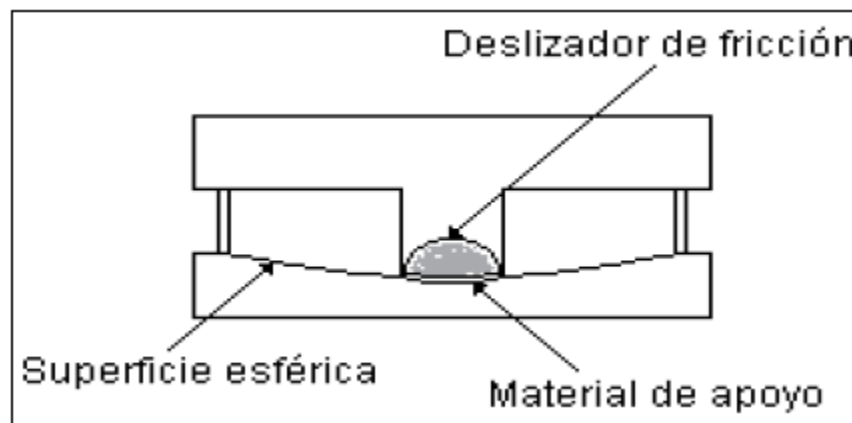
2.4.1. Aisladores de deslizamiento

Se caracterizan por ser un sistema friccional, siendo el aislador de péndulo de fricción el más implementado y conocido con el nombre de FPS (Frictional Pendulum System), el cual está compuesto por un deslizador articulado sobre una superficie de acero inoxidable. La parte del apoyo articulado está en contacto con la superficie esférica, está rodeada por una película de un material compuesto de baja fricción de teflón, ver *Figura 1*. Su funcionamiento se basa en que la fuerza impuesta hace que se produzca desplazamiento en las direcciones horizontal y vertical,

cuando esta fuerza desaparece se genera una fuerza restauradora, generando que el deslizante regrese al centro de la concavidad, el movimiento para cuando la fricción es igual o más grande que el componente de la carga vertical aplicada (Rico Pradilla & Chio Cho, 2012, p.109). Los rangos de amortiguamiento de estos tipos de apoyos se encuentran entre 10% y 40%.

Figura 1

Aislador sísmico de deslizamiento o FPS



Nota. Tomado de *Aisladores De Base Elastoméricos y FPS* (p. 25), por Falconí et al., 2016.

2.4.2. Aislador elastomérico

Este sistema se caracteriza por ser un apoyo compuesto por capas intercaladas de goma de neopreno y placas de acero que se unen por un proceso de vulcanización. Esto permite que el dispositivo cuente con gran flexibilidad horizontal aportada por el espesor de las capas de goma, y con gran rigidez vertical debido a que las placas de acero impiden la expansión lateral de la goma (Falconí et al., 2016). Por lo que las deformaciones laterales inducidas por el sismo se

concentran en los aisladores y limitan los daños en la estructura, y es a su vez capaz de resistir cargas verticales propias de la edificación. La geometría más empleada para el diseño de estos aisladores es cilíndrica, permitiendo repartir los esfuerzos de manera uniforme (Mullo, 2014)

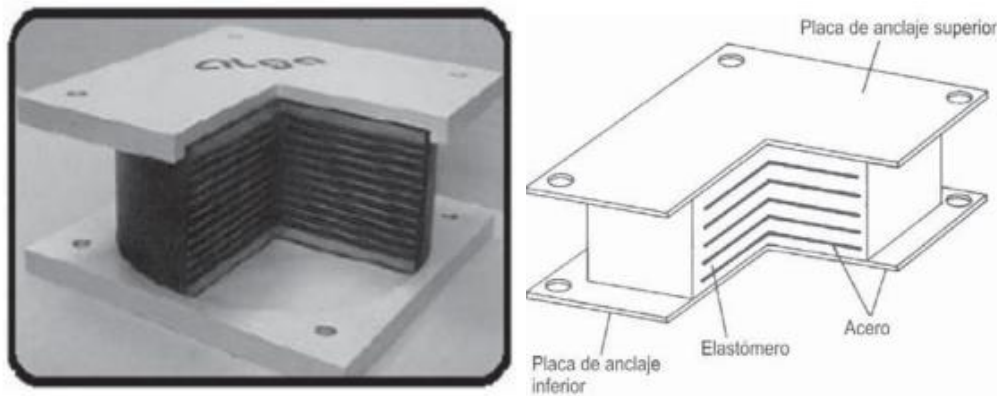
Actualmente este tipo de aisladores es el más implementado en Latinoamérica, encontrándose diferentes catálogos en el mercado. Estos de acuerdo con sus componentes y características mecánicas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

2.4.2.1. Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB).

Esta clase de aislador elastomérico se caracteriza por modificar la goma con aditivos como resinas, carbón extrafino, aceites, polímeros u otros elementos para aumentar su amortiguamiento, el cual varía entre el 10% y el 20%. (Rico Pradilla & Chio Cho, 2012). Están diseñados para rigidizarse para solicitaciones sísmicas pequeñas y mitigar las deformaciones para solicitaciones mayores (Naeim et al., 1999). Adicionalmente debe considerarse que al modificar la goma con aditivos se hacen más sensibles a cambios de temperatura.

Figura 2

Aislador elastomérico de alto amortiguamiento (HDRB)



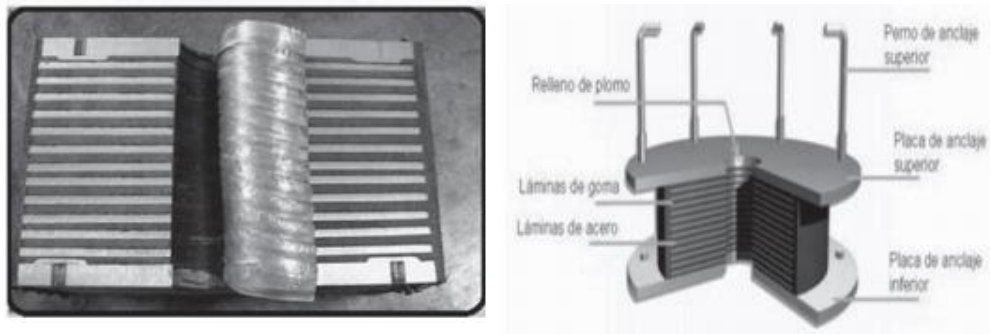
Nota. Tomado de *Uso de Aisladores de Base En Puentes de Concreto* (p. 108), por Rico Pradilla & Chio Cho, 2012.

2.4.2.2. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB).

Este tipo de aislador elastomérico fue desarrollado inicialmente en Nueva Zelanda, se caracteriza por que además de contar con las capas de goma y acero, cuenta con un núcleo de plomo en el centro, aumentando el amortiguamiento a valores entre el 15% y 35%. El plomo aporta mayor capacidad de disipación de energía en forma de calor y mayor rigidez inicial. Su comportamiento depende de la fuerza lateral que se le impone, si es muy pequeña será asumida por el núcleo de plomo, si esta aumenta el núcleo de plomo se deforma y empieza a fluir. (Rico Pradilla & Chio Cho, 2012).

Figura 3

Aislador elastoméricos con núcleo de plomo (LRB).



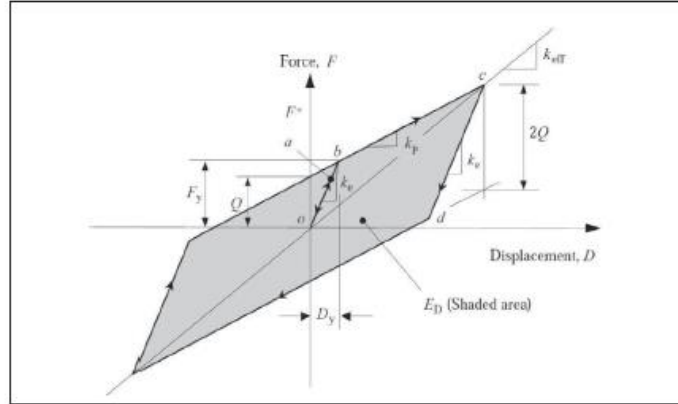
Nota. Tomado de *Uso de Aisladores de Base En Puentes de Concreto* (p. 109), por Rico Pradilla & Chio Cho, 2012.

2.5. Modelo bilineal de un aislador sísmico

En un sistema de aislación sísmica se considera que la estructura se comporta como un cuerpo rígido sostenido sobre los dispositivos de aislación, bajo este concepto se espera que las deformaciones inelásticas se encuentren localizadas en los aisladores y la estructura se comporte linealmente. Es por esto que se han realizado múltiples investigaciones sobre las propiedades mecánicas que han permitido aplicar el modelo bilineal como el más acertado para el diseño de aisladores ya que caracteriza adecuadamente las propiedades mecánicas de los mismos (Rico Pradilla & Chío Cho, 2012). Este modelo hace posible considerar los cambios de rigidez expresados en la relación resistencia- deformación a los que se los materiales de los apoyos cuando se produce variación en los ciclos de carga y descarga, los anterior se representa a través de ciclos de histéresis (Naeim et al., 1999).

Figura 4

Modelo bilineal de un aislador de base



Nota. Tomado de *Uso de Aisladores de Base En Puentes de Concreto* (p. 111), por Rico Pradilla & Chio Cho, 2012.

El modelo bilineal expresa la relación entre la fuerza y el desplazamiento lateral, puede definirse por tres parámetros básicos: Rigidez elástica (K_e), Rigidez Post-fluencia (K_p), Fuerza Característica (Q). La fuerza característica Q , se emplea a menudo para estimar la estabilidad del comportamiento histérico, cuando el aislador experimentar muchos ciclos de carga. Estos tres parámetros reflejan adecuadamente las características mecánicas de los aisladores de una forma simple y suministran el comportamiento no lineal de un aislador. (Rico Pradilla & Chio Cho, 2012, p. 110).

La rigidez efectiva (K_{eff}), es la región de postfluencia puede ser expresada en términos de la rigidez postfluencia (K_p) y la fuerza característica (Q) con el correspondiente desplazamiento lateral (D). De esta manera tenemos:

$$K_{eff} = K_p + Q/D \quad (Ec. 1)$$

El desplazamiento de fluencia (D_y), también se deriva de K_e , K_p , Q :

$$D_y = \frac{Q}{K_e - K_p} \quad (Ec. 2)$$

La fuerza de fluencia (F_y), en el desplazamiento de fluencia (D_y) se determina a través de:

$$F_y = Q + K_p D_y \quad (Ec. 3)$$

El amortiguamiento efectivo (β_{eff}), se define como:

$$\beta_{eff} = \frac{E_D}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (Ec. 4)$$

Donde E_D se considera como el área del ciclo de histéresis y corresponde a la energía disipada por ciclo, limitada por el desplazamiento lateral $-D$ y $+D$ en cada ciclo por lo tanto $E_D = 4Q(D - D_y)$, se obtiene:

$$\beta_{eff} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi K_{eff} D^2} \quad (Ec. 5)$$

En el diseño estructural, tanto la rigidez efectiva como el amortiguamiento efectivo, se determinan a partir del desplazamiento de diseño (DD) y el desplazamiento máximo (DM), los cuales se definen para un periodo de fundamental del sistema.

2.5.1. *Modelo bilineal del aislador de núcleo de plomo (LRB)*

En estos dispositivos a fuerza Característica Q es controlada principalmente por la fuerza cortante del núcleo de plomo, ya que el cortante de fluencia ocurre en el núcleo de plomo a bajos niveles de esfuerzo cortante. Sin embargo, el comportamiento histérico del aislador es bastante estable, incluso cuando este es sometido a muchos ciclos de carga. La siguiente ecuación muestra la relación que existe entre la fuerza característica Q y el producto del esfuerzo de fluencia f_{y1} del plomo por el área de plomo A_1 , este dato es característico para el aislador de núcleo de plomo:

$$Q = A_1 f_{y1} \quad (Ec. 6)$$

La rigidez postfluencia K_p , se define a continuación:

$$K_p = \frac{A_b G f_L}{t} \quad (Ec. 7)$$

Donde A_b es el área de caucho, t es el grosor total del caucho, $f_L = 1,5$ y G es el modulo de cortante tangente del caucho (se determina a través de pruebas dinámicas de cortante). La rigidez elástica K_e no es fácil de calcular, pero a través de la siguiente ecuación empírica se puede obtener un valor aproximado, la rigidez elástica se define como múltiplo de la rigidez de postfluencia:

$$6.5K_p \leq K_e \leq 10K_p \quad (Ec. 8)$$

En base a esta condición se puede conocer el desplazamiento de fluencia D_y sustituyendo

los valores encontrados y asumiendo que $K_e = KK_p$. Se obtiene:

$$D_y = \frac{Q}{K_e - K_p} \approx \frac{Q}{KK_p - K_p} = \frac{Q}{(K - 1)K_p} \quad (Ec. 9)$$

Sustituyendo los datos encontrados, se puede encontrar el amortiguamiento efectivo para un aislador de plomo:

$$\beta_{eff} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi K_{eff} D^2} = \frac{2Q[(k - 1)K_p D - Q]}{\pi(k - 1)K_p(K_p D + Q)D} \quad (Ec. 10)$$

Usualmente se asume que la rigidez vertical del aislador es 500 veces la rigidez efectiva horizontal.

2.5.2. *Modelo bilineal del aislador de alto amortiguamiento (HDRB)*

Para estos tipos de dispositivos se emplean parámetros que son normalmente derivados del módulo de cortante G y el amortiguamiento efectivo β_{eff} . El módulo de cortante G es determinado con precisión en una prueba dinámica de cortante y el amortiguamiento efectivo, determinado de las pruebas a los prototipos de aisladores, puede variar entre 10% y 20% del amortiguamiento crítico. La ecuación para calcular la rigidez postfluencia K_p para este tipo de aisladores es:

$$K_p = \frac{A_b G}{t} \quad (Ec. 11)$$

Donde, A_b es el área de caucho, Q es el grosor total del caucho, G es el modulo de cortante tangente del caucho. La fuerza característica Q puede ser evaluada por la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\pi\beta_{eff}K_pD_D^2}{(2 - \pi\beta_{eff})D_o - 2D_y} \quad (Ec. 12)$$

Una estimación aproximada de D_y puede ser expresada en términos del espesor total de la goma t , $D_y = \lambda t$, donde el coeficiente λ varía entre el 0,05 y 0,1 según el FEMA.

Una vez son conocidas la rigidez de postfluencia K_p , el desplazamiento de fluencia D_y , y la fuerza característica Q , la fuerza de fluencia es fácilmente determinada por la siguiente ecuación:

$$F_y = Q + K_p + D_y \quad (Ec. 13)$$

Luego la rigidez elástica de los aisladores se convierte en la siguiente ecuación:

$$K_e = \frac{F_y}{D_y} = K_p + \frac{Q}{D_y} = K_p \left\{ 1 + \frac{\pi\beta_{eff}K_pD_D^2}{\lambda t[(2 - \pi\beta_{eff})D_D - 2\lambda t]} \right\} \quad (Ec. 14)$$

Finalmente, si se sustituye $D_y = \lambda t$, la rigidez efectiva, hasta lograrse el desplazamiento de diseño estará dada por:

$$K_{eff} = \frac{2Q(D_D - \lambda t)}{\pi\beta_{eff}D_D^2} \quad (Ec. 15)$$

Frecuentemente, se asume que la rigidez vertical del aislador es 500 veces la rigidez efectiva horizontal.

2.6.Antecedentes

El concepto de aislación sísmica lleva casi un siglo desde que se comenzó a investigar y desarrollar de manera científica y tecnológica por ingenieros estructurales, siendo de mayor relevancia estudiada en los países que son más susceptibles geológicamente a la ocurrencia de eventos sísmicos, sin embargo, el ser humano a implementado este concepto desde la antigüedad, se ha encontrado que las primeras técnicas de aislación sísmica consistían (Genatios & Lafuente, 2016):

- en el uso de varias capas de piedra en la base de la estructura, las cuales eran cortadas y colocadas sin morteros.
- El uso de piezas de apoyo de madera
- La colocación de varias capas de arena, piedra, y algunas veces otros materiales, entre el suelo y las paredes.

