

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Posgrados

Estudio comparativo de sistemas pasivos de protección sísmica para edificios

Proyecto de Investigación y Desarrollo

Daniela Alexandra Galarza Altamirano

Pablo Torres, Ph.D.

Director de Trabajo de Titulación

Trabajo de titulación de posgrado presentado como requisito para la obtención del título de Magíster en Ingeniería Civil, Mención Diseño y Construcción de Estructuras Sismo Resistentes

Quito, septiembre 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE POSGRADOS

HOJA DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Estudio comparativo de sistemas pasivos de protección sísmica para edificios

Daniela Alexandra Galarza Altamirano

Nombre del director del programa:	Fabricio Yépez
Título académico:	PhD en Ingeniería Civil
Director del programa de:	Maestría en Ingeniería Civil
Nombre del decano del colegio académico:	Eduardo Alba
Título académico:	Doctor of Philosophy
Decano del Colegio:	Colegio de Ciencias e Ingenierías
Nombre del decano del colegio de posgrados:	Hugo Burgos
Título académico:	Doctor of Philosophy

Quito, septiembre 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombre del estudiante:	Daniela Alexandra Galarza Altamirano
Código del estudiante:	00325212
C.I.:	1804988333
Lugar y fecha:	Quito, 25 de septiembre de 2023

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following graduation project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

DEDICATORIA

Eric hemos hecho todo este viaje juntos, te agradezco todo lo que has hecho por mí y por estar incondicionalmente siempre a mi lado. Sin ti no hubiera llegado hasta aquí.

A mi sobrina Sofia, el destino unió nuestras vidas y estoy agradecida por ello. Recuerda que siempre voy a estar para cuando me necesites.

A Gustavo Pérez y Nelly Martínez han sido un gran apoyo para Sofia y para mí, gracias por todo lo que han hecho por nosotras.

AGRADECIMIENTOS

A Pablo Torres, por su asesoramiento y su tiempo para el desarrollo del presente proyecto de titulación.

A Belén Vásconez coordinadora de consejería psicológica de la USFQ, por haberme brindado la ayuda y las herramientas para poder culminar esa etapa de mi carrera profesional.

A la planta docente de la maestría de ingeniería civil de la USFQ por haberme otorgado conocimientos y siempre despejar cualquier duda a lo largo del programa.

RESUMEN

La estructura para analizar está implantada en la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, con un área en planta baja de 182m², cuenta con un subsuelo y 5 plantas que estarán destinadas para uso de almacén y vivienda. El trabajo de titulación consiste en comparar tres distintos tipos de sistemas estructurales para poder determinar su desempeño sísmico,

El primer modelo por analizar es una estructura de pórticos de hormigón armado con vigas descolgadas de base fija. Las secciones son analizadas y diseñadas en base de análisis modal espectral y a la normativa ACI 318-19 y NEC-SE-HM. El segundo modelo consiste en un interfaz de aisladores elastoméricos (RB), aisladores elastomérico con núcleo de plomo (LRB) y una superestructura que fueron analizadas a partir de análisis lineales y modal espectral para determinar las dimensiones de los aisladores sísmicos y su comportamiento se verifica mediante propiedades límite. El tercer modelo es una estructura con diagonales de pandeo restringido los cuales fueron diseñados a partir de análisis estático no lineal.

Finalmente, se realiza procedimientos de análisis sísmicos no lineales como: pushover (NSP) e historia de respuesta (NLRHA), para el primer caso se utiliza el espectro de respuesta en el segundo caso se utiliza tres pares de registros sísmicos compatibles al mecanismo de falla de la implantación del proyecto, propiamente seleccionados, ajustados y escalador de acuerdo con la NEC-SE-DS. Se compara los resultados en términos de derivas y aceleraciones absolutas de piso.

Palabras clave: Aislación sísmica, disipación sísmica, diseño de base fija, análisis estático no lineal (NSP), análisis dinámico no lineal (NLRHA).

ABSTRACT

The structure to be analyzed is located in the city of Ambato, province of Tungurahua, with a ground floor area of 182m², it has one underground floor and 5 floors that will be used for warehouse and housing. The thesis consists of comparing three different types of structural systems to determine their seismic performance.

The first model to be analyzed is a reinforced concrete frame structure with suspended beams with a fixed base. The sections are analyzed and designed based on spectral modal analysis and calculated based on ACI 318-19 and NEC-SE-HM regulations. The second model consists of an interface of elastomeric isolators (RB), elastomeric isolators with lead core (LRB) and a superstructure that were analyzed from linear and modal spectral analysis to determine the dimensions of the seismic isolators and their behavior is verified through limit properties. The third model is a structure with buckling restricted braces (BRB) which were designed from nonlinear static analysis.

Finally, nonlinear seismic analysis procedures are carried out such as: pushover (NSP) and response history (NLRHA). In the second case, three pairs of seismic records compatible with the failure mechanism of the project implementation are used. The results are compared in terms of drifts and absolute floor accelerations.

Keywords: Seismic isolation, seismic dissipation, fixed base design, nonlinear static analysis (NSP), nonlinear dynamic analysis (NLRHA).

CONTENIDO

© Derechos de Autor	3
ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN	4
DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTOS	6
RESUMEN	7
Abstract	8
Contenido	9
Índice de Tablas	12
Índice de Figuras	14
Índice de Gráficas	15
1. INTRODUCCIÓN	17
1.1 Antecedentes	17
1.2 Justificación.....	18
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo principal.....	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	20
2.1 Sistemas pasivos de disipación sísmica	20
2.2 Aisladores sísmicos	24
2.2.1 Estructuración del sistema.....	24
2.2.2 Procedimientos de análisis	24
2.2.3 Procedimiento para cálculo del sistema de aislación	26
2.3 Disipación de energía	43
2.3.1 Diseño y evaluación BRBF	44
2.3.2 Estructuración BRB.....	44
2.3.3 Diagonales restringidas a pandeo, BRB.....	48
2.3.4 Prediseño de diagonales	53
3. METOLOGÍA.....	59
3.1 Datos generales	59
3.1.1 Propiedades de los materiales	59
3.1.2 Cargas gravitacionales.....	60
3.1.3 Carga sísmica	60

3.1.4	Configuración estructural.....	61
3.1.5	Definición de rótulas plásticas	66
3.2	Diseño estructura base fija	66
3.2.1	Configuración estructural.....	66
3.2.2	Secciones de diseño.....	67
3.2.3	Resultados análisis modal espectral	68
3.3	Diseño del sistema aislado	70
3.3.1	Configuración estructural.....	70
3.3.2	Secciones de diseño.....	71
3.3.3	Cargas sísmicas	72
3.3.4	Selección de amortiguamiento	73
3.3.5	Determinación de desplazamiento máximo, DM	73
3.3.6	Rigidez efectiva de los aisladores	74
3.3.7	Análisis de aisladores según su carga	75
3.3.8	Cálculo de desplazamiento máximo.....	75
3.3.9	Comprobación del desplazamiento objetivo	76
3.3.10	Cálculo del diámetro del aislador.....	76
3.3.11	Comprobación de activación del sistema.....	76
3.3.12	Cálculo de propiedades mecánicas de los aisladores LRB	77
3.3.13	Cálculo de propiedades mecánicas de los aisladores RB.....	77
3.3.14	Propiedades nominales.....	78
3.3.15	Verificación capacidad de carga	78
3.3.16	Verificación de las propiedades límites	79
3.3.17	Ubicación final de los aisladores sísmicos.....	81
3.4	Diseño de riostras de pandeo restringido	82
3.4.1	Configuración estructural.....	82
3.4.2	Secciones de diseño.....	83
3.4.3	Diseño basado en control	85
4.	ANÁLISIS DE DATOS.....	87
4.1	Análisis pushover	87
4.1.1	Curvas de capacidad.....	87
4.1.2	Derivas de piso análisis	90
4.2	Análisis historia de respuesta	94

4.2.1	Derivas de piso	94
4.2.2	Aceleración de piso	98
5.	CONCLUSIONES	103
6.	REFERENCIAS.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades de los materiales	60
Tabla 2. Definición de cargas gravitacionales	60
Tabla 3 Factores de carga sísmica	61
Tabla 4 Factores de sitio	61
Tabla 5. Factores de configuración estructural NEC-SE-DS.....	61
Tabla 6 Información de la estación	63
Tabla 7 Información de los eventos sísmicos	63
Tabla 8 Factores de escalado espectral	66
Tabla 9 Secciones de columnas	68
Tabla 10 Secciones de vigas	68
Tabla 11 Períodos estructurales	68
Tabla 12 Períodos y modos de vibración de la masa	69
Tabla 13 Secciones de columnas	71
Tabla 14 Secciones de vigas	71
Tabla 15 Períodos y modos de vibración de la masa – Sistema Aislado.....	72
Tabla 16. Rigidez efectiva inicial del sistema	74
Tabla 17 Tipo de aisladores según la carga máxima en cada aislador.....	75
Tabla 18 Comprobación de compresión en cada aislador	75
Tabla 19 Cálculo de desplazamiento máximo	76
Tabla 20 Cálculo de desplazamiento máximo	76
Tabla 21 Comprobación de activación del sistema de aislación.....	77
Tabla 22 Propiedades mecánicas aisladores LRB	77
Tabla 23 Propiedades mecánicas aisladores RB	77
Tabla 24 Desplazamiento objetivo segunda iteración	78
Tabla 25 Propiedades finales del sistema	78
Tabla 26 Verificación capacidad de carga de los aisladores.....	78
Tabla 27 Propiedades del límite del sistema.....	79
Tabla 28 Comprobación de compresión, límite superior.....	79
Tabla 29 Comprobación de compresión, límite inferior	80
Tabla 30 Secciones de columnas	84
Tabla 31 Secciones de vigas	84

Tabla 32	Períodos y modos de vibración de la masa	84
Tabla 33	Valores de la curva de capacidad-NSP-Aislación-Sentido X.....	88
Tabla 33	Valores de la curva de capacidad-NSP-Aislación-Sentido Y.....	88
Tabla 34	Resultados de derivas de piso-NSP-Aislación.....	92
Tabla 34	Resultados de derivas de piso-NLRHA-Aislación	96
Tabla 35	Resultados aceleraciones de piso - TH-NR – sentido X.....	100
Tabla 36	Resultados aceleraciones de piso - TH-LP – sentido X.....	100
Tabla 37	Resultados aceleraciones de piso - TH-SF – sentido X.....	100
Tabla 38	Resultados aceleraciones de piso - TH-NR – sentido Y.....	101
Tabla 39	Resultados aceleraciones de piso - TH-LP – sentido Y.....	101
Tabla 40	Resultados aceleraciones de piso - TH-SF – sentido Y	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Funcionamiento de estructuras con aislamiento basal.....	21
Figura 3. Composición de un LRB (Dao, 2022).....	22
Figura 1 Funcionamiento de estructuras con disipación sísmica.....	23
Figura 6. Disminución de la aceleración espectral por incorporación del AS.....	29
Figura 7. Factores de modificación de respuesta por amortiguamiento, BM (ASCE/SEI 7-16, 2018).....	30
Figura 8. Diámetros comerciales para aisladores elastoméricos, RB.....	37
Figura 9 Esquema de área reducida.....	37
Figura 10 Ilustración de un BRB.....	49
Figura 11 Mecánica de un BRB.....	51
Figura 12 Parámetros de modelado y criterios de aceptación para procedimientos no lineales – componentes de acero estructural – acciones axiales (American Society of Civil Engineers, 2013).....	55
Figura 13 Desplazamiento máximo de azotea.....	56
Figura 14 Desplazamiento máximo para 1GDL.....	57
Figura 15 Determinación del período máximo en base al desplazamiento máximo.....	58

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Disipadores de energía para controlar vibraciones de un edificio	44
Gráfica 2 Plano de rigidez.....	45
Gráfica 3 Plano de rigidez no recomendado	45
Gráfica 4 Plano de rigidez no recomendado	46
Gráfica 5 Ciclo histerético estable de un BRB	51
Gráfica 6 Esquema de un pórtico arriostrado	53
Gráfica 7 Distribución del área de un BRB	53
Gráfica 8 Factores para ductilidad global de la edificación.....	56
Gráfica 9 Área de diagonales sigue distribución de cortantes de entrepiso.....	57
Gráfica 10 Factor Alpha para desplazamiento espectral.....	57
Gráfica 11. Espectro elástico y espectro de diseño NEC.....	62
Gráfica 12 Componentes horizontales de componentes seleccionado	64
Gráfica 13 Ajuste espectral componentes sísmicos	65
Gráfica 14 Configuración estructural del sistema de base fija	67
Gráfica 15 Configuración estructural del sistema aislado	70
Gráfica 16. Espectro elástico NEC y <i>MCE</i>	72
Gráfica 17. Espectro de aceleraciones reducido por amortiguamiento.....	73
Gráfica 18. Espectro de desplazamiento reducido NEC-SE-DS	74
Gráfica 19 Desplazamiento máximo de piso (DTM-ESPECX)	80
Gráfica 20 Desplazamiento máximo de piso (DTM-ESPECY)	81
Gráfica 21 Ubicación de aisladores LRB y RB	82
Gráfica 21 Configuración estructural del sistema de disipación	83
Gráfica 24 Ubicación en elevación de BRB	86
Gráfica 24 Resultados curva de capacidad-NSP-Base fija-Sentido X.....	87
Gráfica 25 Resultados curva de capacidad-NSP-Base fija-Sentido Y.....	88
Gráfica 26 Resultados curva de capacidad-NSP-Disipación-Sentido X.....	89
Gráfica 27 Resultados curva de capacidad-NSP-Disipación-Sentido X.....	89
Gráfica 28 Resultados derivas de piso-NSP-Base fija-Sentido X	90
Gráfica 29 Resultados derivas de piso-NSP-Base fija-Sentido Y	91
Gráfica 30 Resultados derivas de piso-NSP-Aislación-Sentido X	91
Gráfica 30 Resultados derivas de piso-NSP-Aislación-Sentido Y	92
Gráfica 30 Resultados derivas de piso-NSP-Disipación-Sentido X	93

Gráfica 31 Resultados derivas de piso-NSP-Disipación-Sentido Y	93
Gráfica 32 Resultados derivas de piso-NLRHA-Base fija-Sentido X	94
Gráfica 33 Resultados derivas de piso-NLRHA-Base fija-Sentido Y	95
Gráfica 34 Resultados derivas de piso-NLRHA-Aislación-Sentido X.....	95
Gráfica 35 Resultados derivas de piso-NLRHA-Aislación-Sentido Y	96
Gráfica 36 Resultados derivas de piso-NLRHA-Disipación-Sentido X.....	97
Gráfica 37 Resultados derivas de piso-NLRHA-Disipación-Sentido X.....	97
Gráfica 38 Resultados aceleraciones de piso-NLRHA-Base fija-Sentido X.....	98
Gráfica 39 Resultados aceleraciones de piso-NLRHA-Base fija-Sentido Y	99
Gráfica 40 Resultados aceleraciones de piso-NLRHA-Aislación-Sentido X.....	99
Gráfica 41 Resultados aceleraciones de piso-NLRHA-Aislación-Sentido Y	101
Gráfica 42 Resultados aceleraciones de piso-NLRHA-Disipación-Sentido X.....	102
Gráfica 43 Resultados aceleraciones de piso-NLRHA-Disipación-Sentido X.....	102

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Desde el año 1960, con el primer código de diseño sísmico de edificios “SEAOC Blue Book” se introdujeron los objetivos de desempeño que aún se utilizan en la actualidad. Los códigos actuales permiten que la mayoría de edificaciones proporcionen seguridad de vida para el sismo máximo de diseño, desarrollando grandes ductilidades antes de colapsar, pero no garantizan la funcionalidad del edificio después del evento sísmico mayor, como consecuencia luego que un gran terremoto golpea una región urbana, las pérdidas debidas a edificios e infraestructura dañados son considerables (Almufti & Willford, 2014).

Las pérdidas producidas por los terremotos se miden en términos de costos de reparación o reconstrucción, pero también existen pérdidas indirectas por el tiempo de inactividad, la incapacidad de las personas en retomar su vida familiar y laboral. Las pérdidas afectan a las comunidades durante años e incluso décadas después de un terremoto (Almufti & Willford, 2014).

Ahora es posible diseñar edificios resilientes que luego de grandes terremotos sufrirán pocos daños con una prima de costo mínima. Esto es posible gracias al desarrollo de dispositivos de protección sísmica y al alcance computacional que permite modelar el comportamiento estructural para predecir las demandas sísmicas en estructuras, lo cual permite proteger los activos de los propietarios y la continuidad del negocio, además de brindar tranquilidad en los usuarios (Almufti & Willford, 2014).

1.2 Justificación

Los terremotos afectan al crecimiento de las sociedades e inciden en su desarrollo. La respuesta de un país durante y después de un desastre natural depende de su nivel de preparación (Genatios & Lafuente, 2016). En búsqueda de un mejor desempeño sísmico y luego de observar las limitaciones que presenta los diseños tradicionales, los ingenieros estructurales han optado por dispositivos que permitan la resiliencia estructural, ya que este comportamiento aumenta el nivel de seguridad para el usuario y la ocupación de la estructura después de un terremoto (NCh2745, 2003).

Los sistemas de protección sísmica han tenido un gran auge mundial. La aislación sísmica, tiene como objetivo desacoplar la respuesta dinámica de las estructuras de los movimientos sísmicos a través de dispositivos conocidos como aisladores de base (Tena Colunga, 2016). Por otra parte los disipadores sísmicos de energía absorben la demanda de desplazamiento ocasionado por el movimiento lateral, mientras que, la superestructura se mantiene en el rango elástico (Guerrero Bobadilla et al., 2022).

Por lo tanto, un enfoque basado en resiliencia logra estructuras más eficientes y con un mejor comportamiento ante carga lateral. El uso de tecnologías de protección sísmica combinadas con procedimientos racionales de diseño puede reducir tanto pérdidas de vidas y pérdidas económicas (Guerrero Bobadilla et al., 2022).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo principal

- Realizar un estudio comparativo de sistemas pasivos de protección sísmica para edificios de hormigón armado en base a una estructuración propuesta.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar y diseñar una estructura aporticada de hormigón armado de base fija.
- Analizar y diseñar un sistema de aislación sísmica.
- Analizar y diseñar sistema de control en base a diagonales restringidas a pandeo.
- Evaluar el efecto de incorporar sistemas de protección sísmica en la estructura en base de análisis no lineal estático (NSP) y análisis no lineal dinámico (NLRHA).
- Comparar los resultados de los distintos sistemas de protección sísmica.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Sistemas pasivos de disipación sísmica

El diseño sísmico tradicional se basa en la filosofía de que las estructuras luego de un evento sísmico eviten la pérdida de vidas a través de impedir el colapso de todo tipo de estructura (Genatios & Lafuente, 2016).

La respuesta dinámica en estructuras es difícil de predecir, más cuando estas exhiben comportamiento no lineal, debido a la incertidumbre que conlleva el fenómeno sísmico y el alcance limitado de las metodologías numéricas (Terán, 2023).

Predecir las zonas en la estructura donde se ubicará las principales fuentes de disipación de energía por acción inelástica de los materiales, permite predecir un mecanismo de falla que evite el colapso por la ocurrencia de fallas frágiles y repentinas (Genatios & Lafuente, 2016).

La inclusión de dispositivos de control de respuesta sísmica limita los daños en la estructura, contenidos y en elementos no estructurales. Los dispositivos de protección sísmica, aumentan la capacidad de disipación de energía o a su vez la disminución de energía que introduce el sismo a las estructuras lo que significa que las fuerzas de diseño puedan ser reducidas por debajo del límite elástico (Genatios & Lafuente, 2016).

2.1.1.1 Aisladores sísmicos

Durante un movimiento sísmico, los aisladores elastoméricos tienen como función transferir la menor cantidad de energía a la estructura. Los aisladores al incorporarse al sistema estructural cambian sus propiedades dinámicas, incrementan el período fundamental de vibración lo que conlleva a valores bajos en aceleraciones en el espectro sísmico. Las

deformaciones se concentran en los aisladores y producen un efecto de amortiguamiento importante que contribuye a disipación de energía (Genatios & Lafuente, 2016).

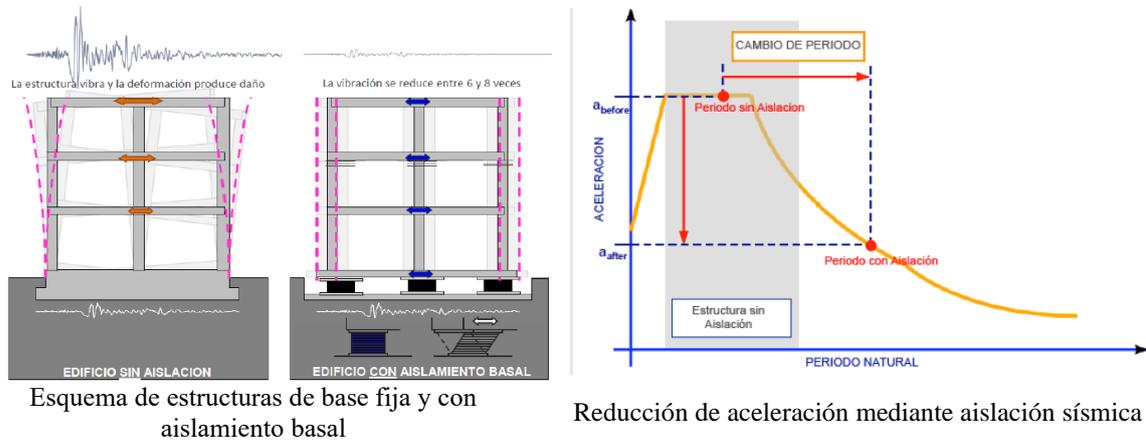


Figura 1 Funcionamiento de estructuras con aislamiento basal

Fuente: Adaptado (Genatios & Lafuente, 2016)

2.1.1.1.1 Aisladores elastoméricos, RB

Los RB, consisten en un conjunto de capas delgadas de goma natural adheridas a planchas delgadas de acero, en el proceso de fabricación, las láminas de acero y goma se intercalan horizontalmente dentro de un molde de acero que da la forma geométrica al aislador, durante el proceso de presión y temperatura, la goma se vulcaniza y adquiere su propiedad elástica (NCh2745, 2003).

El calor aplicado produce la reacción del pegamento epóxico el cual cubre las láminas de goma y acero. La adherencia debe ser más resistente que la goma misma y la falla por cizalle de un aislador debe ocurrir por ruptura de la goma antes que por una falla el pegamento goma-acero (NCh2745, 2003).

2.1.1.1.2 Aisladores con corazón de plomo, LRB

Los LRB, están formados por acero y caucho que rodean el núcleo de plomo. Estos componentes se montan entre 2 gruesas placas de acero que se conectan a la base de la columna

del edificio y los cimientos. Esta composición provee al aislador de rigidez en la dirección vertical y flexibilidad en la dirección horizontal (Dao, 2022).

Se construyen de goma de bajo amortiguamiento con un orificio central cilíndrico en el que se introduce el corazón de plomo bajo presión. Bajo deformación lateral, el plomo se deforma a un estado de corte puro y fluye a una tensión cercana a los 10 MPa a temperatura ambiente, provocando ciclos histeréticos estables, además de conseguir amortiguamiento hasta el 30%. Debido a que el plomo recristaliza a temperatura ambiente su fluencia repetida no origina falla por fatiga. Los LRB producen en forma natural un nivel de rigidez inicial importante para cargas de servicio (Genatios & Lafuente, 2016), (NCh2745, 2003).

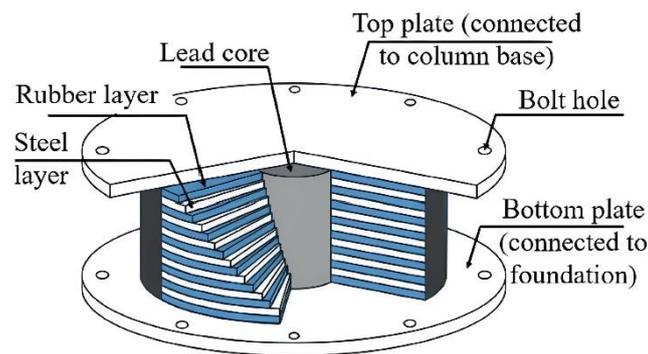
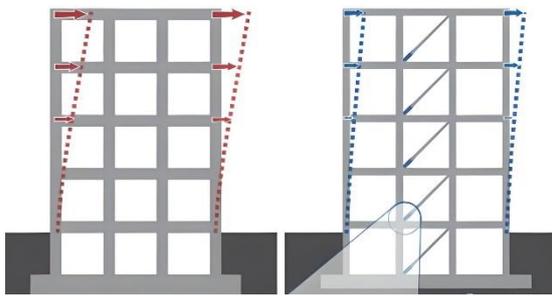


Figura 2. Composición de un LRB (Dao, 2022)

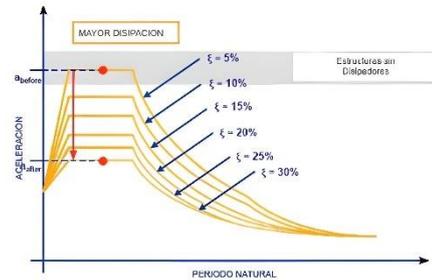
Fuente: Adaptado (Dao, 2022)

2.1.1.2 Disipadores sísmicos

Los disipadores sísmicos permiten a las estructuras deformarse elásticamente, incrementando su amortiguación y disipando la energía de un terremoto, permitiendo optimizar los elementos estructurales. Los disipadores están diseñados para accionarse y trabajar antes que los elementos estructurales alcance su estado plástico durante un evento sísmico (Neicer et al., 2022).



Esquema de estructuras de base fija y con disipación sísmica



Reducción de aceleración disipación sísmica

Figura 3 Funcionamiento de estructuras con disipación sísmica

Fuente: Adaptado (Genatios & Lafuente, 2016)

La función de los disipadores de energía permite que la estructura sea sometida a una reducción de demanda sísmica y que la concentración del daño se de en elementos diseñados para entrar en el rango inelástico. Si los dispositivos resultan dañados después de un sismo pueden ser reemplazados y la estructura recuperara su funcionalidad en el menor tiempo posible (Genatios & Lafuente, 2016).

2.1.1.2.1 Diagonales de pandeo restringido, BRB

Los BRB fluyen tanto en compresión como en tracción. Fabricado con dos componentes desacoplados: para resistir la carga lateral es el núcleo de acero y relleno de hormigón que evita el pandeo. En el proceso de fabricación se debe garantizar que los 2 componentes permanezcan separados para evitar la acción compuesta que cambiaría el comportamiento deseado (Robinson, 2009).

Los BRB se colocan en un pórtico arriostrado concéntricamente, que así se convierte en un sistema resistente a fuerzas laterales de pórticos arriostrado con restricción de pandeo (BRBF). Los sistemas BRBF presentan un desempeño cíclico estable y gran capacidad de ductilidad. Varias pruebas han sugerido que los BRB pueden incluso ser capaces de soportar múltiples eventos sísmicos sin fallar (Robinson, 2009).

2.2 Aisladores sísmicos

2.2.1 Estructuración del sistema

2.2.1.1 Modelo de aislación sísmica

El modelo estructural del interfaz de aislación debe representar efectos de la respuesta tridimensional del sistema: torsión en planta; correcta distribución de cargas verticales en los aisladores; interacción bidireccional. También debe considerar la: variabilidad de las propiedades de los aisladores; mayor rigidez del sistema de aislación en la determinación de las fuerzas de diseño de la superestructura; y la menor rigidez posible en la deformación del sistema de aislación (NCh2745, 2003).

2.2.1.2 Modelo de la superestructura

La superestructura se modela con el mismo detalle que un edificio de base fija; permaneciendo en el rango elástico y por lo tanto su rigidez y resistencia debe ser consistente con este comportamiento, el nivel de detalle de la superestructura debe permitir evaluar las deformaciones en sus elementos y la distribución de esfuerzos (NCh2745, 2003).

2.2.2 Procedimientos de análisis

2.2.2.1 Análisis lineal equivalente

El sistema de aislación puede ser representado por un modelo lineal equivalente. Las propiedades de este modelo son la rigidez secante del aislador. Los modelos lineales equivalentes son utilizados solo en el diseño de aisladores elastoméricos ya que sus propiedades no dependen de la carga axial (NCh2745, 2003).

2.2.2.2 Análisis modal espectral

Se utiliza para un diseño preliminar de la estructura y provee una verificación simple de modelos más sofisticados, la mayor ventaja de un análisis de respuesta espectral con

superestructura flexible es que permite calcular de manera simple la distribución de fuerzas y deformaciones en los elementos. El análisis de respuesta espectral se recomienda para estructuras que tienen (NCh2745, 2003):

1. Superestructura flexible.
2. Superestructura de planta irregular
3. Aisladores con una relación constitutiva fuerza deformación representada por un modelo lineal equivalente.

El análisis no lineal de respuesta en el tiempo se utiliza en los siguientes casos (NCh2745, 2003):

- Sistemas con una razón de amortiguamiento modal mayor a un 30%.
- Sistemas sin capacidad auto centrante.
- Sistemas cuya deformación se espera exceda la distancia disponible de separación con estructuras adyacentes.
- Sistemas que son dependientes de la velocidad de deformación.
- Sistemas que experimentan levantamiento y/o impacto.

