



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

**“AISLAMIENTO SÍSMICO EN ESTRUCTURAS ASIMÉTRICAS  
PARA REDUCCIÓN DE EFECTO DE TORSIÓN”**

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para  
obtener el Grado de

**Maestría en Ciencias (Estructuras)**

---

Presenta:

**Ing. Ilse Hernández Vázquez**

---

Dirigida por:

**Dr. Luis Francisco Pérez Moreno**

---

Querétaro, Qro. Febrero de 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de  
Información



Aislamiento sísmico en estructuras asimétricas para  
reducción de efecto de torsión

**por**

Ilse Hernandez Vázquez

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

**Clave RI:** IGMAC-300609-0323-223



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Aislamiento sísmico en estructuras asimétricas para reducción de efecto de torsión

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestría en Ciencias (Estructuras)

**Presenta:**

Ilse Hernández Vázquez

Dirigido por:

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

Presidente

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Vocal

Dr. Alejandro Clemente Chávez

Suplente

M.I. Hansel Francisco García Rodríguez

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Febrero, 2023  
México

## RESUMEN

Las terribles experiencias que se han generado de colapsos y los esfuerzos por minimizar los desastres producidos por terremotos, han acompañado al desarrollo y evolución en las edificaciones desde la antigüedad. La exigencia de garantizar la funcionalidad de una estructura después de terremotos severos ha motivado el desarrollo de tecnologías de aislamiento sísmico y de disipación de energía. El uso de dichos sistemas de protección sísmica no solo garantiza la protección de la vida y la seguridad de las estructuras en caso de terremoto, también permite la reducción del daño en elementos no estructurales y contenidos. En algunos casos, un segundo beneficio obtenido con el uso de un sistema de protección sísmica es plantear estructuras más esbeltas y por lo tanto más económicas. Por lo anterior, se presenta el caso de estudio del análisis estructural de un edificio asimétrico de 10 niveles, implementando en el análisis las propiedades de los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB, por sus siglas en inglés), como sistema de aislamiento sísmico. Esto con el objetivo principal de reducir la respuesta torsional existente. Los resultados obtenidos muestran una mejora en las propiedades dinámicas de la estructura; así como las distorsiones de entrepiso, cortantes máximos y sus aceleraciones.

(Palabras clave: aislamiento sísmico, sistema de protección, aislador elastomérico, estructura asimétrica, respuesta torsional).

## **SUMMARY**

The terrible experiences of collapse and the efforts to minimize earthquake disasters have accompanied the development and evolution of buildings since ancient times. The requirement to guarantee the functionality of a structure after severe earthquakes has motivated the development of seismic isolation and energy dissipation technologies. The use of such seismic protection systems not only guarantees the life protection and structures safety in the event of an earthquake, but also makes it possible damage reduction in non-structural elements and contents. In some cases, a second benefit obtained with the use of aseismic protection system is to design slimmer and thus more economical structures. Therefore, a case study of the structural analysis of a 10-story asymmetric building is presented, implementing in the analysis the properties of the Lead Rubber Bearing (LRB) as a seismic isolation system. The main objective is to reduce the existing torsional response, improving the dynamic properties of the structure, as well as the floor-to-floor distortions, maximum shear, and its accelerations.

(Keywords: seismic isolation, protection system, elastomeric isolation, asymmetric structure, torsional response).

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, por mi formación en mis estudios del Posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo que recibí durante mis estudios de maestría.

Al Dr. Luis Francisco Pérez Moreno, por haberme orientado desde el inicio del Posgrado, por su dirección en el trabajo de tesis y en la estructura de esta, por sus valiosos consejos académicos, por su apoyo y asesoría en los procesos administrativos.

Al M.I. Hansel Rodríguez, por aceptar ser parte del grupo de síndicos, por contribuir en ampliar mi visión y criterio en el área académica y profesional con ayuda de su vasta experiencia, por brindarme su apoyo moral, asesoría y mentoría técnica durante esta trayectoria.

A los Dres. Mígues Ángel Pérez Lara y Hernández, Alejandro Clemente Chávez y Jaime Horta Rangel, por sus críticas y sugerencias en el transcurso de mis estudios de Posgrado.

Al Dr. Carlos Méndez Galindo, por su apoyo en mi proceso de iniciar el estudio de mi maestría, por sus valiosas palabras y consejos en el área profesional. Siempre le estaré muy agradecida.

A Octavio Méndez, por todo su apoyo moral y consejos en el transcurso de mis estudios y en la vida, que sin duda ha impactado de forma positiva en mí.