A principios del siglo XX inicia el interés por estudiar sistemas de disipación de energía que permitieran brindar mayor seguridad y operatividad a las edificaciones durante y después de ocurrido un terremoto. Sin embargo, es hasta las décadas de los setenta y ochenta que se logra avanzar en el desarrollo e implementación de esta tecnología en países como Nueva Zelandia, Estados Unidos y Japón.

2.6.1. Estados Unidos.

En los estados unidos el primer edificio en utilizar un sistema de aislamiento sísmico en la base fue el *Foothill Communities Law and Justice Center* (FCLJC), construido en el año de 1985 y ubicado al sur del estado de California en la ciudad en Rancho Cucamonga, a 12 millas de la falla de San Andrés. El sistema de protección sísmica disponía de un subsótano donde se localizaron de 98 rodamientos de caucho natural de varias capas reforzadas con capas de acero, es decir es la primera edificación en el mundo a la que se instalan aisladores elastoméricos. El objetivo de estos apoyos era aumentar dos veces el periodo fundamental de un edificio de base fija.

En la ciudad de Los Ángeles, en el año de 1989, el edificio *County Fire Command and Control Facility*, fue construido con un sistema de aislamiento similar al del *Foothill Center*, con la diferencia que los apoyos usados eran de alto amortiguamiento. Es una estructura aporticada en acero y con un total de 32 columnas, cada una cuenta con un aislador. En esta misma ciudad se encuentra el Hospital Universitario de la Universidad de *Southern California* que se caracteriza por tener 68 aisladores de caucho y plomo en su perímetro y 81 aisladores de caucho en las demás columnas (Genatios & Lafuente, 2016).

Figura 5

Edificio County Fire Command and Control Facility



Nota. Tomado de *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice* (p. 8), por Naeim et al., 1999.

En este país uno de los pioneros en el estudio, implementación y desarrollo de sistemas de aislación sísmica basal en este país es la Universidad de Berkeley, en la cual en el año de 1976 se llevó a cabo la investigación sobre los cojinetes de caucho como dispositivos de aislamiento de base, y que hoy en día son conocidos como aisladores elastoméricos. Dicha investigación se llevó a cabo por el Centro de Investigación de Ingeniería sísmica (CEIE) y el Centro de Investigación en Ingeniería del Pacífico de la Universidad de California en Berkeley (Lagos, 2019)

2.6.2. Japón

El diseño sismo resistente y diferentes mecanismos para la protección sísmica de estructuras incluyendo la aislación sísmica de base han sido de alta prioridad en Japón debido a la gran actividad sísmica con la que cuenta este territorio. Debido a esto los ingenieros estructurales japoneses generalmente diseñan edificios con mayor resistencia sísmica en comparación con los diseñados por ingenieros de estados unidos o Europa sin importar el aumento de costos en los diseños.

Teniendo en cuenta lo anterior el número de edificaciones aisladas antes de 1991 era de alrededor 10 edificaciones por año, sin embargo, esta tasa habría disminuido a 4 o 5 por año debido a la caída económica en el país. Para enero de 1995 fecha en la ocurrencia del sismo Kobe el número de estructuras aisladas era de 80, luego de esto el número de estructuras con aisladores de base creció notablemente habiendo actualmente más de 600 edificaciones con aisladores.

Actualmente el edificio más grande aislado en su base en el mundo es el West Japan Postal Computer Center es cual está localizado en Sanda, Kobe Prefecture. Está conformado por 6 pisos y tiene un área de alrededor de 47000 metros cuadrados, la estructura cuenta con 120 aisladores elastoméricos. Cuenta con un periodo de 3.9 segundos y se encuentra localizado aproximadamente a 30 km del epicentro del terremoto de Kobe en 1995. El desplazamiento estimado de los aisladores utilizados es de alrededor de 12 cm (Naeim et al., 1999)

Figura 6

Edificio West Japan postal Center, Sanda, Japan



Nota. Nota. Tomado de Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice (p.19), por Naeim et al., 1999.

2.6.3. Europa y Oceanía

En Europa la aislación de base se ha desarrollado principalmente en Italia liderada por el grupo de trabajo nacional de aislación sísmica (Gruppo de Lavoro Isolamento Sísmico GLIS). Muchas edificaciones han sido construidas en Italia utilizando aislación de base, dentro de estas podemos encontrar el Administration Center of the National Telephone Company (SIP), un complejo de 5-7 pisos en la ciudad de Ancona.

El primer edificio aislado en su base en nueva Zelanda fue el edificio William Clayton en Wellington, fue completado en 1981 y fue el primer edificio en el mundo en ser aislado utilizando aisladores LRB. Además de esto el museo nacional de Nueva Zelanda en Wellington fue construido con 142 aisladores LRB y 36 almohadillas de teflón bajo los muros de corte. Un

edificio reconocido por el uso de aisladores en su base es la casa parlamentaria de Nueva Zelanda la cual fue construida en 1922 y su estructura está basada en muros de carga en mampostería, en la construcción de este y otro edificio se utilizaron más de 514 aisladores LRB (Naeim et al., 1999).

Figura 7

The SIP Complex, Ancona, Italy.



Nota. Tomado de Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice (p. 20), por Naeim et al., 1999.

2.6.4. Colombia

En Colombia las principales estructuras donde se han implementado sistemas de protección sísmica son infraestructuras viales como puentes, viaductos e intersecciones (Betancur et al., 2014). Con el objetivo de obtener una estructura segura, funcional y económicamente

competitiva, demostrando la eficacia de utilizar esta técnica e incentivando la mayor aplicación de este método de protección sísmica en los proyectos de infraestructura en Colombia. A continuación, algunos ejemplos según Betancur (2014):

- Viaducto Portachuelo, Zipaquirá: se encuentra a 30km al norte de la ciudad de Bogotá (amenaza sísmica intermedia). Inaugurado en 2009, es una de las primeras aplicaciones de aislación sísmica en Colombia. Consta de 2 puentes paralelos de 363 m de longitud que describen una curva espiral que termina en un tramo recto. La aislación basal cuenta con aisladores LRDB (Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento) cuadrados que flexibilizan la estructura, en total se cuentan con 4 apoyos rectangulares, 14 apoyos circulares. El uso de estos dispositivos eliminó en gran proporción la incidencia de los modos torsionales y elevó el periodo fundamental de vibración casi 4 veces.

Figura 8

Viaducto Portachuelo Zipaquirá.



Nota. Tomado de *Experiencias Sobre Aislamiento Sísmico En Colombia* (p. 4), por Betancur, 2014.

- Intersección vial Redoma San Mateo, Cúcuta: ubicada en el centro de la ciudad de Cúcuta, construido en el año 2007. Cuenta con apoyos de neopreno, aumentando la flexibilidad lateral de la estructura. En total se usaron 12 apoyos, que permiten obtener periodos fundamentales en cada sentido de 2,5 segundos que corresponden a una aceleración espectral de 0,22g.

Figura 9

Intersección Vial Redoma San Mateo, Cúcuta.

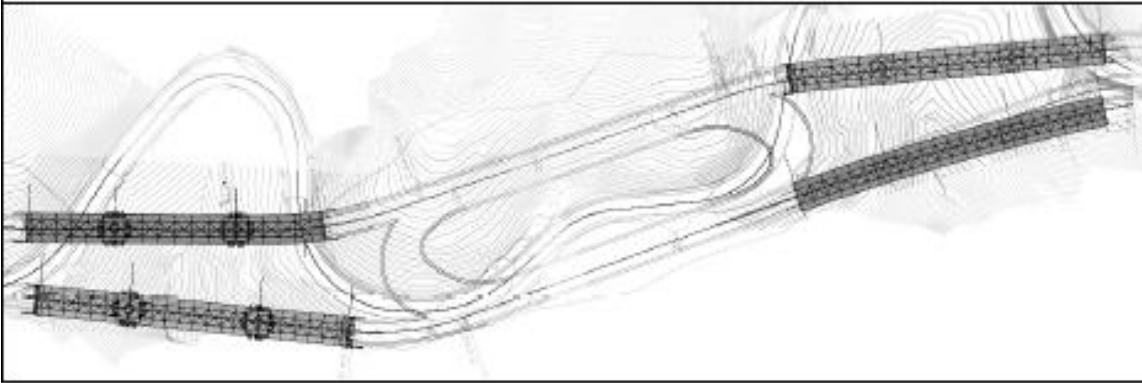


Nota. Tomado de *Experiencias Sobre Aislamiento Sísmico En Colombia* (p. 5), por Betancur, 2014.

- Puentes del PR12 y PR13, vía Bucaramanga-Cúcuta: se usaron aisladores LDRB (aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento) que permitieron reducir la demanda sísmica en un 78%, esto se debe el periodo fundamental paso de ser de 0.83 segundos a ser de 1.5 segundos con lo cual se disminuye la aceleración espectral, que para la estructura aislada es de 0.18g.

Figura 10

Puentes del PR12 Y PR13, vía Bucaramanga-Cúcuta.



Nota. Tomado de *Experiencias Sobre Aislamiento Sísmico En Colombia* (p. 6), por Betancur, 2014.

- Puente intersección El Rosal-Cundinamarca: debido a que la demanda sísmica es moderada se seleccionaron aisladores sísmicos HDRB (aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento), en total se instalaron 6 apoyos de este tipo, uno sobre cada columna. El sistema de aislación sísmica incremento el periodo fundamental de 0.51 segundos a 1.42 segundos en sentido transversal, y de 0.2 segundos a 1.35 segundos en sentido longitudinal. Después del análisis estructural y calibración del modelo se obtuvo que los aisladores sufren un desplazamiento de 70mm y le proporcionan a la estructura 205 de amortiguación, con lo que se logró una reducción de la aceleración espectral de diseño de 0.50g a 0.15g, es decir una reducción del 70% de la fuerza sísmica.

Figura 11

Intersección El Rosal-Cundinamarca



Nota. Tomado de *Experiencias Sobre Aislamiento Sísmico En Colombia* (p. 8), por Betancur, 2014.

- *Intersección de la Cra. 44 Cali-Valle del Cauca:* en esta estructura el aislamiento sísmico está proporcionado por apoyos elastoméricos con núcleo de plomo por primera vez utilizados en Colombia en puentes. En total se utilizaron 10 aisladores en pilas y 8 aisladores en estribos. Gracias a la implementación de estos apoyos se logro un amortiguamiento del 20% y un periodo fundamental de 1.9 segundos, que corresponde a una aceleración espectral de 0.35g, indicando una reducción de la fuerza sísmica del 57% en sentido transversal y del 65% en sentido longitudinal.

Figura 12

Intersección de la Cra. 44, Cali-Valle del Cauca



Nota. Tomado de *Experiencias Sobre Aislamiento Sísmico En Colombia* (p. 9), por Betancur, 2014.

Adicionalmente, se han implementado aisladores elastoméricos en edificaciones de grupos de uso IV, específicamente en dos centros de salud de la ciudad de Cali:

- *Clínica Comfandi*: Entregada en el 2009, tiene 15 metros de altura y cuenta con 83 aisladores elastoméricos LRB con diámetro de 75cm y altura de 45cm, láminas de goma con espesor de 8mm y 3mm de espesor para las láminas de acero. Se realizó un proceso iterativo para ajustar los aisladores a las condiciones de la estructura. Con la implementación de los aisladores se amplió el periodo fundamental de 1.2 segundos a 3.3 segundos, con lo que se flexibiliza la estructura y disminuye la aceleración espectral. (Oviedo A, 2018).

Figura 13

Clínica Comfandi



Nota. Tomado de Aislamiento Sísmico de Edificaciones y Puentes (conferencia), por Oviedo, 2018

- *Clínica Imbanaco*: Conformado por 120 aisladores, los cuales se distribuyeron de manera que los centros de masa y rigidez coincidan en el mismo punto para evitar efectos torsionales. El periodo fundamental aumento de 1.5 segundos a 3.5 segundos. Estos dispositivos se instalaron en las columnas de la estructura a partir del sótano 4 (nivel 0.0), aislando a los 9 pisos de la torre. Es la estructura con aislamiento sísmico con mayor área y mayor número de pisos en el país. (Oviedo A, 2015)

Figura 14

Clínica Imbanaco.



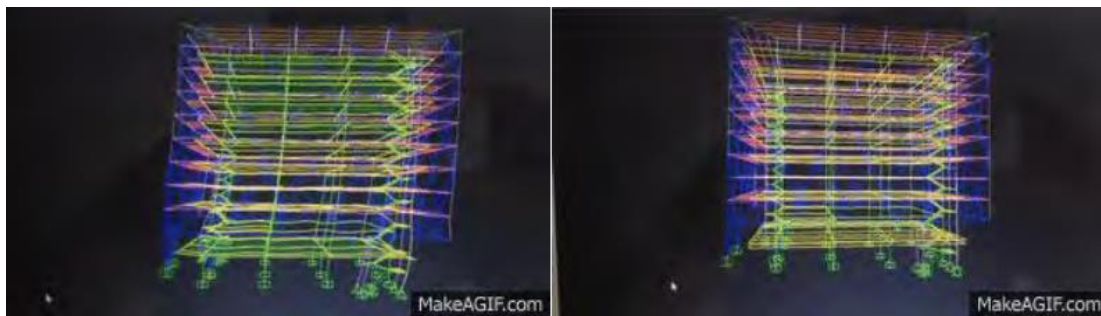
Nota. Tomado de Protección Sísmica y Reforzamiento de Edificaciones a través de Sistemas no Convencionales (Simposio), por Oviedo, 2015.

También se implementó este tipo de dispositivos en una educación educativa de Medellín:

- Laboratorios de ciencias de la Universidad EAFIT: estructura de concreto y fachada en diagrid metálico, cuenta con 12 aisladores elastoméricos ubicados en las columnas debajo de la primera losa. (Oviedo A, 2018).

Figura 15

Laboratorios de ciencia de la universidad EAFIT



a) Estructura sin aislamiento

b) Estructura con aislamiento

Nota. Tomado de *Aislamiento Sísmico de Edificaciones y Puentes* (conferencia), por Oviedo, 2018

Algunos trabajos de investigación desarrollados en la línea de sistemas de protección sísmica por universidades colombianas son los siguientes:

- En la universidad Javeriana: se presentó una investigación sobre aisladores de caucho reforzados con diferentes fibras (nailon y carbono), realizando pruebas experimentales con cinco prototipos, que mostraron un comportamiento satisfactorio. Lo que representa una alternativa viable para implementarse en Colombia en edificaciones residenciales de baja altura debido a que minimizan el costo al ser reforzado. (Madera Sierra et al., 2019)

Figura 16

Prototipo aislador elastomérico reforzado con fibras naturales



Nota. Tomado de *Development and Experimental Behavior of HDR Seismic Isolators for Low-Rise Residential Buildings* (p. 900), por Madera Sierra et al., 2019

- Universidad EAFIT: desarrolló un aislador de resorte para proteger equipos de subestaciones eléctricas. (Garzón, 2017)

Figura 17

Aislador de resorte.



Nota. Tomado de *Inventan Aislador Sísmico* (p. 125), por Guzmán, 2017, *Revista Universidad EAFIT*.

2.7.Fuerza horizontal equivalente (FHE)

Es un método aproximado en donde se representan las fuerzas sísmicas a través de cargas laterales estáticas, determinando la fuerza lateral totalizada, cortante de basal, período fundamental de la edificación, amortiguamiento efectivo y de esta forma poder hacer una distribución en la altura de las fuerzas sísmicas, teniendo en cuenta efectos como los cortantes de piso, los momentos de vuelco y los efectos de torsión. Obteniendo como resultado los desplazamientos por piso de la estructura y poder analizar los efectos de las fuerzas sísmicas en la estructura.

En Colombia para aplicar este tipo de análisis dinámico se debe considerar las especificaciones del apartado A.4 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10).

2.7.1. *Periodo Fundamental de Vibración*

La NSR-10 determina que el periodo fundamental de vibración de la estructura se puede determinar a partir de las propiedades del sistema de resistencia sísmica de acuerdo a los principios de dinámica estructural, a través de un modelo matemático linealmente elástico (métodos computacionales ETABS), o por medio de la ecuación:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i \delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (f_i \delta_i^2)}} \quad (Ec. 16)$$

Los valores de f_i representan las fuerzas horizontales distribuidas, δ_i son las deflexiones horizontales.