2.2.2.2.1 *Comprobaciones del análisis modal espectral*

Se puede utilizar análisis modal espectral cuando se cumplan las siguientes condiciones (ASCE/SEI 7-16, 2018)

1. La estructura se encuentre implantada a más de 10 km de todas las fallas activas.
2. La estructura está implantada en suelo tipo A, B, C, o D.

El período efectivo de la estructura aislada en el desplazamiento máximo, D_M , es menor o igual a 5s.

La estructura debajo del interfaz de aislación es menor o igual a cuatro pisos (19.8m) en elevación estructural medida desde el nivel de base. De igual manera no debe presentar irregularidades estructurales.

2.2.2.3 Análisis de respuesta en el tiempo

La respuesta dinámica no lineal de la estructura queda controlada por el sistema de aislación, se permite que el modelo de análisis sea simple e ignore, la flexibilidad de la superestructura. Ahorrando recursos computacionales y entregando resultados más precisos. Una vez concluido el proceso de diseño se verifica en conjunto el sistema de aislación y la superestructura mediante análisis no lineal para un conjunto de sismos (NCh2745, 2003).

El modelo matemático de la estructura incluye: el sistema de aislamiento, el sistema resistente a fuerzas sísmicas y otros elementos estructurales. El sistema de aislamiento debe modelarse con suficiente detalle para capturar el siguiente comportamiento (ASCE/SEI 7-16, 2018):

- Distribución espacial de las unidades.
- Traslación, en ambas direcciones horizontales, y torsión de la estructura por encima del sistema de aislamiento, considerando la ubicación más desfavorable de la masa excéntrica.
- Fuerzas de volcamientos y elevación en unidades aisladoras individuales.
- Efectos de carga vertical, carga bilateral.

2.2.3 Procedimiento para cálculo del sistema de aislación

2.2.3.1 Respuesta sísmica

2.2.3.1.1 Definición del espectro elástico de diseño

La curva para espectro de respuesta se desarrolla de la siguiente manera de acuerdo con la sección 3.3 de la NEC-SE-DS:

1. Para períodos menores a T_0 , la aceleración de la respuesta espectral de diseño, S_a , se obtendrá a partir:

$$S_a = z * F_a \left(1 + (\eta - 1) \frac{T}{T_0} \right)$$

Ec. 1: NEC-SE-DS (Sección 3.3)

2. Para períodos mayores o iguales a T_0 , y menores a T_c , la aceleración de la respuesta espectral de diseño, S_a , se obtendrá a partir:

$$S_a = \eta * z * F_a$$

Ec. 2: NEC-SE-DS (Sección 3.3)

3. Para períodos mayores a T_c , la aceleración de la respuesta espectral de diseño, S_a , se obtendrá a partir:

$$S_a = \eta * z * F_a \left(\frac{T_c}{T} \right)^r$$

Ec. 3: NEC-SE-DS (Sección 3.3)

Donde

η = razón entra la aceleración espectral S_a ($T=0,1s$) y el PGA para el período de retorno seleccionado. Depende la de región

$\eta = 1.80$ Provincias de la Costa (excepto Esmeraldas)

$\eta = 2.48$ Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos

$\eta = 2.60$ Provincias del Oriente

F_a = coeficientes de ampliación de suelo en la zona de período corto.

F_d = coeficientes de amplificación del suelo de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca.

F_s = coeficientes de amplificación del suelo, considerando el comportamiento no lineal del suelo y la degradación del período del sitio.

S_a = espectro de respuesta elástico de aceleraciones dependientes de período o modo de vibración de la estructura.

T = período fundamental de vibración de la estructura.

T_0 = período de vibración límite inferior en el espectro sísmico elástico de aceleraciones.

T_c = período de vibración límite superior en el espectro sísmico elástico de aceleraciones.

Z = aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración.

r = factor usado en el espectro de diseño elástico, cuyos valores dependen de la ubicación geográfica del proyecto

$r = 1$ para todos los suelos, con excepción del suelo tipo E

$r = 1.5$ Para tipo de suelo E

2.2.3.1.2 Definición del espectro máximo considerado, MCE.

El espectro de respuesta de terremoto máximo considerado en función del riesgo, MCE, se determina multiplicando 1.5 por el espectro de respuesta de diseño según la ASCE-SEI 7-16, en este proyecto se aplicará para el sismo máximo posible de 1.2 según la norma chilena: NCh2745 debido a que los espectros de diseño deben ser racionales para viabilizar la tecnología y no hacer ineficientes el análisis y diseño de los edificios (Retamales, 2023)

2.2.3.1.3 Espectro elástico de diseño en desplazamientos

Para la definición de los desplazamientos espectrales elásticos para diseño, correspondiente al nivel del sismo de diseño, se calculará el espectro elástico de diseño de desplazamientos $S_d (m)$, definido a partir a partir del espectro de aceleraciones, mediante las siguientes fórmulas:

$$S_d = S_a * g \left(\frac{T}{2 * \pi} \right)^2 \text{ para } 0 \leq T \leq T_L$$

$$S_d = S_a * g \left(\frac{T}{2 * \pi} \right)^2 \text{ para } T > T_L$$

Ec. 5: NEC-SE-DS (Sección 3.3.2)

$$T_L = 2.4 * F_d$$

Ec. 6: NEC-SE-DS (Sección 3.3.2)

Donde

g = aceleración de la gravedad.

S_d = espectro elástico de diseño de desplazamiento (definido para una fracción del amortiguamiento respecto al crítico igual a 5%. Depende del período o modo de vibración de la estructura.

2.2.3.1.4 Espectros reducidos de aceleración y desplazamiento

En la Figura 4, se muestra la variación en la acción espectral en estructuras de base fija y con aislamiento. T_1 , representa el periodo de vibración de la estructura de base fija, T_2 , es el periodo de vibración de la estructura aislada, lo que conlleva a una carga sísmica inferior (cortante basal). Adicionalmente, los espectros de fuerzas se reducen por el efecto del amortiguamiento introducido por el aislador (Genatios & Lafuente, 2016)

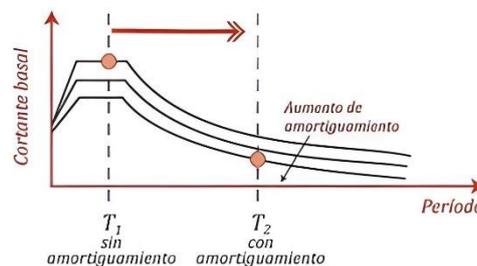


Figura 4. Disminución de la aceleración espectral por incorporación del AS

Fuente: Adaptado (Genatios & Lafuente, 2016)

El factor de reducción de respuesta por amortiguamiento β_M , se puede obtener de manera conservadora a partir de la Figura 5.

Effective Damping, β_M (percentage of critical) ^{a,b}	B_M Factor
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

^aThe damping factor shall be based on the effective damping of the isolation system determined in accordance with the requirements of Section 17.2.8.6.
^bThe damping factor shall be based on linear interpolation for effective damping values other than those given.

Figura 5. Factores de modificación de respuesta por amortiguamiento, B_M (ASCE/SEI 7-16, 2018)

2.2.3.2 Desplazamientos laterales mínimos requeridos para el diseño

2.2.3.2.1 Desplazamiento máximo

El sistema de aislamiento debe diseñarse y construirse, como mínimo, para el desplazamiento máximo, D_M , usando las propiedades nominales en la dirección más crítica de la respuesta horizontal (ASCE/SEI 7-16, 2018),(Retamales, 2023):

$$D_M = \frac{g * S_{M1} * T_M}{4 * \pi^2 * \beta_M}$$

Ec. 7: ASCE - SEI 7-16 (17.5-1)

Donde

g = aceleración causada por la gravedad.

S_{M1} = parámetro de aceleración espectral amortiguada.

T_M = período efectivo de la estructura aislada en el desplazamiento máximo en la dirección bajo consideración.

β_M = Coeficiente numérico para el amortiguamiento efectivo del sistema aislado en el desplazamiento máximo.

El resultado obtenido del análisis modal espectral, para los desplazamientos en el centro de masas, da como resultado valores cercanos al desplazamiento objetivo obtenido del espectro de desplazamientos reducido.

2.2.3.2.2 *Período efectivo en el desplazamiento máximo*

El período efectivo de la estructura aislada, T_M , en el desplazamiento máximo, D_M , es determinado usando las propiedades del límite superior e inferior (ASCE/SEI 7-16, 2018).

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_M * g}}$$

Ec. 8: ASCE - SEI 7-16 (17.5-2)

Donde

W = peso sísmico efectivo de la estructura por encima de la interfaz de aislamiento.

k_M = rigidez efectiva de la estructura aislada en el máximo desplazamiento, D_M .

2.2.3.2.3 *Amortiguamiento efectivo*

El valor de la amortiguación viscosa equivalente correspondiente a la energía disipada durante la respuesta cíclica del sistema de aislamiento (ASCE/SEI 7-16, 2018).

Para garantizar una respuesta óptima de los aisladores el valor de amortiguamiento debe estar entre (Retamales, 2023):

$$\beta_D = 15\% - 20\%$$

Los amortiguamientos mayores al 30% retrasan la activación del sistema de aislación, volviendo ineficiente al sistema y a su vez genera que las personas dentro del edificio sienta en sismo (Retamales, 2023).

A mayor incremento de amortiguamiento en el sistema, menor demanda de deformación sobre el sistema de aislación, implicando una reducción de la fuerza de corte que actúa sobre la superestructura y la superestructura (NCh2745, 2003).

Del objetivo de diseño depende el amortiguamiento (deformaciones y aceleraciones), un aumento excesivo del amortiguamiento conduce a mayores aceleraciones de piso que produce deficiencias en los contenidos de la estructura (NCh2745, 2003).

El amortiguamiento efectivo controla el desplazamiento lateral, a mayor amortiguamiento menor desplazamiento, pero a mayor amortiguamiento mayor es el nivel de activación del sistema de aislamiento (Retamales, 2023)

2.2.3.2.4 *Desplazamiento máximo total DTM*

De los elementos del sistema de aislamiento que incluye tanto el desplazamiento adicional causado por la torsión real y accidental calculada a partir de la distribución espacial de la rigidez lateral del sistema de aislamiento y la ubicación más desventajosa de la masa excéntrica (ASCE/SEI 7-16, 2018).

$$D_{TM} = 1.15 * D_M$$

Para el cálculo del DTM, se utiliza el análisis modal espectral, en donde se incluye la excitación simultánea del modelo para el 100% del movimiento del suelo en la dirección crítica y el 30% del movimiento del suelo en la dirección perpendicular horizontal. El DTM es el resultado de la suma vectorial de los dos desplazamientos ortogonales (ASCE/SEI 7-16, 2018).

$$S_x + 0.30S_y$$

$$S_y + 0.30x$$

Las separaciones mínimas entre la estructura aislada y los muros de contención circundantes u otras obstrucciones fijas no deben ser menores que el desplazamiento máximo total (ASCE/SEI 7-16, 2018).

2.2.3.3 Rigidez efectiva

2.2.3.3.1 Rigidez efectiva horizontal

$$K_{eff-ht} = \frac{4 * \pi^2 * W}{T^2 * g}$$

Ec. 9. Rigidez efectiva horizontal

Donde

W = Peso de la estructura

$$K_{eff-hi} = \frac{K_{eff-t}}{\# \text{ de aisladores}}$$

Ec. 10. Rigidez efectiva horizontal para cada AS

2.2.3.3.2 Rigidez vertical

$$K_{eff-vt} = \frac{4 * \pi^2 * W}{\left(\frac{1}{f_v}\right)^2 * g}$$

Ec. 11. Rigidez efectiva vertical

La rigidez vertical mínima del sistema de aislación debe ser tal que la frecuencia de vibración propia de la estructura aislada en sentido vertical, suponiendo una superestructura rígida, debe ser mayor que $10 H_z$ (NCh2745, 2003).

$$K_{eff-vi} = \frac{K_{eff-vt}}{\# \text{ de aisladores}}$$

Ec. 12. Rigidez efectiva vertical para cada AS

2.2.3.4 Fuerzas laterales mínimas requeridas para el diseño

Todos los elementos estructurales deberán proporcionar continuidad por encima de la interfaz de aislamientos y deberán tener la resistencia y ductilidad adecuadas para transmitir fuerzas dentro de la estructura (ASCE/SEI 7-16, 2018).

2.2.3.4.1 Sistema de aislamiento y elementos estructurales por debajo del nivel base

El sistema de aislamiento, la cimentación y todos los elementos estructurales por debajo del nivel de la base deben diseñarse y construirse para soportar una fuerza sísmica lateral mínima, V_b , usando todos los requisitos aplicables para una estructura no aislada, utilizando las propiedades nominales del sistema (ASCE/SEI 7-16, 2018), (Retamales, 2023).

$$V_b = k_M * D_M$$

k_M = rigidez efectiva del sistema de aislación en el desplazamiento máximo D_M .

D_M = máximo desplazamientos en el centro de rigidez des sistema de aislación en la dirección bajo consideración.

2.2.3.4.2 Elementos estructurales por encima del nivel base

La superestructura se diseña y construye usando todos los requisitos aplicables para una estructura no aislada para una fuerza cortante mínima, V_s , usando las propiedades nominales (ASCE/SEI 7-16, 2018), (Retamales, 2023).

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_I}$$

Ec. 13: ASCE - SEI 7-16 (17.5-6)

Donde

R_I = factor de reducción de resistencia sísmica.

V_{st} = fuerza de diseño sísmica lateral total no reducida o cortante sobre elementos por encima del nivel de la base.

El factor, R_I , será 3/8 del valor R, donde el valor máximo=2, y el valor mínimo 1.

La fuerza sísmica lateral total no reducida o cortante sobre los elementos por encima del nivel de la base se determinará utilizando las propiedades utilizando las propiedades nominales (ASCE/SEI 7-16, 2018), (Retamales, 2023).

$$V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{1-2.5\beta_m}$$

Ec. 14: ASCE - SEI 7-16 (17.5-7)

Donde

W = peso efectivo de la estructura sobre la interfaz de aislación.

W_s = peso efectivo de la estructura sobre la interfaz de aislación excluyendo el peso sísmico efectivo del nivel base. W_s , será considerado igual a W , cuando la distancia desde el tope del aislador a la parte baja de la base exceda a 0.90m.

Límites de V_s : el valor de V_s no se debe tomar a menos que:

- La fuerza sísmica lateral requerida para una estructura de base fija del mismo peso sísmico efectivo, W_s , y un período igual al período del sistema de aislamiento usando propiedades nominales.
- La fuerza cortante base que corresponde a la carga de viento de diseño factorizada.
- La fuerza sísmica lateral, V_{st} , con V_b , igual a la fuerza requerida para activar completamente el sistema de aislación.

2.2.3.5 Combinaciones de carga vertical de la unidad aisladora

La carga vertical promedio, mínima y máxima en cada aislador se calculará a partir de la aplicación de fuerzas sísmicas horizontales, causadas por movimientos del suelo, Se clasifica los aisladores según la carga máxima. (ASCE/SEI 7-16, 2018):

$$P_o = D + 0.5L$$

Ec. 15. Combinación de carga vertical 1

$$P_{max} = (1.2 + 0.2S_{MS})D + L + |E_M|$$

Ec. 16. Combinación de carga vertical 2

$$P_{min} = (0.9 - 0.2S_{MS})D - |E_M|$$

Ec. 17. Combinación de carga vertical 3

Para el análisis modal espectral, se ingresa el espectro reducido por amortiguamiento, la fuerza cortante mínima aplicada en la superestructura y la rigidez efectiva para cada aislador, se comienza la primera interacción, en donde se determina las fuerzas de diseño para cada aislador.

2.2.3.6 Prediseños aisladores LRB/RB

2.2.3.6.1 Cálculo área elastómero

En base a la tensión admisible se calcula el área de los aisladores, la fuerza máxima que se puede aplicar a un elastómero es de 15 a 17 MPa, valores mayores no tienen rigidez horizontal, va a producir vibraciones y generar molestias en el edificio (Retamales, 2023).

Tensión admisible = $\sigma = 17 \text{ MPa}$

$$A = \frac{P_{max}}{\sigma}$$

Ec. 18 Cálculo área elastómero

Se determina el área de aisladores en base a medidas de catálogo.

2.2.3.6.2 Selección área transversal de aisladores elastómeros

DEVICE SIZE				MOUNTING PLATE DIMENSIONS					
Isolator Diameter, D_i (mm)	Isolator Height, H (mm)	Number of Rubber Layers, N	Lead Diameter D_l (mm)	L (mm)	t (mm)	Hole Qty.	Hole Φ (mm)	A (mm)	B (mm)
305	125-280	4-14	0-100	355	25	4	27	50	-
355	150-305	5-16	0-100	405	25	4	27	50	-
405	175-330	6-20	0-125	455	25	4	27	50	-
455	175-355	6-20	0-125	510	25	4	27	50	-
520	205-380	8-24	0-180	570	25	8	27	50	50
570	205-380	8-24	0-180	620	25	8	27	50	50
650	205-380	8-24	0-205	700	32	8	27	50	50
700	205-430	8-30	0-205	750	32	8	33	65	75
750	230-455	8-30	0-230	800	32	8	33	65	75
800	230-510	8-33	0-230	850	32	8	33	65	75
850	230-535	8-35	0-255	900	38	12	33	65	95
900	255-560	9-37	0-255	955	38	12	33	65	95
950	255-585	10-40	0-280	1005	38	12	33	65	95
1000	280-635	11-40	0-280	1055	38	12	40	75	115
1050	305-660	12-45	0-305	1105	44	12	40	75	115
1160	330-760	14-45	0-330	1205	44	12	40	75	115
1260	355-760	16-45	0-355	1335	44	16	40	75	115
1360	405-760	18-45	0-380	1435	51	16	40	75	115
1450	430-760	20-45	0-405	1525	51	20	40	75	115
1550	455-760	22-45	0-405	1625	51	20	40	75	115

Figura 6. Diámetros comerciales para aisladores elastoméricos, RB.

2.2.3.6.3 Cálculo área reducida

$$A_{red} = \frac{2Ar}{\pi D_e^2} \left[D_e^2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{D_e^2 - D_{TM}^2}}{D_e} \right) - D_{TM} \sqrt{D_e^2 - D_{TM}^2} \right]$$

Ec. 19 Cálculo área reducida

Comprobación:

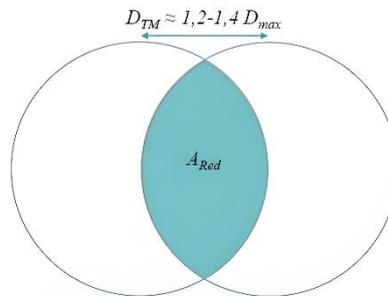


Figura 7 Esquema de área reducida

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

$$A_{red} > 0.5A_r$$

$$D_{TM} \approx 1.2 - 1.4 D_{max}$$

2.2.3.6.4 Rigidez post fluencia del aislador

0.3MPa flexibiliza el sistema de aislación, hace más eficiente, genera mayor dispersión en los ensayos de laboratorio. Se recomienda no usar módulos de corte de 0.38 – 0.4 MPa,

existen módulos de corte de 1MPa, pero mientras más grande es el módulo de corte del material más baja es su deformación de rotura. Módulos de corte de 0.4 MPa llega al 700% de la deformación de rotura (Retamales, 2023)

Módulo de corte de la goma

$G_r=0.4$ MPa

$$K_d = \frac{G_r * A_r}{h_r}$$

Ec. 20 Rigidez post fluencia

Donde

G_r = módulo de corte de la goma.

A_r = área de la goma adherida al acero.

h_r = altura total de goma en el aislador.

Aisladores sísmicos muy altos tienen baja capacidad de carga (Retamales, 2023)

2.2.3.6.5 Resistencia característica, Q_d

Para un aislador con núcleo de plomo el valor de Q_d , representa la fluencia del plomo y se consigue con la siguiente expresión:

$$Q_d = A_L * \tau_{py}$$

Ec. 21 Resistencia característica

Donde

A_L = Área de la sección transversal del núcleo de plomo

τ_{py} = Esfuerzo de corte del plomo a nivel de fluencia

$$\tau_{py} = 8MPa$$

El núcleo de plomo fluye a una tensión de corte de 8MPa. Cuando el plomo está en un estado de alta pureza, la fluencia es altamente predecible y siempre va a fluir entre 7-8MPa, y al fluir comienza el comportamiento histerético y es muy predecible su comportamiento (Retamales, 2023).

Se coloca un porcentaje de aisladores con núcleo de plomo y los demás puramente elastoméricos, con el fin de dejar la activación del sistema lo más bajo posible para que la fuerza requerida para activar el sistema de aislación no se mayo que el 1-2% del peso sísmico que la estructura (Retamales, 2023).

2.2.3.6.6 *Rigidez efectiva para cada aislador perimetral*

$$K_{effM} = K_d + \frac{Q_d}{D_M}$$

Ec. 22 Rigidez efectiva para cada aislador

2.2.3.6.7 *Rigidez post fluencia*

$$K_u = 10K_d$$

Ec. 23 Rigidez post fluencia

2.2.3.6.8 *Fuerza de fluencia*

$$F_y = \Delta_y * K_u$$

Ec. 24 Fuerza de fluencia

2.2.3.6.9 *Desplazamiento de fluencia*

$$\Delta_y = \frac{Q_d}{9 * K_d}$$

Ec. 25 Desplazamiento de fluencia

2.2.3.6.10 *Energía disipada en un ciclo efectuado a desplazamiento máximo.*

Fuerza de fluencia cuando el aislador empieza a trabajar en el rango no lineal.

$$EDC_M = 4Q_d(D_M - \Delta_y)$$

Ec. 26 Energía disipada en cada ciclo

2.2.3.6.11 Amortiguamiento del sistema

$$\beta_M = \frac{EDC_M}{(2 * \pi * K_{effM} * D_M^2)}$$

Ec. 27 Amortiguamiento total del sistema

2.2.3.6.12 Rigidez efectiva total del sistema

$$K_{effM}^T = \sum K_{effM}^i$$

2.2.3.6.13 Amortiguamiento efectivo total del sistema

$$\beta_{effM}^T = \frac{\sum \beta_{effM}^i * K_{effM}^i}{K_{effM}^T}$$

2.2.3.7 Restricciones geométricas LRB

2.2.3.7.1 Relación diámetros

Si la relación del diámetro exterior y el diámetro del núcleo de plomo es mayor a 6, entonces el corazón de plomo es muy pequeño en relación con el diámetro exterior del aislador, si esto sucede el aislador en vez de fluir a corte, rotaría. En caso contrario, si el corazón de plomo es muy grande la capacidad de carga del aislador sería menor (Retamales, 2023).

$$3.3 < \frac{D_e}{D_l} < 6$$

Ec. 28 Verificación de relación de diámetros

2.2.3.8 Verificación aisladores LRB / RB

2.2.3.8.1 Verificación de capacidad de carga

$$S = \frac{D_e}{4 * t_r}$$

Ec. 29 Factor de forma

$$P_{cr} = \frac{\pi * G_r * S * D_e * A_{red}}{\sqrt{8} * h_r}$$

Ec. 30 Capacidad de carga

2.2.3.8.2 Verificación de deformaciones en el elastómero

$$\frac{D_{TM}}{h_r} + \frac{P_r}{G * A_r * S} \leq \frac{0.85 * \varepsilon_u}{1.5}$$

Ec. 31 Verificación caso sísmico

$$\frac{D_{TM}}{h_r} + \frac{P_r}{G * A_r * S} + \frac{0.375 * B^2 \theta}{t_r * h_r} \leq \frac{0.85 * \varepsilon_u}{1.3}$$

Ec. 32 Verificación caso estático

P_r , Corresponde a la carga máxima en el aislador

$\varepsilon_u = 600\%$, corresponde a la elongación de rotura mínima de diseño de la placa de goma

θ , Rotación del aislador

B , Diámetro de las placas de refuerzo

2.2.3.8.3 Espesor de las placas de refuerzo de los aisladores:

$$t_{s,min} = \frac{K_p * P_{max} * (t_{r1} + t_{r2}) K_h * \gamma_m}{A_r * D_0 * f_y} \geq 2mm$$

Ec. 33 Espesor de placas de refuerzo

Donde

K_p , Factor de corrección = 1.3

t_{r1}, t_{r2} , espesor láminas de elastómero en cada cara de la placa de acero

K_h , factor para las tensiones de tracción inducidas en la placa de refuerzo, igual a 1 para placas sin perforaciones y 2 para placas con perforaciones

γ_m , Factor de seguridad parcial, igual a 1

F_y , esfuerzo de fluencia de la placa de acero

Se recomienda colocar aisladores con núcleo de plomo LRB en el perímetro de la estructura para proporcionar a la edificación rigidez torsional.

2.2.3.9 Propiedades delimitadoras del sistema de aislamiento

Al establecer la ubicación y las propiedades nominales de los aisladores en el sistema estructural, se debe verificar si los elementos de los aisladores son capaces de trabajar al modificar sus propiedades efectivas ante un límite superior (Upper bound-UB), e inferior (Lower bound-LB).

Los factores de modificación de las propiedades máximo y mínimo (λ) se utilizarán para tomar en consideración la variación de los parámetros de diseño nominales de cada aislador que contemplen los efectos del calentamiento causado por el movimiento dinámico cíclico, tasa de carga, raspado y recuperación, variabilidad en las propiedades del soporte de producción, temperatura, envejecimientos, exposición ambiental y contaminación (ASCE/SEI 7-16, 2018).

Cuando se aplican los factores de modificación de las propiedades (λ) al diseño nominal, el diseño nominal debe envolver la respuesta histórica para el rango de demandas desde 0.5DM hasta el desplazamiento máximo DM (ASCE/SEI 7-16, 2018).

$$\lambda_{max} = \left(1 + \left(0.75 * (\lambda_{(ae,max)} - 1) \right) \right) * \lambda_{(test,max)} * \lambda_{(spec,max)} \geq 1.8$$

Ec. 34: ASCE - SEI 7-16 (17.2-1)

$$\lambda_{max} = \left(1 - \left(0.75 * (1 - \lambda_{(ae,min)}) \right) \right) * \lambda_{(test,min)} * \lambda_{(spec,min)} \geq 0.6$$

Ec. 35: ASCE - SEI 7-16 (17.2-2)

Donde

$\lambda_{(ae,max)}, \lambda_{(ae,min)}$ = factor de modificación para el cálculo del valor máximo y mínimo de la propiedad de interés del aislador, toma en cuenta los efectos del envejecimiento y las condiciones ambientales.

$\lambda_{(test,max)}, \lambda_{(test,min)}$ = factor de modificación para el cálculo del valor máximo y mínimo de la propiedad de interés del aislador, toma en cuenta el calentamiento, la tasa de carga y el raspado.

$\lambda_{(spec,max)}, \lambda_{(spec,min)}$ = factor de modificación para el cálculo del valor máximo y mínimo de la propiedad de interés del aislador, se utiliza para tener en cuenta la variación de fabricación permisible en las propiedades promedio de un grupo de aisladores del mismo tamaño.

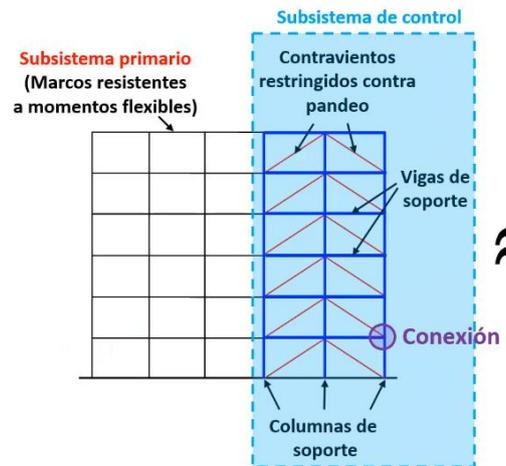
2.2.3.9.1 Análisis límite superior y límite inferior

Se desarrolla un modelo matemático del comportamiento de deflexión de la fuerza del límite superior de cada tipo de componente del sistema de aislamiento. Los dispositivos histeréticos se deben modelar usando los valores máximos de las propiedades del aislador calculados usando los factores de modificación (ASCE/SEI 7-16, 2018).

2.3 Disipación de energía

La base del diseño de una estructura con dispositivos de control sísmico es concentrar la no linealidad en estos dispositivos ya que dan una respuesta estable, y como no resisten carga lateral al fallar en un sismo la estabilidad global del sistema estructural no se ve comprometida (Terán, 2023), (Watanabe, 2018).

En un planteamiento de control de desplazamientos casi siempre son la rigidez lateral y la capacidad extra de disipación de energía, que se usan para controlar la respuesta dinámica del sistema estructural (Terán, 2023).



Gráfica 1 Disipadores de energía para controlar vibraciones de un edificio

Fuente: Adaptado (American Society of Civil Engineers, 2013)

Al mantener el sistema estructural gravitacional en su rango elástico, su comportamiento dinámico es mejor y evita falla prematuras (Terán, 2023).

2.3.1 Diseño y evaluación BRBF

Son sistemas de pórticos arriostrados concéntricamente con diagonales restringidas a pandeo (BRB) (American Society of Civil Engineers, 2013).