A mis compañeros de maestría, por todo lo compartido en conocimientos y por las experiencias que compartimos durante el trayecto.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	2
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	4
<b>2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>5</b>
2.1 TIPOS DE AISLADORES SÍSMICOS .....	7
2.1.1 Aislador por deslizamiento.....	8
2.1.2 Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB) .....	8
2.2 CASOS DE ESTUDIO EN LATINOAMÉRICA .....	10
2.2.1 Aislamiento sísmico de hotel Vía Vallejo, Ciudad de México, México. ....	10
2.2.2 Aislamiento sísmico del edificio Espacio Condesa, Ciudad de México, México. ....	11
2.2.3 Aislamiento sísmico del edificio Sky Building, Guayaquil, Ecuador. ....	12
2.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA DINÁMICA ESTRUCTURAL.....	13
2.3.1 Periodo de vibración de una estructura (T) .....	13
2.3.2 Espectro de respuesta (T) .....	14
2.3.3 Formas modales y periodos superiores de vibración.....	15
2.3.4 Distorsión de entrepiso .....	16
2.3.5 Amortiguamiento.....	16
2.3.6 Fuerzas inerciales en una estructura .....	17
2.4 ECUACIÓN DE MOVIMIENTO.....	18
2.5 PROPIEDADES AISLADOR ELASTOMÉRICO.....	19
2.5.1 Módulo de corte (G) .....	19
2.5.2 Rigidez horizontal o lateral ( $k_{lh}$ ).....	19
2.5.3 Factor de forma ( $S_i$ ).....	20

2.5.4	Rigidez vertical ( $k_{vh}$ ) .....	20
2.5.5	Deformaciones límite ( $\gamma$ ) .....	22
2.5.6	Capacidad de carga contra el pandeo .....	24
2.6	<b>PROPIEDADES AISLADOR ELASTOMÉRICO CON NÚCLEO DE PLOMO (LRB)</b> 25	
2.6.1	Rigidez lateral.....	25
2.6.2	Fuerza de autocentrado.....	26
2.6.3	Capacidad de carga contra el pandeo .....	27
2.6.4	Amortiguamiento efectivo.....	27
2.7	<b>MÉTODOS DE ANÁLISIS</b> .....	29
2.7.1	Análisis estático lineal.....	29
2.7.1.1	Valuación de fuerzas sísmicas sin estimar el periodo fundamental.....	29
2.7.1.2	Valuación de fuerzas sísmicas estimando el periodo fundamental.....	30
2.7.2	Análisis modal espectral.....	31
2.7.2.1	Revisión por cortante basal.....	31
2.7.3	Método paso a paso .....	32
<b>3.</b>	<b>HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....</b>	<b>33</b>
3.1	HIPÓTESIS .....	33
3.2	OBJETIVO GENERAL.....	33
3.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	33
<b>4.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>34</b>
4.1	ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA IRREGULAR CON BASE FIJA .....	34
4.1.1	Definición de las características del edificio .....	34
4.1.2	Análisis de cargas gravitacionales.....	34
4.1.3	Obtención del espectro de aceleraciones .....	34

4.1.4	Análisis estático.....	35
4.1.5	Análisis modal espectral.....	35
4.2	ESTIMACIÓN INICIAL DE LAS PROPIEDADES DEL AISLADOR LRB.....	35
4.3	ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA AGREGANDO LAS PROPIEDADES DEL AISLADOR LRB.....	41
4.3.1	Propiedades mecánicas principales .....	41
4.4	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE AMBOS MODELOS .....	41
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>42</b>
5.1	ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA IRREGULAR CON BASE FIJA .....	42
5.1.1	Características del edificio .....	42
5.1.2	Cargas gravitacionales.....	44
5.1.3	Espectro de aceleraciones.....	45
5.1.4	Estados límites.....	46
5.1.5	Análisis estático.....	47
5.1.5.1	Valuación de fuerzas sísmicas sin estimar el periodo fundamental.....	47
5.1.5.2	Valuación de fuerzas sísmicas estimando el periodo fundamental.....	47
5.1.6	Análisis modal espectral.....	48
5.1.6.1	Masas modales efectivas.....	48
5.1.6.2	Propiedades dinámicas del edificio de base rígida .....	49
5.1.6.3	Distorsiones de entrepiso .....	50
5.1.6.4	Revisión por cortante mínimo.....	51
5.1.7	Descarga en columnas .....	51
5.2	ESTIMACIÓN INICIAL DE LAS PROPIEDADES DEL DISPOSITIVO.....	54
5.2.1	Proceso iterativo .....	54
5.2.2	Propiedades geométricas y mecánicas del aislador .....	60