La NSR-10 prescribe una serie de condiciones que deben cumplirse respecto al periodo fundamental a usarse para el análisis.

- a) El valor de T determinado a partir del modelo matemático linealmente inelástico no debe exceder $C_u T_a$, donde C_u es el coeficiente para el cálculo del periodo máximo permisible de la estructura, T_a periodo de vibración fundamental aproximado.

$$C_u = 1.75 - 1.2 A_v F_v \quad (Ec. 17)$$

C_u no puede ser menor de 1.2

- b) Alternativamente el valor de T puede ser igual al periodo fundamental aproximado, T_a que se obtenga mediante:

$$T_a = C_t h^\alpha \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde C_t y α están definidos en la tabla A.4.2-1 de la NSR-10, donde se muestran los valores de los parámetros C_t y α según el caso presentado.

2.7.2. Fuerzas sísmicas horizontales equivalentes

El cortante sísmico basal V_s definido por la NSR-10 está dado en función de la aceleración espectral para el periodo fundamental de vibración y la masa total de la edificación:

$$V_s = S_\alpha g M \quad (\text{Ec. 19})$$

La fuerza sísmica horizontal F_x , en cualquier nivel x , debe determinarse según:

$$F_x = C_{vx} V_s \quad (\text{Ec. 20})$$

$$C_{vx} = \frac{m_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n (m_i h_i^k)}$$

Donde k es un exponente relacionado con el periodo fundamental de vibración T :

- a) Para T menor o igual a 0.5, $k=1.0$.
- b) Para T entre 0.5 y 2.5, $k=0.75+0.5T$
- c) Para T mayor que 2.5, $k=2.0$

2.8. Análisis dinámico cronológico no lineal

El análisis dinámico cronológico no lineal (Non Linear Response History Analysis, NLRHA), permite realizar el modelamiento dinámico del comportamiento de la estructura ante sismos, con el cual se obtiene la respuesta de la edificación en la edificación, proporcionando datos de desplazamientos de piso, derivas, fuerzas cortantes, entre otras. Este tipo de análisis se caracteriza por la variación en el tiempo de las fuerzas internas del sistema, por lo que la solución para un análisis dinámico es más compleja, ya que se requiere la descripción del sistema en todos los instantes del periodo de estudio, por lo cual es necesario disponer de una herramienta computacional (Mora et al., 2006).

Adicionalmente, el análisis debe estar basado en una apropiada representación del movimiento del terreno y en principios aceptados por la dinámica estructural, la cual indica que para múltiples grados de libertad la ecuación dinámica es (Mora et al., 2006, p. 60):

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -M\tau\ddot{U}_R(t) \quad (Ec. 21)$$

Donde:

M = matriz de masa

C = matriz de amortiguamiento

K = matriz de rigidez

U = Vector de desplazamiento

$\dot{U}$ = Vector velocidad

$\ddot{U}$ = Vector de aceleración

$\ddot{U}_R(t)$ = historia en el tiempo en la base del edificio

τ = Vector de influencia (para cada elemento es igual a 1)

En este modelo matemático el vector desplazamiento U está relacionado con los grados de libertad, es decir, con las posibilidades de movimiento de las masas concentradas en cada piso de la estructura y se idealiza que estas no se pueden desplazar verticalmente, ni rotacional, solamente se pueden desplazar horizontalmente, con lo que es posible obtener un sistema con dos grados de libertad por cada piso, que es donde se concentra la masa. La complejidad de la solución del sistema de ecuaciones radica en que, aunque la matriz de masa es constante en el tiempo, las matrices de amortiguamiento y rigidez presentan una variación una vez que se supere el límite del comportamiento elástico, haciendo necesario el uso de software y/o herramientas computacionales para dar solución al sistema (Mora et al., 2006).

En Colombia para aplicar este tipo de análisis dinámico se debe de considerar las especificaciones del apartado A.5.5 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), las cuales son:

- Respuesta máxima: Se debe determinar las repuestas máximas de las deflexiones, derivas, fuerzas de los pisos, cortantes de piso y en la base para el conjunto de registro de la familia de acelerogramas. Según el apartado A.2.7 estos registros deben ser como mínimo tres y es importante resaltar que se deben seleccionara aquellos que tengan una fuente de amenaza similar a la región donde se ubica la edificación estudiada. Cabe mencionar que en el apartado A.2.7 también se menciona que los acelerogramas a utilizar deben ser escalados bajo ciertos criterios en consistencia al espectro de diseño de la estructura estudiada.

- Ajuste de los resultados: el valor máximo cortante dinámico total en la base, V_{tj} , obtenido para cualquiera de las direcciones horizontales, j , no puede ser menor que el cortante sísmico en la base, V_s , calculado por el método de fuerza horizontal equivalente. Cuando no se cumpla lo anterior, todos los parámetros de a respuesta dinámica deben ser ajustarse al multiplicarlos por el siguiente factor de modificación: $\frac{V_s}{V_{tj}}$.

2.9. Estructura de baja altura

Según la Asociación Nacional de Protección contra incendios de los EE. UU define un edificio de gran altura aquellos de más de 22 metros o 7 pisos, por lo que es posible afirmar que aquellos por debajo de dichos valores es considerado un edificio de baja altura. Sin embargo, como no existe un concepto formal, por lo general se dice que los edificios de baja altura son aquellos que tiene entre 3 y 4 pisos. (Diesel, 2020).

3. Modelamiento de la estructura

La estructura de estudio para este proyecto está ubicada en la ciudad de Bucaramanga del departamento de Santander, corresponde a una edificación con sistema estructural tipo pórtico resistente a momentos, perteneciente al grupo de ocupación I, es decir de ocupación normal. Cuenta con una altura total 18,38m distribuida en 5 pisos, de la siguiente manera:

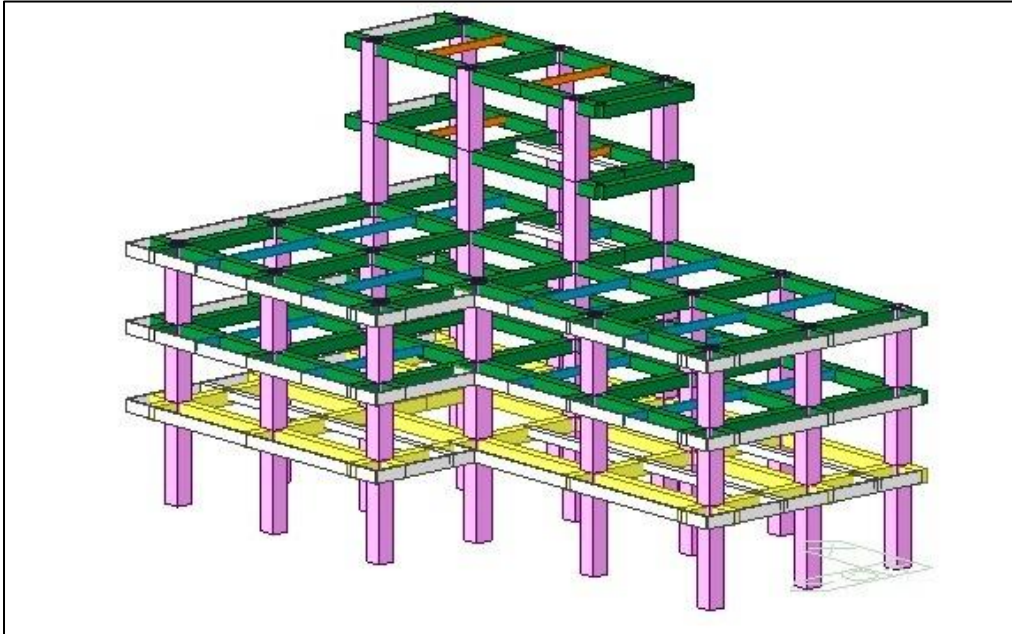
Tabla 1*Entrepisos edificación*

Nivel	Altura entre piso (m)	Área de entrepiso (m²)
<i>Z0</i>	0	328,100
<i>Z1</i>	4,53	408,905
<i>Z2</i>	3,405	408,905
<i>Z3</i>	3,405	408,905
<i>Z4</i>	3,52	63,500
<i>Z5</i>	3,52	80,500
<i>Total</i>	18,38	1370,715

La estructura cuenta con 4 losas de entrepiso: la primera, corresponde a una losa maciza de 23cm; la segunda y tercera, corresponde a losas aligeradas con espesor de 38cm; la cuarta y quinta (funciona como cubierta), corresponde a losas aligeradas con espesor de 32cm.

Figura 18

Modelo Estructural en Midas Gen

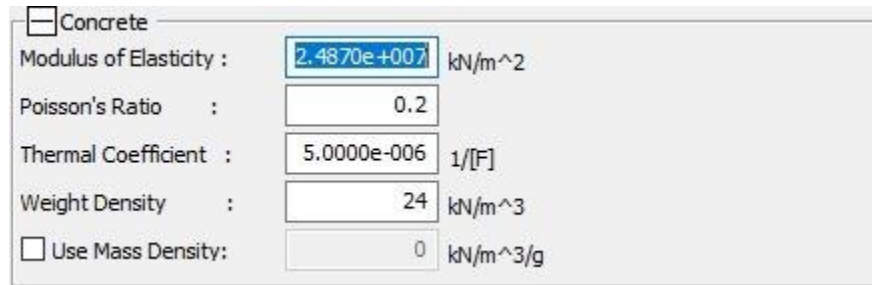


3.1. Materiales

La estructura se modeló en el software de Midas Gen, donde se definieron las propiedades del material, que para este caso es un concreto con una resistencia a la compresión, f'_c , de 28MPa (4000 psi), y un módulo de elasticidad, $E = 4700\sqrt{f'_c}$ en MPa.

Figura 19

Propiedades Material en Midas Gen



Concrete

Modulus of Elasticity : 2.4870e+007 kN/m²

Poisson's Ratio : 0.2

Thermal Coefficient : 5.0000e-006 1/[F]

Weight Density : 24 kN/m³

☐ Use Mass Density: 0 kN/m³/g

3.2.Elementos estructurales

Considerando que la edificación tiene un sistema estructural tipo pórtico, se utilizan columnas y vigas como elementos estructurales, los cuales soportan y transmiten las cargas al suelo, en consecuencia, la siguiente tabla se muestra las características de dichos elementos que constituyen la estructura estudiada:

Tabla 2

Elementos estructurales de la edificación

Nombre	Material	Base (m)	Altura (m)
Viga 0.55x0.6	Concreto 28MPa	0.55	0.6
Viga Aux 0.4x0.4	Concreto 28MPa	0.40	0.40
Viga 0.55x0.55	Concreto 28MPa	0.55	0.55

Columna 0.8x0.8	Concreto 28MPa	0.80	0.80
-----------------	----------------	------	------

3.3.Evaluación de cargas

Para el modelamiento de la edificación el programa Midas Gen permite considerar el peso propio de todos los elementos estructurales que la conforman, diferente es para el análisis estático de cargas donde se debe definir dos tipos de carga: la carga muerta, que representa todos los elementos no estructurales como lo son los acabados; y la carga viva, la cual está relacionada al tipo de ocupación y uso de la edificación. Estas cargas deben asignarse de manera manual a cada uno de los entrepisos a partir de un previo análisis de carga que se especifica en el Título B de la NSR-10.

Tabla 3

Carga Muerta sobre la edificación

Entrepiso	Carga muerta (KN/m ²)
Z1	2,3
Z2	2
Z3	2
Z4	2
Z5	0,03

Tabla 4*Carga Viva sobre la edificación*

Entrepiso	Ocupación	Tipo	Carga viva (KN/m²)
Z1	Fábrica	Industria pesada	10
Z2	Almacenamiento	Liviano	6
Z3	Almacenamiento	Liviano	6
Z4	Oficinas	Corredores y oficinas	2
		Escaleras	3
		No se le asigno, se	
Z5	Cubierta	consideró que no se tendrá acceso a dicho lugar	0

Cabe mencionar que las cargas correspondientes a las escaleras se asignaron a las vigas sobre las que están se apoyan como cargas distribuidas.

3.4. Irregularidades de la edificación

Es necesario establecer la configuración estructural de la edificación, es decir, las dimensiones y la localización de los elementos estructurales que pueden llegar a afectar el comportamiento dinámico de la edificación ante solicitaciones sísmicas, en este sentido es necesario establecer si se presentan irregularidades en planta y/o altura.

3.4.1. Irregularidades en planta

A partir de la Tabla A.3-6 de la NSR-10 se establecieron los tipos de irregularidades en planta presente en la edificación de estudio, las cuales son:

- Irregularidad torsional extrema (1bP): Al presentarse este tipo de irregularidad se indica que el valor del coeficiente $\Phi_p=0,8$
- Irregularidad de retrocesos en las esquinas (2P): Al presentarse este tipo de irregularidad se indica que el valor del coeficiente $\Phi_p=0,9$

3.4.2. Irregularidades en altura

A partir de la Tabla A.3-7 de la NSR-10 se establecieron los tipos de irregularidades en planta presente en la edificación de estudio, las cuales son:

- Irregularidad distribución de masa (2A): Al presentarse este tipo de irregularidad se indica que el valor del coeficiente $\Phi_a=0,9$
- Irregularidad geométrica (3A): Al presentarse este tipo de irregularidad se indica que el valor del coeficiente $\Phi_a=0,9$

3.5.Coeficiente de capacidad de disipación de energía R

Debido a que la estructura presenta irregularidades en necesario reducir el coeficiente de capacidad de disipación de energía R, tal y como se indica en el apartado A.3.3.3 de la NSR-10, con la siguiente formula

$$R = \Phi_a \Phi_p \Phi_r R_0$$

Donde los valores de cada uno de los parámetros se definen a continuación:

- Donde R_0 , es el factor de disipación de energía obtenido en la tabla A.3-3 de la NSR-10, y ya que se cuenta con un pórtico DES en concreto resistente a momentos el valor $R_0=7$.
- $\Phi_p = 0,8$, se toma el menor valor de las irregularidades en altura presentes.
- $\Phi_a = 0,9$, se toma el menor valor de las irregularidades en planta presentes.
- $\Phi_r = 0,75$

Con los variables determinadas se obtiene el valor reducido del coeficiente de disipación de energía es de:

$$R = 0,8 * 0,9 * 0,75 * 7$$

$$R = 3,78$$

4. Espectro de diseño

Es necesario establecer el espectro de aceleraciones, S_a , utilizado para el diseño de la edificación ubicada en la ciudad de Bucaramanga, que se expresa como fracción de la gravedad, para un coeficiente de 5% del amortiguamiento crítico.

4.1. Parámetros sísmicos de diseño

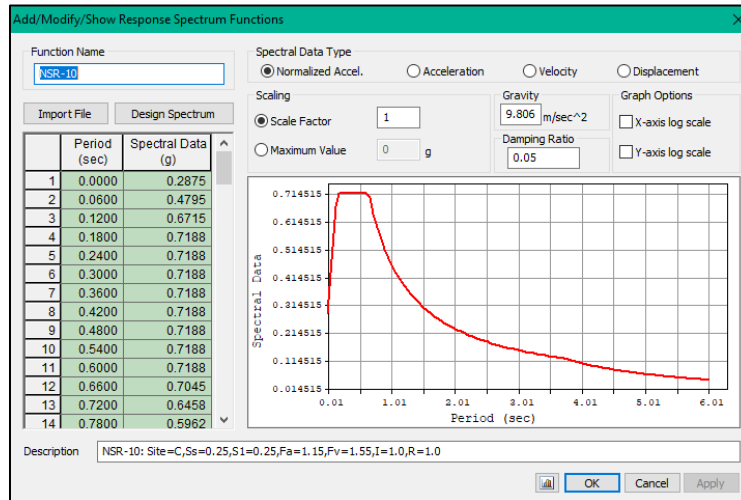
Para la elaboración del espectro de diseño es necesario establecer los parámetros sísmicos que caracterizan a la edificación estudiada, lo cuales son:

- Zona de amenaza sísmica: según la clasificación indicada en la tabla A.2.3-2 de la NSR-10, toda edificación localizada en Bucaramanga se encuentra en zona de amenaza sísmica alta.
- Coeficientes de aceleración pico efectiva, A_a , y velocidad pico efectiva, A_v : el valor de estos coeficientes está dados por la tabla A.2.3-2 de la NSR-10, que indica que para la ciudad de Bucaramanga $A_a = 0.25$ y $A_v = 0.25$
- Tipo de perfil del suelo: A partir de los estudios geotécnicos y la información suministrada en los planos la edificación se encuentra ubicada sobre un perfil de suelo tipo C.
- Coeficientes de amplificación de la aceleración en periodos cortos e intermedios, F_a y F_v : Estos coeficientes están en función del perfil del suelo, y se obtienen a partir de las gráficas A.2.4-1 y A.2.4-2 de la NSR-10, por lo que se determina que $F_a = 1.15$ y $F_v = 1.55$.
- Coeficiente de importancia: este coeficiente esta en función del grupo de uso de la edificación, que para el presente caso de estudio correspondo al grupo I (ocupación normal, por lo que el coeficiente de Importancia (I) es igual a 1, como se indica en la tabla A.2.5-1 de la NSR-10.