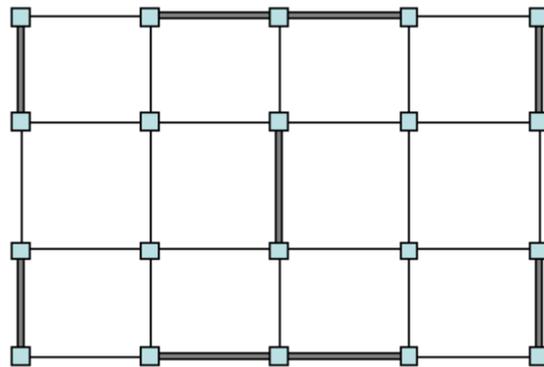
Los sistemas BRBF deben evaluarse y diseñarse como sistemas basados en capacidad en conjunto con: el sistema BRB, conexiones y miembros adyacentes diseñados para resistir las fuerzas máximas desarrolladas en el núcleo de acero (American Society of Civil Engineers, 2013).

La evaluación de los BRBF deben considerar la rigidez rotacional y las limitaciones de deformación de las conexiones de las placas de refuerzo del sistema BRB (American Society of Civil Engineers, 2013).

2.3.2 Estructuración BRB

Una ubicación correcta de los disipadores en el plano de rigidez debe considerar los siguientes aspectos (Terán, 2023):

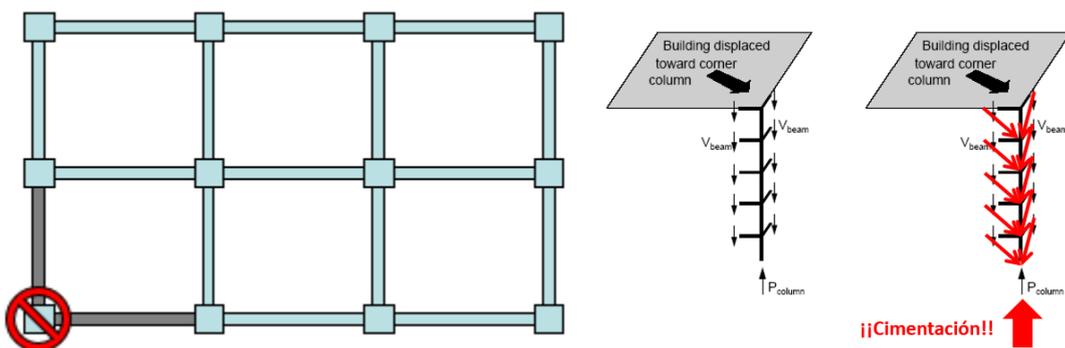
- La estructuración debe tener características simples.
- Corregir irregularidades de masa, corregir o evitar irregularidades estructurales.
- No utilizar una columna como soporte de dos elementos rígidos concurrentes en 2 direcciones diferentes.
- No concentrar sismo resistencia en unos cuantos elementos de muy elevada rigidez.



Gráfica 2 Plano de rigidez

Fuente: Adaptado (Terán, 2023)

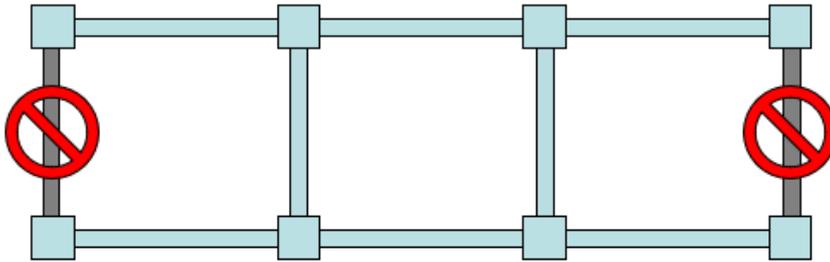
En la Gráfica 3, se analiza las implicaciones que conllevaría ubicar 2 riostras en una columna esquinera, ya que los esfuerzos concentrados en la columna esquinera afectarían a su respectiva cimentación (Terán, 2023).



Gráfica 3 Plano de rigidez no recomendado

Fuente: Adaptado (Terán, 2023)

En la Gráfica 4, se observa una estructuración no recomendada debido a que cambia el sistema de piso de rígido a flexible, produciendo desviación de la tensión en el diafragma flexible, en un sistema de piso rígido, la concentración del esfuerzo se produce en la conexión a los elementos verticales (Terán, 2023).



Gráfica 4 Plano de rigidez no recomendado

Fuente: Adaptado (Terán, 2023)

2.3.2.1 Tipos de estructuración BRB

Los BRB pueden tener distintas configuraciones, debido a que no hay degradación de la resistencia o la rigidez en los arriostramientos, y debido a que las resistencias a las tracción

y compresión son casi iguales, se permite la configuración de una sola diagonal sin ninguna penalización (López & Sabelli, 2004).

2.3.2.1.1 *Estructuración en diagonal*

La configuración de una sola diagonal es una forma efectiva de aprovechar las altas resistencias posibles para los BRB (López & Sabelli, 2004).

2.3.2.1.2 *Estructuración en V y V invertida*

Las configuraciones en V y V invertida ya que permiten cierta apertura en el marco. Debido al equilibrio entre la tensión de la riostra y la resistencia a la compresión (López & Sabelli, 2004).

Requerimiento especial para V y V invertida

Una viga que sea intersecada por arriostramientos deberá ser continua entre columnas y será diseñada para resistir los efectos de las combinaciones indicadas, para las combinaciones de carga que incluyan sísmica, una carga Q_b , debe sustituir el término E (NEHRP, 2003).

Q_b es el efecto de carga máxima aplicada a la viga que resiste las riostras. Este efecto de carga vertical y horizontal se calculará utilizando (NEHRP, 2003):

$$\beta_{\omega} P_{y_{sc}}$$

Ec. 36 Riostra en tracción

$$\omega P_{y_{sc}}$$

Ec. 37 Riostra en compresión

Rigidez de la viga

Las deflexiones de las vigas bajo combinación de carga $D + Q_b$, no deben exceder $L/240$, donde L es la luz de la viga entre las líneas de las columnas (NEHRP, 2003).

A los efectos del diseño y ensayo de las riostras, la deformación máxima calcula de las riostras se debe aumentar incluyendo el efecto de la deflexión vertical de la viga bajo combinación de carga (NEHRP, 2003).

Se proporcionará apoyo lateral de la viga cuando sea necesario para la estabilidad. El análisis deberá incluir la consideración de Q_b y la fuerza axial en la viga (NEHRP, 2003).

2.3.3 Diagonales restringidas a pandeo, BRB

Ofrecen resistencia y disipación de energía al mismo tiempo que exhibe una fluencia bien distribuida (Black & Aiken, 2002). El sistema BRB disipan la energía de carga cíclica a través de deformación axial. Se vinculan a pórticos de hormigón o acero de forma concéntrica, están compuestos por un núcleo de acero rodeado por un tubo metálico relleno de hormigón (Acosta et al., 2016; Watanabe, 2018).

El comportamiento histerético del núcleo de acero es estable y simétrico una vez que la sección transversal del núcleo ha fluido. La placa de acero central proporciona una disipación de energía estable cuando fluye bajo carga axial inversa, mientras que, el tubo de acero relleno de hormigón circundantes resiste el pandeo por compresión. Por lo que, no hay degradación durante el ciclo de compresión (Watanabe, 2018).

Los BRB son disipadores metálicos o histeréticos que tiene como ventajas (Symans et al., 2008):

- Comportamiento histeretico estable.
- Confiabilidad a largo plazo.
- Propiedades mecánicas independientes de la frecuencia y la temperatura.
- Materiales y comportamiento con el cual los ingenieros se encuentran familiarizados.

- Soportan deformaciones inelásticas significativas sin degradación de la resistencia o la rigidez bajo carga sísmicas (American Society of Civil Engineers, 2013).

Las desventajas que presentan son (Symans et al., 2008):

- Daño en el dispositivos despues del terremoto.
- Requiere reemplazo del mismo.
- Comportamiento no lineal, requiere llevar a cabo analisis no lineal.

En la Figura 8, se muestra un BRB de uso común. El núcleo de acero se divide en cinco segmentos: el segmento de fluencia restringida, una sección reducida dentro de la zona de restricción lateral proporcionada por la carcasa; segmentos de transición restringidos y no cedentes; y segmentos de conexión sin restricciones, que no cede, que se extienden más allá de la carcasa y se conecta al marco, típicamente por medio de placas de refuerzo (López & Sabelli, 2004).

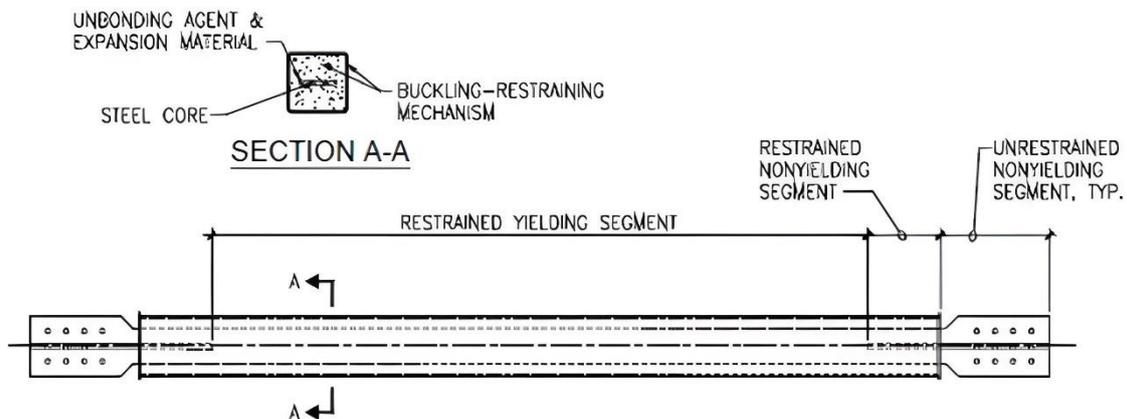


Figura 8 Ilustración de un BRB

Fuente: Adaptado (López & Sabelli, 2004)

Los BRB, generalmente se diseñan utilizando el método de fuerza lateral equivalente, se somete un modelo elástico lineal a una carga sísmica reducida para determinar la resistencia requerida y verificar la rigidez adecuada del pórtico. Normalmente no se requiere un análisis

dinámico inelástico, aunque los análisis inelásticos brinda una mejor estimación de las demandas de ductilidad de la riostra que los análisis elásticos (López & Sabelli, 2004).

Para que un análisis elástico de este tipo sea válido, el elemento de las riostras utilizado en el análisis debe corresponder al comportamiento de la riostra probado y, de manera similar, las pruebas de la riostra deben corroborar la resistencia y la ductilidad supuestas en el análisis. En consecuencia, el diseño de un BRBF se basa en los resultados de pruebas exitosas. Las pruebas exitosas son aquellas que exhiben un comportamiento histerético completo y estable con sola una sobre resistencia a la compresión moderada mientras logran valores de ductilidad plástica máxima y acumulativa superiores a los requeridos por el proyecto de construcción real (López & Sabelli, 2004).

Una vez que los BRB se han diseñado para una resistencia adecuada, los elementos de los marcos adyacentes se diseñan para las resistencias BRB (López & Sabelli, 2004).

El diseño de las BRBF aún no se rige por ningún código de construcción. Sin embargo, existen disposiciones recomendadas para el diseño de BRBF (López & Sabelli, 2004).

2.3.3.1 Comportamiento de un BRB

En la Figura 9, se muestra los ciclos histeréticos completos y equilibrados de un BRB, este comportamiento se logra a través del desacoplamiento de los aspectos de la resistencia a la compresión que son la resistencia a la tensión y la resistencia al pandeo por flexión (López & Sabelli, 2004).

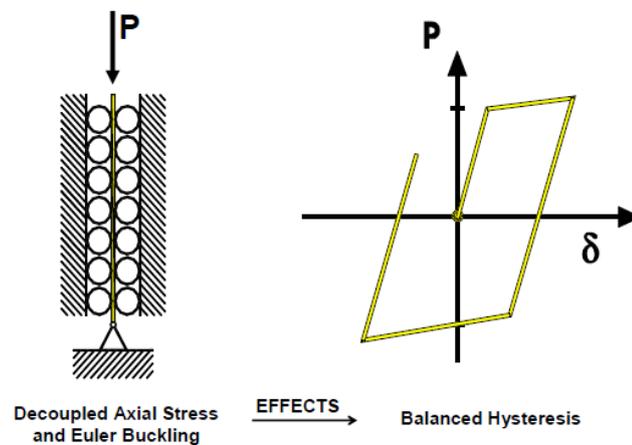
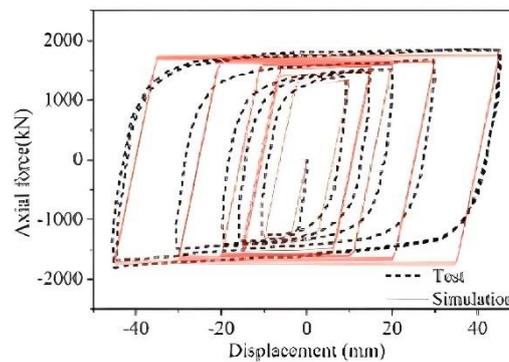


Figura 9 Mecánica de un BRB

Fuente: Adaptado (López & Sabelli, 2004)



Gráfica 5 Ciclo histerético estable de un BRB

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano (Terán, 2023)

2.3.3.2 Partes de los BRB

2.3.3.2.1 Resistencia requerida del núcleo de acero

La resistencia axial requerida de la riostra no debe exceder la resistencia de diseño del núcleo de acero (NEHRP, 2003):

$$\phi P_{y_{sc}}$$

Donde

$$\phi = 0.9$$

$$P_{y_{sc}} = F_y A_{sc}$$

F_y = límite elástico mínimo especificado del núcleo de acero

A_{sc} = área neta del núcleo de acero

2.3.3.2.2 *Detallado del núcleo de acero*

Las placas utilizadas en el núcleo de acero que tienen un espesor de 2 pulgadas o más deben cumplir con los requisitos mínimos de tenacidad de la sección 6.3 (AISC Sísmico) (NEHRP, 2003).

No se permiten empalmes en el núcleo de acero (NEHRP, 2003).

2.3.3.2.3 *Sistema de restricción de pandeo*

Consistirá en el revestimiento del núcleo de acero. En los cálculos de estabilidad, las vigas, las columnas y cartelas que conectan el núcleo se considerarán partes de este sistema (NEHRP, 2003).

2.3.3.2.4 *Restricciones del sistema de pandeo*

El sistema de restricción de pandeo debe limitar el pandeo local y general del núcleo de acero para deformaciones correspondientes a 1.5 veces la deriva de piso de diseño (NEHRP, 2003).

2.3.3.2.5 *Conexiones de arriostramiento*

La resistencia requerida de las conexiones de arriostramiento en tracción y compresión (incluidas las conexiones viga-columna si forman parte del sistema de arriostramiento debe ser (NEHRP, 2003):

$$\beta_{\omega} R_y P_{y_{sc}}$$

Cartelas:

El diseño de las conexiones debe incluir consideraciones de pandeo local y general

2.3.4 Prediseño de diagonales

Metodología basada en desplazamientos para el diseño de edificios de baja altura

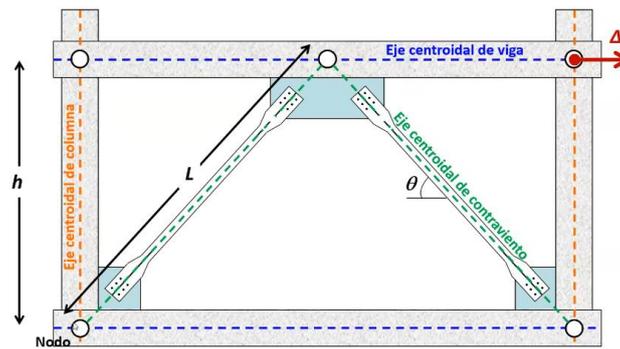
Una metodología basada en el control de desplazamiento lateral requiere de ayudas de diseño que permitan el diseño explícito de las propiedades estructurales de un contraviento.

$$\frac{K_L}{(A_n/L)} = \frac{E \cos^2 \theta}{\gamma + \eta(1 - \gamma)}$$

Ec. 38 Rigidez lateral y área de diagonales

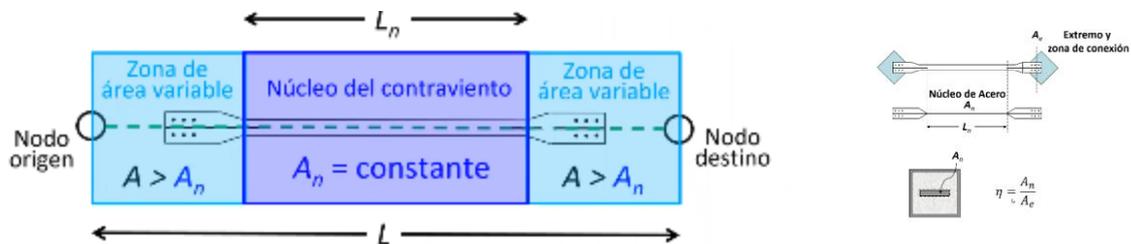
$$\left(\frac{A_L}{h}\right)_y = \frac{[\gamma + \eta(1 - \gamma)]}{E \operatorname{sen} \theta \operatorname{cos} \theta}$$

Ec. 39 Distorsión de fluencia y esfuerzo de fluencia



Gráfica 6 Esquema de un pórtico arriostrado

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano (Terán, 2023)



Gráfica 7 Distribución del área de un BRB

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano (Terán, 2023)

2.3.4.1 Relaciones geométricas de diagonales

$$\gamma = \frac{L_n}{L}$$

Ec. 40 Relación de longitud

$$\eta = \frac{A_n}{A_e}$$

Ec. 41 Relación de área

2.3.4.2 Cociente de relación de rigidez

Los coeficientes de relación de área y longitud vienen determinados por el fabricante

$$\frac{1}{K_f}$$

Ec. 42 Cociente de corrección de rigidez

$$K_{real} = \frac{E A_n}{L} K_f$$

Ec. 43 Rigidez lateral real en base a coeficiente tabulado

2.3.4.3 Distorsión de fluencia de los diagonales

Distorsión a la cual fluye los BRB

$$DI_y = \frac{f_y \frac{1}{K_f}}{E \operatorname{sen} \theta \cos \theta}$$

Ec. 44 Distorsión de fluencia de los diagonales

Donde

f_y = resistencia a la tracción esperado (fabricante)

$1/K_f$ = factor de corrección de rigidez (fabricante)

E = módulo de elasticidad del acero

$\operatorname{sen} \theta, \cos \theta$ = ángulo de inclinación de los diagonales

2.3.4.4 Ductilidad máxima de entrepiso

Considerando que DI_{max} , para establecer un objetivo de desempeño, el sistema de diagonales debe ser capaz de desarrollar una ductilidad de entrepiso de:

$$\mu_{ent} = \frac{DI_{max}}{DI_y}$$

Ec. 45 Ductilidad máxima de entrepiso

DI_{max} = deriva de entrepiso máxima permitida.

En la Figura 10, se puede observar los parámetros de aceptación en términos de que tanto se puede deformar axialmente una diagonal para permanecer en un rango de deformación plástica.

Table 9-7. Modeling Parameters and Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Structural Steel Components—Axial Actions

Component/Action	Modeling Parameters			Acceptance Criteria		
	Plastic Deformation		Residual Strength Ratio	Plastic Deformation		
	a	b		IO	LS	CP
Buckling-restrained braces ^{h,i,j}	13.3Δ _y	13.3Δ _y	1.0	3.0Δ _y	10Δ _y	13.3Δ _y

^hΔ_y is the axial deformation at the expected brace capacity per Section 9.5.4.2.2

ⁱMaximum strain of the BRB core shall not exceed 2.5%.

^jIf testing to demonstrate compliance with Section 9.5.4.4.3 is not available, the acceptance criteria and modeling parameters shall be multiplied by 0.7.

Figura 10 Parámetros de modelado y criterios de aceptación para procedimientos no lineales – componentes de acero estructural – acciones axiales (American Society of Civil Engineers, 2013)

2.3.4.5 Ductilidad global

Según el número de pisos y regularidad en altura del sistema estructural, se asigna un valor de ductilidad global a la edificación (Terán, 2023):

$$\mu_{max} = \frac{\mu_{ent}}{\beta}$$

Ec. 46 Ductilidad global de la edificación

Número de pisos	β
-----------------	---------

	$\mu_{max} = 2$	$\mu_{max} = 6$
5	1.0	1.1
10	1.0	1.1
20	1.1	1.2
30	1.2	1.3
40+	1.3	1.4

Gráfica 8 Factores para ductilidad global de la edificación

Fuente: Adaptado (Terán, 2023)

2.3.4.6 Desplazamiento máximo de azotea

Desplazamiento máximo que va a desarrollar el sistema estructural para cuando el entrepiso crítico alcance la distorsión máxima DI_{max} .

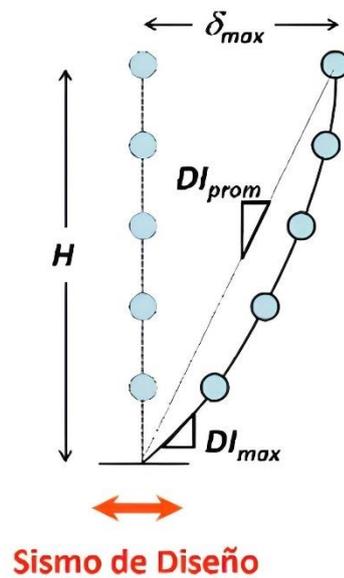


Figura 11 Desplazamiento máximo de azotea

Fuente: Adaptado (Terán, 2023)

La distorsión de entrepiso sirve para establecer el umbral de desplazamiento de azotea. Considerar el área del núcleo de las diagonales sigue la distribución en altura de cortantes de piso (Terán, 2023).

$$COD = \frac{DI_{max}}{DI_{prom}}$$

Ec. 47 Coeficiente de distorsión

$$\delta_{max} = \frac{DI_{max} H}{COD}$$

μ_{max}	COD	
	Regular	Irregular
1	1.2	1.5
2+	1.2	1.5

Gráfica 9 Área de diagonales sigue distribución de cortantes de entrepiso

Fuente: Adaptado (Terán, 2023)

2.3.4.7 Desplazamiento máximo de azotea para un sistema de un grado de libertad

Es necesario corregir el desplazamiento de azotea (sistema de varios grados de libertad) antes de entrar al espectro de desplazamientos (sistemas de un grado de libertad) (Terán, 2023):

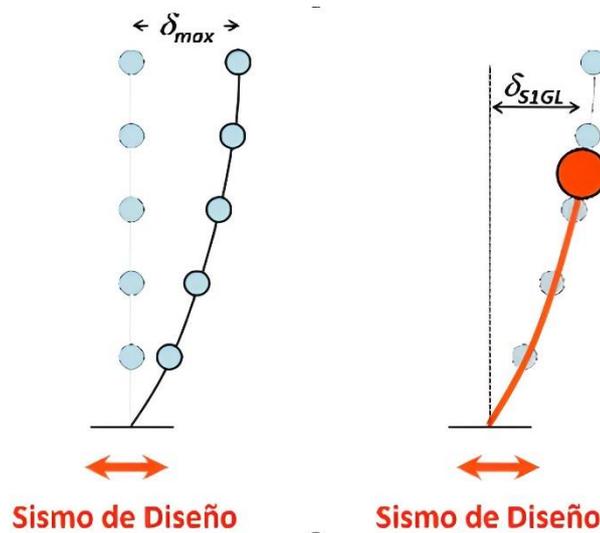


Figura 12 Desplazamiento máximo para IGDL

Fuente: Adaptado (Terán, 2023)

$$S_{dmax} = \frac{\delta_{max}}{\alpha}$$

Ec. 48 Desplazamiento pseudo espectral

Número de pisos	α	
	$\mu_{max} = 1$	$\mu_{max} = 2 +$
1	1.0	1.0
2	1.2	1.1
3	1.3	1.2
5+	1.4	1.2

Gráfica 10 Factor Alpha para desplazamiento espectral

Fuente: Adaptado (Terán, 2023)

2.3.4.8 Determinación de período máximo

Se determina el período máximo para los marcos contra vientos de tal manera de satisfacer sus objetivos de diseño (Terán, 2023).

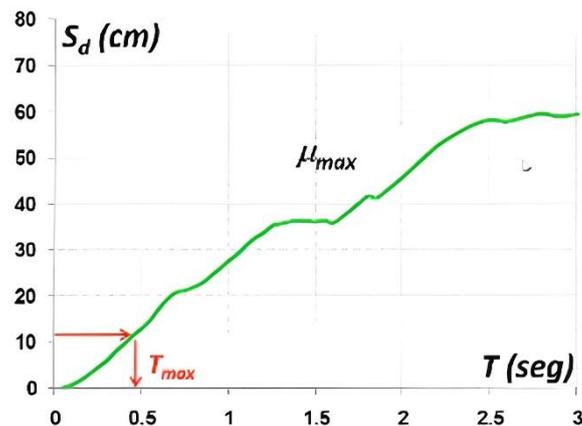


Figura 13 Determinación del período máximo en base al desplazamiento máximo

Fuente: Adaptado (Terán, 2023)

2.3.4.9 Dimensionado basado en rigidez

Sacar el área de las diagonales que hagan posible que el período sea el período máximo (Terán, 2023).

Es posible tomar en cuenta la contribución del sistema gravitacional a la rigidez lateral del sistema estructural (Terán, 2023).

$$\frac{1}{T_{CV}^2} = \frac{1}{T_{max}^2} - \frac{1}{T_{SG}^2}$$

Ec. 49 Períodos asociados a la rigidez del sistema

Donde

T_{CV}^2 = período relacionado a la rigidez lateral aportada por los diagonales.

T_{max}^2 = período relacionado a la rigidez lateral del sistema estructural.

T_{SG}^2 = período relacionado a la rigidez lateral aportada por el sistema gravitacional.

3. METODOLOGÍA

3.1 Datos generales

La estructura analizada está ubicada en la ciudad de Ambato en la provincia de Tungurahua, construido sobre un suelo tipo C. La ocupación de la edificación en subsuelo, primera y segunda planta es para almacén y tercera, cuarta y quinta planta para uso residencial. Con una altura total de 17.1m cuenta con un área en planta baja de 316m² aproximadamente.

El primer caso de análisis es una estructura de pórticos de hormigón armado con vigas descolgadas de base fija. Para este caso primero se realiza el diseño tradicional y su posterior análisis modal espectral en donde se verifica su correcto comportamiento dinámico.

Para el segundo caso de análisis a la estructura se la diseña con un interfaz de aislación, se calcula las propiedades de los aisladores mediante análisis modal espectral, luego se procedió a calcular sus propiedades límites hasta que sistema converja.

Finalmente, el tercer caso es una estructura diseñada con diagonales restringidas a pandeo.

Para los 3 casos de análisis se procede a la verificación del desempeño mediante análisis estático no lineal pushover (NSP) con el método de linealización equivalente mediante puntos de desempeño y análisis dinámico no lineal historia de respuesta (NLRHA) con el método de integración directa no lineal.

3.1.1 Propiedades de los materiales

Para las propiedades no lineales de los materiales se utilizará el modelo Mander de esfuerzo / deformación para hormigón confinado y no confinado y el modelo de histéresis para el hormigón se utilizó el modelo de Takeda. Para definir las propiedades no lineales del acero

se utilizó el modelo cinemático para establecer el comportamiento de histéresis del material y para la curva esfuerzo / deformación se utilizó el modelo de Park.

Material	Propiedades lineales		Propiedades no lineales	
Hormigón	Módulo de elasticidad	$4700 \sqrt{f'c} \text{ (MPa)}$	Comportamiento histerético	Takeda
	Resistencia a la compresión	24 MPa	Curva esfuerzo / deformación	Mander
Acero	Resistencia a la tracción	240 MPa	Comportamiento histerético	Kinematic
			Curva esfuerzo / deformación	Park

Tabla 1 Propiedades de los materiales

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.1.2 Cargas gravitacionales

En base a los planos arquitectónicos se calcula el adicional de cargas muertas, y en base a la NEC-SE-DS, se asigna la carga viva según la ocupación de cada piso.

Piso	Carga Viva (Tn/m ²)	Carga Muerta (Tn/m ²)	Normativa NEC-SE-CG
Nivel 5	0.48	0.40	Tabla 9: Patios y terrazas peatonales
Nivel 4	0.2	0.58	Tabla 9: Viviendas unifamiliares
Nivel 3	0.2	0.58	Tabla 9: Viviendas unifamiliares
Nivel 2	0.2	0.58	Tabla 9: Viviendas unifamiliares
Nivel 1	0.48	0.40	Tabla 9: Almacenes
Nivel 0	0.48	0.40	Tabla 9: Almacenes
Aislación	0.6	0.40	Tabla 9: Bodega de almacenamiento

Tabla 2. Definición de cargas gravitacionales

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.1.3 Carga sísmica

La edificación está ubicada en la ciudad de Ambato, sobre suelo tipo C, pertenece a la zona sísmica IV. Se la evaluara para un período de retorno de 475 años.