5.2.3	Condiciones .....	61
5.2.4	Resumen de propiedades del aislador.....	61
5.3	ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA AGREGANDO LAS PROPIEDADES DEL AISLADOR LRB.....	62
5.3.1	Modelación de aislador LRB en el software .....	62
5.3.2	Análisis modal espectral.....	67
5.3.3	Análisis tiempo historia modal no lineal .....	68
5.3.3.1	Registros sísmicos .....	68
5.3.3.2	Espectros.....	72
5.4	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE AMBOS MODELOS .....	75
5.4.1	Análisis modal espectral.....	75
5.4.1.1	Masas efectivas .....	75
5.4.1.2	Aceleraciones espectrales .....	76
5.4.1.3	Resumen de resultados.....	76
5.4.2	Análisis tiempo historia modal no lineal .....	77
5.4.2.1	Desplazamientos .....	77
5.4.2.2	Distorsiones de entrepiso .....	78
5.4.2.3	Corte sísmico .....	79
5.4.2.4	Aceleración máxima de piso.....	92
5.4.2.5	Energía acumulada.....	93
5.4.2.6	Resumen de resultados.....	97
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>98</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>100</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Epicentros de sismos en México con $M_w \geq 7$ , reportado por el SSN.....	1
Figura 2.1. Reducción de aceleraciones por cambio de periodo (espectro marcado en color azul)....	7
Figura 2.2. Sección típica de aislador por deslizamiento tipo péndulo (Spuler et al., 2017) .....	8
Figura 2.3. Esquema de aislador elastomérico. ....	8
Figura 2.4. Aisladores en la base del edificio del hotel Vía Vallejo (Galindo et al., 2016). ....	10
Figura 2.5. Aisladores en edificio de Espacio Condesa (Mageba, 2020). ....	11
Figura 2.6. Edificio Sky Building (Redacción, 2019). ....	12
Figura 2.7. a) Primer modo, b) Segundo modo y c) Tercer modo de vibrar (Arnold, 2006) .....	15
Figura 2.8. Efectos de amortiguación en vibración libre. (Chopra, 2001) .....	16
Figura 2.9. Fuerzas inerciales en una estructura .....	17
Figura 2.10. Área efectiva a la compresión (el área achurada es el área traslapada) (CFE, 2015) ...	22
Figura 2.11. Ciclo histerético típico de un LRB (CFE, 2015). ....	25
Figura 2.12. Fuerzas sísmicas en un edificio (CFE, 2015). ....	30
Figura 4.1. Resumen de metodología a seguir .....	34
Figura 4.2. Parámetros de referencia para el espectro de diseño, obtenidos de PRODISIS.....	35
Figura 5.1. Vista en planta del modelo.....	43
Figura 5.2. Vista 3D y elevación longitudinal del modelo.....	43
Figura 5.3. Análisis de cargas gravitacionales .....	44
Figura 5.4. Regionalización de México. PRODISIS .....	45
Figura 5.5. Espectros de respuesta obtenidos: espectro elástico y espectro de diseño.....	46
Figura 5.6. Primer modo de vibrar de la estructura: torsional.....	49
Figura 5.7. Reacciones en la base en condiciones de servicio. ....	52
Figura 5.8. Máxima descarga en columnas .....	53
Figura 5.9. Definición del elemento “link” en ETABS.....	62

Figura 5.10. Ventana del link “Rubber Isolator”.....	63
Figura 5.11. Ventana de acuerdo con los resultados obtenidos (dirección U1). .....	64
Figura 5.12. Ventana de acuerdo con los resultados obtenidos (dirección U2 y U3). .....	64
Figura 5.13. Detalle de elementos Links.....	65
Figura 5.14. Vista en planta de ubicación de los aisladores.....	66
Figura 5.15. Vista 3D y elevación longitudinal del modelo base aislada.....	66
Figura 5.16. Espectro de diseño a considerar (marcado en rojo, 5-20%).....	67
Figura 5.17. Espectro de desplazamientos. ....	67
Figura 5.18. Simulaciones de mov. 1, original y compatible, en sus componentes EO y NS.....	68
Figura 5.19. Simulaciones de mov. 2, original y compatible, en sus componentes EO y NS.....	69
Figura 5.20. Simulaciones de mov. 3, original y compatible, en sus componentes EO y NS.....	70
Figura 5.21. Simulaciones de mov. 4, original y compatible, en sus componentes EO y NS.....	71
Figura 5.22. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 1, componente EO.....	72
Figura 5.23. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 1, componente NS. ....	72
Figura 5.24. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 2, componente EO.....	73
Figura 5.25. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 2, componente NS. ....	73
Figura 5.26. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 3, componente EO.....	73
Figura 5.27. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 3, componente NS. ....	74
Figura 5.28. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 4, componente EO.....	74
Figura 5.29. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 4, componente NS. ....	74
Figura 5.30. Desplazamiento absoluto en X y Y.....	77
Figura 5.31. Desplazamiento relativo en X y Y.....	78
Figura 5.32. Distorsiones en X y Y.....	78
Figura 5.33. Cortante sísmico en X y Y.....	79
Figura 5.34. Curva de histéresis de la simulación 1, apoyo B1 en dirección X.....	81
Figura 5.35. Curva de histéresis de la simulación 1, apoyo A1 en dirección X.....	81

Figura 5.36. Curva de histéresis de la simulación 1, apoyo F5 en dirección Y. ....	82
Figura 5.37. Curva de histéresis de la simulación 2, apoyo F3 en dirección X. ....	84
Figura 5.38. Curva de histéresis de la simulación 2, apoyo B1 en dirección X. ....	84
Figura 5.39. Curva de histéresis de la simulación 2, apoyo A2 en dirección Y. ....	85
Figura 5.40. Curva de histéresis de la simulación 2, apoyo A5 en dirección Y. ....	85
Figura 5.41. Curva de histéresis de la simulación 3, apoyo F6 en dirección X. ....	87
Figura 5.42. Curva de histéresis de la simulación 3, apoyo F4 en dirección X. ....	87
Figura 5.43. Curva de histéresis de la simulación 3, apoyo A5 en dirección Y. ....	88
Figura 5.44. Curva de histéresis de la simulación 3, apoyo A2 en dirección Y. ....	88
Figura 5.45. Curva de histéresis de la simulación 4, apoyo A6 en dirección X. ....	90
Figura 5.46. Curva de histéresis de la simulación 4, apoyo C6 en dirección X. ....	90
Figura 5.47. Curva de histéresis de la simulación 4, apoyo F4 en dirección Y. ....	91
Figura 5.48. Espectros de piso en dirección X y Y. ....	92
Figura 5.49. Distribución de energía acumulada en simulación 1. ....	93
Figura 5.50. Distribución de energía acumulada en simulación 2. ....	94
Figura 5.51. Distribución de energía acumulada en simulación 3. ....	95
Figura 5.52. Distribución de energía acumulada en simulación 4. ....	96