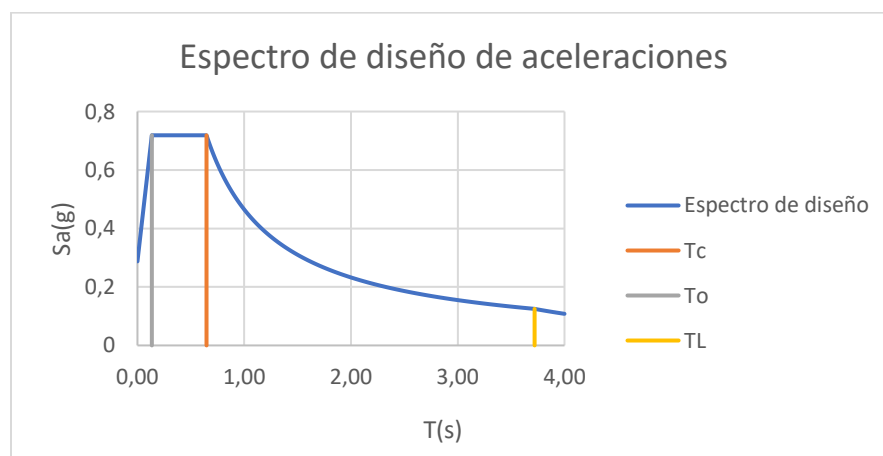
Tabla 5*Parámetros sísmicos de la edificación*

Espectro Bucaramanga	
Municipio	Bucaramanga
Zona Amenaza	Alta
Sísmica	
Av	0,25
Aa	0,25
Suelo	C
Fv	1,55
Fa	1,15
Grupo De Uso	
I	1

Una vez se cuenta con todos sísmicos establecidos, se ingresan dichos datos al software de Midas Gen, tal y como se observa en la siguiente figura:

Figura 20*Espectro de diseño en Midas Gen*

Finalmente se grafica el espectro de aceleraciones de la edificación de interés, teniendo en cuenta lo establecido en el apartado A.2.6.1 de la NSR-10:

Figura 21*Espectro de diseño de la edificación*

5. Análisis estático de la estructura

Con el objetivo de verificar que la estructura de estudio cumple con los requisitos normativos de diseño sismo resistente convencional ante las solicitaciones de carga, se realiza un análisis estático a través del método de fuerza horizontal equivalente (FHE) descrito en el capítulo A.4 de Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Este método es aplicable a esta estructura ya que cumple con el literal d del apartado A.3.4.2.1 de la NSR-10, ya que la edificación es irregular y no tienen más de 6 niveles, ni más de 18m de altura medidos desde la base.

5.1.Consideraciones del análisis estructural

Al realizar el modelamiento de la estructura en el software Midas Gen fue necesario establecer los efectos de los movimientos sísmicos que actúan sobre los elementos estructurales de la misma, tal y como lo indica el apartado A.3.6 de la NSR-10, dichas consideraciones para el análisis se mencionan a continuación:

- Combinación de los efectos de carga: deben de emplearse ciertos coeficientes en la combinación de cargas de gravedad y fuerzas sísmicas como se establece en el Título B de la NSR-10, dichas combinaciones se utilizan para el estado límite de servicio y para cargas mayoradas para evaluar la resistencia.
- Dirección de aplicación de las fuerzas sísmicas: deben considerarse los efectos ortogonales de las fuerzas sísmicas en edificaciones ubicadas en zonas de amenaza

sísmica alta e intermedia. Dichos efectos deben tenerse en cuenta suponiendo la ocurrencia simultanea del 100% de las fuerzas sísmicas en una dirección y el 30% en la dirección perpendicular.

- Torsión accidental: la normativa indica que debe suponerse que la masa concentrada en cada uno de los pisos de la edificación esta desplazada transversalmente, hacia cualquiera de los dos lados, del centro de masa de cada piso una distancia del 5% de la medida en la dirección perpendicular a la de estudio.
- Diafragma rígido en su plano: se supone que el diafragma o entrepiso es rígido en su plano ya que su rigidez y resistencia actúan como una unidad y sus propiedades de masa y rigidez se concentran en el centro de masa y centro de rigidez respectivamente.

5.2.Periodo fundamental de la edificación

El valor del periodo fundamental de la edificación, T, debe obtenerse a partir de las propiedades de su sistema de resistencia sísmica, sin embargo, se puede igualar al periodo fundamental aproximado, T_a , haciendo uso de la ecuación A.4.2-3 que indica la NSR-10:

$$T_a = C_t h^\alpha$$

Donde h corresponde a la altura total de la edificación, los valores de C_t y α están dados por la tabla A.4.2-1 de la NSR-10:

Figura 22*Parámetros para cálculo de T_a*

Sistema estructural de resistencia sísmica	C_t	α
Pórticos resistentes a momentos de concreto reforzado que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.	0.047	0.9
Pórticos resistentes a momentos de acero estructural que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.	0.072	0.8
Pórticos arriostrados de acero estructural con diagonales excéntricas restringidas a pandeo.	0.073	0.75
Todos los otros sistemas estructurales basados en muros de rigidez similar o mayor a la de muros de concreto o mampostería	0.049	0.75
Alternativamente, para estructuras que tengan muros estructurales de concreto reforzado o mampostería estructural, pueden emplearse los siguientes parámetros C_t y α , donde C_w se calcula utilizando la ecuación A.4.2-4.	$\frac{0.0062}{\sqrt{C_w}}$	1.00

Nota. Tomado de *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)*, Título A (p. A.66), 2010.

Debido a que la edificación estudiada es un sistema estructural resistente de pórticos resistente momentos de concreto reforzado, los valores de C_t y α para este caso serán los indicados en la primera fila de la anterior tabla. Finalmente se obtiene que el periodo T_a es de 0,6457 segundos en dirección X y Y.

A partir de los parámetros sísmicos de diseño definidos en el capítulo 4.1 y el periodo fundamental aproximado calculado anteriormente es posible ingresar en el software de Midas Gen las fuerzas sísmicas en dirección X (FHx) y en dirección Y (FHy):

Figura 23

Definición de fuerza sísmica estática en Midas Gen

Add/Modify Seismic Load Specification

Load Case Name : FHx

Seismic Load Code : NSR-10

Description :

Seismic Load Parameters

Design Spectral Response Acceleration

Site Class : C

Aa : 0.25 g Fa : 1.15000

Av : 0.25 g Fv : 1.55000

Period Coef. (Cu) : 1.28500

Importance Factor (I) : 1

Structural Parameters

	X-Dir.	Y-Dir.
Analytical Period :	0	0
Approximate Period :	0.6457	0.6457
Fundamental Period :	0.6457	0.6457
Basic Ductility Factor (R0)	4	
Phi :	1	1

Seismic Load Direction Factor (Scale Factor)

X-Direction : 1 Y-Direction : 0

Accidental Eccentricity

X-Direction (Ex) : ☐ Positive ☐ Negative ☒ None

Y-Direction (Ey) : ☐ Positive ☐ Negative ☒ None

Torsional Amplification

☐ Accidental Eccentricity ☐ Inherent Eccentricity

Additional Seismic Loads (Unit:kN,m)

Story	Add.-X	Add.-Y	Add.-RZ

Seismic Load Profile... OK Cancel Apply

A partir de la definición de estas fuerzas sísmicas horizontales y el efecto ortogonal de las mallas en el programa Midas Gen, este ejecuta el análisis de la edificación con lo cual se obtienen los valores de la fuerza horizontal en cada uno de los pisos así con el cortante basal para la estructura fija que es de 4117.6528 KN.

5.3.Verificación de derivas

Uno de los parámetros más importantes al momento de verificar un diseño estructural es la deriva, la cual se define como el desplazamiento relativo entre dos puntos colocados en la misma línea vertical en dos pisos consecutivos. Este parámetro se encuentra relacionado con los siguientes efectos durante un temblor:

- a) Deformación inelástica de los elementos estructurales y no estructurales
- b) Estabilidad global de la estructura
- c) Daño de los elementos no estructurales
- d) Alarma y pánico entre las personas que ocupan la edificación.

Por estas razones se debe controlar el cumplimiento de que las derivas no excedan un valor determinado, establecido en la tabla A.6.4-1 de la NSR-10, conocido como deriva máxima y que para nuestro caso de estudio no debe ser superior al 1% de la altura de entrepiso.

Conforme a esto, se realizó el respectivo chequeo de las derivas de la edificación de interés a partir de los resultados obtenidos en Midas Gen, los cuales muestran el cumplimiento de este requisito de diseño para todas las combinaciones de carga.

6. Modelamiento de los aisladores

El objetivo del proyecto es evaluar el comportamiento dinámico de la estructura de estudio bajo diferentes configuraciones aisladores de base, centrándonos en el uso de dos tipos

de aisladores elastoméricos como los son los LRB (aisladores con núcleo de plomo) y los HDRB (aisladores de alto amortiguamiento). Por lo tanto, se debe establecer las propiedades mecánicas de estos dispositivos haciendo uso de sus respectivos modelos de bilinealidad a partir de los aisladores disponible comercialmente, concretamente en el catálogo de la empresa GAMA ISOSISM.

6.1. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)

En el modelamiento de Midas Gen se incluyeron aisladores del tipo LRB, se definieron tres opciones de diseño de este tipo de aislador en función de la rigidez del apoyo, es decir, uno de baja rigidez (LRB-L), uno de media rigidez (LRB-M) y uno de alta rigidez (LRB-H). La selección de estas opciones se hizo a través del catálogo comercial de la empresa GAMA ISOSISM y se usó del modelo de bilinealidad para calcular las características mecánicas que permiten describir el comportamiento del dispositivo. En la Tabla 6 se muestran las propiedades de cada uno de los aisladores LRB utilizados.

Tabla 6

Propiedades Aisladores LRB

Propiedad	LRB-L	LRB-M	LRB-H	Unidad
Diámetro	300	550	800	mm
Altura total	169	228	358	mm

Altura del elastómero (t)	70	88	176	mm
Módulo de cortante del caucho(G)	0,8	0,8	0,8	MPa
Desplazamiento de Diseño (D)	150	190	285	mm
Amortiguamiento efectivo (ξ_{eff})	27	27	27	%
Fuerza elástica del plomo (Fy)	60	196	425	KN
Fuerza característica (Q)	54	178,6	387,6	KN
Rigidez post fluencia (Kp)	0,72	1,93	2,71	KN/mm
Rigidez elástica (Ke)	7,18	19,29	27,12	KN/mm
Rigidez efectiva (Keff)	1,08	2,87	4,07	KN/mm
Rigidez vertical (Kv)	540	1435	2035	KN/mm
Relación Kp/Ke	0,1	0,1	0,1	-----

6.2.Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB)

Para el modelamiento de estos dispositivos también se definieron tres opciones de diseño en función de la rigidez del apoyo, es decir, uno de baja rigidez (HDRB-L), uno de media rigidez (HDRB-M) y uno de alta rigidez (HDRB-H). Se seleccionaron a partir del catálogo comercial de GAMA ISOSISM y se usó del modelo de bilinealidad para calcular las características mecánicas que permiten describir el comportamiento del dispositivo, cabe mencionar que dicho modelo es diferente al usado para los aisladores LRB. En la Tabla 7 se muestran las propiedades de cada uno de los aisladores HDRB utilizados.

Tabla 7*Propiedades Aisladores HDRB*

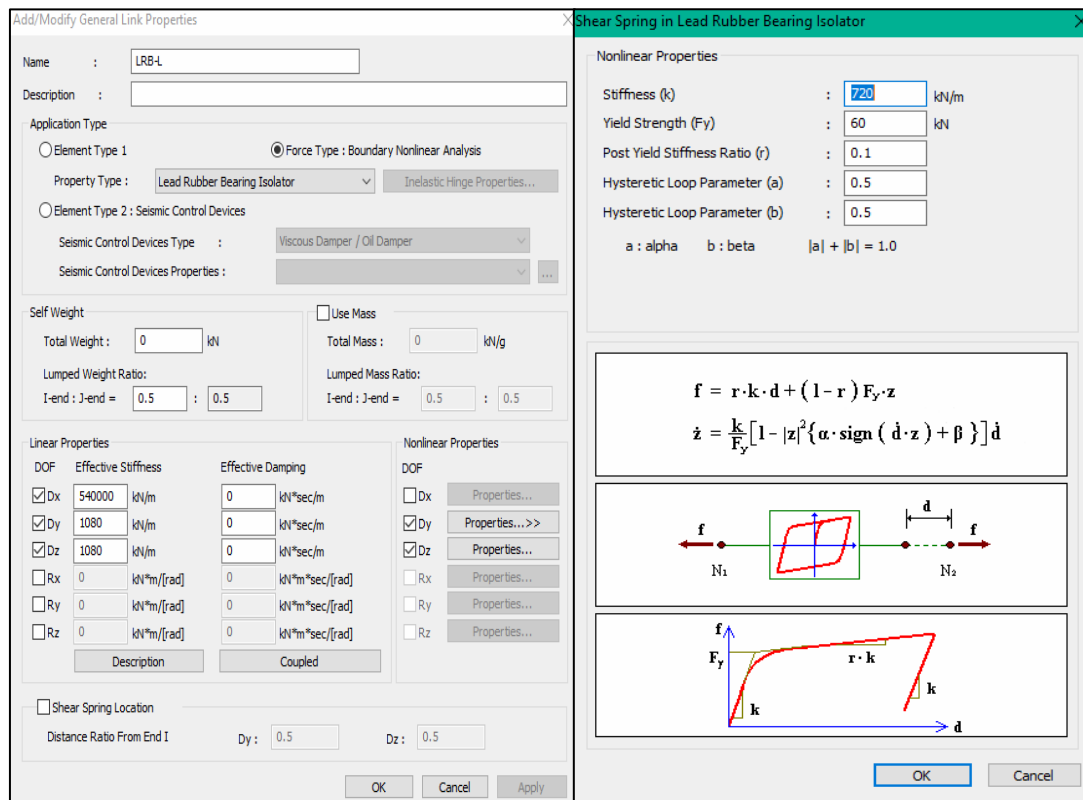
Propiedad	HDRB-L	HDRB-M	HDRB-H	Unidad
Diámetro	300	500	800	mm
Altura total	169	217	336	mm
Altura del elastómero (t)	70	84	132	mm
Módulo de cortante del caucho(G)	0,8	0,8	0,8	Mpa
Desplazamiento de Diseño (D)	150	180	285	mm
Parámetro λ	0,07	0,07	0,07	-----
Desplazamiento de fluencia (Dy)	3,15	5,88	9,24	mm
Amortiguamiento efectivo (ξ_{eff})	10	10	10	%
Fuerza elástica del plomo (Fy)	25,77	76,25	196,65	KN
Fuerza característica (Q)	23,22	65,25	168,47	KN
Rigidez post fluencia (Kp)	0,81	1,87	3,05	KN/mm
Rigidez elástica (Ke)	8,18	12,97	21,26	KN/mm
Rigidez efectiva (Keff)	0,96479	2,23236	3,6412	KN/mm
Rigidez vertical (Kv)	482,395	1116,18	1820,6	KN/mm
Relación Kp/Ke	0,1	0,14	0,14	-----

6.3. Definición de los aisladores en Midas Gen

Una vez se cuenta con cada una de las propiedades mecánicas de los aisladores a implementar, se modelan en el programa de Midas Gen como elementos “General Link” donde se deberá ingresar las propiedades lineales, que corresponden a la rigidez efectiva vertical (Dx) y la rigidez efectiva horizontal (Dy, Dz); al igual que las propiedades no lineales en los ejes horizontales.