Para las 3 estructuras de análisis se toma en consideración las siguientes cargas sísmicas:

3.1.3.1 Espectro de respuesta en aceleraciones

Criterio	Valor	NEC-SE-DE
Zona sísmica	Sierra, Esmeraldas y Galápagos	Lit-3.3.1
n	2.48	
Provincia	Tungurahua	
Ciudad	Ambato	
Zona Sísmica	V	Lit-3.1.1
Factor Z	0.4	Lit-3.1.1
Tipo de suelo	C	Lit-3.2.1
r	1.00	Lit-3.3.1

Tabla 3 Factores de carga sísmica

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Criterio	Valor	NEC-SE-DE
Fa	1.20	Lit-3.2.2-Tabla 3
Fd	1.11	Lit-3.2.2-Tabla 4
Fs	1.11	Lit-3.2.2-Tabla 5

Tabla 4 Factores de sitio

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

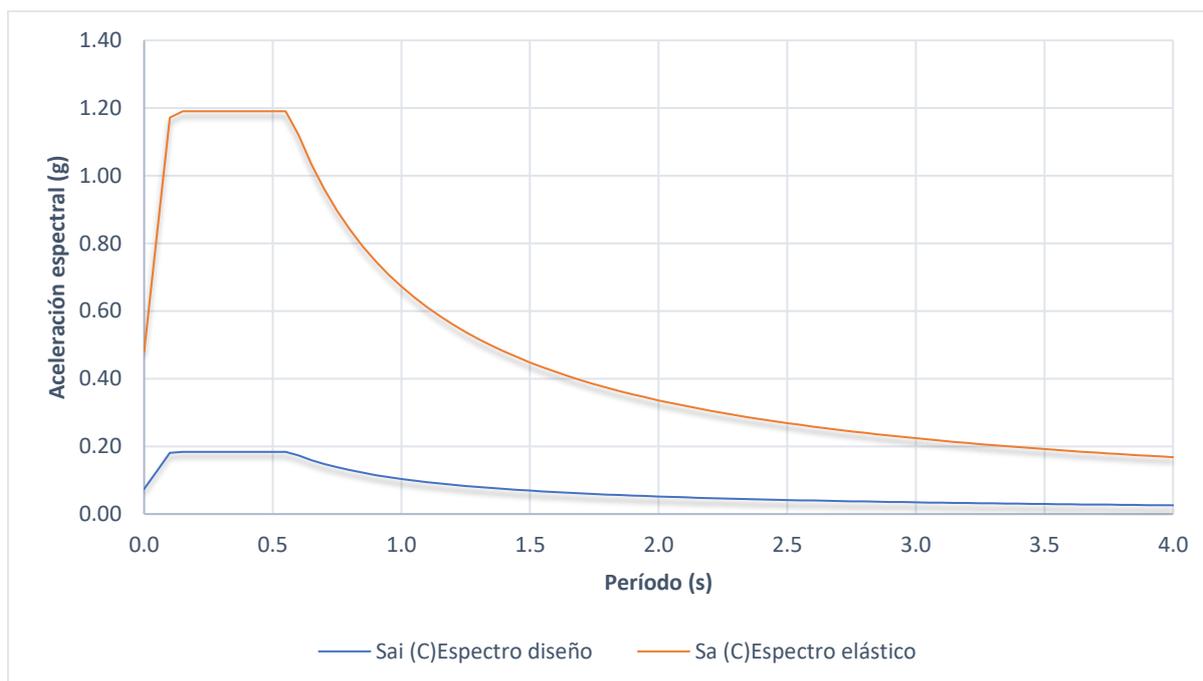
3.1.4 Configuración estructural

Parámetro	Factores		NEC-SE-DE
Sin muros estructurales ni diagonales rigidizadoras	$C_t=0.055$	$\alpha=0.9$	Lit-6.3.3
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas	R=8		Lit-6.3.4-Tabla 15
Irregularidad en planta	0.9		Lit-5.2.3-Tabla 13
Irregularidad en elevación	0.9		Lit-5.2.3-Tabla 14
Categoría del edificio: otras estructuras	1		Lit-4.1-Tabla 6

Tabla 5. Factores de configuración estructural NEC-SE-DS

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

En base a los valores de carga sísmica y configuración estructural se calcula el espectro de aceleraciones en base a la NEC-SE-DE:



Gráfica 11. Espectro elástico y espectro de diseño NEC

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.1.4.1 Registros sísmicos

Siguiendo el procedimiento definido en la NEC-SE-DS para el manejo de acelerogramas para el análisis historia de respuesta, se utilizó 2 componentes horizontales de no menos 3 registros sísmicos, teniendo que estos 3 pares de registros sísmicos cumplir con los requisitos de compatibilidad: distancia a la falla, magnitud, mecanismo de falla y efectos de sitio.

Los registros sísmicos seleccionados poseen características compatibles con el sismo de Ambato del 9 de agosto de 1949, con una M_w 6.8, de origen cortical y una profundidad de 19 km en suelo tipo C. El régimen tectónico de ciudad de Ambato proviene cortical, subducción intraplaca y volcánica (Cobos, 2017; Quinde & Reinoso, 2016).

3.1.4.1.1 Selección de acelerogramas

En base al régimen tectónico de la ciudad de Ambato, se procede a seleccionar los siguientes eventos sísmicos.

Evento sísmico	ID	Fecha	Estación	Velocidad de onda de corte (m/s)	Geología de sitio	Tipo de Suelo	Distancia al epicentro (km)
Northridge	NR	17/01/1994	Sylmar	684	Roca (gneiss, meteorizada)	C	19.2
San Fernando	SF	09/02/1971	Sylmar	684	Roca (gneiss, meteorizada)		7.3
Loma Prieta	LP	17/10/1989	Corralitos	462	depósitos de deslizamientos		7.1

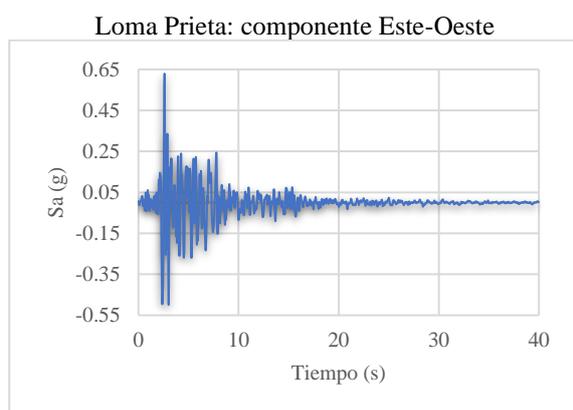
Tabla 6 Información de la estación

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

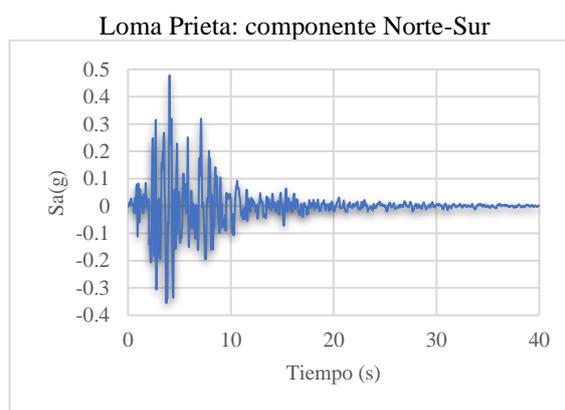
Evento sísmico	ID	Fecha	Mecanismo de falla	GPA	Magnitud	Tipo de Suelo	Profundidad (km)
Northridge	NR	17/01/1994	Cortical	1.53	6.4	C	19
San Fernando	SF	09/02/1971		1.251	6.6		9
Loma Prieta	LP	17/10/1989		0.64	7		18

Tabla 7 Información de los eventos sísmicos

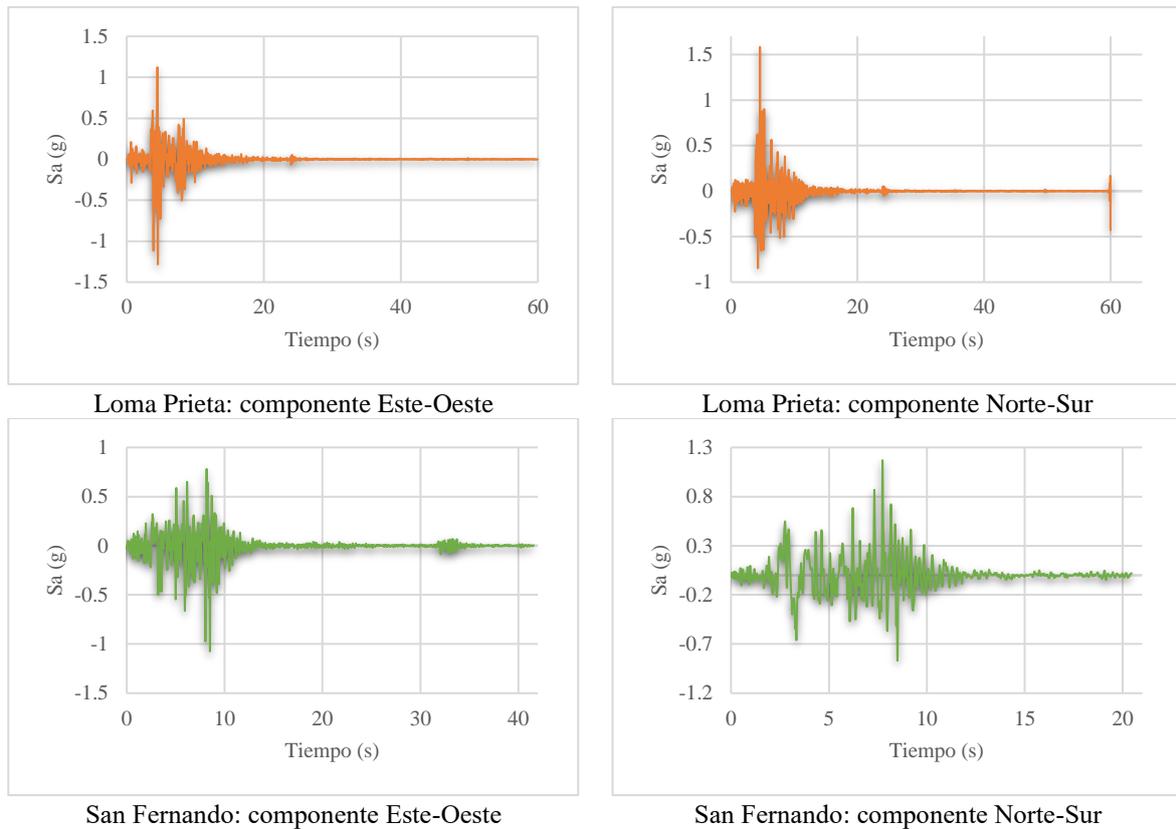
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano



Northridge: componente Este-Oeste



Northridge: componente Norte-Sur

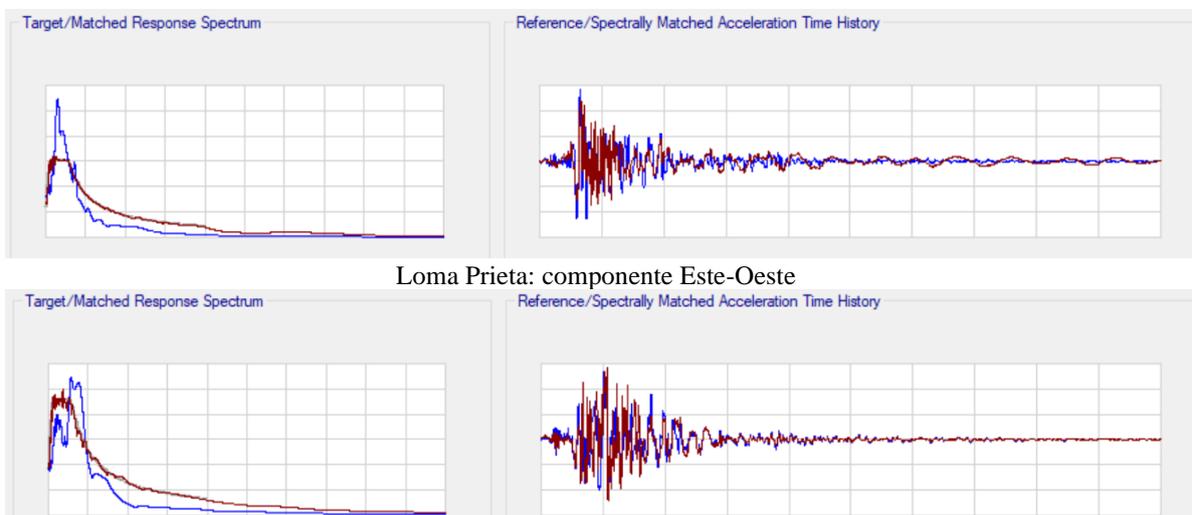


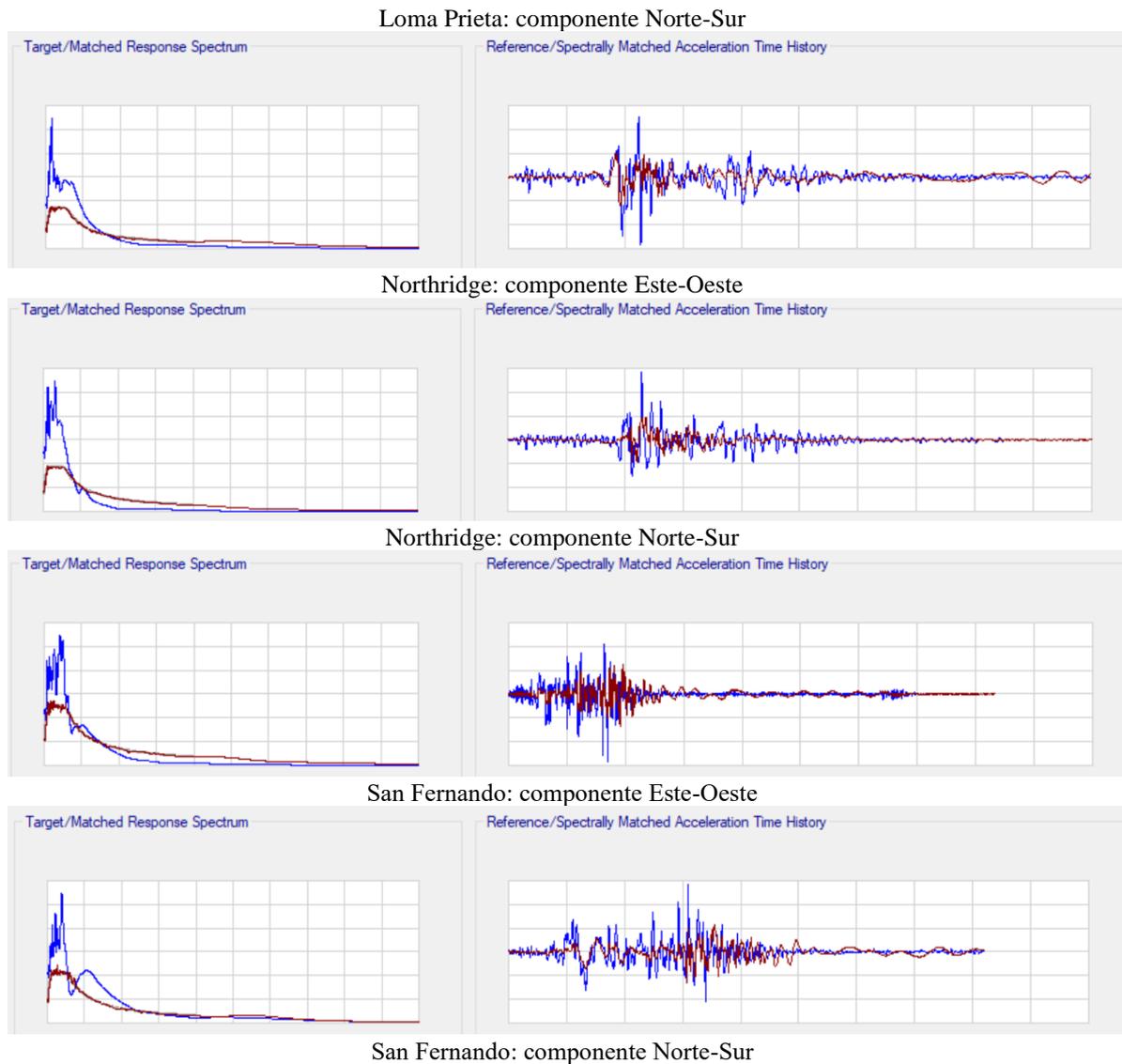
Gráfica 12 Componentes horizontales de componentes seleccionado

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.1.4.1.2 Ajuste espectral

Para obtener acelerogramas escalados se utilizó el ajuste en el dominio del tiempo en donde se obtuvo la forma espectral compatible al espectro objetivo de cada par de componente de cada registro sísmico.





Gráfica 13 Ajuste espectral componentes sísmicos

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.1.4.1.3 Escalados espectral

A partir del procedimiento descrito en la NEC-SE-DS, a cada par de registros de sísmicos se los escala para que el valor promedio de los espectros provenientes de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los espectros de los registros no se encuentre por debajo del espectro de aceleraciones amortiguado al 5% del sismo de diseño para períodos entre 0.2T y 1.5T.

Los resultados obtenidos del escalado espectral se observan en la siguiente gráfica, los cuales serán aplicados a los casos de carga para cada análisis tiempo historia.

Evento	Factor de escala
Loma Prieta: componente Este-Oeste	1.15
Loma Prieta: componente Norte-Sur	1.13
Northridge: componente Este-Oeste	1.05
Northridge: componente Norte-Sur	1.09
San Fernando: componente Este-Oeste	1.17
San Fernando: componente Norte-Sur	1.18

Tabla 8 Factores de escalado espectral

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

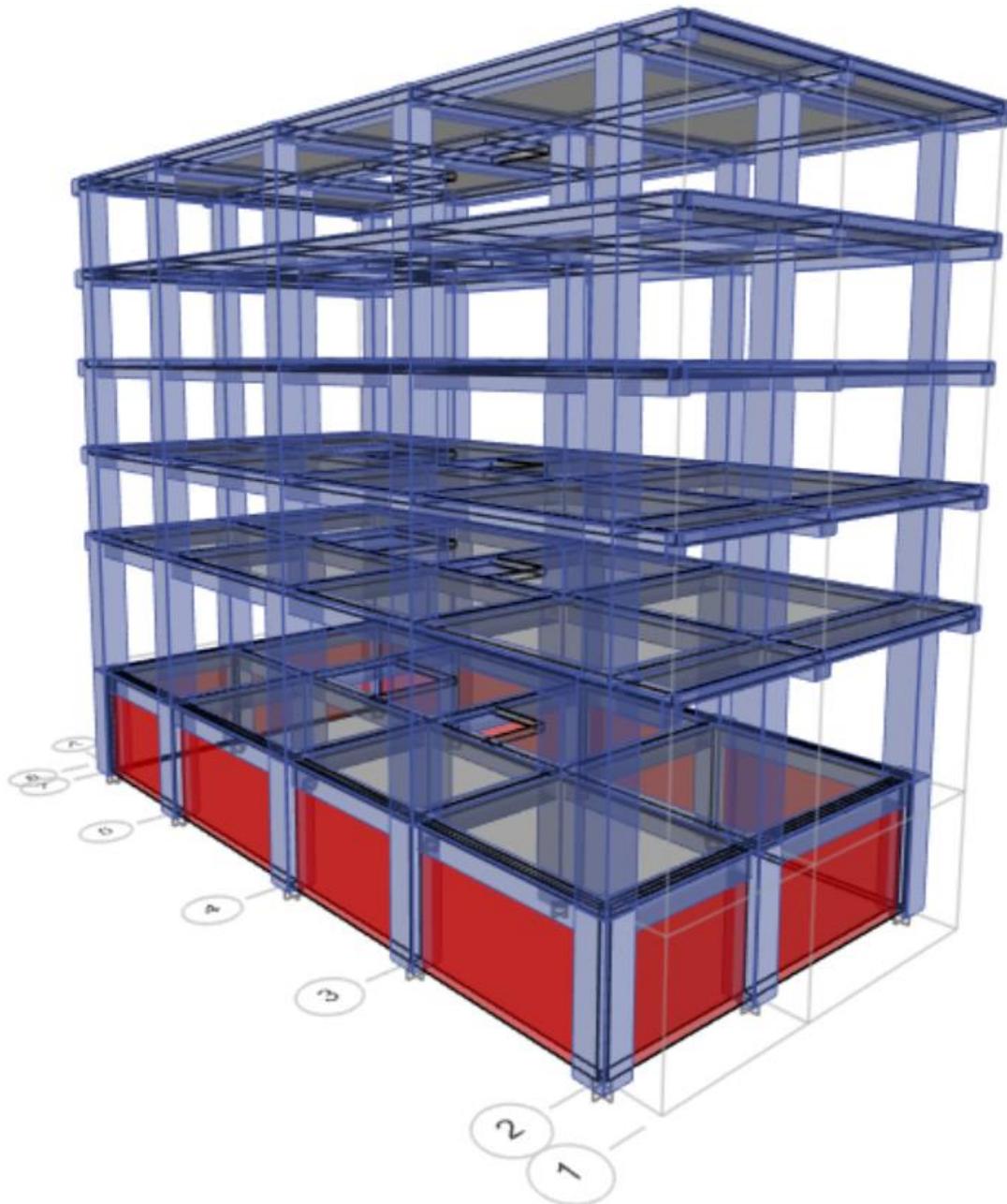
3.1.5 Definición de rótulas plásticas

La asignación de rótulas plásticas para las columnas es en base a las tablas del ASCE 41-13 (Tabla 10-8), y para las vigas (Tabla 10-7). La definición es automática y considera que para la longitud de las rótulas plásticas en columnas la distancia relativa es del 10% y 90% y para vigas del 5% al 95%.

3.2 Diseño estructura base fija

3.2.1 Configuración estructural

El edificio es un pórtico especial sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas de cinco pisos y un subsuelo, sin muros estructurales ni diagonales rigidizadores. En primera planta presenta una irregularidad en elevación debido a su altura de 3.96m.



Gráfica 14 Configuración estructural del sistema de base fija

Fuente: Computers and Structures (Etabs)

3.2.2 Secciones de diseño

Para que la estructura alcance los niveles de desempeño y un comportamiento dinámico adecuado se obtuvo las siguientes secciones transversales y acero longitudinal para columnas y vigas.

Piso	Sección (cm)	# Long. Barras 3-axis	# Long. Barras 2-axis	Φ Long. (mm)	Φ esq. (mm)	Rec. (cm)	Φ transversal. (mm)	# Long. Trans. 3-axis	# Long. Trans. 2-axis
Nivel 0	70x70	8	8	18	18	4	10	6	6
Nivel 1	70x70	8	8	18	18	4	10	6	6
Nivel 2	60x60	8	8	18	18	4	10	6	6
Nivel 3	60x60	8	8	18	18	4	10	7	7
Nivel 4	50x50	6	6	18	18	3	10	5	5
Nivel 5	50x50	6	6	18	18	3	10	5	5

Tabla 9 Secciones de columnas

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Piso	Sección (cm)	Rec. Parte superior (cm)	Rec. Parte inferior (cm)	Área parte superior I-fin (cm ²)	Área parte superior J-fin (cm ²)	Área parte inferior I-fin (cm ²)	Área parte inferior J-fin (cm ²)
Subsuelo	-	-	-	-	-	-	-
Nivel 0	45x50	3	3	16.08	16.08	16.08	16.08
Nivel 1	45x50	3	3	16.08	16.08	16.08	16.08
Nivel 2	45x45	3	3	12.06	12.06	12.06	12.06
Nivel 3	45x45	3	3	12.06	12.06	12.06	12.06
Nivel 4	40x45	3	3	12.06	12.06	12.06	12.06
Nivel 5	40x40	3	3	10.05	10.05	10.05	10.05

Tabla 10 Secciones de vigas

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.2.3 Resultados análisis modal espectral

El período fundamental calculado para el primer modo de vibración es de 0.702s, lo que conlleva a una estructura rígida.

Período fundamental crítico calculado	Período fundamental	Período fundamental mayorado (1.3) calculado
0.593	0.702	0.771

Tabla 11 Períodos estructurales

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Para el análisis de torsión en planta se evalúa la forma modal y el porcentaje de participación modal de la masa del sistema de base fija.

En donde se verifica el comportamiento dinámico de la estructura en sus dos primeros modos de vibrar son traslacionales y el tercer modo es rotacional.

Modo	Período (s)	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	Acumulación de la masa	Tipo
1	0.702	0.637	0.001	0.637	0.001	0.020	3.06%	Traslacional
2	0.655	0.002	0.641	0.638	0.642	0.010	1.51%	Traslacional
3	0.603	0.018	0.011	0.656	0.653	0.618	3470.79%	Rotacional
4	0.225	0.090	0.000	0.746	0.653	0.004	4.43%	Traslacional
5	0.212	0.001	0.090	0.747	0.742	0.002	1.90%	Traslacional
6	0.198	0.004	0.002	0.751	0.744	0.088	2364.86%	Rotacional
7	0.114	0.030	0.000	0.781	0.744	0.002	6.25%	Traslacional
8	0.109	0.000	0.030	0.781	0.774	0.001	2.02%	Traslacional
9	0.102	0.002	0.001	0.783	0.775	0.029	1700.00%	Rotacional
10	0.068	0.010	0.000	0.793	0.775	0.001	10.68%	Traslacional
11	0.066	0.000	0.010	0.794	0.785	0.000	1.05%	Traslacional
12	0.062	0.001	0.000	0.795	0.785	0.009	809.09%	Rotacional
13	0.045	0.007	0.000	0.802	0.785	0.001	9.86%	Traslacional
14	0.044	0.000	0.005	0.802	0.790	0.000	0.80%	Traslacional
15	0.041	0.001	0.000	0.803	0.790	0.004	400.00%	Rotacional
16	0.026	0.197	0.000	1.000	0.790	0.000	0.05%	Traslacional
17	0.019	0.000	0.210	1.000	1.000	0.000	0.14%	Traslacional
18	0.018	0.000	0.000	1.000	1.000	0.213	71000.00%	Rotacional

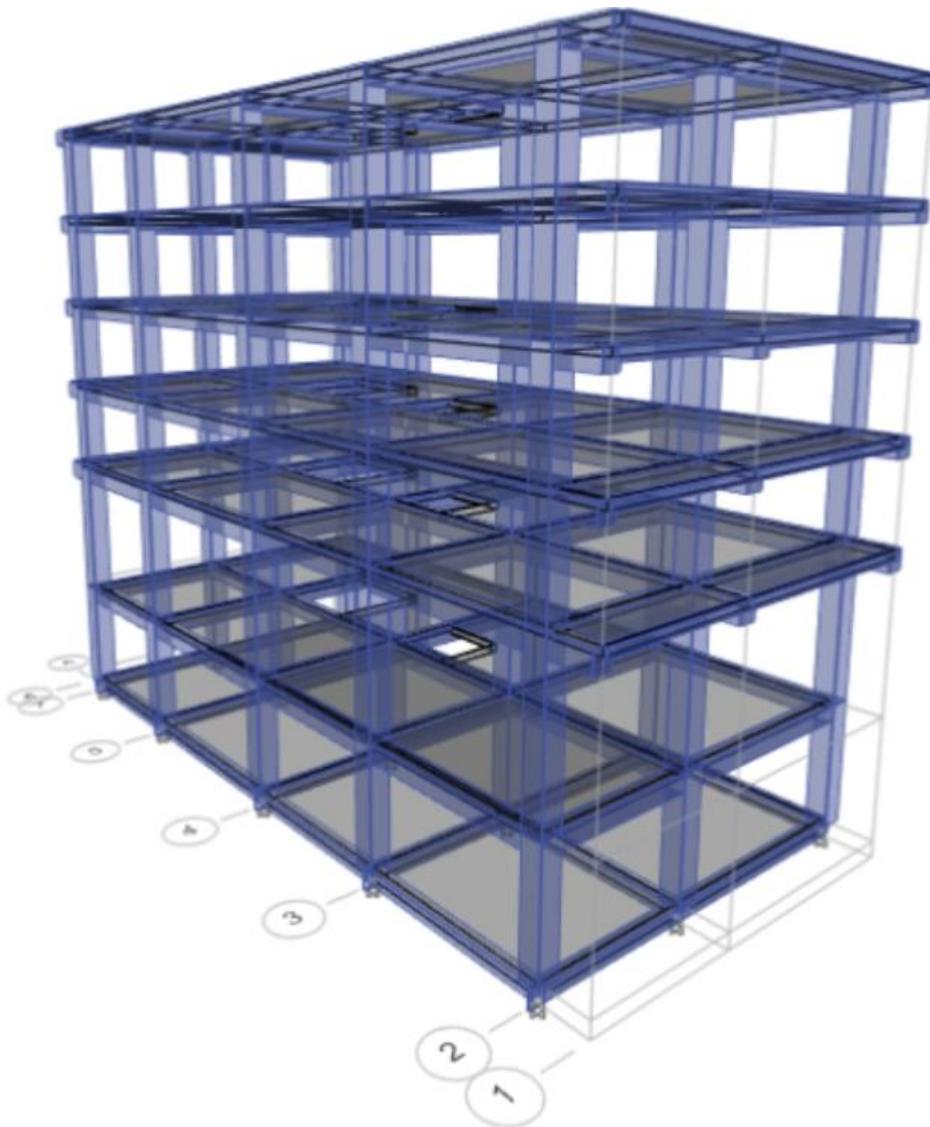
Tabla 12 Períodos y modos de vibración de la masa

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3 Diseño del sistema aislado

3.3.1 Configuración estructural

El sistema estructural de columnas y vigas se diseñó solo para carga gravitacional, ya que debido a la función de los aisladores la superestructura no ingresará en el rango inelástico. Sobre el interfaz de aislación se agrega una losa maciza de 30cm. El muro de sótano en el presente caso se omite debido a que el muro estará separado del sistema estructural principal.