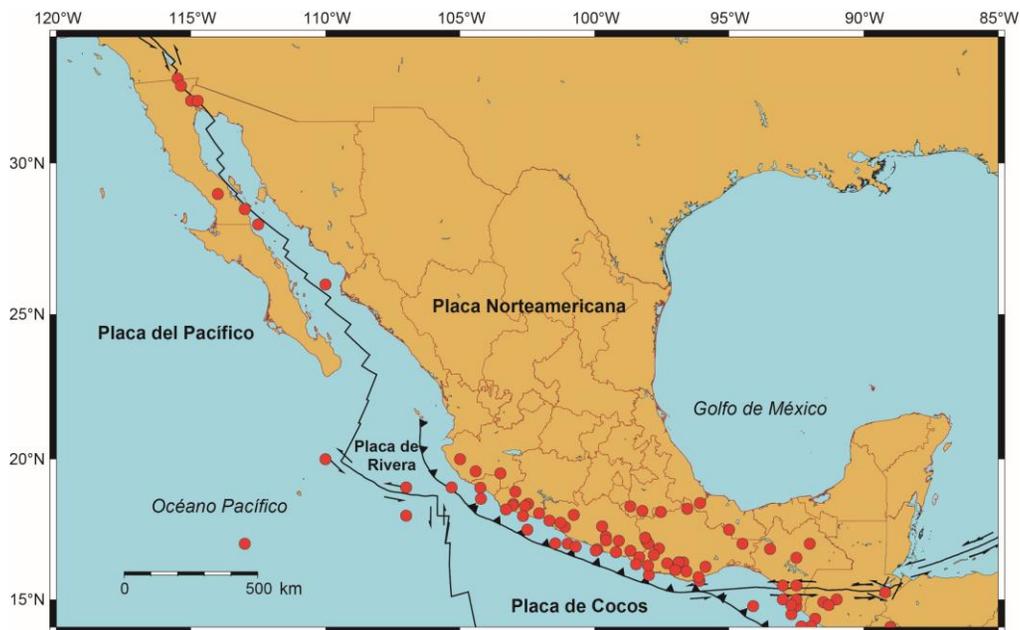
## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Propiedades mecánicas del hule natural vulcanizado (CFE, 2015). .....	19
Tabla 5-1. Fuerzas sísmicas sin estimar $T_{e0}$ .....	47
Tabla 5-2. Obtención del periodo fundamental.....	47
Tabla 5-3. Fuerzas sísmicas estimando $T_{e0}$ .....	48
Tabla 5-4. Masa efectiva que se desplaza en cada dirección de análisis.....	48
Tabla 5-5. Propiedades dinámicas de edificio con base rígida.....	50
Tabla 5-6. Distorsiones de entrepiso estructura base fija.....	51
Tabla 5-7. Datos preliminares para la estimación inicial del dispositivo.....	54
Tabla 5-8. Resultados de las iteraciones, pasos 6-8. ....	56
Tabla 5-9. Resultados de las iteraciones (parte 1), pasos 1-13.....	59
Tabla 5-10. Resultados de las iteraciones (parte 2), pasos 1-13.....	59
Tabla 5-11. Dimensiones del apoyo.....	60
Tabla 5-12. Propiedades del material y geométricas.....	60
Tabla 5-13. Rigidez y amortiguamiento del LRB .....	60
Tabla 5-14. Dimensiones del apoyo.....	61
Tabla 5-15. Resumen de propiedades .....	61
Tabla 5-16. Resultados comparativos de análisis modal de sistemas .....	75
Tabla 5-17. Aceleraciones espectrales de estructura base fija y aislada .....	76
Tabla 5-18. Datos del dispositivo.....	79
Tabla 5-19. Resultados de los análisis no lineales, caso de carga “Simulación 1”.....	80
Tabla 5-20. Resultados de los análisis no lineales, caso de carga “Simulación 2”.....	83
Tabla 5-21. Resultados de los análisis no lineales, caso de carga “Simulación 3”.....	86
Tabla 5-22. Resultados de los análisis no lineales, caso de carga “Simulación 4”.....	89
Tabla 5-23. Resultados de energía total acumulada en simulación 1.....	93