Figura 24

Definición de los aisladores en Midas Gen.

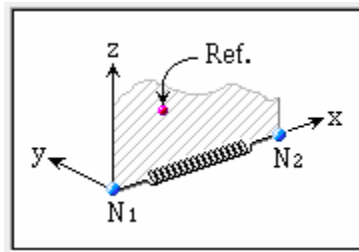


El procedimiento es el mismo para definir los diferentes tipos de aisladores que se utilizaran en el estudio. Cabe mencionar que se consideran que los ejes horizontales son Y y Z, y

el eje vertical X, debido a que el programa modela estos dispositivos con un eje local descrito en la Figura 25.

Figura 25

Ejes locales de los aisladores en Midas Gen



6.4.Distribución de los aisladores en la estructura

Una vez definidas las propiedades de los diferentes aisladores que se emplearan en el análisis dinámico de la estructura, se establecen las distribuciones de dichos aisladores en la base de la edificación por medio de un diseño de experimento 2^K factorial, implementando como herramienta de apoyo el programa Minitab.

En el diseño factorial se consideró como primer factor el tipo de aislador, donde cada nivel está representado por los seis tipos de aisladores; y como segundo factor la posición del aislador, donde los niveles indican si están ubicados en los apoyos internos o perimetrales de la edificación. Finalmente se obtiene un total de 36 diferentes posibilidades en las que se distribuyen los aisladores, como se indica en la Tabla 8.

Tabla 8*Distribución de aisladores*

Combinación	Perimetrales	Internos
1	HDRB-L	HDRB-L
2	HDRB-L	HDRB-M
3	HDRB-L	HDRB-H
4	HDRB-L	LRB-L
5	HDRB-L	LRB-M
6	HDRB-L	LRB-H
7	HDRB-M	HDRB-L
8	HDRB-M	HDRB-M
9	HDRB-M	HDRB-H
10	HDRB-M	LRB-L
11	HDRB-M	LRB-M
12	HDRB-M	LRB-H
13	HDRB-H	HDRB-L
14	HDRB-H	HDRB-M
15	HDRB-H	HDRB-H
16	HDRB-H	LRB-L
17	HDRB-H	LRB-M
18	HDRB-H	LRB-H
19	LRB-L	HDRB-L
20	LRB-L	HDRB-M

21	LRB-L	HDRB-H
22	LRB-L	LRB-L
23	LRB-L	LRB-M
24	LRB-L	LRB-H
25	LRB-M	HDRB-L
26	LRB-M	HDRB-M
27	LRB-M	HDRB-H
28	LRB-M	LRB-L
29	LRB-M	LRB-M
30	LRB-M	LRB-H
31	LRB-H	HDRB-L
32	LRB-H	HDRB-M
33	LRB-H	HDRB-H
34	LRB-H	LRB-L
35	LRB-H	LRB-M
36	LRB-H	LRB-H

7. Análisis dinámico cronológico

El análisis dinámico cronológico no lineal se caracteriza principalmente porque la acción sísmica en la edificación está representada por un acelerogramas que registras el movimiento en

aceleración a lo largo del tiempo. En el apartado A.2.7. de la NSR-10 se especifican los requisitos que deben de cumplir la familia de acelerogramas que se utilicen para el análisis.

7.1. Selección de sismos

Para realizar un análisis dinámico cronológico la NSR-10 indica que se requiere un mínimo de 3 registros de acelerogramas, en consistencia a esto se emplearon 5 acelerogramas correspondientes a la microzonificación sísmica del área metropolitana de Bucaramanga, específicamente a la falla Bucaramanga – Santa Marta. Los registros de acelerogramas compatibles se seleccionaron buscando fuentes de amenaza similares a las que tenemos en la región obtenidos de la base de datos PEER Strong Motion Database de la Uniniversity of california en Berkeley, para finalmente definir las familias de acelerogramas a utilizar.

Tabla 9

Sismos seleccionados

<i>Acelerogramas compatibles con escenario sísmico de la falla B/manga - Santa Marta</i>				
<i>Fecha</i>	<i>Hora</i>	<i>Nombre Sismo</i>	<i>Estación</i>	<i>Nombre Código</i>
31/10/1935	18:37:49	Helena	Carr. Coll.	Helena

27/05/1980	14:50:57	Mammoth Lake	Long Val. D.	Mammoth
22/07/1983	2:39:54	Coalinga	Oil Fie.	Coalinga
1/10/1987	14:42:40	Whittier Narrow	Wilson	Whittier
26/09/1997	9:40:30	Umbria-Marche	Nocera Umbra	Umbria

Figura 26

Acelerograma Sismo Helena

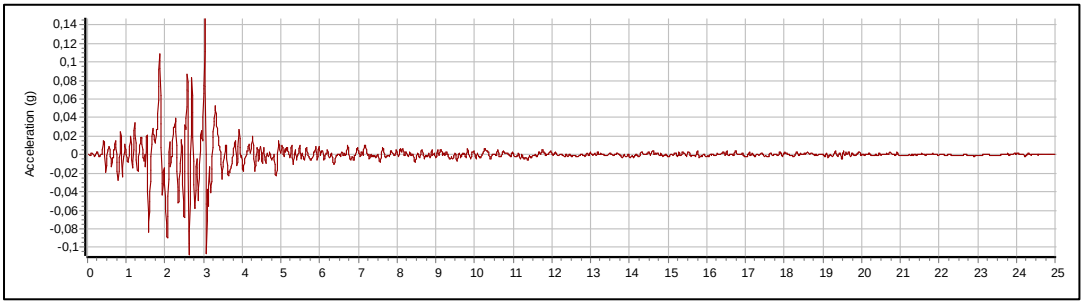


Figura 27

Acelerograma Mammoth Lake

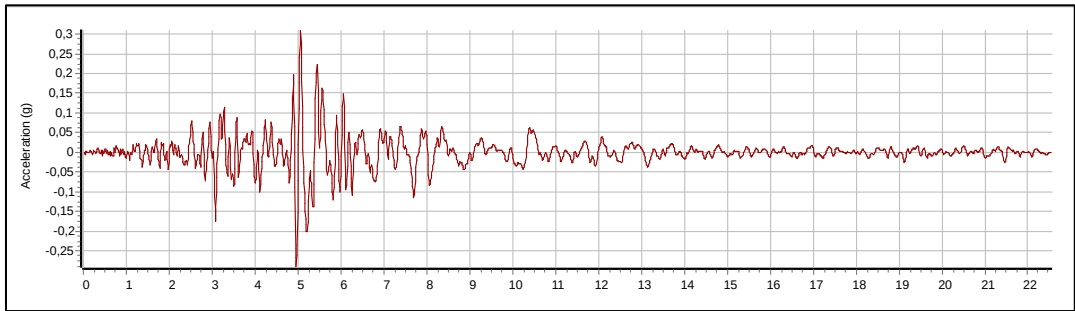
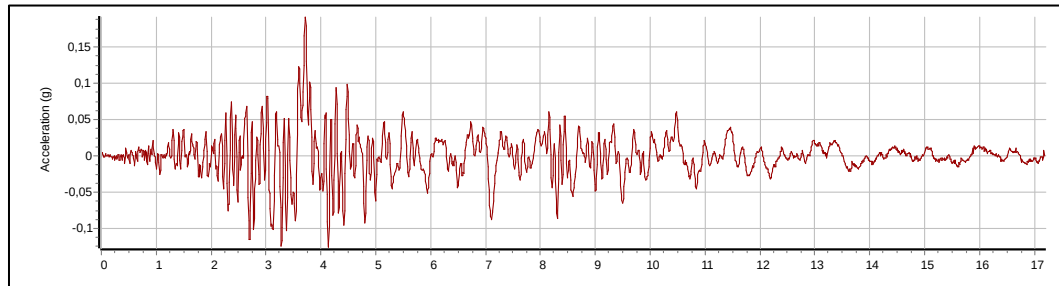
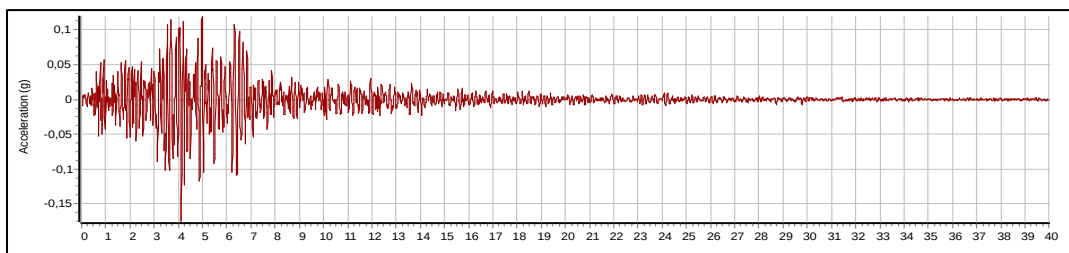
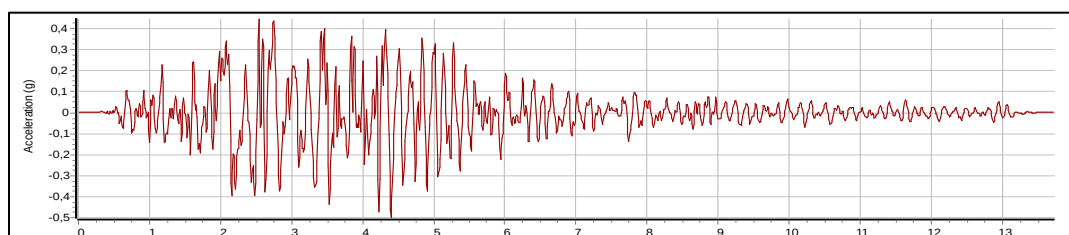


Figura 28*Acelerograma Sismo Colainga***Figura 29***Acelerograma Sismo Whittier Narrow***Figura 30***Acelerograma Sismo Umbria-Marche*

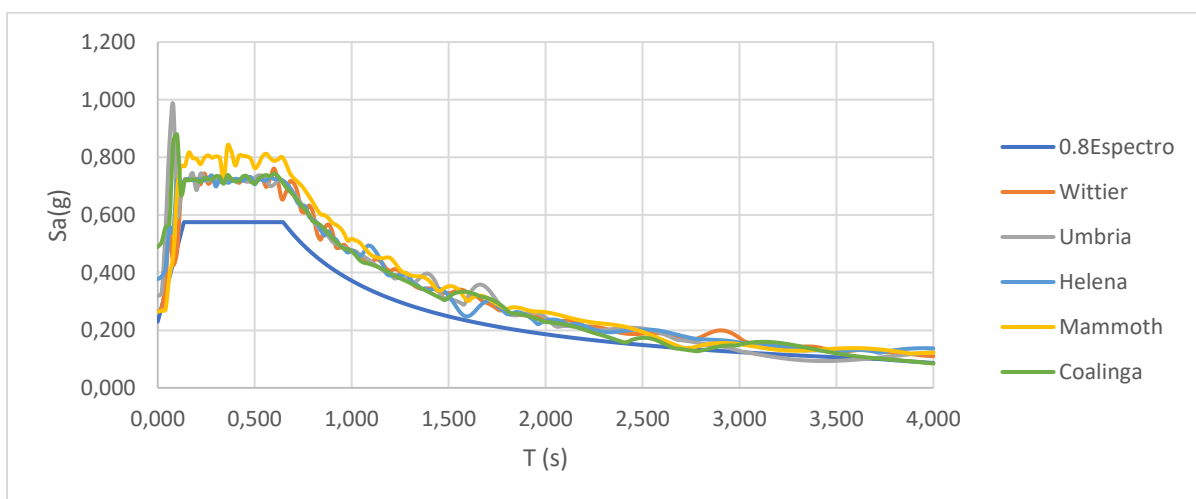
7.2. Ajuste de sismos

Los registros reales compatibles ya seleccionados deben de ser apropiadamente escalados para que pueden emplearse en el análisis dinámico cronológico, dicho ajuste se realizó a través del software de SeismoMatch y cumpliendo con dos requisitos indicados en el apartado A.2.7.1 de la NSR-10:

- a) Los espectros de respuesta de los acelerogramas seleccionados, apropiadamente escalados, debe cumplirse que todas espectrales sean mayores al 80% de las ordenas del espectro de diseño, para en rango comprendido entre $0.8T$ y $1.2T$, donde T es el periodo de la estructura. En la Figura 31 se evidencia el cumplimiento de este requisito al escalar cada uno de los registros.

Figura 31

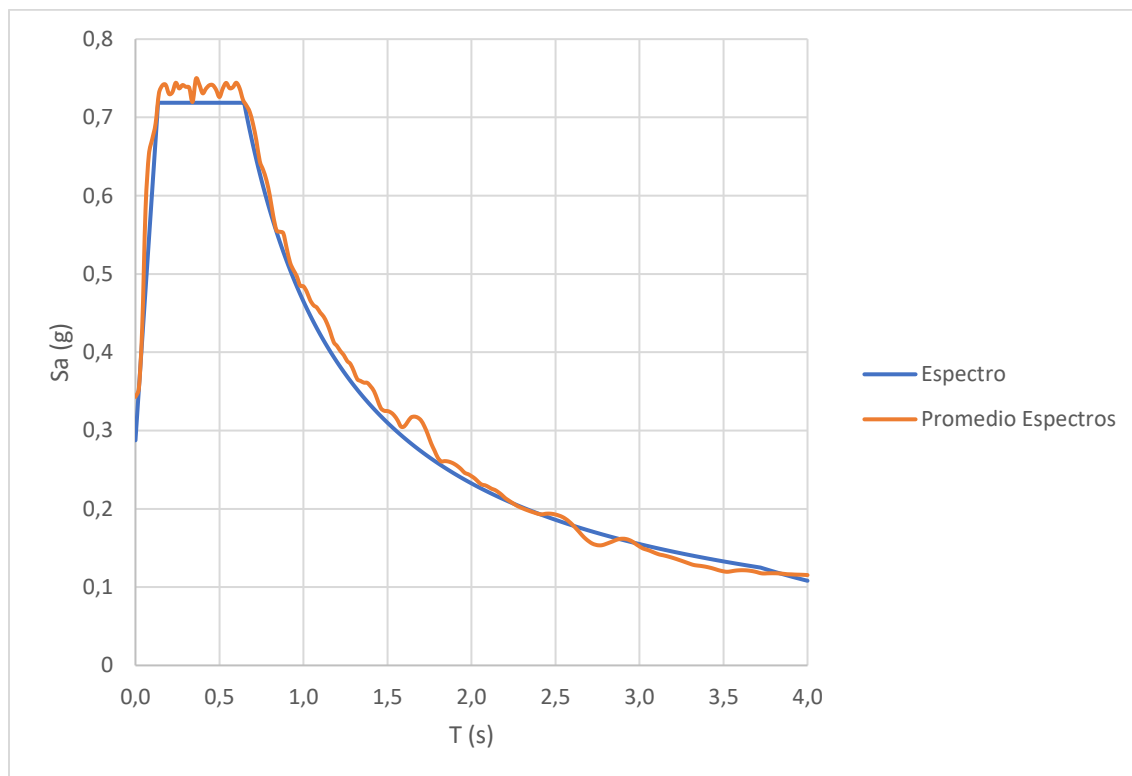
Verificación primer requisito de A.2.7.1 (c) de NSR-10



b) El promedio las ordenadas espectrales de todos los registros seleccionados, deber ser mayores a las ordenadas espectrales del espectro de diseño, en el rango comprendido entre $0.2T$ y $1.5T$, donde T es el periodo de la estructura. En la Figura 32 se evidencia el cumplimiento de este requisito al promediar los registros respectivamente escalados.