Gráfica 15 Configuración estructural del sistema aislado

Fuente: Computers and Structures (Etabs)

3.3.2 Secciones de diseño

Para que la estructura alcance los niveles de desempeño y un comportamiento dinámico adecuado se obtuvo las siguientes secciones transversales y acero longitudinal para columnas y vigas.

Piso	Sección (cm)	# Long. Barras 3-axis	# Long. Barras 2-axis	Φ Long. (mm)	Φ esq. (mm)	Rec. (cm)	Φ transversal. (mm)	# Long. Trans. 3-axis	# Long. Trans. 2-axis
Nivel 0	50x50	8	8	18	18	4	10	6	6
Nivel 1	50x50	8	8	18	18	4	10	6	6
Nivel 2	50x50	8	8	18	18	4	10	6	6
Nivel 3	50x50	5	5	16	16	4	10	7	7
Nivel 4	50x50	5	5	16	16	3	10	5	5
Nivel 5	50x50	5	5	16	16	3	10	5	5

Tabla 13 Secciones de columnas

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Piso	Sección (cm)	Rec. Parte superior (cm)	Rec. Parte inferior (cm)	Área parte superior I-fin (cm ²)	Área parte superior J-fin (cm ²)	Área parte inferior I-fin (cm ²)	Área parte inferior J-fin (cm ²)
Aislación	30x30	3	3	16.08	16.08	16.08	16.08
Nivel 0	45x50	3	3	16.08	16.08	16.08	16.08
Nivel 1	45x50	3	3	16.08	16.08	16.08	16.08
Nivel 2	45x45	3	3	12.06	12.06	12.06	12.06
Nivel 3	45x45	3	3	12.06	12.06	12.06	12.06
Nivel 4	40x45	3	3	12.06	12.06	12.06	12.06
Nivel 5	40x40	3	3	10.05	10.05	10.05	10.05

Tabla 14 Secciones de vigas

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Para el análisis de torsión en planta se evalúa la forma modal y el porcentaje de participación modal de la masa del sistema aislado. En donde se verifica el comportamiento dinámico de la estructura en sus dos primeros modos de vibrar son traslacionales y el tercer modo es rotacional.

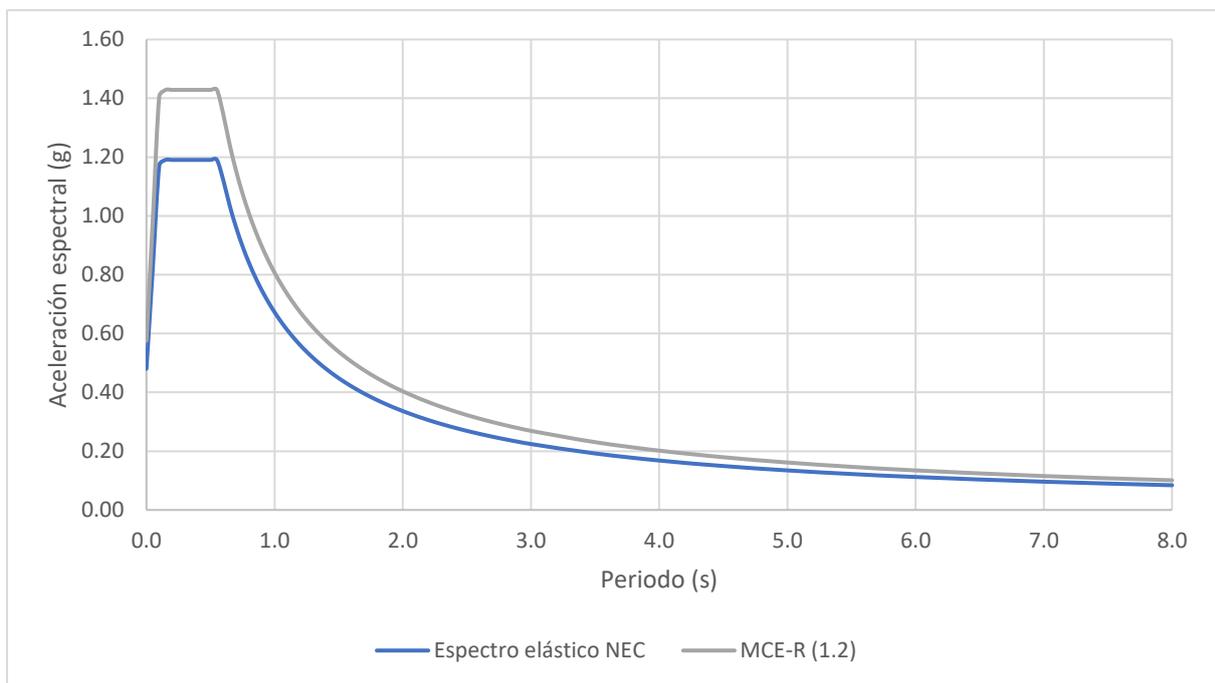
o	Período (s)	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	Acumulación de la masa	Tipo
1	4.222	0.914	0.048	0.914	0.048	0.037	4.09%	Traslacional
2	4.182	0.054	0.944	0.967	0.992	0.002	0.19%	Traslacional
3	3.717	0.032	0.007	0.999	0.999	0.960	3009.72%	Rotacional
4	0.524	0.001	0.000	1.000	0.999	0.000	0.76%	Traslacional
5	0.479	0.000	0.001	1.000	1.000	0.000	1.46%	Traslacional
6	0.425	0.000	0.000	1.000	1.000	0.001	8391.27%	Rotacional
7	0.262	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	4.90%	Traslacional
8	0.245	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	3.53%	Traslacional
9	0.226	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	4896.57%	Rotacional
10	0.145	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.00%	Traslacional
11	0.138	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.00%	Traslacional

Tabla 15 Períodos y modos de vibración de la masa – Sistema Aislado

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.3 Cargas sísmicas

El espectro elástico de diseño se lo construye en base a los pasos detallados en 2.2.3.1.1, el espectro máximo considerado (*MCE*), es el resultado del proceso detalla 2.2.3.1.2.

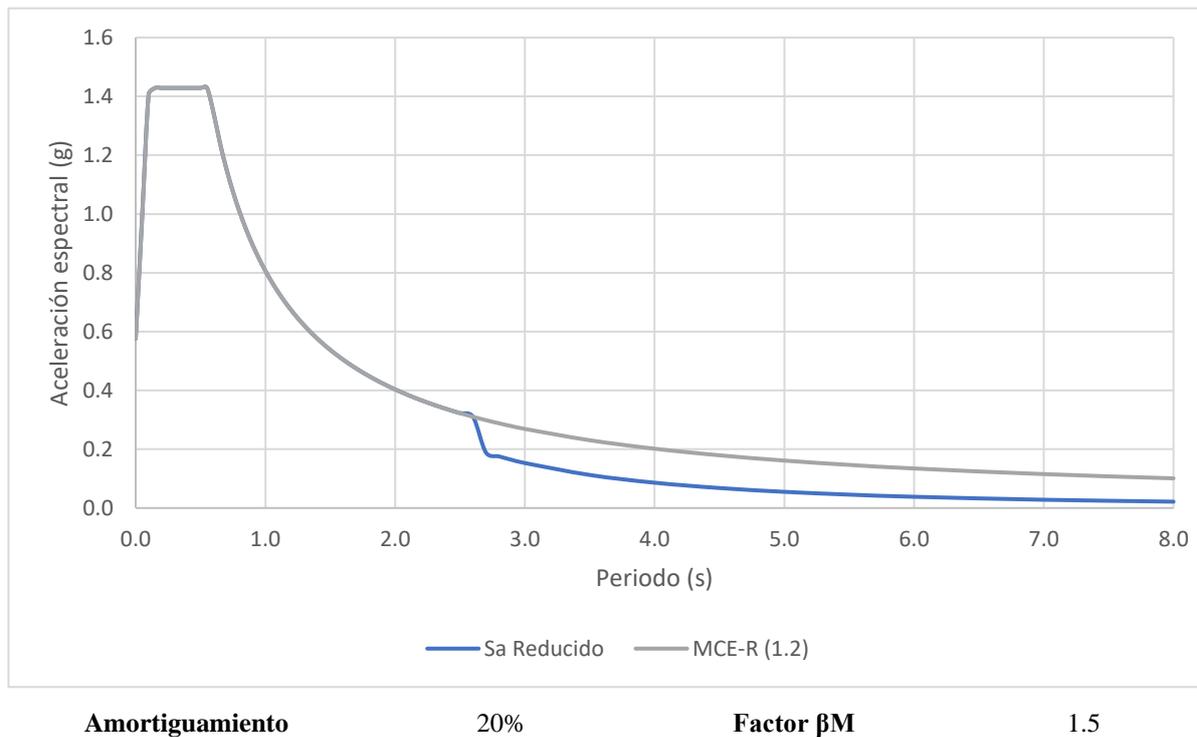


Gráfica 16. Espectro elástico NEC y MCE

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.4 Selección de amortiguamiento

Luego de seleccionar un amortiguamiento del sistema y su respectivo factor (Figura 5), se procede a obtener el espectro de aceleración reducido por amortiguamiento.

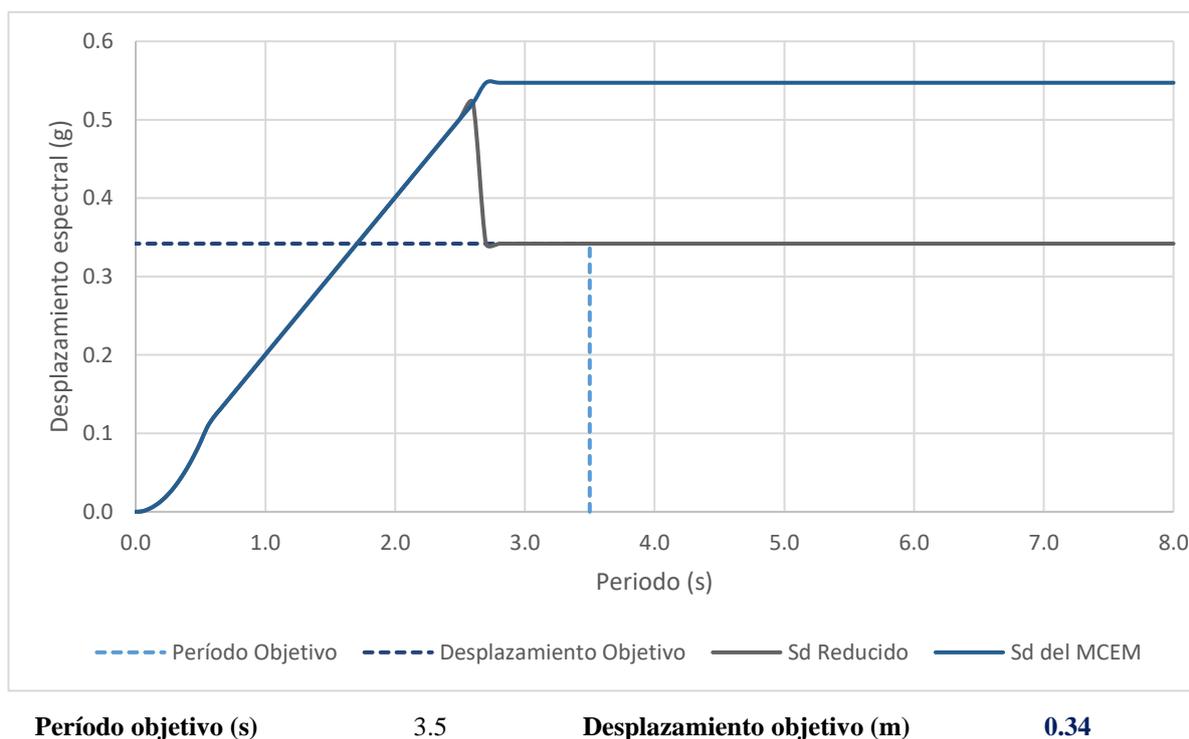


Gráfica 17. Espectro de aceleraciones reducido por amortiguamiento

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.5 Determinación de desplazamiento máximo, D_M

El espectro de aceleraciones se procede a convertirlo en espectro de desplazamiento, en el cual en base del espectro de desplazamiento reducido por amortiguamiento y el periodo objetivo seleccionado, se calcula el desplazamiento objetivo en base al procedimiento detallado en 2.2.3.2.1.



Gráfica 18. Espectro de desplazamiento reducido NEC-SE-DS

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.6 Rigidez efectiva de los aisladores

Según el procedimiento detallado en la sección 2.2.3.3 se obtiene los resultados de rigidez horizontal y vertical de cada aislador. En la primera interacción se asigna los mismos valores de rigidez efectiva para todos los aisladores.

Peso sísmico de la estructura	1957.17	Tn
Número de aisladores	15	U
Rigidez efectiva horizontal	642.96	Tn/m
Rigidez efectiva horizontal / cada AS	42.86	Tn/m
Rigidez efectiva vertical	787623.17	Tn/m
Rigidez efectiva vertical / cada AS	52508.21	Tn/m

Tabla 16. Rigidez efectiva inicial del sistema

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.7 Análisis de aisladores según su carga

En base de las combinaciones de carga detalladas en el literal 2.2.3.5, se clasifica el tipo de aisladores según la carga máxima en cada aislador, a partir de los valores obtenidos detallados en la Tabla 17, se determina que solo se utilizará un tipo de aislador elastomérico.

ID	Pmax (Tn)	ID	Pmax (Tn)
K1	208.87	K9	256.04
K2	267.51	K10	232.01
K3	284.00	K11	225.80
K4	241.01	K12	262.62
K5	241.09	K13	259.60
K6	228.46	K14	241.27
K7	175.28	K15	190.31
K8	277.01		

Tabla 17 Tipo de aisladores según la carga máxima en cada aislador

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Se comprueba el estado de compresión de los aisladores según la carga mínima.

ID	Pmin (Tn)	Comprobación	ID	Pmin (Tn)	Comprobación
K1	4.280	Ok	K9	68.238	Ok
K2	44.337	Ok	K10	23.195	Ok
K3	78.583	Ok	K11	28.712	Ok
K4	11.243	Ok	K12	35.840	Ok
K5	17.693	Ok	K13	40.353	Ok
K6	13.726	Ok	K14	34.298	Ok
K7	1.494	Ok	K15	16.979	Ok
K8	76.528	Ok			

Tabla 18 Comprobación de compresión en cada aislador

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.8 Cálculo de desplazamiento máximo

Se calcula el DTM en base a las deformaciones obtenidas de los aisladores más alejados del sistema de aislación en planta. El resultado es el valor máximo calculado de la suma vectorial de los desplazamientos de cada aislador.

AISLADOR	ESPECX			ESPECY		
	X (m)	Y (m)	DTM (m)	X (m)	Y (m)	DTM (m)
K1	0.41	0.13	0.43	0.14	0.32	0.35
K7	0.31	0.13	0.34	0.09	0.32	0.34
K11	0.41	0.14	0.44	0.14	0.34	0.37
K15	0.33	0.14	0.36	0.12	0.34	0.37
DTM		0.44		m		

Tabla 19 Cálculo de desplazamiento máximo

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.9 Comprobación del desplazamiento objetivo

Se comprueba el desplazamiento objetivo calculado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, con los resultados vectoriales obtenidos del análisis modal espectral en el centro de masas de la estructura.

Desplazamiento	X (m)	Y (m)	Resultado Vectorial	Comprobación
CMX	0.32	0.02	0.32	Ok
CMY	0.02	0.33	0.33	Ok

Tabla 20 Cálculo de desplazamiento máximo

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.10 Cálculo del diámetro del aislador

Siguiendo los pasos detallados en 2.2.3.6, se procede a calcular el diámetro del aislador en base a diámetros comerciales (Figura 6), y se verifica el área reducida del literal 2.2.3.6.3.

ID AISLADOR	Área (m ²)	Diámetro (m)	Diámetro propuesto (m)	Área propuesta (m ²)	Área reducida (m ²)	Comprobación
AS1	0.13	0.41	0.520	0.21	4.41	Ok

3.3.11 Comprobación de activación del sistema

Se coloca aisladores LRB en el perímetro de la planta del interfaz de aislación en la ubicación: K1, K7, K15, K11, K5, K13, K2, K10. Se coloca un porcentaje de aisladores con núcleo de plomo con el fin de dejar la activación del sistema lo más bajo posible (1 al 2%) del peso sísmico de la estructura.

Sumatoria de Q_d (Tn)	40.89
Peso sísmico de la estructura (Tn)	1957.17
Factor	3%
% de núcleos de plomo	58.71
Activación del sistema	Ok
% de núcleos de plomo colocados	2.09%

Tabla 21 Comprobación de activación del sistema de aislación

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.12 Cálculo de propiedades mecánicas de los aisladores LRB

Denominación	Símbolo	Valor	Unidades
Cantidad de aisladores		8	U
Resistencia característica	Q_d	4.10	Tn
Rigidez post fluencia	K_d	21.66	Tn/m
Rigidez efectiva horizontal	K_{effih}	33.66	Tn/m
Rigidez efectiva vertical	K_{effiv}	52508.21	Tn/m
Diámetro núcleo de plomo		0.08	m
Rigidez post fluencia	K_u	216.62	Tn/m
Fuerza de fluencia	F_y	4.56	Tn
Desplazamiento de fluencia	Δ_y	0.02	m
Energía disipada	EDC_M	5.27	Tn
Amortiguamiento del sistema	β_M	0.21	-

Tabla 22 Propiedades mecánicas aisladores LRB

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.13 Cálculo de propiedades mecánicas de los aisladores RB

Denominación	Símbolo	Valor	Unidades
Cantidad de aisladores		7	U
Rigidez efectiva horizontal	K_{effih}	21.66	Tn/m
Rigidez efectiva vertical	K_{effiv}	52508.21	Tn/m
Rigidez post fluencia	K_u	21.66	Tn/m
Rigidez post fluencia	K_d	216.62	Tn/m

Tabla 23 Propiedades mecánicas aisladores RB

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.14 Propiedades nominales

En base a los resultados obtenidos para la rigidez efectiva de los aisladores RB (Tabla 23) y LRB (Tabla 22) se procede a la segunda iteración para la comprobación del sistema con las nuevas rigideces efectivas calculadas.

Desplazamiento	X (m)	Y (m)	Resultado Vectorial (m)	Comprobación
CMX	0.329634	0.010829	0.329634	Ok
CMY	0.010831	0.334763	0.334763	Ok

Tabla 24 Desplazamiento objetivo segunda iteración

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

En la Tabla 25 se observa las propiedades finales del sistema.

Denominación	Símbolo	Valor	Unidades
Peso de la estructura	W	1957.17	Tn
Rigidez efectiva del sistema	K_{eff}	269.25	Tn/m
Amortiguamiento objetivo	β_{obj}	20.00	%
Amortiguamiento efectivo	β_{eff}	21.29	%
Período objetivo	T_{obj}	3.5	s
Período efectivo	T_{eff}	5.41	s
Desplazamiento objetivo	D_M	0.342	m

Tabla 25 Propiedades finales del sistema

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.15 Verificación capacidad de carga

Se verifica la capacidad de carga mediante las ecuaciones detalladas 2.2.3.8.1, para el caso sísmico, estático y verificar que cumpla compresión en cada aislador.

Tipo Aislador	S	Pcr	Caso Sísmico	Caso Estático	Cumple Compresión
AS1	16.25	4223.88	Ok	Ok	Ok

Tabla 26 Verificación capacidad de carga de los aisladores

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.16 Verificación de las propiedades límites

Se verifica si los aisladores son capaces de trabajar al modificar sus propiedades efectivas ante un límite superior e inferior mediante el procedimiento detallado en 2.2.3.9.

Denominación	Símbolo	Propiedades límite superior	Propiedades límite inferior	Unidades
Rigidez post fluencia	λK_d	38.99	13.00	Tn/m
Resistencia característica	λQ_d	7.38	2.46	Tn
Rigidez efectiva horizontal	K_{effih}	60.58	20.19	Tn/m
Rigidez efectiva vertical	K_{effiv}	52508.21	52508.21	Tn/m
Rigidez post fluencia	K_u	389.91	129.97	Tn/m
Desplazamiento de fluencia	Δ_y	0.02	0.02	m
Fuerza de fluencia	F_y	8.20	2.73	Tn
Fuerza máxima	F_{max}	129.24	40.34	Tn

Tabla 27 Propiedades del límite del sistema

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Con las propiedades límite calculadas en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Tabla 27 se procede a verificar que ningún aislador presente tracción en su comportamiento mecánico.

ID	Pmin (Tn)	Comprobación	ID	Pmin (Tn)	Comprobación
K1	8.84	Ok	K9	69.44	Ok
K2	47.75	Ok	K10	27.17	Ok
K3	79.70	Ok	K11	32.19	Ok
K4	16.04	Ok	K12	39.52	Ok
K5	22.07	Ok	K13	43.61	Ok
K6	18.00	Ok	K14	37.54	Ok
K7	5.54	Ok	K15	20.45	Ok
K8	77.59	Ok			

Tabla 28 Comprobación de compresión, límite superior

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

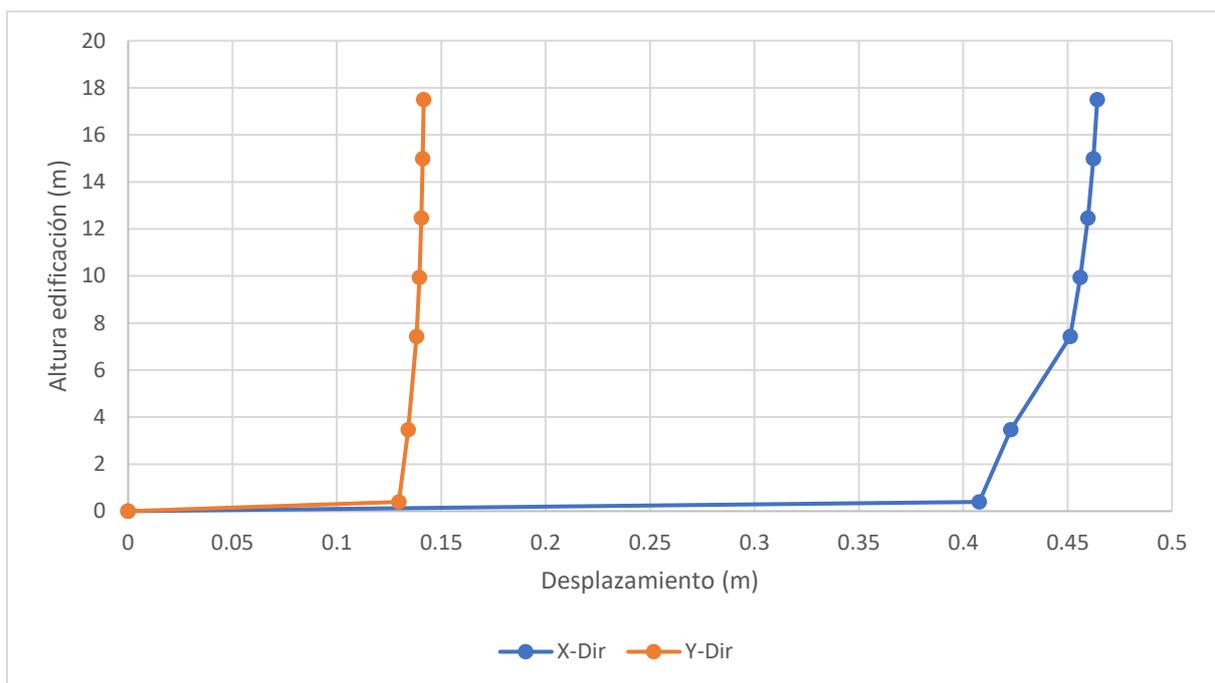
ID	Pmin (Tn)	Comprobación	ID	Pmin (Tn)	Comprobación
K1	31.33	Ok	K9	75.22	Ok
K2	63.18	Ok	K10	45.44	Ok
K3	85.10	Ok	K11	48.71	Ok
K4	39.42	Ok	K12	57.36	Ok

K5	43.40	Ok	K13	59.60	Ok
K6	39.37	Ok	K14	53.57	Ok
K7	25.11	Ok	K15	36.63	Ok
K8	82.85	Ok			

Tabla 29 Comprobación de compresión, límite inferior

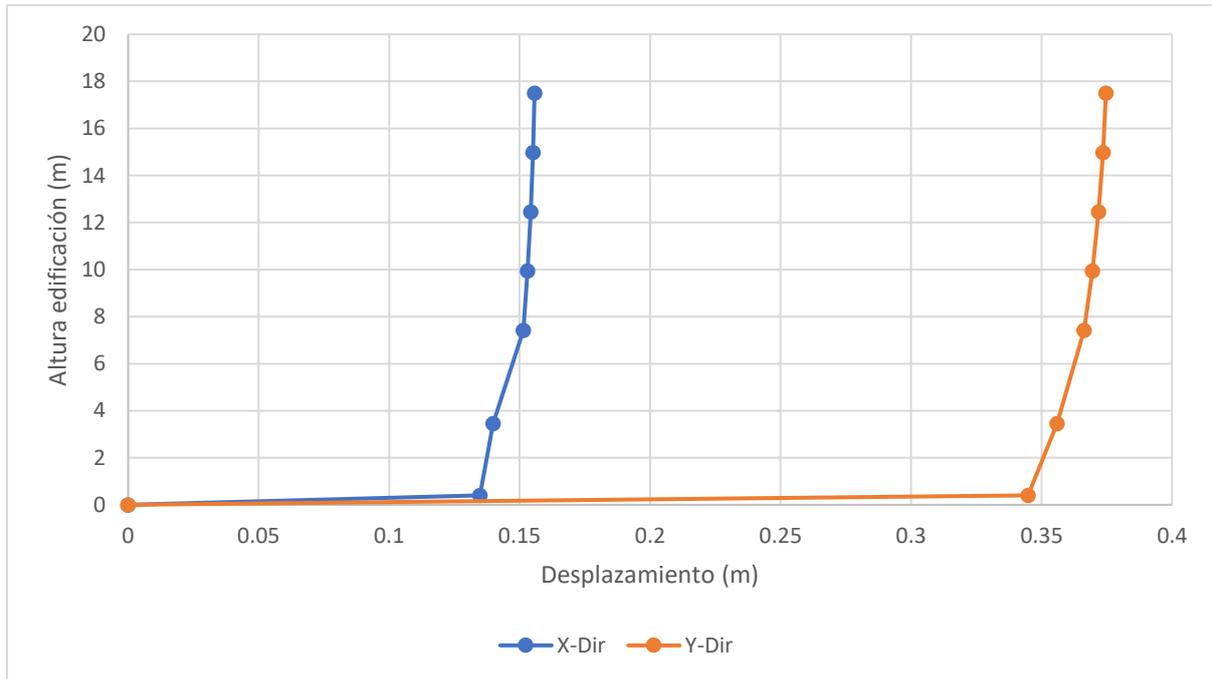
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

En base a los resultados obtenidos del desplazamiento máximo de piso se comprueba el desplazamiento máximo total obtenido en 3.3.8.



Gráfica 19 Desplazamiento máximo de piso (DTM-ESPECX)

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

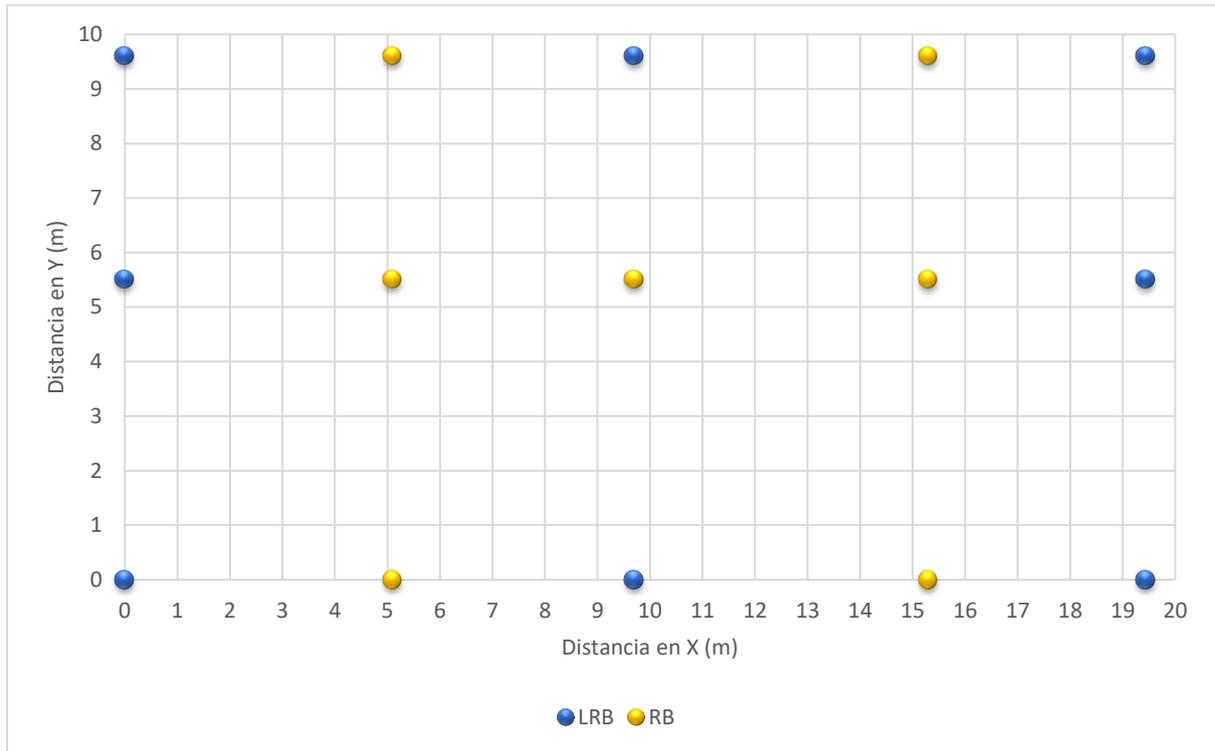


Gráfica 20 Desplazamiento máximo de piso (DTM-ESPECY)

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.3.17 Ubicación final de los aisladores sísmicos

Como se puede observar en la Gráfica 21 los aisladores LRB se colocaron en el perímetro del interfaz de aislación ya que así proveen mejor rigidez torsional.