Tabla 5-24. Resultados de energía total acumulada en simulación 2.....	94
Tabla 5-25. Resultados de energía total acumulada en simulación 3.....	95
Tabla 5-26. Resultados de energía total acumulada en simulación 4.....	96
Tabla 5-27. Resumen de resultados entre sistema base fija y base aislada. ....	97

## 1. INTRODUCCIÓN

México se encuentra en una zona altamente sísmica, el mayor porcentaje de la sismicidad anual en México tiene origen en la costa del Océano Pacífico (Figura 1.1). En particular, en el estado de Guerrero, se tiene una alta tasa de sismicidad asociada a eventos interplaca, debido a la interacción de la Placa de Cocos con la norteamericana. Uno de los sismos que causó más daños en Guerrero fue el ocurrido el 7 de septiembre de 2021, que de acuerdo al reporte generado por el Servicio Sismológico Nacional, tuvo una magnitud de 7.1 con 3321 réplicas hasta el día 28 de febrero de 2022 (SSN, 2022).



**Figura 1.1. Epicentros de sismos en México con  $M_w \geq 7$ , reportado por el SSN.**

Debido a los estragos ocasionados por este tipo de eventos, el uso de sistemas de protección sísmica ha tenido un gran auge en el mundo en las últimas décadas, como es el caso del aislamiento sísmico. Este sistema consiste en la separación de una estructura de los movimientos del suelo que podrían afectarla. Para lograr esta separación, el sistema de aislamiento consiste en la implementación de dispositivos sísmicos llamados aisladores (Méndez Galindo, 2013). La utilización de estos dispositivos permite asegurar un desempeño mejorado de las estructuras durante un terremoto, reflejado en una mejora de sus propiedades dinámicas.

El éxito del aislamiento sísmico en una estructura en particular depende en gran medida de la elección correcta de los dispositivos o aisladores sísmicos utilizados, para proporcionar una flexibilidad horizontal con al menos una fuerza de recentrado mínima y un amortiguamiento adecuado. Las funciones principales de un sistema de aislamiento son: 1. Transmisión de cargas verticales, 2. Flexibilidad lateral / horizontal, 3. Disipación de energía y 4. Capacidad de recentrado. Debido a la flexibilidad lateral del sistema de aislamiento, se aumenta el periodo fundamental y, por lo tanto, se reducen las aceleraciones y fuerzas de inercia generadas por el sismo.

A continuación, se discute brevemente la justificación y la descripción del problema, haciendo énfasis en los trabajos previos, los daños relacionados debido a la existencia de la torsión en estructuras asimétricas; así como el estado actual en normativa.

En el capítulo 2, se incluyen los antecedentes de la tecnología del aislamiento sísmico, un poco de su historia, así como la clasificación de estos. Se mencionan algunos ejemplos de casos de estudio y lo existente en la literatura de respuesta torsional en conjunto con el aislamiento sísmico. Del mismo modo, se presentan las bases teóricas en diseño y en el funcionamiento de los aisladores, así como sus propiedades importantes.

Después, en el capítulo 3 se menciona la hipótesis y objetivos de la presente investigación.

Posteriormente, en el capítulo 4 se aborda la metodología a seguir y finalmente en el capítulo 5 y 6, los resultados y conclusiones respectivamente.

## **1.1 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

Las estructuras sin aisladores sísmicos están diseñadas, por lo general, para presentar una respuesta ante sismos severos, caracterizada por mecanismos de disipación de energía producidos por desplazamientos importantes entre los pisos, los cuales conducen a incursiones en el rango inelástico de algunos elementos estructurales (Genatios y Lafuente, 2016). Elementos estructurales como muros, columnas y vigas sufren deterioro cuando se

genera este efecto. El daño causado por llegar al rango inelástico hace que sea difícil de repararlo; en muchos casos, los daños causados por los terremotos requieren costosos esfuerzos de reconstrucción o incluso la demolición y reconstrucción de todo el edificio.

Uno de los aspectos que afecta negativamente la respuesta de las estructuras es la torsión. Como ejemplo de esto se puede mencionar lo ocurrido en la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 (Mw 8.1), donde el 42% de los derrumbes ocurridos se relacionaron con la respuesta torsional de edificios asimétricos (Tena-colunga y Escamilla-Cruz, 2007). Por otra parte, durante el sismo del 19 de septiembre del 2017 (Mw 7.1), se identificaron 2213 estructuras irregulares, de las cuales el 57.7% tenían al menos una condición de fuerte irregularidad como pisos suaves, estructuras de esquina, y fuertes respuestas torsionales, y el 43.3% tenían otras condiciones de irregularidad estructural únicamente (Tena-colunga, 2021).

Hay muchos aspectos estructurales del aislamiento de base que han sido ampliamente estudiados y que han llevado al desarrollo de esta nueva tecnología. Sin embargo, un aspecto que ha recibido menos atención es la respuesta torsional. Hay pocos trabajos disponibles en la literatura que estudian la respuesta torsional de estructuras con bases aisladas. La mayoría de los estudios se realizan en estructuras de un solo piso sujetas a registros de terremotos típicos y la mayoría de los estudios consideran un valor fijo para el período efectivo de las estructuras con base aislada. Como una excepción se puede mencionar el estudio presentado por el Dr. Arturo Tena (Tena-Colunga y Gómez-Soberón, 2002), en donde realiza una investigación paramétrica en la respuesta torsional de una estructura rígida de tres pisos con aisladores bilineales (elastoméricos).