Figura 32

Verificación segundo requisito de A.2.7.1 (c) de NSR-10



Luego de realizar el procedimiento de selección y ajuste de los registros compatibles a la zona geotécnica de la falla de Bucaramanga – Santa Marta y cumplir con los requisitos normativos de la NSR-10, queda definida la acción sísmica a la que se someterá la

edificación para el respectivo análisis estructural dinámico. A continuación, se presenta un comparativo entre los acelerogramas originales y los acelerogramas debidamente escalados.

Figura 33

Comparación sismo Helena real y escalado

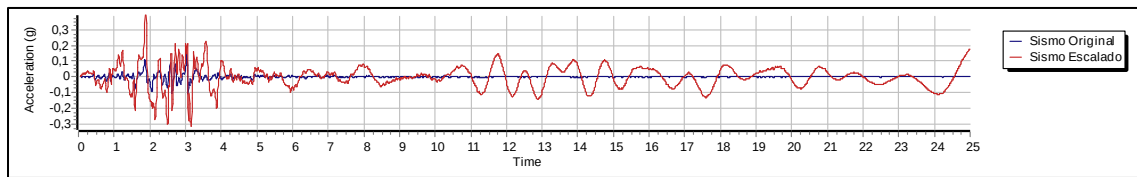


Figura 34

Comparación sismo Mammoth Lake real y escalado

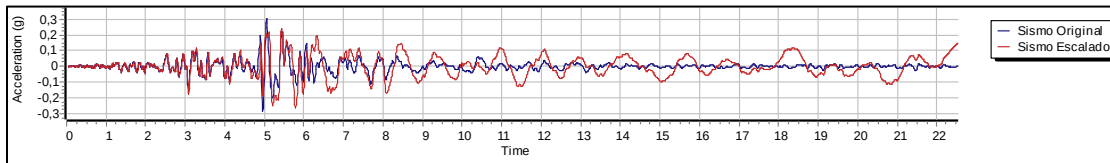


Figura 35

Comparación sismo Coalinga real y escalado

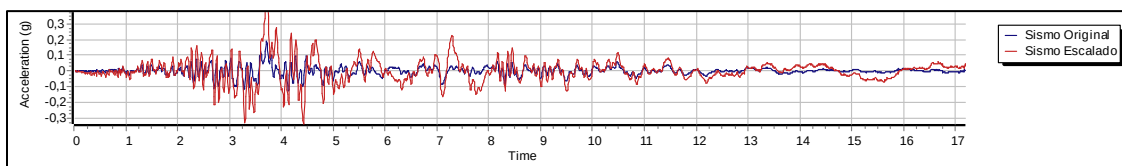
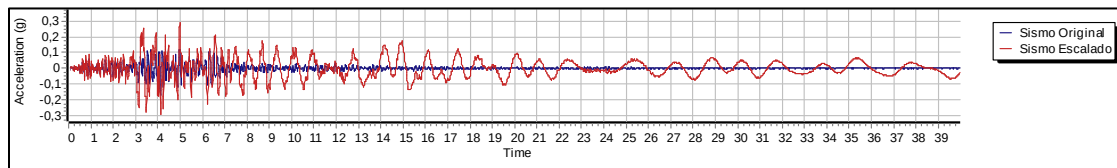
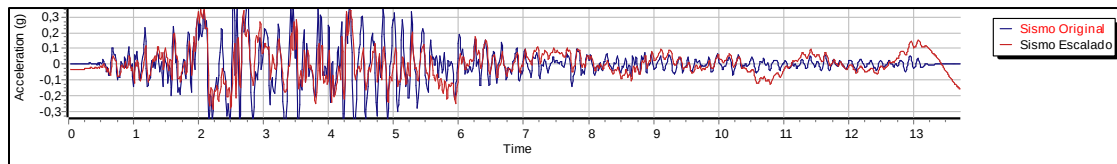


Figura 36

Comparación sismo Whittier Narrow real y escalado

**Figura 37**

Comparación sismo Umbria-Marche real y escalado



7.3. Ajuste de resultados

Para cada una de las 36 diferentes distribuciones de aisladores que se definieron a través del análisis factorial es necesario realizar la corrección de resultados obtenidos (derivadas, desplazamientos, fuerzas cortantes) en aquellos que no cumplan con especificado en el apartado A.5.5.3 de la NSR-10, donde indica que en caso de que el máximo cortante dinámico total en la base, V_{tj} , sea menor al cortante sísmico en la base, V_s , deben de multiplicarse por un factor de modificación dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{V_s}{V_{tj}}$$

El cortante sísmico en la base, V_s , para la edificación de estudio es de 4224,18 KN y al realizar la comparación con cada una de los cortantes dinámicos en la base de las 36 combinaciones, para las dos direcciones horizontales, fue necesario hacer el respectivo ajuste para varias de las distribuciones de aisladores estudiadas.

8. Resultados

Luego de modelar y obtener las respuestas de todas las distribuciones posibles de aisladores de estudio en el software Midas Gen (ver Tabla 8), se dispuso a realizar el ajuste de los parámetros de interés que corresponden a fuerza cortante, deriva y desplazamiento en el último piso de la edificación en las dos direcciones horizontales tal y como se indica en el apartado A.5.5.3. de la NSR-10. Posteriormente se definió una envolvente para cada una los parámetros de respuesta con los resultados de cada sismo, para establecer el valor máximo y así ingresar los datos en el software de análisis estadístico Minitab y así aplicar un análisis factorial para evaluar dichos resultados a partir de los estadísticos y graficas en el comportamiento de la estructura aislada y establecer la distribución optima de los aisladores de base.

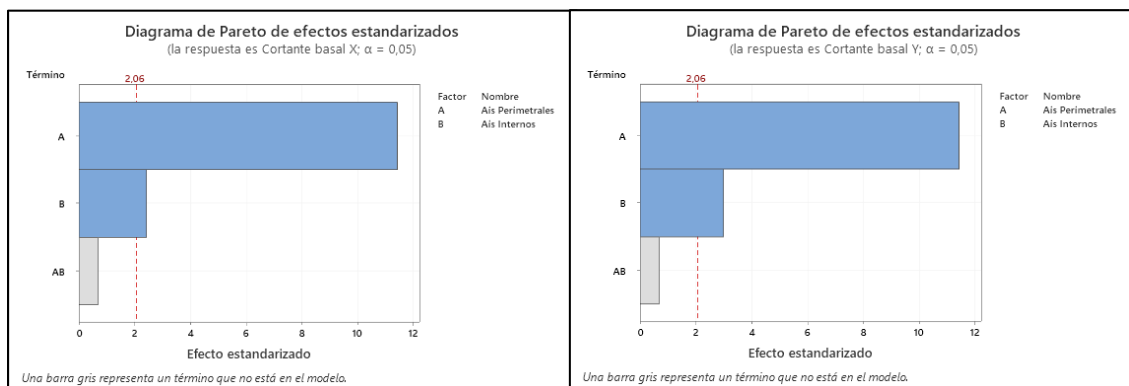
8.1. Análisis Diagramas de Pareto de efectos

Los diagramas de Pareto de efectos permiten establecer cuales efectos principales e interacciones de estos son significativos en el modelo, graficando con barras y de manera decreciente los valores absolutos de la importancia de dichos efectos. A partir de esto es posible afirmar que para la investigación los dos efectos principales, es decir, que los aisladores sean perimetrales o internos, son significativos y de gran importancia en el modelo ya que las barras superan la línea de referencia indicada en 2,060. Para el caso, se consideró un valor de significancia de 0,05 ($\alpha=0,05$)

No obstante, en el caso del parámetro de deriva en dirección x el efecto de los aisladores internos no se considera significativo al estar por debajo de la línea de referencia de 2,060.

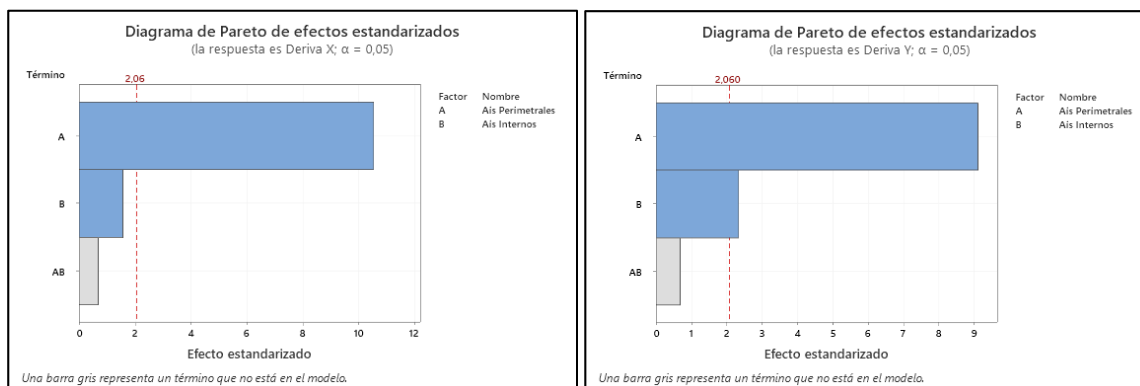
Figura 38

Diagrama de Pareto Cortante Basal



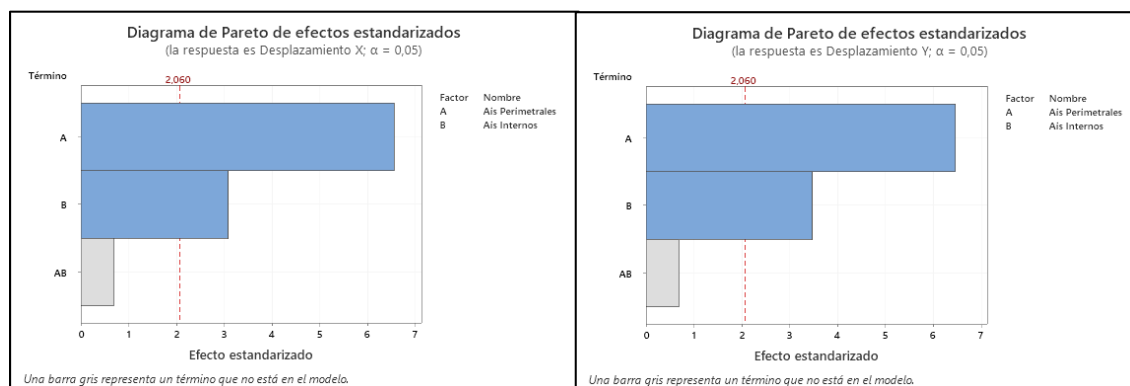
a) Dirección x

b) Dirección y

Figura 39*Diagrama de Pareto Deriva*

a) Dirección x

b) Dirección y

Figura 40*Diagrama de Pareto de desplazamiento horizontal*

a) Dirección x

b) Dirección y

Para reafirmar la significancia de los efectos principales se evalúa también el estadístico conocido como “Valor p”, haciendo una comparación de dicho dato con el valor de la significancia que es de 0,05 ($\alpha=0,05$). En nuestro estudio se cumple que el valor p es menor a la

significancia, tanto para los aisladores perimetrales como para los aisladores internos en cada uno de los parámetros de análisis, lo que implica una asociación estadísticamente significativa entre las variables de respuesta y los términos. Por otro lado, nuevamente se establece que el efecto de los aisladores internos en las respuestas de la deriva en X no es significativo, donde el Valor p es menor a la significancia.

Tabla 10

Valor P de los parámetros de respuesta

Parámetro De Respuesta	Valor P	
	Ais. Perimetrales	Ais. Internos
Cortante Basal X	0,000	0,023
Cortante Basal Y	0,000	0,006
Deriva X	0,000	0,129
Deriva Y	0,000	0,027
Desplazamiento X	0,000	0,005
Desplazamiento Y	0,000	0,002

8.2.Ajuste del modelo

Para determinar si el modelo establecido por Minitab se ajusta correctamente es necesario evaluar el dato estadístico de bondad conocido como R^2 , este valor se da en porcentaje y entre más cercano este al 100% es posible afirmar que el modelo se ajusta mejor. En el estudio se

puede observar que los modelos se ajustan mejor para el parámetro de fuerza cortante basal en las dos direcciones de estudio, ya que se obtienen valores de R^2 mayores al 90 % y que en el caso que menos se ajusta es para el parámetro de desplazamiento horizontal en las dos direcciones de estudio donde se observa aproximadamente un R^2 de 80 %. En general el modelo se ajusta bien para cada uno de los parámetros analizados.

Adicionalmente, es posible afirmar que el modelo para cada uno de los parámetros no está sobre ajustado, debido a que al comparar R^2 con $R^2(\text{pred})$, se evidencia que el valor de este último estadístico de bondad no es sustancialmente menor que R^2 .

Tabla 11

Estadísticos de bondad de los parámetros de respuesta

Parámetro de Respuesta	R^2	R^2 (ajustado)	R^2 (pred)
Cortante Basal X	95,21%	93,29%	90,06%
Cortante Basal Y	94,58%	92,41%	88,75%
Deriva X	88,45%	83,83%	76,05%
Deriva Y	85,98%	80,37%	70,92%
Desplazamiento X	79,64%	71,49%	57,77%
Desplazamiento Y	80,02%	72,02%	58,56%

8.3. Gráficas de residuos

Las gráficas de residuos obtenidas de Minitab al realizar el análisis del diseño factorial se utilizan para determinar si el modelo es adecuado y cumple con las premisas del análisis, en caso de que no se cumplan, el modelo podría no ajustarse adecuadamente a los datos y por tanto tener precaución al momento de interpretar los datos.

8.3.1. Gráfica de residuo vs orden

Esta grafica permite verificar que los residuos son independientes entre sí, esto se evidencia cuando la gráfica no presenta tendencias ni patrones cuando se muestran en orden cronológico. En nuestro análisis se evidencia que los residuos son independientes al no observarse ningún tipo de patrón, ya que se ubican aleatoriamente alrededor de la línea central, para cada uno de los parámetros de respuesta (Cortante basal, desplazamiento y deriva) en las dos direcciones de estudio.