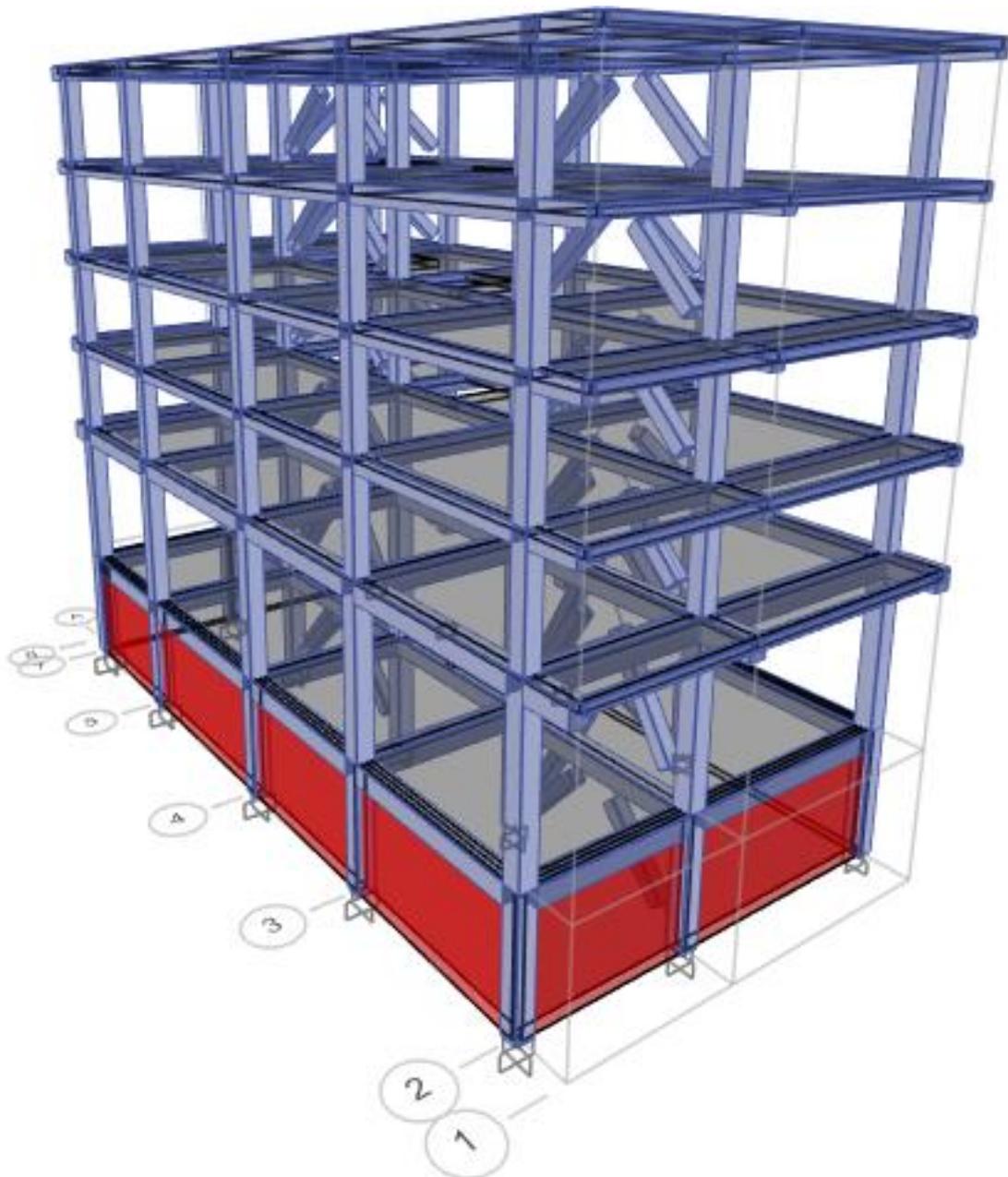


Gráfica 21 Ubicación de aisladores LRB y RB

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.4 Diseño de riostras de pandeo restringido

3.4.1 Configuración estructural



Gráfica 22 Configuración estructural del sistema de disipación

Fuente: Computers and Structures (Etabs)

3.4.2 Secciones de diseño

Para que la estructura alcance los niveles de desempeño y un comportamiento dinámico adecuado se obtuvo las siguientes secciones transversales y acero longitudinal para columnas y vigas.

Piso	Sección (cm)	# Long. Barras 3-axis	# Long. Barras 2-axis	Φ Long. (mm)	Φ esq. (mm)	Rec. (cm)	Φ transversal. (mm)	# Long. Trans. 3-axis	# Long. Trans. 2-axis
Nivel 0	45x45	5	5	16	16	3	10	5	5
Nivel 1	35x35	4	4	16	16	3	10	4	4
Nivel 2	35x35	4	4	16	16	3	10	4	4
Nivel 3	35x35	4	4	16	16	3	10	4	4
Nivel 4	35x35	4	4	16	16	3	10	4	4
Nivel 5	35x35	4	4	16	16	3	10	4	4

Tabla 30 Secciones de columnas

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Piso	Sección (cm)	Rec. Parte superior (cm)	Rec. Parte inferior (cm)	Área parte superior I-fin (cm ²)	Área parte superior J-fin (cm ²)	Área parte inferior I-fin (cm ²)	Área parte inferior J-fin (cm ²)
Nivel 0	40x45	3	3	16.08	16.08	16.08	16.08
Nivel 1	40x45	3	3	16.08	16.08	16.08	16.08
Nivel 2	30x35	3	3	12.06	12.06	12.06	12.06
Nivel 3	30x35	3	3	12.06	12.06	12.06	12.06
Nivel 4	30x35	3	3	12.06	12.06	12.06	12.06
Nivel 5	30x35	3	3	10.05	10.05	10.05	10.05

Tabla 31 Secciones de vigas

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Para el análisis de torsión en planta se evalúa la forma modal y el porcentaje de participación modal de la masa del sistema aislado.

En donde se verifica el comportamiento dinámico de la estructura en sus dos primeros modos de vibrar son traslacionales y el tercer modo es rotacional.

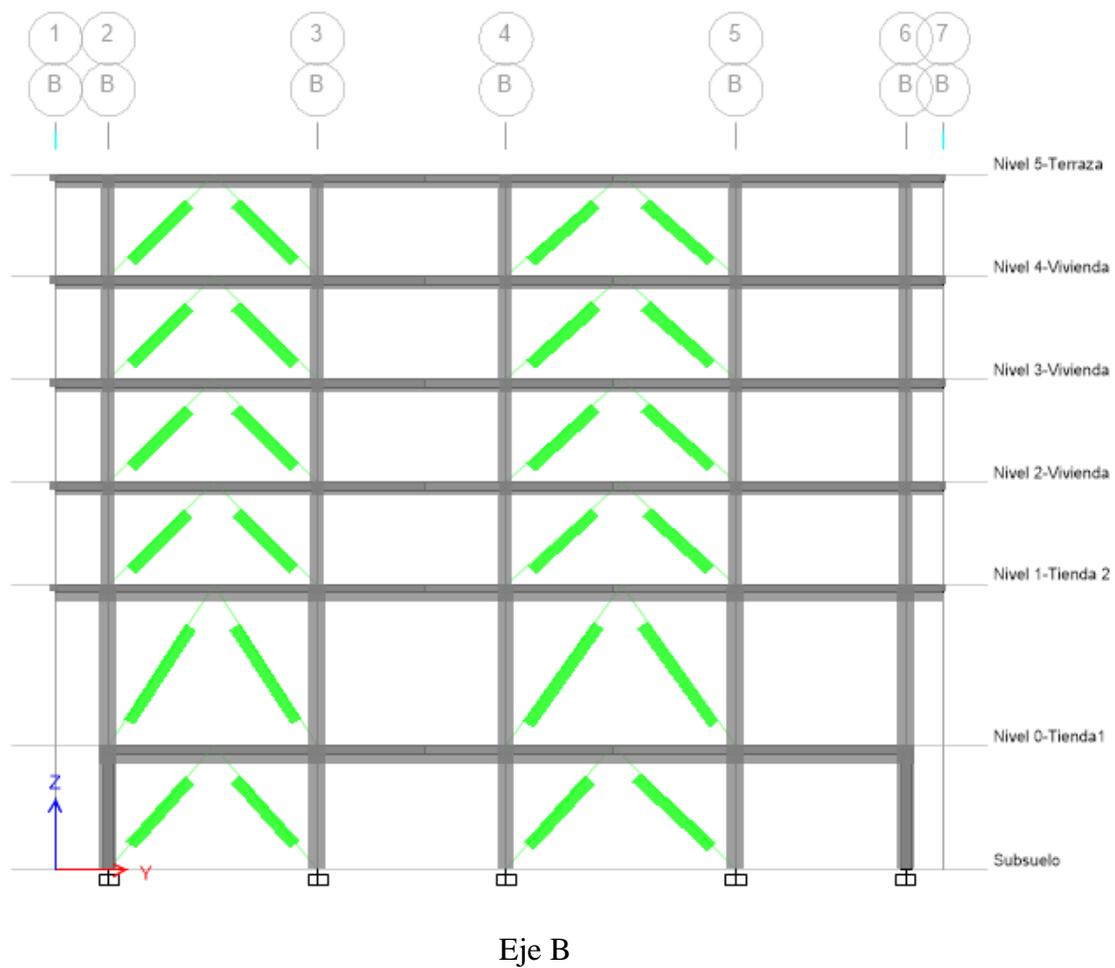
Modo	Período (s)	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	Acumulación de la masa	Tipo
1	0.552	0.3294	0.3241	0.3508	0.3283	0.0032	0.97%	Traslacional
2	0.46	0.3378	0.3442	0.6886	0.6725	0.0206	5.98%	Traslacional
3	0.353	0.0213	0.0042	0.0213	0.0042	0.6535	3068.08%	Rotacional
4	0.186	0.0656	0.052	0.7561	0.7252	0.0003	0.46%	Traslacional
5	0.143	0.0261	0.0494	0.7822	0.7747	0.0031	6.28%	Traslacional
6	0.12	0.0018	0.0007	0.6904	0.6733	0.0897	4983.33%	Rotacional

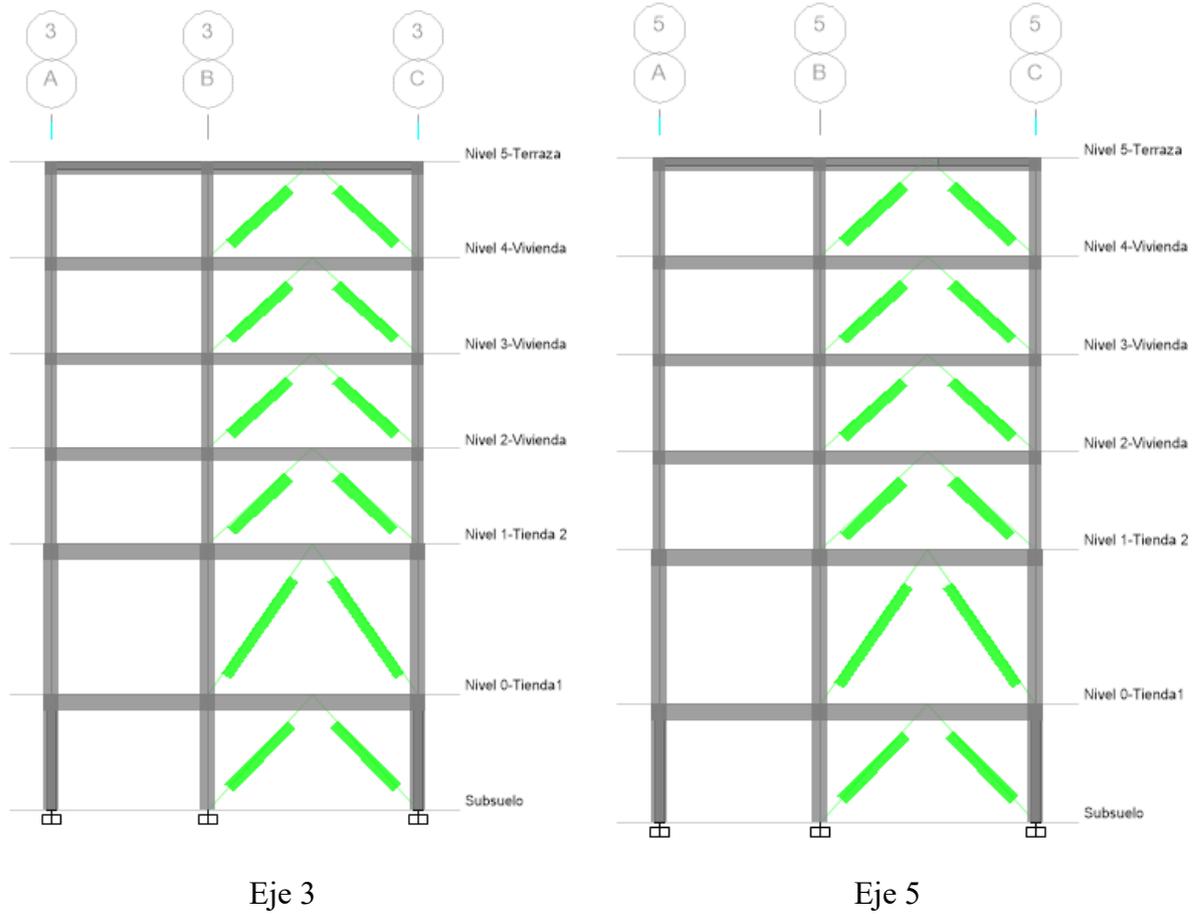
Tabla 32 Períodos y modos de vibración de la masa

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

3.4.3 Diseño basado en control

En base a análisis estático no lineal y tomando en consideración parámetros de no linealidad para cumplir con los objetivos de diseño se diseñan las diagonales restringidas a pandeo.





Eje 3

Eje 5

Gráfica 23 Ubicación en elevación de BRB

Fuente: Computers and Structures (Etabs)

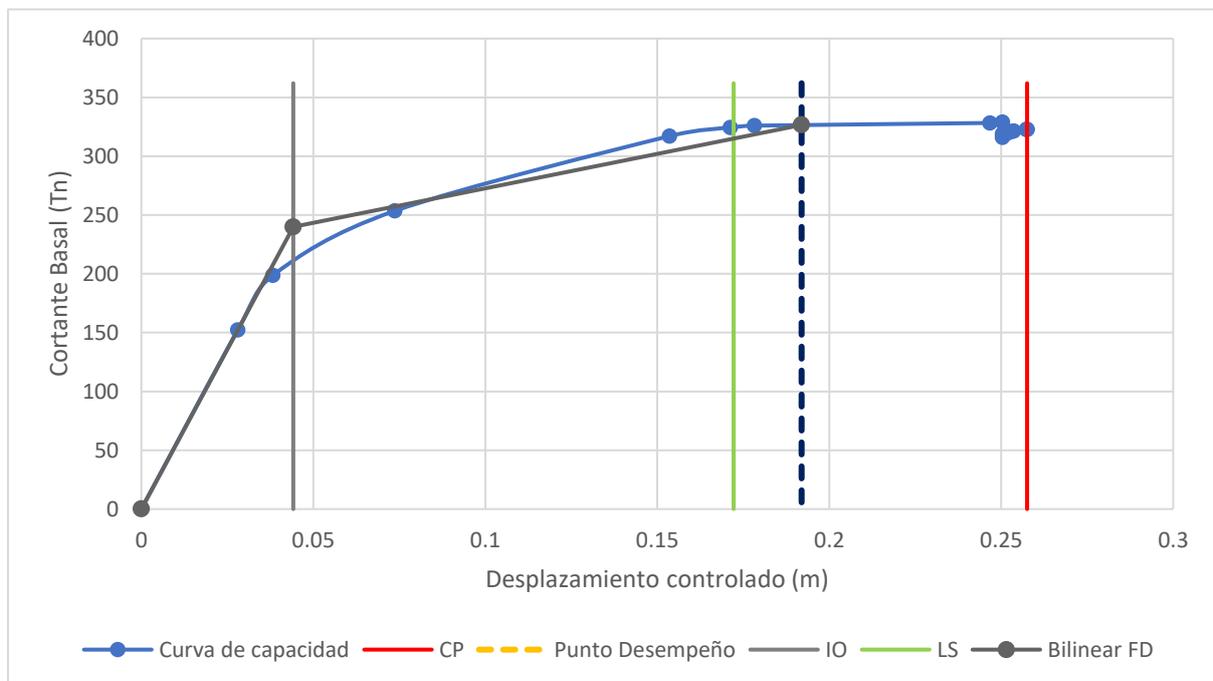
4. ANÁLISIS DE DATOS

4.1 Análisis pushover

4.1.1 Curvas de capacidad

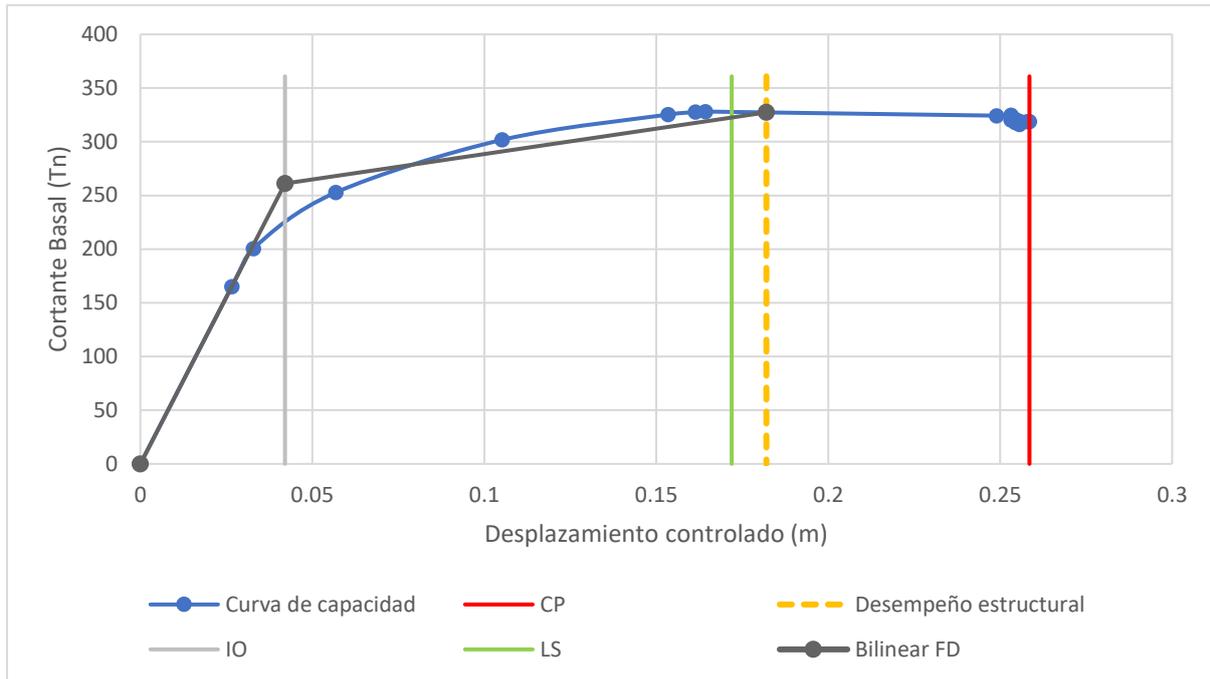
4.1.1.1 Modelo base fija

En las Gráfica 24 y Gráfica 25, para los casos PushX y PushY respectivamente, se observa como la capacidad estructural llega a sobrepasar el límite de seguridad de vida (LS), en ambos casos.



Gráfica 24 Resultados curva de capacidad-NSP-Base fija-Sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano



Gráfica 25 Resultados curva de capacidad-NSP-Base fija-Sentido Y

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

4.1.1.2 Modelo aislación sísmica

La curva de capacidad para el modelo de aislación sísmica no presenta un nivel de desempeño debido a que la estructura se mantiene en su rango inelástico gracias a las propiedades del sistema.

Desplazamiento (m)	Cortante Basal (Tn)
0	0
1.5	14543.401057

Tabla 33 Valores de la curva de capacidad-NSP-Aislación-Sentido X

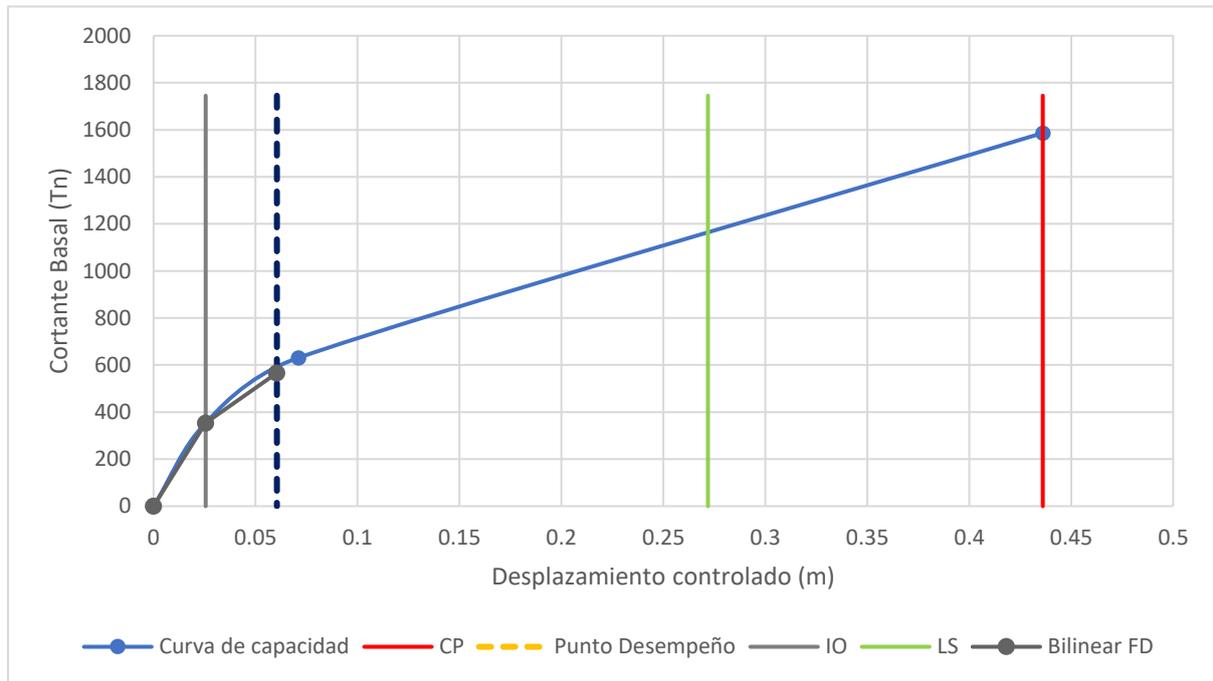
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Desplazamiento (m)	Cortante Basal (Tn)
0	0
1.5	24894.856467

Tabla 34 Valores de la curva de capacidad-NSP-Aislación-Sentido Y

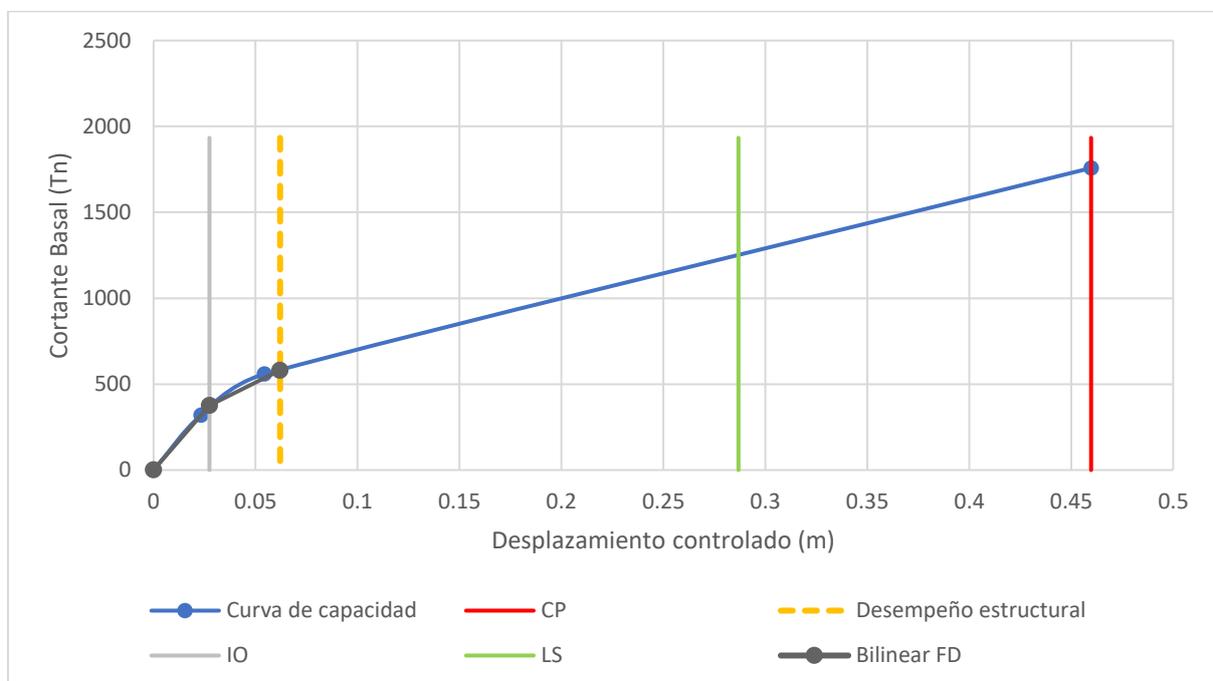
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

4.1.1.3 Diseño disipación sísmica



Gráfica 26 Resultados curva de capacidad-NSP-Disipación-Sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano



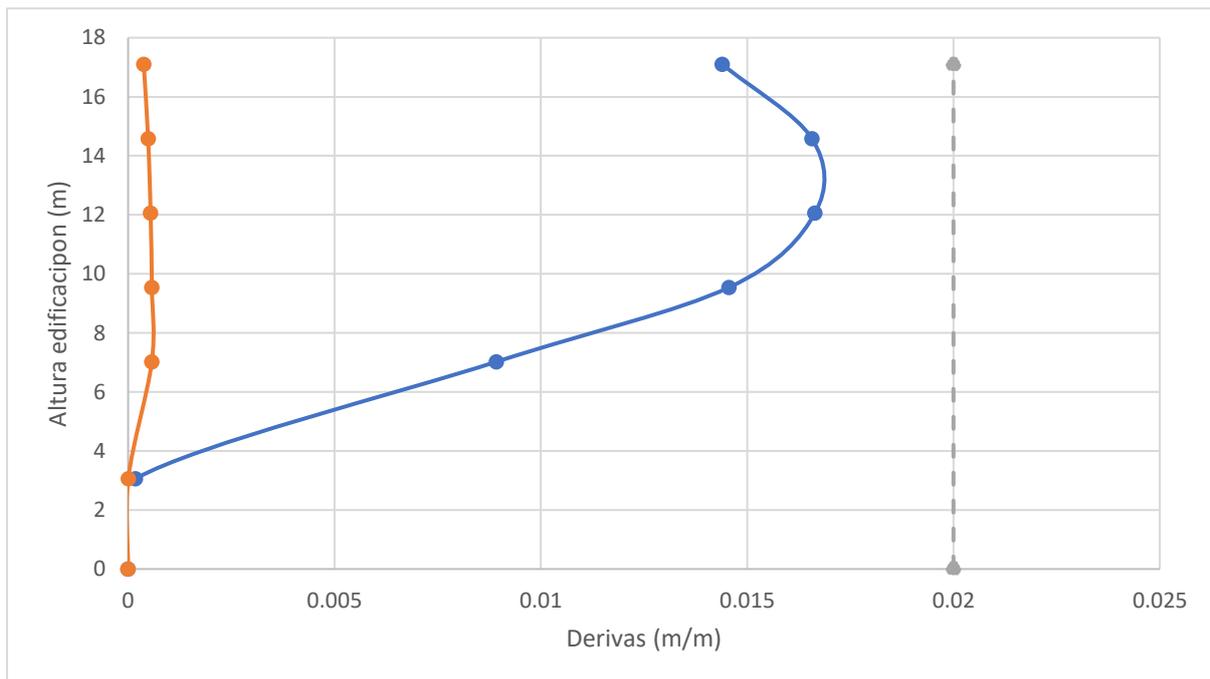
Gráfica 27 Resultados curva de capacidad-NSP-Disipación-Sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

4.1.2 Derivas de piso análisis

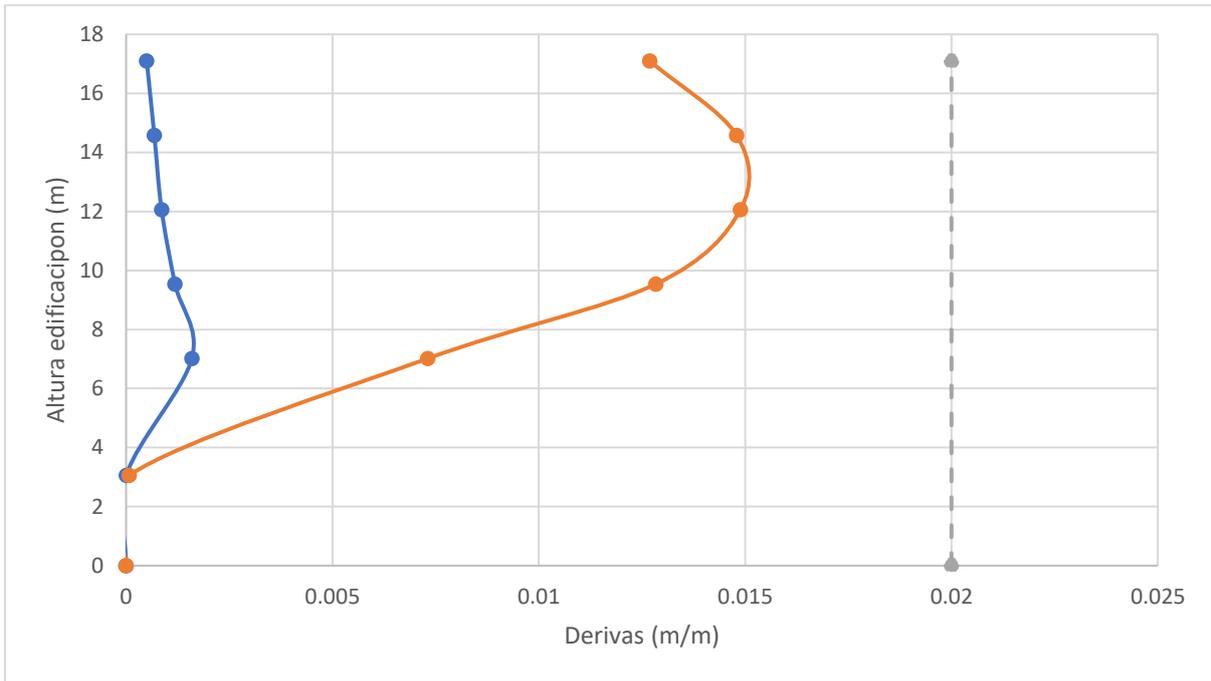
4.1.2.1 Modelo base fija

Para determinar las derivas de piso se toman los valores obtenidos del análisis no lineal en su punto de desempeño para los casos modales, para PUSHX el punto de desempeño se encuentra en el punto 6 y para el PUSHY el punto de desempeño se encuentra en el paso 7.