Por otra parte, Mohammed tuvo una importante contribución en el estudio del aislador Roll in Cage aplicado a una estructura asimétrica (Ismail, 2018a, 2018b), la cual resulta una interesante propuesta con resultados satisfactorios; sin embargo, su aplicación no ha sido llevada constructivamente, ya que es una tecnología propuesta recientemente.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las Normas Técnicas Complementarias de la ciudad de México (México, 2017), ha introducido la filosofía de diseño de estructuras irregulares desde 1987, y otros códigos modelos mexicanos como el Manual de Estructuras Civiles (CFE, 2015) comparte esta filosofía. Con base en ello y otras consideraciones, se elige el método de análisis sísmico, esto con el objetivo de prevenir efectos torsionales no deseados.

Actualmente, el Manual de Diseño de Obras Civiles, es el primer código mexicano en incluir las recomendaciones para el diseño sísmico de estructuras con base aislada. No obstante, a pesar de que se tienen propuestas formales para el diseño sísmico de estructuras aisladas de base para México (Tena-Colunga, 2004, 2005), aplicables solo para edificios; por ahora se mantiene como propuesta y no ha sido implementada como norma vigente. Siendo importante destacar que en su desarrollo se adecuaron y/o adaptaron muchos de los criterios de los reglamentos Uniform Building Code (UBC, 1997) e International Building Code (IBC, 2000) de los Estados Unidos, considerando además las opiniones de expertos mundiales como el profesor James Kelly de la Universidad de California en Berkeley, en el diseño sísmico de aisladores de base.

Por lo anterior, en esta investigación se tomarán como bases el manual de la CFE y algunos parámetros complementarios de normas estadounidenses, anexando a las del párrafo anterior la normativa *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings* (ASCE/SEI 41-17, 2017) y *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (ASCE, 2017).

Se conoce todos los esfuerzos que los investigadores han tenido hacia el trabajo hacia un Código Modelo Mexicano para el Diseño Sísmico de Edificaciones. Por lo que el estudio de este tipo de tecnologías toma mayor peso para su mejor entendimiento. En ello radica la contribución del presente trabajo, tomando como dispositivo para analizar el aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB).

## 2. ANTECEDENTES

Las terribles experiencias que se han generado de colapsos y los esfuerzos por reducir los desastres producidos por terremotos, han acompañado al desarrollo y evolución en las estructuras desde la antigüedad. En el libro, “History of Earthquake Resistant Constructions. From Antiquity to our times”, su autor B. Kirikov, señala las primeras técnicas de construcción utilizadas en la antigüedad, en la cual incluían mecanismos de aislamiento sísmico, sustentados en la idea de aislar las construcciones de los movimientos del terreno producidos por el sismo (Kirikov, 1992). Tres técnicas de aislamiento sísmico que destacaban en la antigüedad para poder obtener un aislamiento sísmico son las siguientes:

- El uso de varias capas de piedras bajo la base de la estructura. Dichas piedras eran cortadas, con superficies alisadas y colocadas sin mortero.
- El uso de piezas de apoyo de madera.
- La colocación de varias capas de arena, piedras y otros materiales, entre el suelo y las paredes.

Una de las primeras propuestas en mencionar los beneficios del aislamiento sísmico y la protección de los contenido, fue la planteada en 1909 por el Dr. Calantarients, el cual proponía que un edificio se construyera sobre una junta libre y una capa de arena fina, mica o talco, que permitiría que el edificio se deslizara en un terremoto (Farzad y Kelly, 1999).

Una forma de reducir los niveles de energía que introduce el sismo a la estructura es a través del uso de sistemas de aislamiento. (Hanson, 1993) propone una clasificación de los sistemas de control de la respuesta sísmica en:

### a) Sistemas pasivos

Como los aisladores de base y los dispositivos suplementarios de disipación de energía. El propósito de un aislador sísmico es evitar la transferencia del movimiento sísmico del suelo a la estructura. Por otro lado, los disipadores de energía están diseñados para disipar la energía introducida en el sistema estructural por las fuerzas dinámicas externas provocadas por terremotos o viento. Estos aparatos permiten aumentar el nivel de amortiguamiento de la

estructura, entre algunos tipos de disipadores de energía se encuentran: de amortiguamiento viscoso y viscoelástico y dispositivos de amortiguamiento por fricción y cedencia.

#### b) Sistemas activos

Son aparatos mecánicos cuyas propiedades cambian de acuerdo con las mediciones de los movimientos de la estructura. Son complejos, ya que se necesita de la instalación de sensores para procesar y medir las variables de control, a fin de regular la respuesta del dispositivo en caso de que ocurra un terremoto. Por lo general, se colocan acelerómetros para medir las aceleraciones en puntos clave de la estructura e iniciar los mecanismos de control. Un ejemplo de un sistema activo son los amortiguadores de masa activa (AMD por sus siglas en inglés: Active Mass Damper). Este tipo de sistema se basa en cuerpos de masa conocida que se ubican generalmente en el techo de la estructura. Según la lectura que se tenga de los sensores, un actuador hará oscilar esta masa a manera de compensar las vibraciones inducidas por el terremoto.