Figura 41

Gráfica de residuos Vs Orden de cortante basal

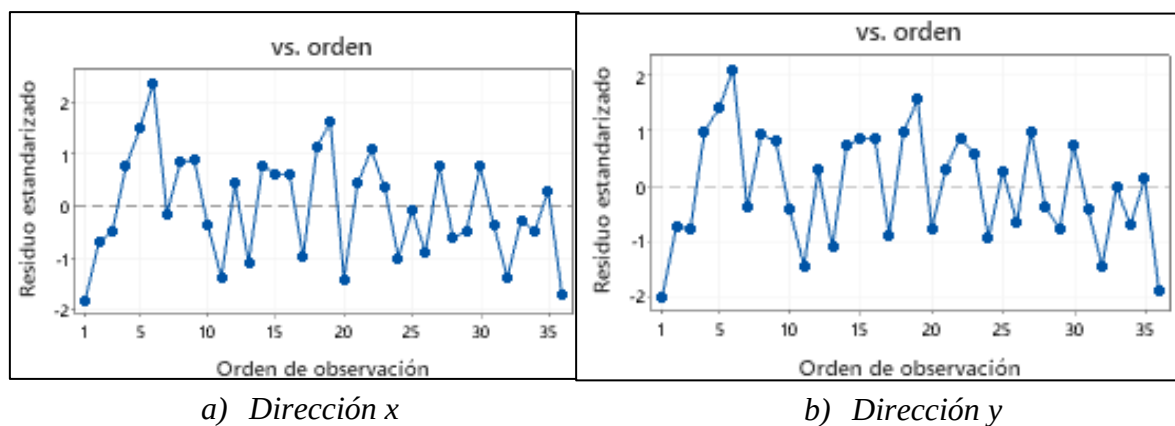
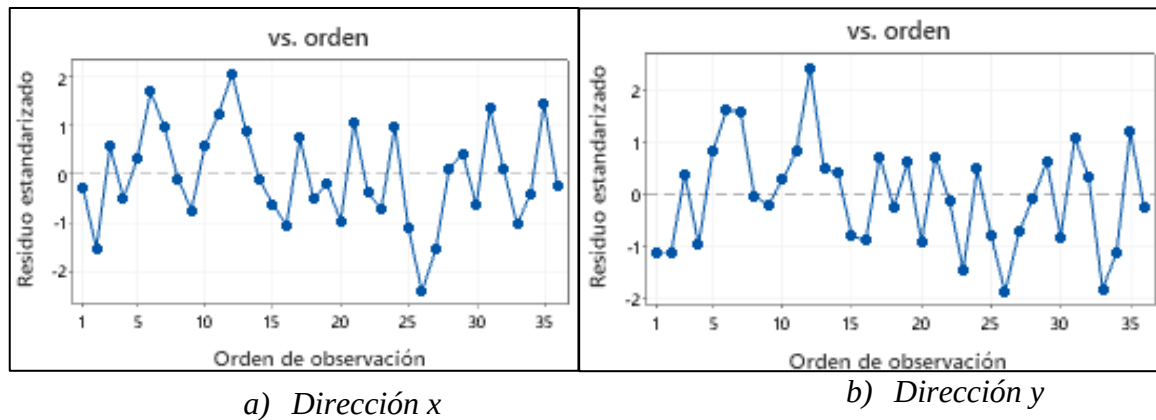
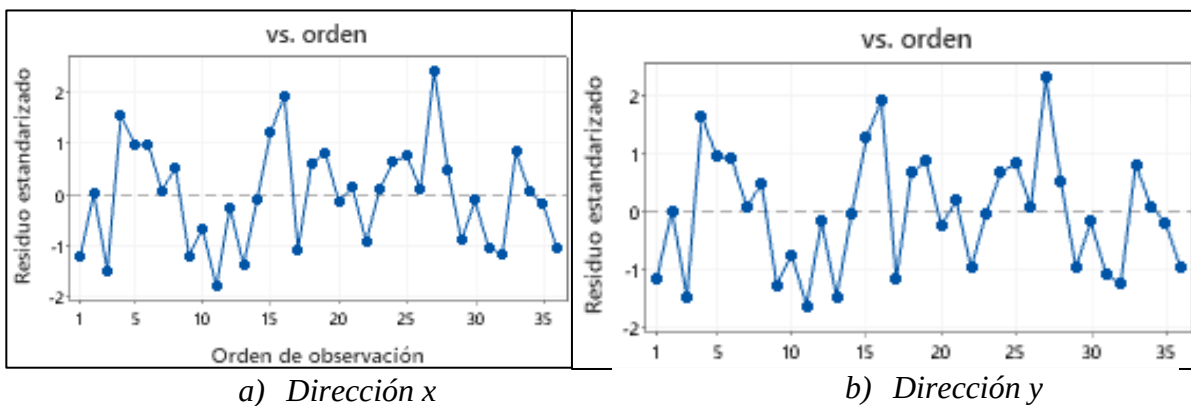


Figura 42*Gráfica de residuos Vs Orden de deriva***Figura 43***Gráfica de residuos Vs Orden de desplazamiento*

8.3.2. Gráfica de probabilidad normal

Este tipo de grafica se emplea para verificar si los residuos están distribuidos normalmente, para lo cual debe seguir aproximadamente una línea recta. En nuestro análisis de observa que los residuos para todos los parámetros de respuesta están distribuidos normalmente,

lo cual permite afirmar que los datos estadísticos como intervalos de confianza y Valores p son más exactos para el modelo.

Figura 44

Gráfica de probabilidad normal de cortante basal

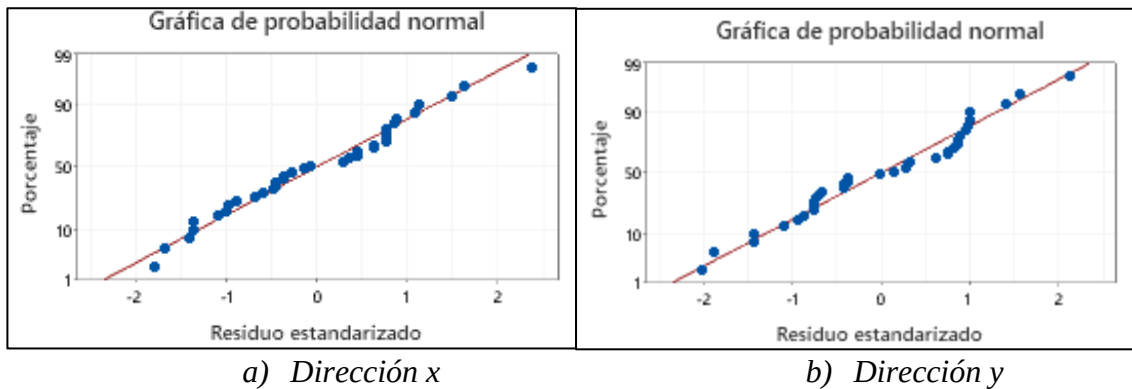


Figura 45

Gráfica de probabilidad normal de deriva

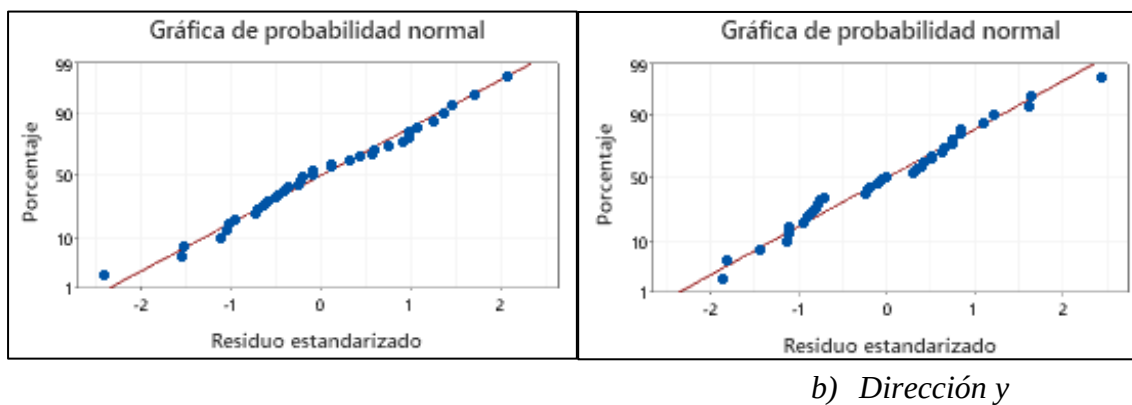
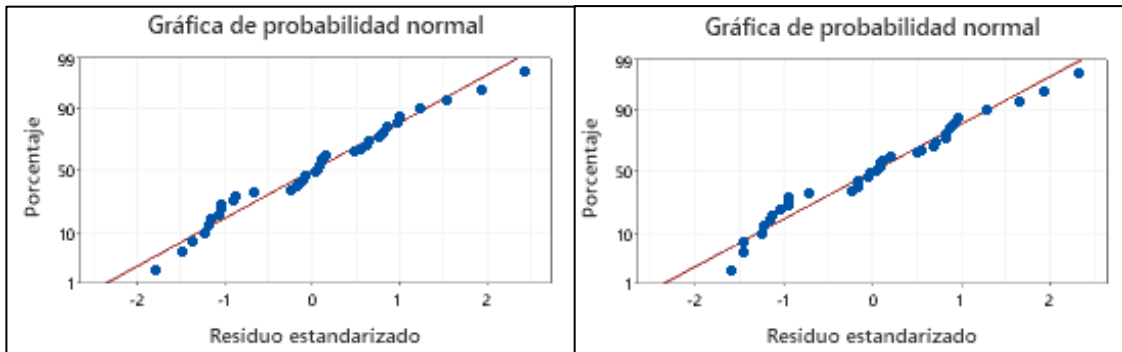


Figura 46

Gráfica de probabilidad normal de desplazamiento



a) Dirección x

b) Dirección y

8.3.3. Gráfica de ajustes versus residuos

Esta grafica permite comprobar si los residuos están distribuidos aleatoriamente y tienen varianza constante. En nuestro análisis se observa que los datos se distribuyen aleatoriamente a ambos lados de la línea central, y no se presentan patrones detectables para ningunos de los parámetros de respuesta, lo cual indica que se cuenta con una varianza constante. Sin embargo, para el parámetro de respuesta de fuerza cortante en la base, se evidencia algunos puntos lejos de los otros en la dirección X, lo cual indica que estos son puntos influyentes.

Figura 47

Gráfica de ajustes Vs residuos de cortante basal

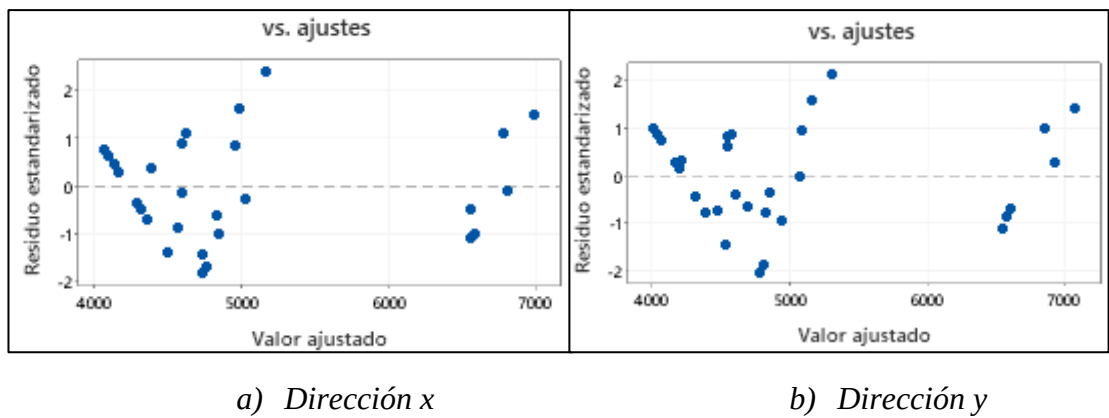


Figura 48

Gráfica de ajustes Vs residuos de deriva

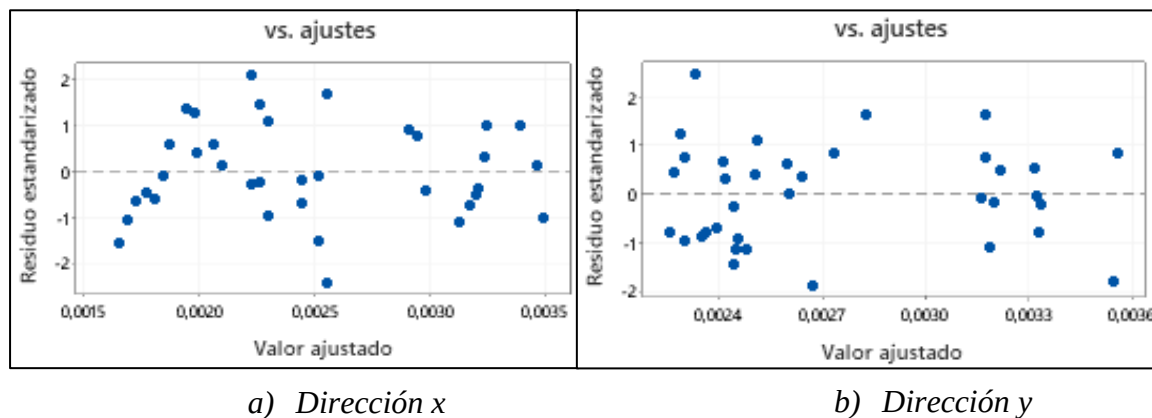
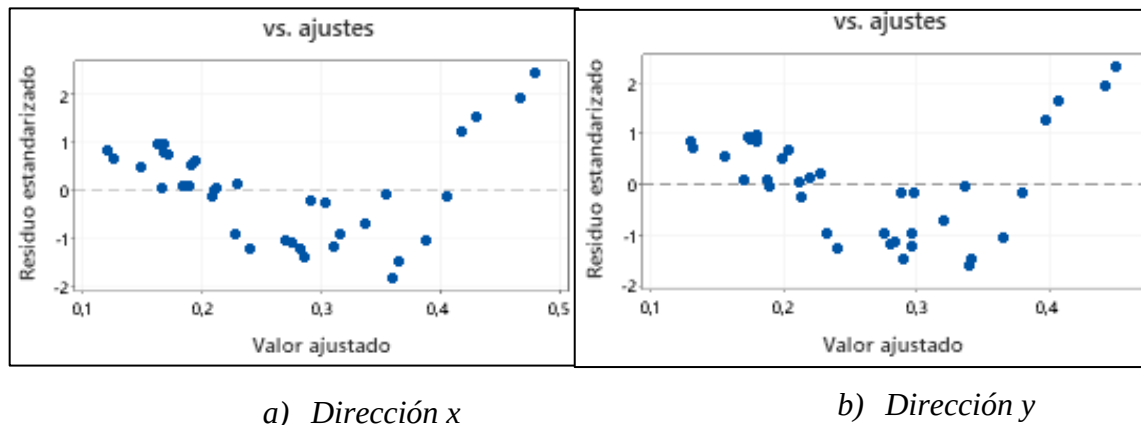


Figura 49

Gráfica de ajustes Vs residuos de desplazamiento



8.4. Selección de la distribución optima de aisladores

Con el objetivo de encontrar la distribución optima de aisladores que se deben ubicar en los apoyos tanto perimetrales como internos en la edificación de estudio, que permiten disminuir los parámetros de respuesta del análisis dinámico realizado, se empleó el software de minitab para realizar la optimización a partir de los modelos generados por el mismo software, una vez que se comprobó que dichos modelos se ajustan correctamente.

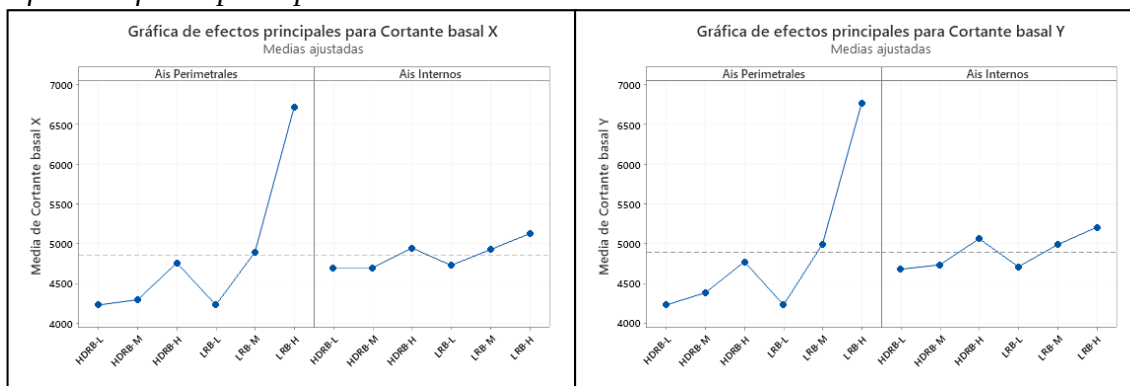
8.4.1. Minimizar Cortante basa

Inicialmente se buscó la distribución optima de aisladores para obtener el menor valor de cortante en la base de la edificación, en las dos direcciones horizontales, para lo cual se utilizó la herramienta de optimizar respuesta de Minitab, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 12*Resultados optimización cortante basal*

Apoyos	Apoyos	Cortante basal Y	Cortante basal X	Deseabilidad
Perimetrales	Internos	Ajuste	Ajuste	compuesta
LRB-L	HDRB-L	4006,91 KN	4069,72 KN	1

Como muestra en la Tabla 12, la combinación de aisladores que permiten obtener el menor valor de fuerza cortante en la base es aisladores LRB-L en los apoyos perimetrales y aisladores HDRB-L en los apoyos internos. Esto también se puede evidenciar en la graficas de efectos principales del parámetro de cortante basal, donde se observa que para las dos direcciones horizontales de estudio el menor valor de la media ajustada de fuerza cortante en la base se obtiene al emplear aisladores perimetrales LRB-L y aisladores internos HDRB-L.