Gráfica 28 Resultados derivas de piso-NSP-Base fija-Sentido X

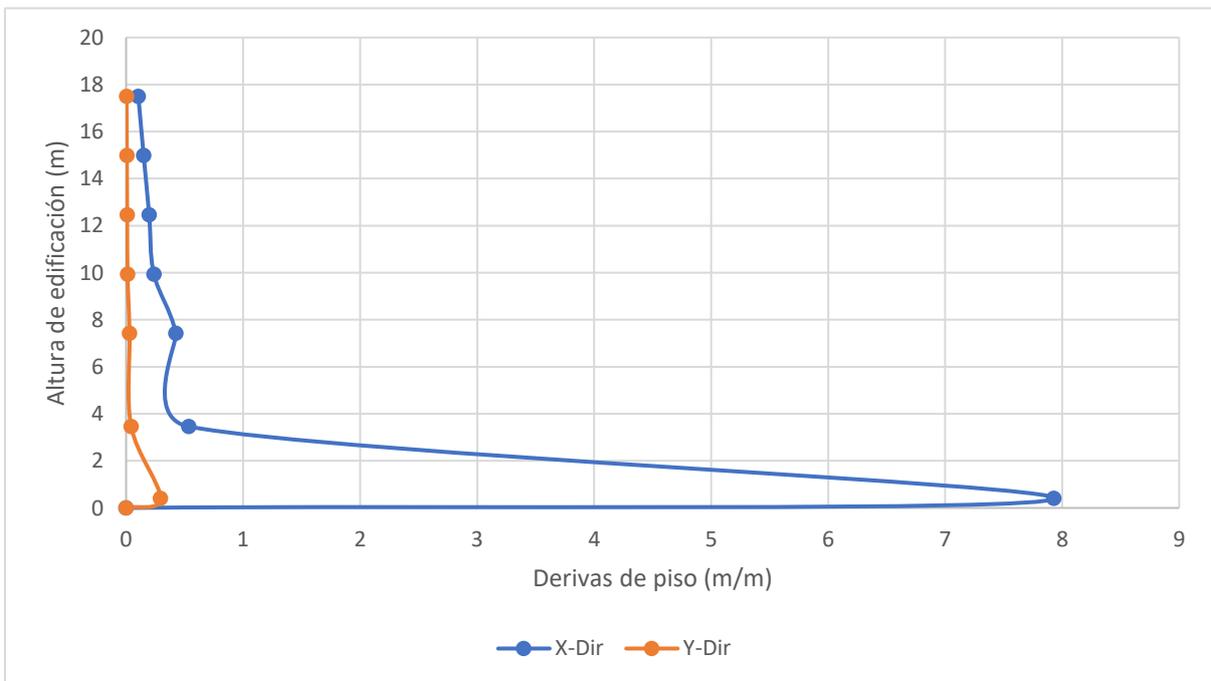
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano



Gráfica 29 Resultados derivas de piso-NSP-Base fija-Sentido Y

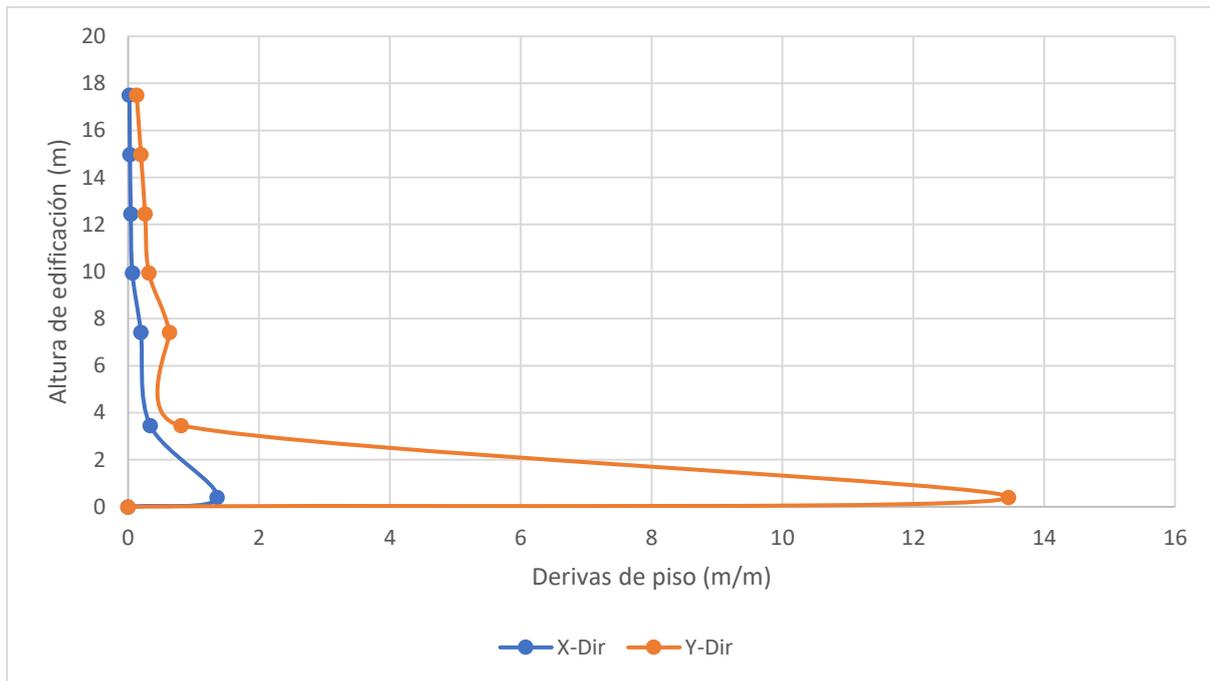
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

4.1.2.2 Modelo aislación sísmica



Gráfica 30 Resultados derivas de piso-NSP-Aislación-Sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano



Gráfica 31 Resultados derivas de piso-NSP-Aislación-Sentido Y

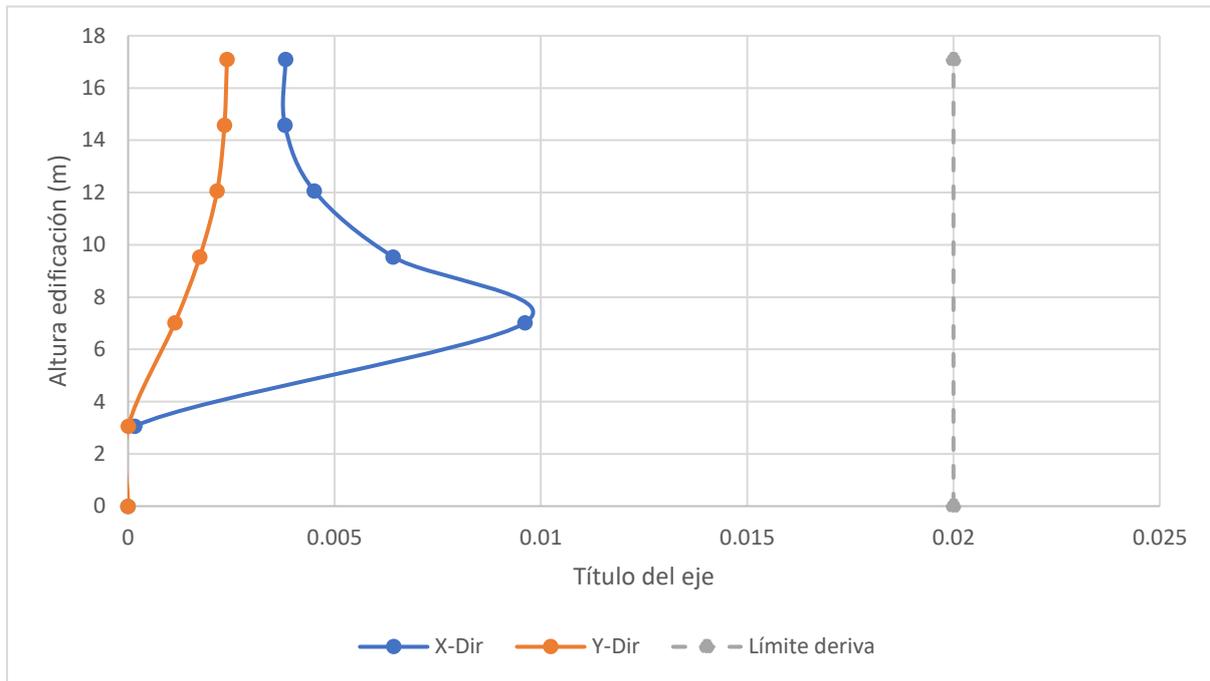
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Altura edificación (m)	Derivas de piso (m/m)			
	PUSHX		PUSHY	
	X-Dir	Y-Dir	X-Dir	Y-Dir
0	0	0	0	0
0.4	7.928	0.293	1.358	13.455
3.46	0.536	0.043	0.338	0.808
7.42	0.426	0.030	0.194	0.631
9.94	0.237	0.012	0.064	0.318
12.46	0.197	0.009	0.041	0.259
14.98	0.150	0.006	0.028	0.196
17.5	0.104	0.004	0.019	0.130

Tabla 35 Resultados de derivas de piso-NSP-Aislación

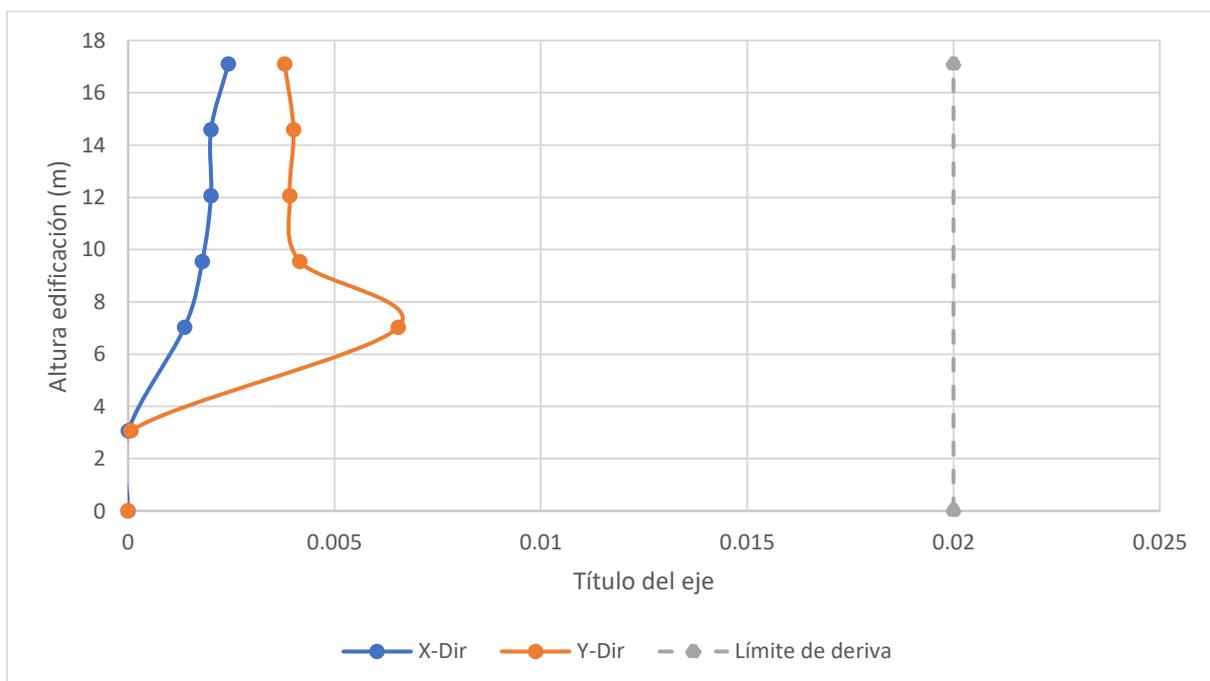
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

4.1.2.3 Diseño disipación sísmica



Gráfica 32 Resultados derivas de piso-NSP-Disipación-Sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano



Gráfica 33 Resultados derivas de piso-NSP-Disipación-Sentido Y

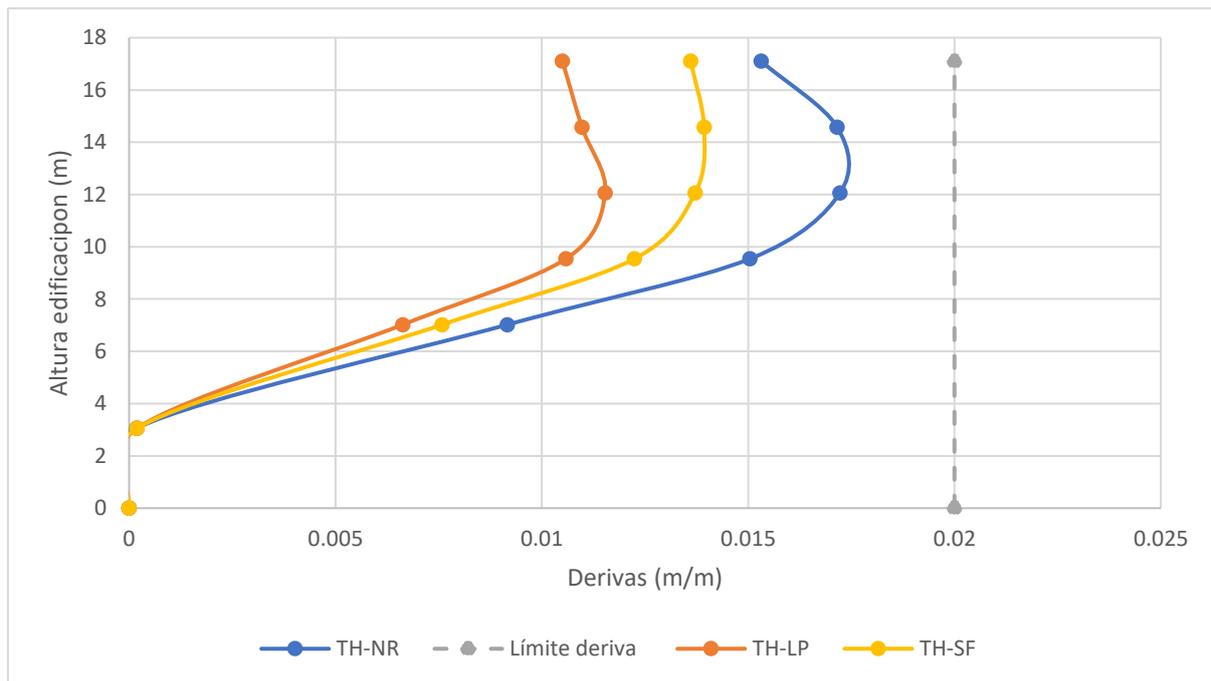
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

4.2 Análisis historia de respuesta

4.2.1 Derivas de piso

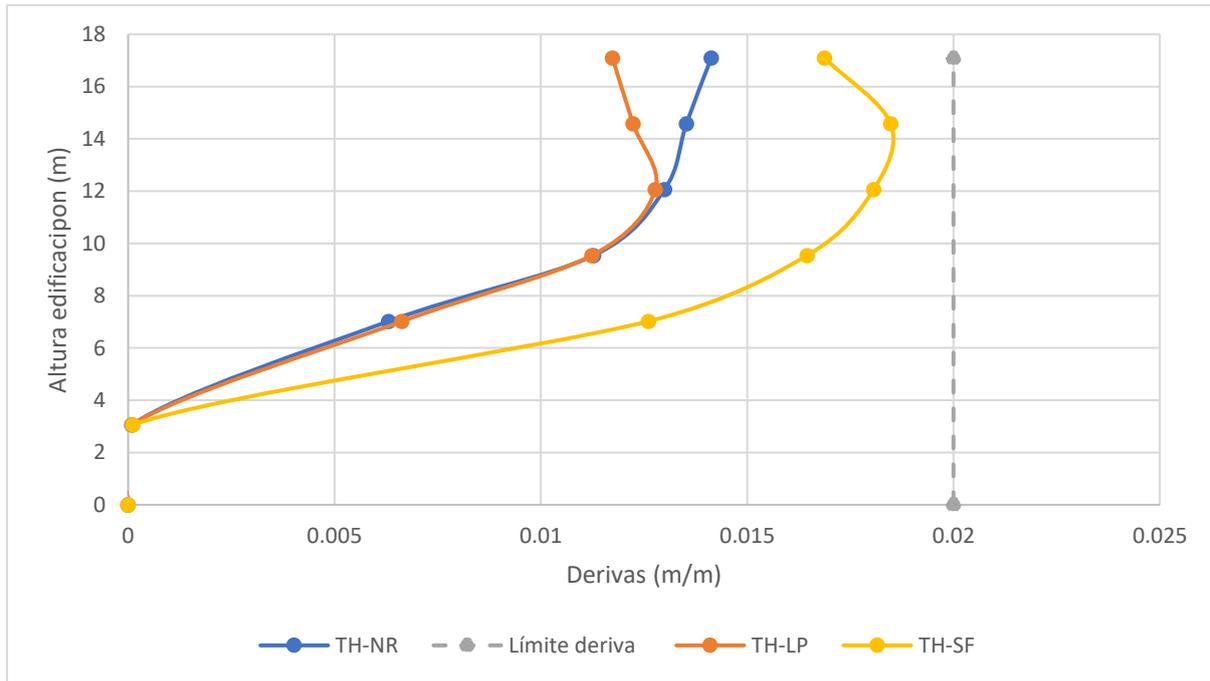
Según la NEC-SE-DS, se tomará para el diseño la respuesta máxima de los parámetros de interés.

4.2.1.1 Modelo base fija



Gráfica 34 Resultados derivas de piso-NLRHA-Base fija-Sentido X

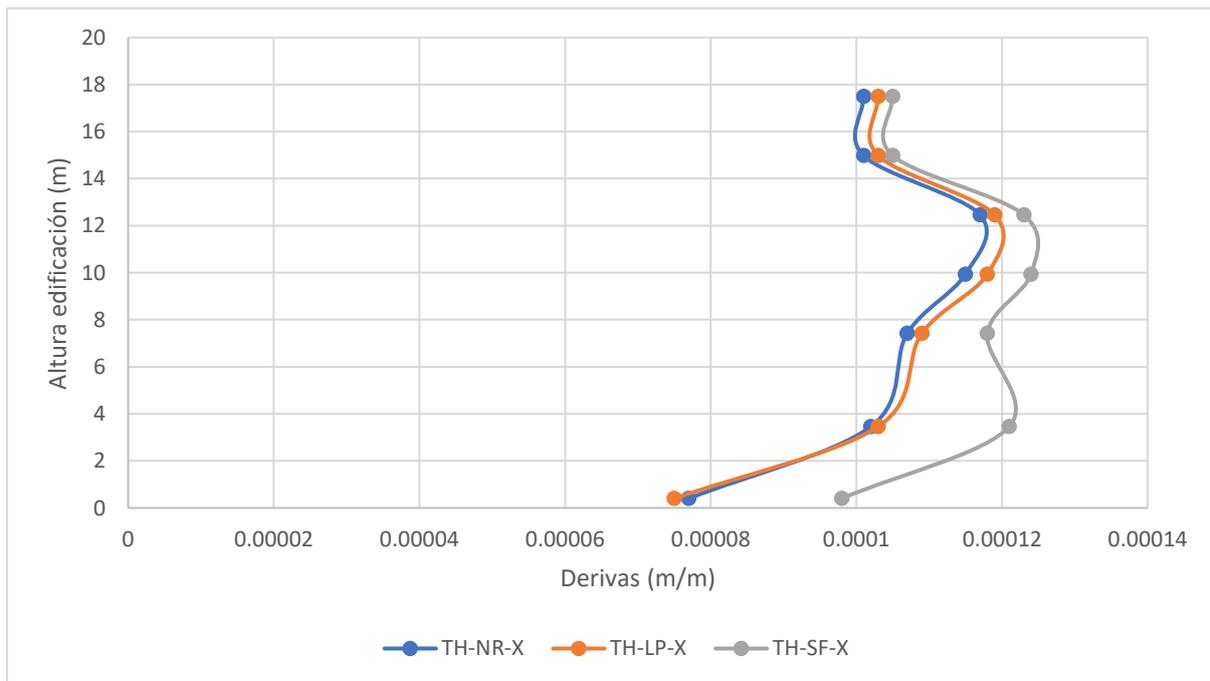
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano



Gráfica 35 Resultados derivas de piso-NLRHA-Base fija-Sentido Y

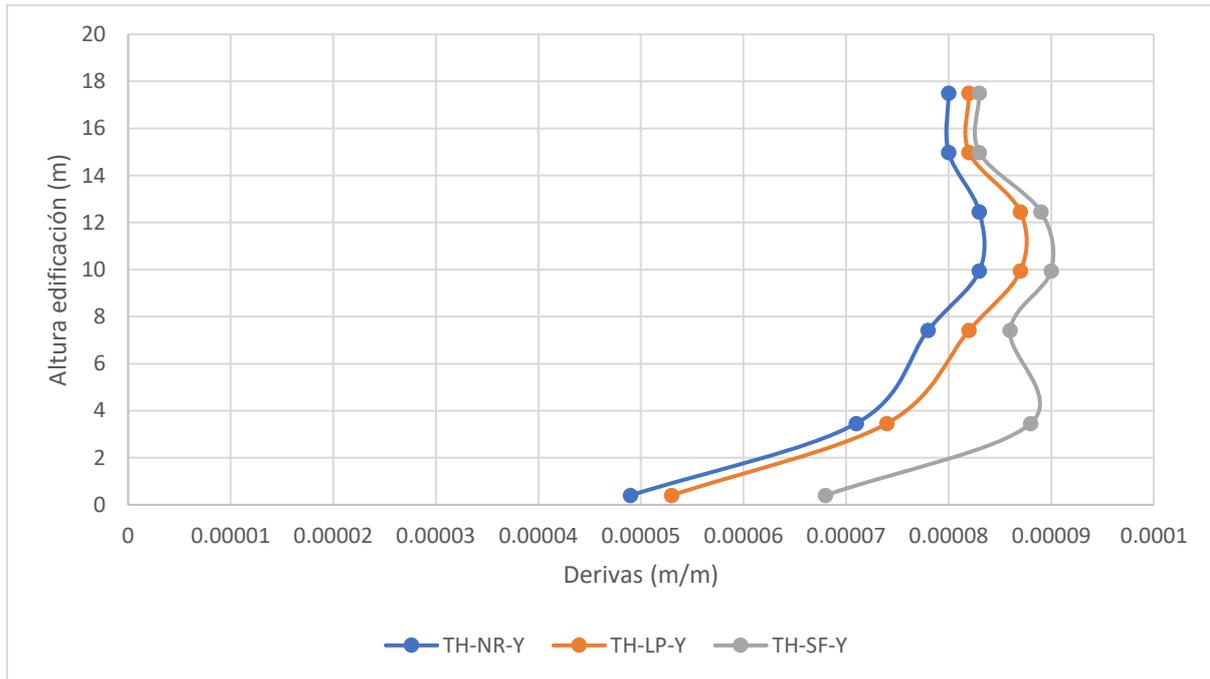
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

4.2.1.2 Modelo aislación sísmica



Gráfica 36 Resultados derivas de piso-NLRHA-Aislación-Sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano



Gráfica 37 Resultados derivas de piso-NLRHA-Aislación-Sentido Y

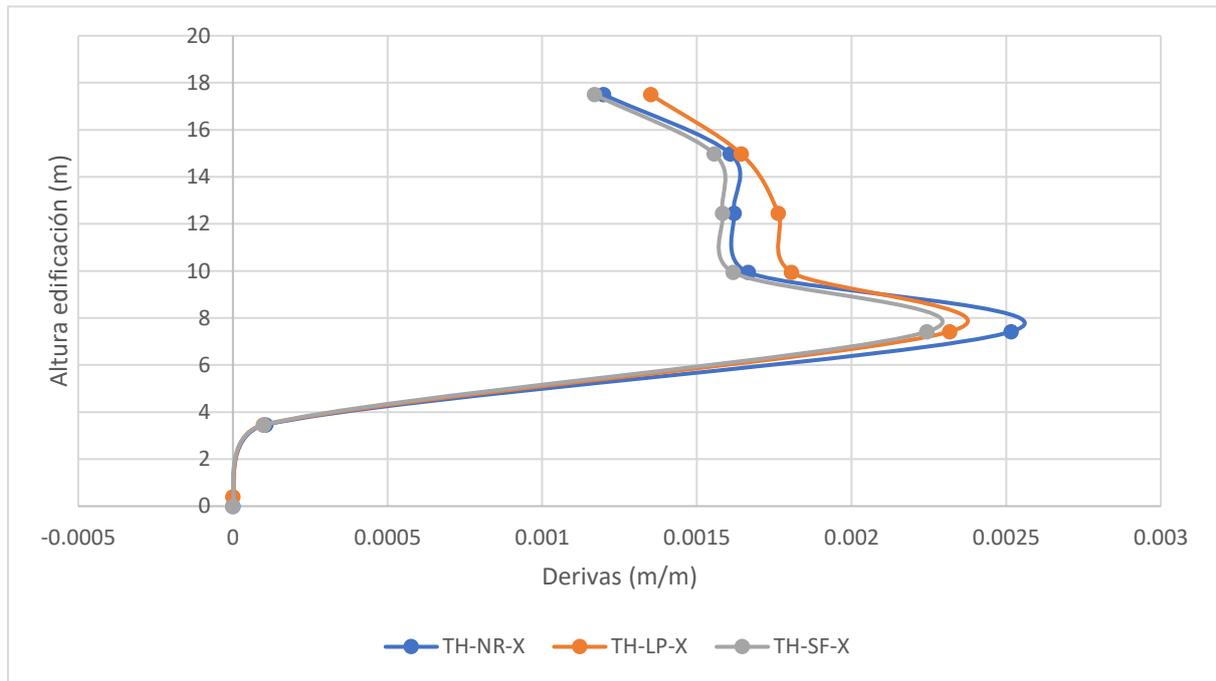
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Altura edificación (m)	Derivas de piso (m/m)					
	Time History: Northridge		Time History: Loma Prieta		Time History: San Fernando	
	TH-NR-X	TH-NR-Y	TH-LP-X	TH-LP-Y	TH-SF-X	TH-SF-Y
17.5	0.000101	0.000088	0.000103	0.000082	0.000105	0.000083
14.98	0.000101	0.000088	0.000103	0.000082	0.000105	0.000083
12.46	0.000117	0.000083	0.000119	0.000087	0.000123	0.000089
9.94	0.000115	0.000083	0.000118	0.000087	0.000124	0.00009
7.42	0.000107	0.000078	0.000109	0.000082	0.000118	0.000086
3.46	0.000102	0.000071	0.000103	0.000074	0.000121	0.000088
0.4	0.000077	0.000049	0.000075	0.000053	0.000098	0.000068
0	6.603851	3.095658	10.296373	2.945845	8.339693	10.884656