Los sistemas pasivos son los sistemas más utilizados en la actualidad. Los aisladores ayudan a aumentar el período de vibración fundamental del sistema debido a su gran flexibilidad, también contribuyen a un efecto de amortiguamiento importante que tiene como resultado disipar la energía introducida por el sismo.

Al incluir los aisladores sísmicos en el diseño de estructuras, el objetivo es hacer que la estructura actúe como un cuerpo rígido, de esta manera se reduce en gran medida las deformaciones de la estructura y éstas se concentran en el aislador sísmico.

Los aisladores proveen suficiente flexibilidad a la estructura para que el período natural de ésta se aleje lo suficiente del período natural del terremoto.

Distintos estudios (Cardone et al., 2018)(Zayas et al., 1990), reconocen los beneficios que se tienen con el uso de aislamiento sísmico en estructuras ubicadas en suelos firmes. Por lo contrario, en suelos blandos, donde se tienen las máximas aceleraciones en periodos del suelo más largos, es necesario llevar a la estructura a periodos de vibrar muy largos. Es por ello, que el uso del aislamiento sísmico es recomendable en suelos firmes para poder obtener su máximo beneficio. Las fuerzas sísmicas que se inducen a la estructura serán

menores al alejar el periodo de la meseta y disminuir la pseudoaceleración tomada del espectro (Figura 2.1).

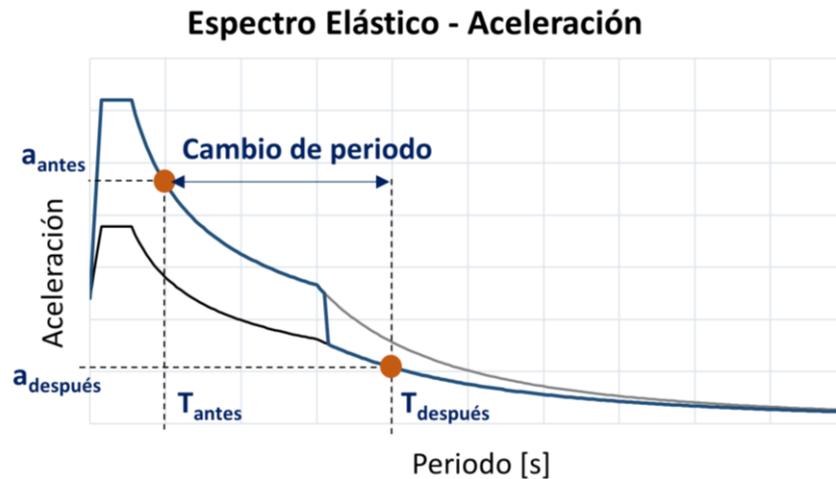


Figura 2.1. Reducción de aceleraciones por cambio de periodo (espectro marcado en color azul).

Además, es importante recalcar, que existe una disminución extra en consecuencia al aumento del amortiguamiento del sistema; significando que, la ordenada del periodo con aislamiento es menor, tal como se ilustra en la Figura 2.1.

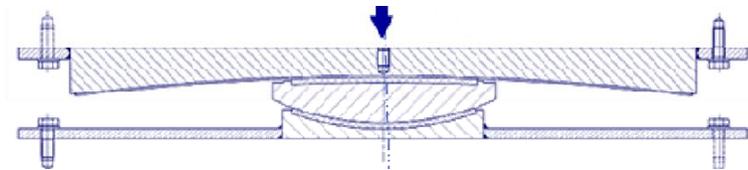
## 2.1 TIPOS DE AISLADORES SÍSMICOS

Hay mucha diversidad en los tipos de aisladores sísmicos. Estos, sin embargo, pueden agruparse en dos tipos:

- Aislador por deslizamiento.
- Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB, por sus siglas en inglés).

### 2.1.1 Aislador por deslizamiento

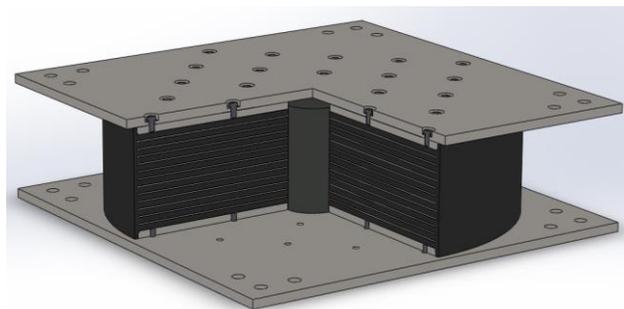
Los aisladores por deslizamiento (Figura 2.2), se basan en apoyos con planchas metálicas que permiten desplazamientos relativos entre las dos planchas, una plancha va sujeta a la cimentación y la otra a la estructura. Este tipo de aisladores se basan en el principio de funcionamiento de un péndulo. Permiten el desplazamiento horizontal de la estructura, al tiempo que proporcionan el período natural necesario de desplazamiento requerido por el sistema de aislamiento sísmico. Una vez activados por un terremoto, los aisladores permitirán el desacoplamiento virtual de la estructura soportada del suelo. Al mismo tiempo, la fuerza de restauración debida a la gravedad lo devolverá a la posición central. El rendimiento del dispositivo depende principalmente del radio de curvatura y el coeficiente de fricción (Spuler et al., 2017).