Figura 50*Gráfica de efectos principales cortante basal*

a) Dirección x

b) Dirección y

8.4.2. Minimizar Derivas

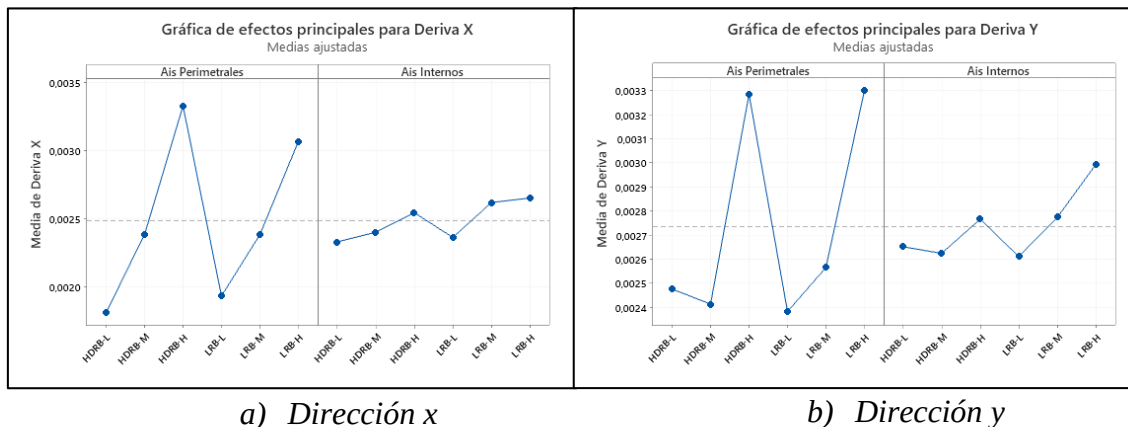
Siguiendo el mismo procedimiento se buscó la distribución óptima de aisladores para lograr minimizar las derivas en la edificación de estudio, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 13

Resultados optimización Derivas

Apoyos	Apoyos	Deriva Y	Deriva X	Deseabilidad
Perimetrales	Internos	Ajuste	Ajuste	compuesta
LRB-L	LRB-L	0,0022552 m	0,0018055 m	0,850998

Para este caso se evidencia que emplear aisladores LRB-L tanto en los apoyos perimetrales como internos de la edificación permiten disminuir las derivas en las dos direcciones horizontales de estudio. Al observar la gráfica de efectos principales del parámetro de deriva en dirección X se evidencia que el menor valor de la media se encuentra cuando se usan aisladores HDRB-L en todos los apoyos de la edificación, sin embargo, cuando se usan aisladores LRB-L se obtienen valores muy cercanos a los mínimos, siendo esta la mejor opción ya que en la dirección Y son estos últimos aisladores con los que permiten tener el menor valor de deriva.

Figura 51*Gráfica de efectos principales deriva***8.4.3. Minimizar desplazamientos horizontales**

Al igual que para los otros dos parámetros de respuesta estudiados se buscó la distribución óptima de aisladores para lograr minimizar los desplazamientos horizontales de la edificación, obteniéndose los siguientes resultados:

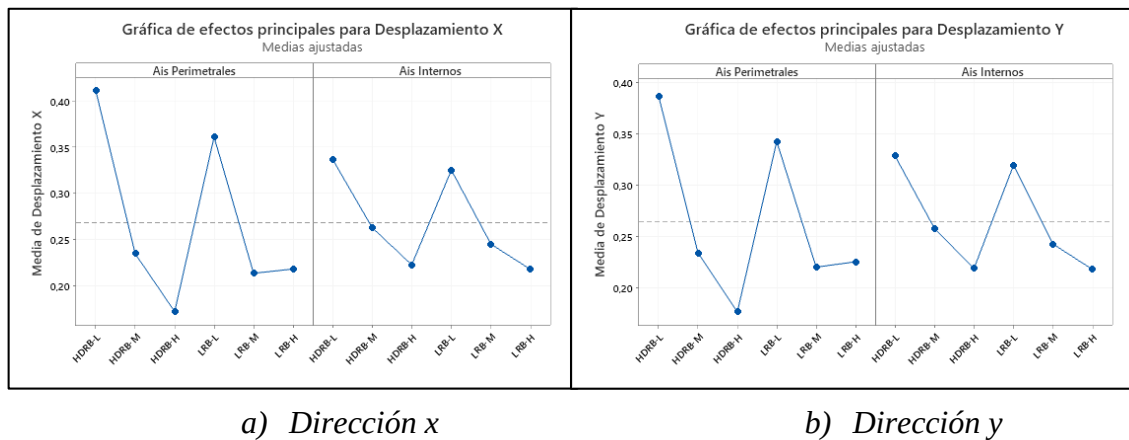
Tabla 14*Resultados optimización desplazamientos horizontales*

Apoyos	Apoyos	Desplazamiento Y	Desplazamiento X	Deseabilidad
Perimetrales	Internos	Ajuste	Ajuste	compuesta
HDRB-H	LRB-H	0,129842	0,120821	1

Se evidencia que para minimizar los desplazamientos horizontales en las dos direcciones se deben ubicar aisladores HDRB-H en los apoyos perimetrales y aisladores LRB-H en los apoyos internos de la estructura. Esta respuesta tiene concordancia con las gráficas de efectos principales de este parámetro en las dos direcciones, ya que se observa que el menor valor de la media de desplazamiento se obtiene usando aisladores HDRB-H en los nodos perimetrales y LRB-H en los apoyos internos.

Figura 52

Gráfica de efectos principales desplazamiento



8.4.4. Minimizar todos los parámetros de respuesta

Después de obtener las distribuciones de aisladores que permiten minimizar por separado cada uno de los parámetros de respuesta de interés en este estudio, finalmente se busca obtener la distribución que permita disminuir en conjunto todos los parámetros de respuesta dinámica, y por

tanto la que hace más segura y eficiente a la edificación, obteniéndose así los siguientes resultados:

Tabla 15

Resultados optimización en conjunto de los parámetros de respuesta

Aisladores perimetrales	HDRB-M
Aisladores internos	HDRB-M
Desplazamiento Y Ajustado	0,227403
Deriva Y Ajustado	0,0022995
Desplazamiento X Ajustado	0,228878
Deriva X Ajustado	0,0022962
Cortante basal X Ajustado	4215,56
Cortante basal Y Ajustado	413510
Deseabilidad compuesta	0,842135

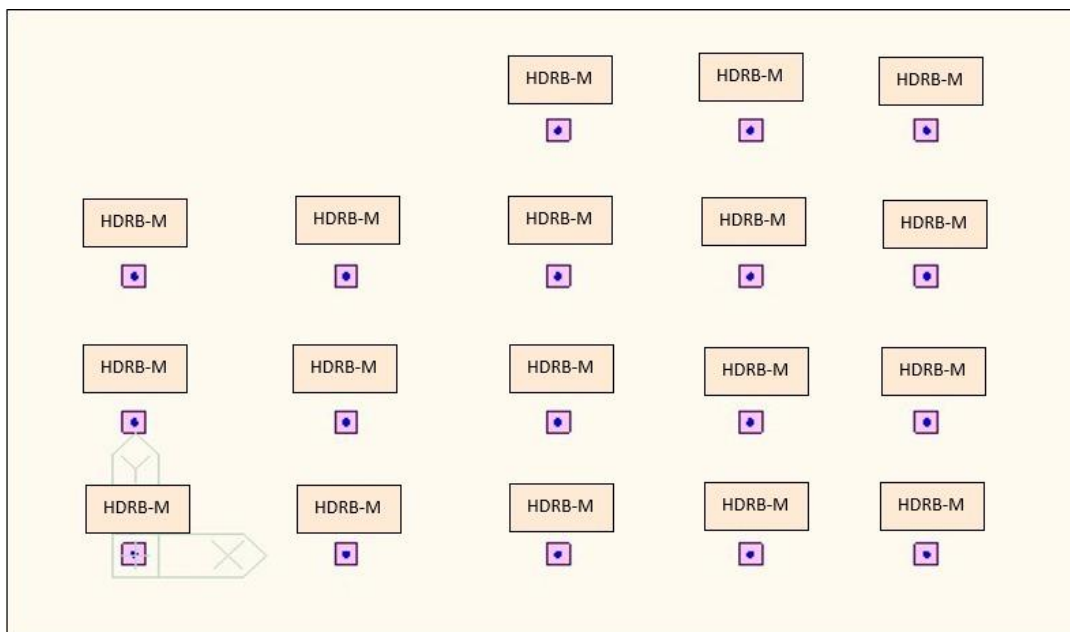
A partir del resultado obtenido por el análisis factorial es posible afirmar que la distribución optima que permite minimizar la respuesta dinámica de la edificación es la de ubicar aisladores HDRB-M en todos los apoyos de es edificación.

Se esperaba que la distribución que optimizara la respuesta dinámica de la edificación estudiada no implementara el mismo tipo de aisladores en todos los apoyos, debido a que esta presenta irregularidad en altura, lo que indica conceptualmente que los apoyos de las columnas más largas tuvieran un tipo diferente de dispositivo a de las columnas más cortas. Este resultado

pudo darse a que condicionamos la posición de los aisladores en dos opciones posibles, apoyos perimetrales o internos, sin poner en consideración la configuración estructural, por tanto, la rigidez de las columnas, esta condicionalidad sería válido si la estructura analizada fuera regular.

Figura 53

Esquema en planta de configuración óptima de aisladores



9. Conclusiones

Con el objetivo de determinar la distribución óptima de aisladores en la base de la estructura se establecieron 36 posibles combinaciones de aisladores de base de tipo HDRB (aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento) y LRB (aisladores elastoméricos con núcleo

de plomo), como resultado de variar la posición y la rigidez de estos dispositivos. A partir del análisis dinámico cronológico no lineal realizada en el software Midas Gen para cada una de las combinaciones se seleccionaron como parámetros de respuesta para la elección de la distribución optima la fuerza córtate basal, derivas y desplazamientos del último, que finalmente a través de un análisis factorial permitió llegar a las siguientes conclusiones:

El análisis factorial realizado en el software Minitab permite obtener la distribución optima de manera confiable, ya que cada uno de los parámetros de repuesta de estudio se ajustan correctamente al modelo propuesto por el software, lo cual se verifica con las gráficas de residuos y los datos estadísticos de cada uno de los modelos.

La distribución optima de aisladores para el disminuir el parámetro de fuerza cortante en la base, es ubicar aisladores LRB-L (con baja rigidez) en los apoyos perimetrales y aisladores HDRB-L (con baja rigidez) en los aisladores perimetrales. Evidenciándose una reducción en la demanda de carga sísmica, al pasar de un cortante basal en dirección X de 12840 KN cuando la edificación es de base fija a un valor de 4069,72 KN para la distribución mencionada, y en dirección Y el cortante basal es de 12932KN para la edificación de base fija, mientras que con el sistema de aislación es de 4069,72KN

El parámetro de respuesta de deriva está relacionado con el daño estructural debido al desplazamiento relativo de los entrepisos, por lo tanto, se buscó una distribución de aisladores que permitiera reducir la deriva del último piso y así tener un impacto positivo en disminuir los daños estructurales y no estructurales, dando como resultado emplear aisladores LRB-L (con baja rigidez) tanto en los apoyos perimetrales como internos. Evidenciándose con esta distribución derivas considerablemente menores en comparación en las obtenidas para la

estructura fija, en dirección X se pasó de un valor de 0,0195m a 0,0018055m, y en dirección Y de 0,0186m a 0,00225512m.

Debido a que la rigidez lateral de los aisladores es considerablemente más baja que el del resto de la estructura sabiendo que estos dispositivos disipan la energía mediante los desplazamientos, se espera que estos sean mayores en un sistema de aislación sísmica que en una base fija. Lo cual se evidencia en la distribución que busca minimizar el desplazamiento que indica que se deben emplear aisladores HDRB-H (con alta rigidez) en los apoyos perimetrales y aisladores LRB-H (con alta rigidez). Obteniendo como resultado el valor del desplazamiento en dirección X es de 0,120821m y que en base fija es de 0,01121m; en dirección Y es de 0,129842m y para base fija en esa misma dirección es de 0,01026m.

Se determinó que la distribución óptima para los tres parámetros de estudio en conjunto debe utilizar aisladores HDRB-M (con media rigidez) para todos los apoyos de la edificación. Como se evidencia en la Tabla 8 los valores de los parámetros de respuesta de fuerza córtate en la base y derivas para esta combinación están por debajo de los obtenidos para la estructura de base fija y para el caso del parámetro de desplazamiento están por encima del de base fija, tal y como se esperaba. En base a esto es posible afirmar un óptimo rendimiento del sistema de aislación sísmica en comparación a un sistema tradicional de protección sísmica.

Como se logró evidenciar en los resultados obtenidos de optimización de los parámetros individualmente el rango de rigidez de los aisladores se encuentra entre baja y media, debido a que la estructura estudiada al ser de baja altura y de ocupación normal no cuenta con altas solicitaciones que impliquen un sistema de aislación con alta rigidez. Esta premisa se evidencia también en el resultado de optimización de todos los parámetros en conjunto donde se requiere aisladores HDRB-M, es decir de rigidez media, en todos los apoyos de la edificación.

Referencias Bibliográficas

- Betancur, N., Galvis F. y Rosillo L. (junio de 2014). Experiencias Sobre Aislamiento Sísmico En Colombia. En J. Herrero (Presidencia). *VI Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE)*, Madrid, España.
- Betancur, N., y F. Galvis. (Mayo de 2015). Aislamiento Sísmico En Colombia: Caso de Estudio Puentes Cra. 44 auto-Sur Cali. *VII Congreso nacional de ingeniería sísmica*. Bogotá, Colombia.
- Diesel, T. (2020, 28 de Junio). *How are Low, Mid, and High-Rise Buildings Classified?* Diesel Commercial Group. <https://dieselcommercialgroup.com/how-are-low-mid-and-high-rise-buildings-classified/>
- Falconí, R. A., Almazán, J. L., Dechent, P., & Suárez, V. (2016). *Aisladores De Base Elastoméricos Y Fps*.
- Genatios C. y Lafuente M (2016). *Introducción Al Uso de Aisladores y Disipadores En Estructuras*. Maragno, P. ed. CAF-Banco de Desarrollo de América Latina.
- Guzmán C. (2017). Inventan Aislador Sísmico. *Revista Universidad EAFIT* 52(170): 122–25.
- Hadian, A. V., A. A. Mutalib, and S. Baharom. (2013). Seismic Behaviour of Base Isolation

- System Using Lead Rubber Bearing. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)* 65(2): 79–88.
- Lagos, E (2019). *Análisis Comparativo De La Respuesta Dinámica Entre Una Estructura Sísmicamente Aislada Con Aisladores LRB (Lead Rubber Bearing) Vs Una Estructura Convencional* (Tesis de pregrado). Universidad de Santander, Bucaramanga.
- Madera Sierra, Ingrid E. et al. (2019). Development and Experimental Behavior of HDR Seismic Isolators for Low-Rise Residential Buildings. *Engineering Structures* 183(September 2018): 894–906.
- Ministerio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010. Título A - Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente. NSR-10 Título A: 1–178.
- Mora, M., Villalba, J., y Maldonado Rondón, E. (2006). Deficiencias, limitaciones, ventajas y desventajas de las metodologías de análisis sísmico no lineal. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9), 59–74
- Mulla, C.L, (2014). *Análisis Y Diseño De Un Edificio Con Aisladores Sísmicos, Modelamiento En ETABS* (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Naeim, F. y Kelly, J. M. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. New York: John Wiley & Sons Inc.

Oviedo, A. (octubre de 2015). Protección Sísmica y Reforzamiento de Edificaciones a través de Sistemas no Convencionales. *Tercer Simposio de Ingeniería de Materiales y estructuras*. Bogotá, Colombia.

Oviedo, A. (2018, 13 de Abril). Aislamiento Sísmico de Edificaciones y Puentes, consideraciones Fundamentales de Diseño y Desempeño. *Jornadas XVII Geotécnicas y XX Estructurales*. Bogotá, Colombia.

Piscal, C. M. & López-Almansa F. (2016). “Consecuencias de La Posible Aplicación a Colombia de Las Normas Más Actuales Sobre Aislamiento Sísmico de Edificios. *Revista Internacional de ingeniería de estructuras (Septiembre)*: 415-436

Rico L. & Chio Cho G. (2012). Uso de Aisladores de Base En Puentes de Concreto Simplemente Apoyados. *Revista Tecnura* 16(34): 103–24.