Tabla 36 Resultados de derivas de piso-NLRHA-Aislación

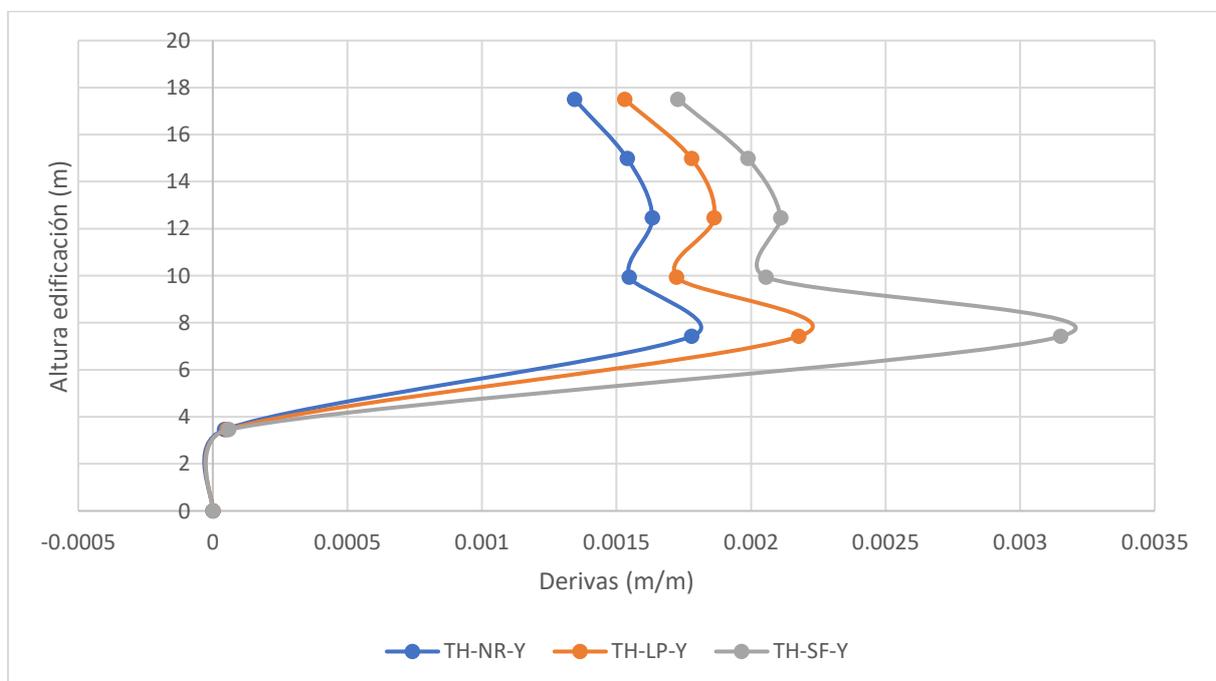
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

4.2.1.3 Diseño disipación sísmica



Gráfica 38 Resultados derivas de piso-NLRHA-Disipación-Sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

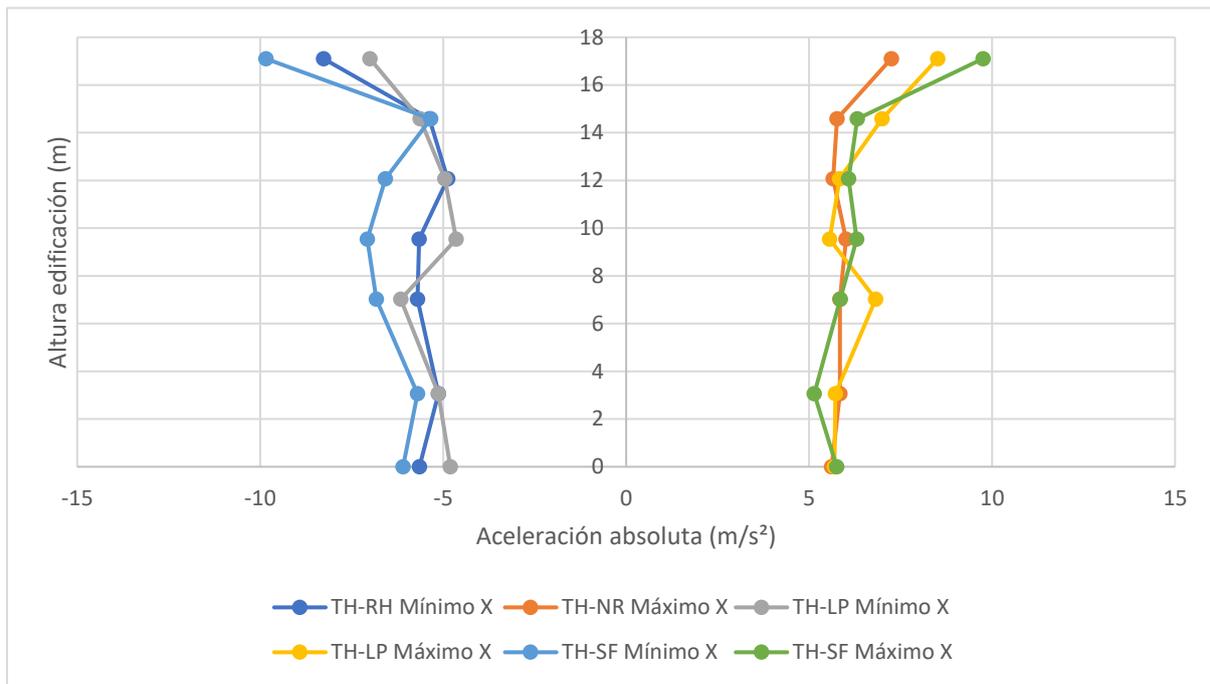


Gráfica 39 Resultados derivas de piso-NLRHA-Disipación-Sentido Y

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

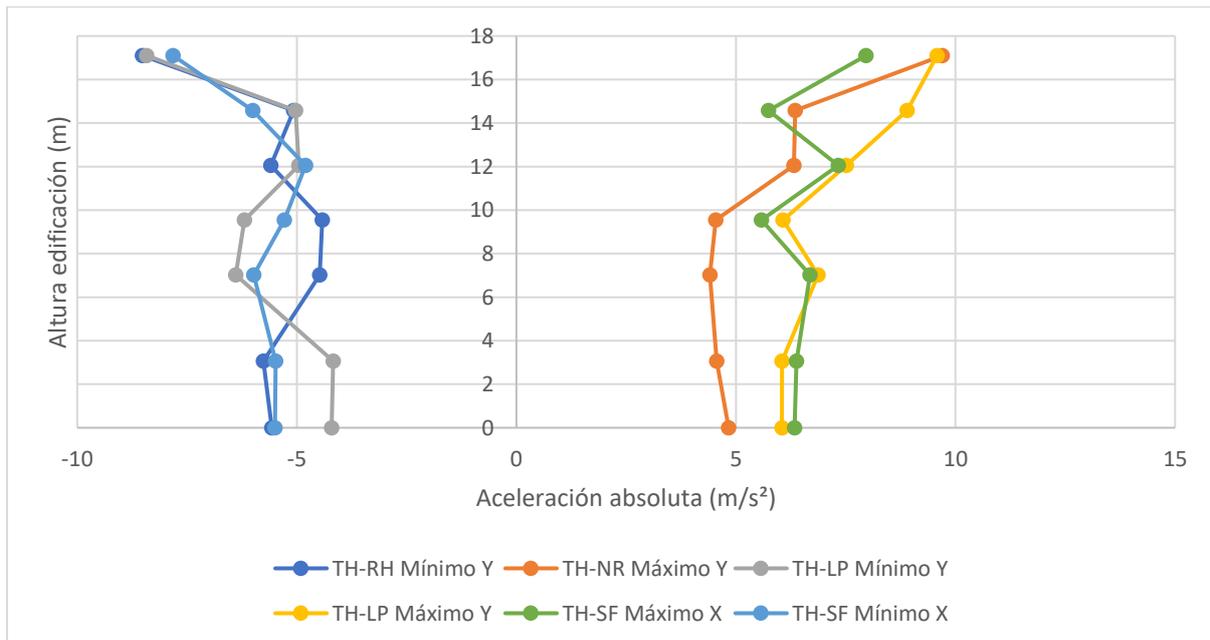
4.2.2 Aceleración de piso

4.2.2.1 Modelo base fija



Gráfica 40 Resultados aceleraciones de piso-NLRHA-Base fija-Sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

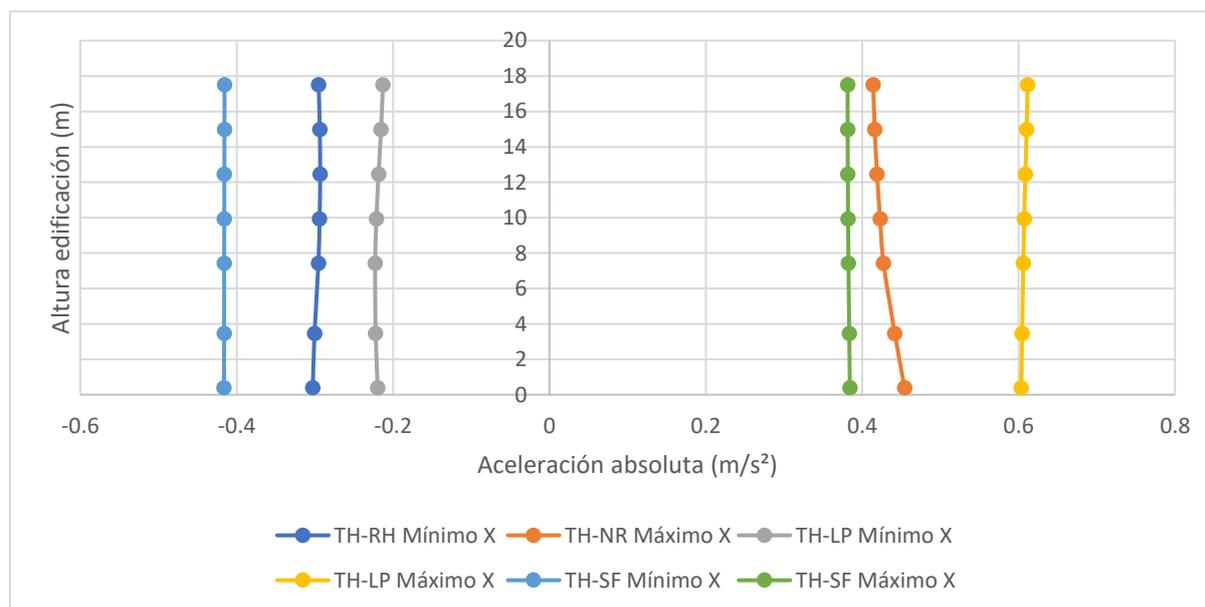


Gráfica 41 Resultados aceleraciones de piso-NLRHA-Base fija-Sentido Y

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

4.2.2.2 Modelo aislación sísmica

Para el análisis de los resultados de aceleraciones de piso, en las Gráfica 42 y Gráfica 43, se ha omitido la aceleración que ingresa al nivel de aislamiento para poder observar las aceleraciones de piso de la superestructura.



Gráfica 42 Resultados aceleraciones de piso-NLRHA-Aislación-Sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

En la Tabla 37, se observa la cantidad de energía que ingresa en el interfaz de aislación para el evento sísmico de Northridge.

Altura edificación (m)	Time History: Northridge _Mínimo X		Time History: Northridge _Máximo X	
	Aceleraciones de piso (m/s)	% energía	Aceleraciones de piso (m/s)	% energía
17.5	-0.295	5.22	0.414	7.37
14.98	-0.294	5.20	0.416	7.41
12.46	-0.293	5.19	0.419	7.46
9.94	-0.294	5.20	0.423	7.53
7.42	-0.295	5.23	0.427	7.61
3.46	-0.300	5.32	0.442	7.86
0.4	-0.303	5.36	0.454	8.09
0	-5.650	100.00	5.615	100.00

Tabla 37 Resultados aceleraciones de piso - TH-NR – sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Altura edificación (m)	Time History: Loma Prieta_Mínimo X		Time History: Loma Prieta_Máximo X	
	Aceleraciones de piso (m ² /s)	% energía	Aceleraciones de piso (m ² /s)	% energía
17.5	-0.213	4.43	0.611	10.74
14.98	-0.215	4.48	0.610	10.72
12.46	-0.219	4.55	0.609	10.69
9.94	-0.221	4.61	0.607	10.67
7.42	-0.223	4.64	0.606	10.65
3.46	-0.222	4.63	0.604	10.62
0.4	-0.220	4.57	0.603	10.60
0	-4.805	100.00	5.692	100.00

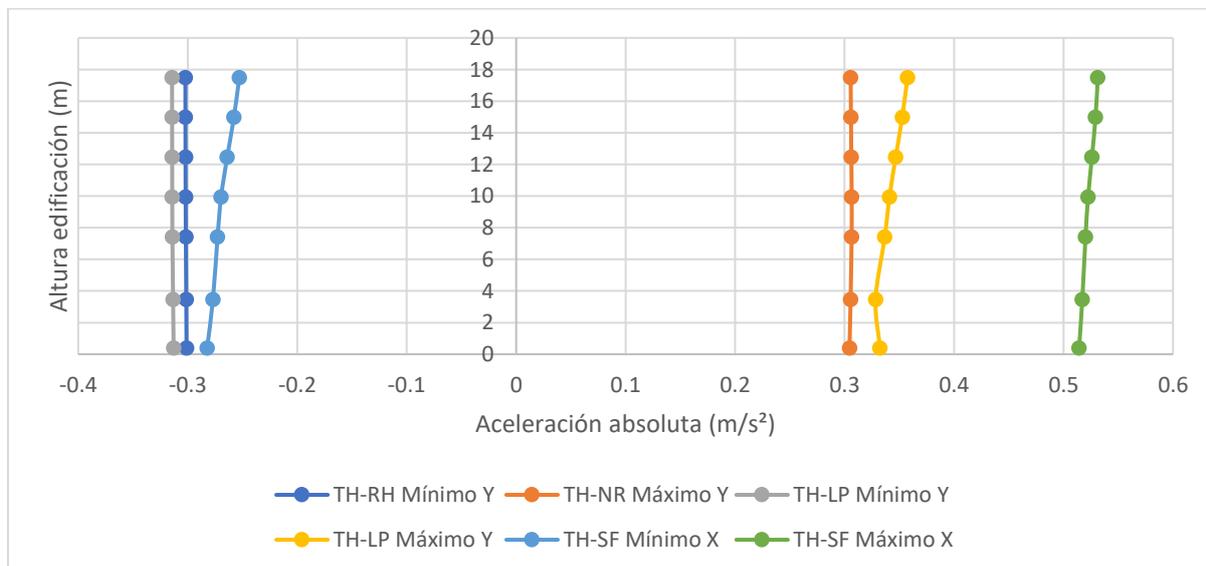
Tabla 38 Resultados aceleraciones de piso - TH-LP – sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Altura edificación (m)	Time History: San Fernando_Mínimo X		Time History: San Fernando_Máximo X	
	Aceleraciones de piso (m ² /s)	% energía	Aceleraciones de piso (m ² /s)	% energía
17.5	-0.416	6.82	0.381	6.63
14.98	-0.416	6.82	0.381	6.63
12.46	-0.416	6.82	0.382	6.64
9.94	-0.416	6.82	0.382	6.64
7.42	-0.416	6.83	0.382	6.65
3.46	-0.416	6.83	0.383	6.67
0.4	-0.416	6.83	0.384	6.68
0	-6.095	100.00	5.751	100.00

Tabla 39 Resultados aceleraciones de piso - TH-SF – sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano



Gráfica 43 Resultados aceleraciones de piso-NLRHA-Aislación-Sentido Y

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Altura edificación (m)	Time History: Northridge_Mínimo X		Time History: Northridge_Máximo X	
	Aceleraciones de piso (m ² /s)	% energía	Aceleraciones de piso (m ² /s)	% energía
17.5	-0.302	5.42	0.306	6.32
14.98	-0.302	5.42	0.306	6.33
12.46	-0.302	5.42	0.306	6.34
9.94	-0.302	5.42	0.306	6.34
7.42	-0.302	5.41	0.306	6.34
3.46	-0.301	5.41	0.305	6.32
0.4	-0.301	5.40	0.304	6.30
0	-5.573	100.00	4.833	100.00

Tabla 40 Resultados aceleraciones de piso - TH-NR – sentido Y

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Altura edificación (m)	Time History: Loma Prieta_Mínimo X		Time History: Loma Prieta_Máximo X	
	Aceleraciones de piso (m ² /s)	% energía	Aceleraciones de piso (m ² /s)	% energía
17.5	-0.314	7.47	0.357	5.91
14.98	-0.314	7.47	0.353	5.83
12.46	-0.314	7.47	0.347	5.73
9.94	-0.314	7.46	0.341	5.64
7.42	-0.314	7.46	0.337	5.57
3.46	-0.313	7.45	0.328	5.43
0	-4.209	100.00	6.046	100.00

Tabla 41 Resultados aceleraciones de piso - TH-LP – sentido Y

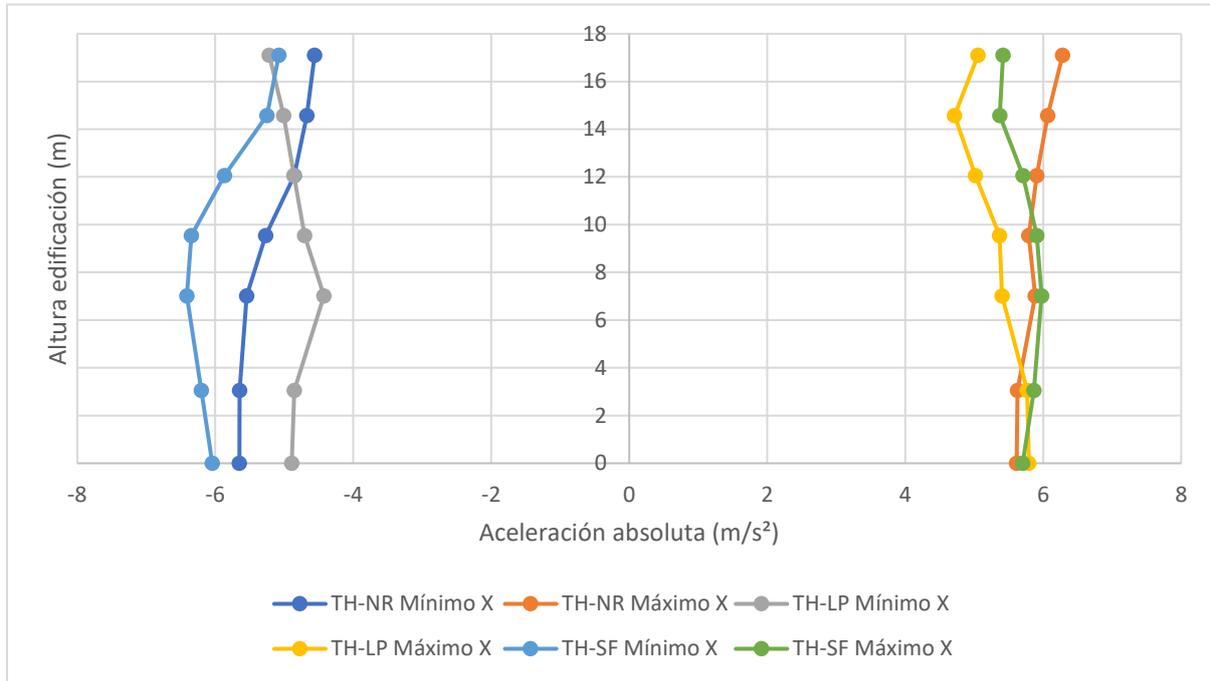
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

Altura edificación (m)	Time History: San Fernando_Mínimo X		Time History: San Fernando_Máximo X	
	Aceleraciones de piso (m ² /s)	% energía	Aceleraciones de piso (m ² /s)	% energía
17.5	-0.253	4.60	0.531	8.38
14.98	-0.258	4.69	0.529	8.35
12.46	-0.264	4.80	0.526	8.30
9.94	-0.270	4.90	0.522	8.24
7.42	-0.273	4.96	0.520	8.21
3.46	-0.277	5.04	0.517	8.16
0	-5.498	100.00	6.338	100.00

Tabla 42 Resultados aceleraciones de piso - TH-SF – sentido Y

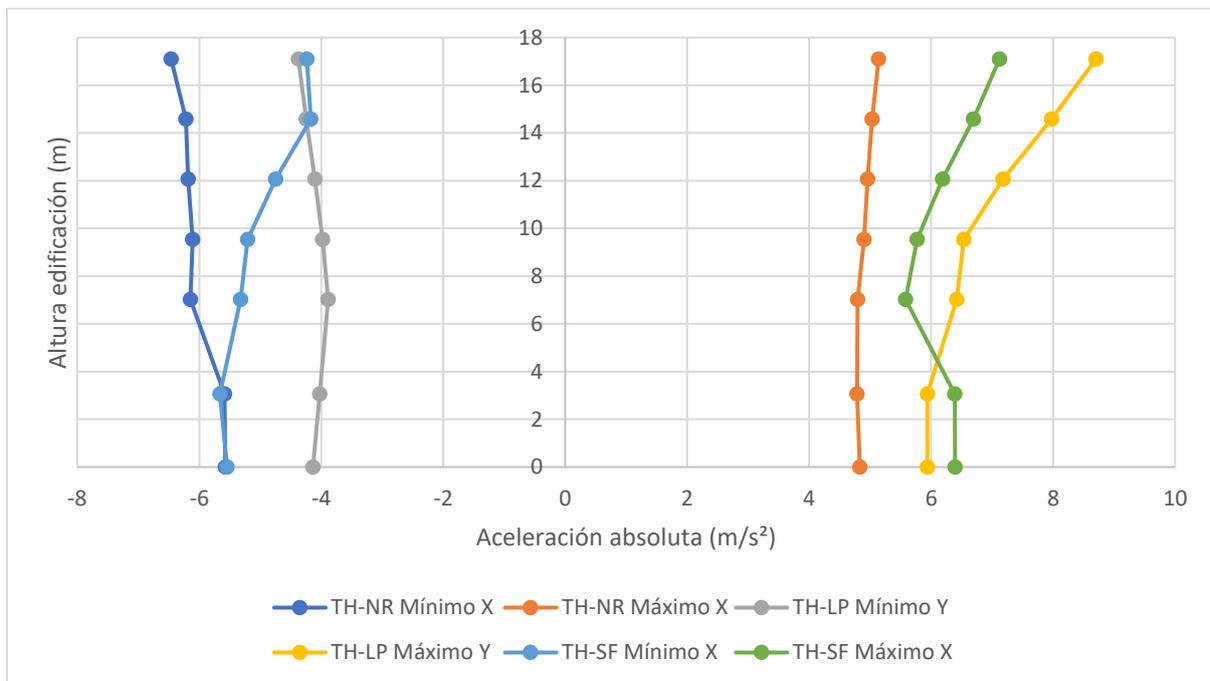
Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

4.2.2.3 Diseño disipación sísmica



Gráfica 44 Resultados aceleraciones de piso-NLRHA-Disipación-Sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano



Gráfica 45 Resultados aceleraciones de piso-NLRHA-Disipación-Sentido X

Elaborado por: Daniela Galarza Altamirano

5. CONCLUSIONES

Modelo base fija

En una estructura de base fija para garantizar un óptimo desempeño para que durante un sismo de diseño presente un comportamiento adecuado, se necesita secciones más grandes para los elementos estructurales, presentando desventajas como: mayores pesos sísmicos de la estructura, lo que conlleva a presupuestos antieconómicos, también dañando los espacios arquitectónicos.

Los resultados muestran que las estructuras de base fija de pórticos de hormigón armado que por lo general se construyen en el país presentan dificultades para alcanzar los niveles de desempeño deseado.

Modelo aislación sísmica

La estructura con aislación sísmica es la que mejor presenta resultados en cuestión de derivas y aceleraciones de piso, ya que toda la energía del sismo es disipada por los aisladores.

Las estructuras con aislación sísmica para no presentar fallas a tracción al nivel de aislamiento necesita un correcto peso sobre cada aislador, por lo que en el caso de estas estructuras se podría utilizar mampostería tradicional de ladrillo debido a su peso y como las aceleraciones de piso que presentan en cada planta son bajas al igual que el desplazamiento de piso son menores, la mampostería no presentaría daños después de un sismo.

La estructura estaría adosada en sus laterales por lo que la mayor desventaja que presenta el modelo es debido al gap sísmico, al estar adosada no tendría el espacio suficiente para desplazarse durante un sismo, la otra opción sería reducir el área en planta, reduciendo los espacios arquitectónicos útiles.

Modelo disipación sísmica

La disipación sísmica presenta un gran aumento de rigidez a la estructura lo que disminuye su desplazamiento lateral por lo que reduce su daño al momento de un sismo. En comparación a la aislación sísmica presenta mayores valores de aceleraciones de piso, por lo que no se recomendaría su uso para estructuras que tenga contenido especial. Por lo que se llega a la conclusión que en base a resultados dinámicos la disipación sísmica es la que mejor se comporta ante carga sísmica.

6. REFERENCIAS

- Acosta, A., Guerrero, D., Cruz, M., & Toulkeridis, T. (2016). *CALIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE FALLAS GEOLÓGICAS EN EL DISTRITO* Ecuador está en medio de una mega-falla geológica denominada “ Guayaquil -Caracas ”, la cual ha generado fallas de segundo y tercer orden que afectan directamente al Distrito Metropolitano . 1(3), 35–42.
- Almufti, I., & Willford, M. (2014). The REDi™ rating system: A framework to implement resilience-based earthquake design for new buildings. *NCEE 2014 - 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering, April 2022*. <https://doi.org/10.4231/D3P26Q437>
- American Society of Civil Engineers. (2013). ASCE/SEI 41-13 seismic evaluation and retrofit of existing buildings. In *American Society of Civil Engineers*. <https://doi.org/10.1061/9780784412855>
- ASCE/SEI 7-16, (2018).
- Black, C., & Aiken, I. (2002). Componente testing, stability analysis and characterization of buckling-restrained unbonded braces. In *Pacific earthquake engineering research center* (Vol. 6, Issue Septiembre).
- Cobos, F. P. (2017). *Estudios de peligro sísmico determinista para las estructuras de la Universidad Técnica de Ambato campus Huachi*. Universidad Técnica de Ambato.
- Dao, N. D. (2022, May 12). Simple Equations for Predicting Maximum Displacement of Isolation Systems Using Lead Rubber Bearings. In *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. <https://doi.org/10.3311/PPci.19894>
- Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). Introducción Al Uso De Aisladores Y Disipadores En Estructuras. In *Banco de Desarrollo de America Latina*. <file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Usodeaisladoresydisipadoresenestructuras.pdf%0Aascioteca.caf.com>
- Guerrero Bobadilla, H., Aguilar Hernández, J., & Sámano Brito, O. (2022). Comportamiento Sísmico De Edificios Con Aisladores De Péndulo De Fricción En La Zona Del Lago De La Ciudad De México. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 21(107), 1–21. <https://doi.org/10.18867/ris.107.584>
- NCh2745, (2003).
- López, W., & Sabelli, R. (2004). Seismic Design of Buckling-Restrained Braced Frames. *SteelTIPS*, 33(July), 1251–1260.
- NEHRP. (2003). NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450). *Part 1, Fema 450*, 338.
- Neicer, C. V., Luis, N. T. J., Kevin, M. C. R., Pier, O. R. J., Antonio, B. S. J., Crisell, C. M. S., & Benjamin, C. A. A. (2022). Influence of dissipating elements on the effect of earthquakes on Buildings 2021. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2022-July*, 1–7. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.230>
- Quinde, P., & Reinoso, A. (2016). SEISMIC HAZARD ASSESSMENT FOR ECUADOR AND DESIGN SPECTRA PROPOSED FOR THE CITY OF CUENCA. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 26(94), 1–26.
- Retamales, R. (2023). *Innovaciones tecnológicas II*.
- Robinson, K. (2009). Specifying Buckling-Restrained Brace Systems. *Modern Steel Construction*, november, 1–3. <https://www.aisc.org/globalassets/modern->

steel/steelwise/112009_nov09_steelwise_web.pdf

- Symans, M. D., Charney, F. A., Whittaker, A. S., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., Johnson, M. W., & McNamara, R. J. (2008). Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments. *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 3–21. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2008\)134:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2008)134:1(3))
- Tena Colunga, A. (2016). Metodo simplificado para el diseño de estructuras con base en muros de carga aislados sismicamente. *Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica*, 1–25.
- Terán, A. (2023). *Innovaciones tecnológicas I*.
- Watanabe, A. (2018). Design and applications of buckling-restrained braces. *International Journal of High-Rise Buildings*, 7(3), 215–221. <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2018.7.3.215>