**Figura 2.2. Sección típica de aislador por deslizamiento tipo péndulo (Spuler et al., 2017)**

### 2.1.2 Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB)

Los LRB consisten en un conjunto de láminas de elastómero natural reforzado con láminas de acero y un núcleo de plomo, está diseñado para soportar las cargas verticales máximas de la estructura, proporcionar elasticidad más allá del límite de fluencia y permitir grandes deformaciones laterales mientras se mantiene estable (Figura 2.3).



**Figura 2.3. Esquema de aislador elastomérico con núcleo de plomo.**

Este tipo de dispositivos posee una alta resistencia a las cargas verticales generadas por la estructura, principalmente ocasionada por la presencia de las capas de acero, que restringen las grandes deformaciones por abultamiento de las capas de goma, mientras que no tienen mayores efectos en los desplazamientos horizontales. El resultado es un elemento de aislamiento que posee una gran rigidez vertical, comparada con la baja rigidez lateral. (Genatios y Lafuente, 2016).

El elastómero logra aislar y recentrar el apoyo tras un sismo. Para limitar simultáneamente el movimiento relativo y disipar energía, los aisladores deben producir altos valores de amortiguamiento. Por ello tienen incluidos núcleos de plomo que permiten grandes deformaciones y pueden generar un elevado amortiguamiento, el cual este varía en función del diámetro del núcleo de plomo. El plomo es usado principalmente para dar disipación de energía, debido a su comportamiento elastoplástico y capacidad de mantener la resistencia a través de múltiples ciclos de deformaciones plásticas. Gracias a su capacidad de disipación de energía, es posible obtener altos valores de amortiguamiento, los cuales pueden alcanzar valores de 25% o inclusive al 30% del amortiguamiento crítico (Chopra, 2001).

En el presente estudio, se considera el dispositivo LRB, debido a que este tipo de apoyos es uno de los más utilizados a nivel mundial (Tafheem et al., 2015). Tan solo en EEUU, los LRB tiene un porcentaje de uso del 75% con respecto a otros dispositivos (Buckle et al., 2006). Por lo tanto, el entendimiento de este tipo de tecnología toma más valor en el campo de la Ingeniería Sísmica.

A continuación, se da a conocer algunos casos de estudios en los que han empleado esta metodología de aislamiento basal sísmico.

## 2.2 CASOS DE ESTUDIO EN LATINOAMÉRICA

### 2.2.1 Aislamiento sísmico de hotel Vía Vallejo, Ciudad de México, México.

Edificio de 10 niveles. Para asegurar la adecuada respuesta sísmica, los ingenieros responsables del diseño realizaron un extenso y complejo análisis dinámico tridimensional y poder confirmar con esto, que la mejor estrategia era el uso del aislamiento sísmico entre la estructura del hotel y el centro comercial. Esta solución requirió la utilización de 18 aisladores tipo LRB para soportar la estructura del hotel, evitando una losa de transferencia muy grande (Figura 2.4).



**Figura 2.4. Aisladores en la base del edificio del hotel Vía Vallejo (Galindo et al., 2016).**

## 2.2.2 Aislamiento sísmico del edificio Espacio Condesa, Ciudad de México, México.

Debido a la complejidad del proyecto y a las demandas sísmicas de la zona, se decidió utilizar aisladores de protección sísmica para salvaguardar las torres de oficinas, departamentos y el centro comercial de los terremotos. La construcción comenzó en 2016 con la demolición de una agencia automotriz que ocupaba los 8,000 metros cuadrados de Espacio Condesa (Figura 2.5). Después de varios análisis dinámicos extensos de la respuesta sísmica estructural, los ingenieros decidieron implementar los apoyos de goma con núcleo de Plomo (LASTO®LRB), estos funcionan de acuerdo con el principio de aislamiento de base y limitan la energía transferida desde el suelo a la estructura en caso de terremoto. Por lo tanto, el edificio está equipado con 87 dispositivos tipo LASTO®LRB de diferentes diámetros, 41 aisladores simples, 11 dobles y 35 cuádruples con una capacidad de carga vertical de hasta 20,683 kN y una capacidad de movimiento de  $\pm 300$  mm.



**Figura 2.5. Aisladores en edificio de Espacio Condesa (Mageba, 2020).**

### 2.2.3 Aislamiento sísmico del edificio Sky Building, Guayaquil, Ecuador.

El edificio Sky Building (Figura 2.6), ubicado en la ciudad de Guayaquil, Ecuador, es parte del complejo comercial Aerocity. Este edificio de 15 niveles consiste en 4 pisos de estacionamiento y 11 niveles de oficinas, el cual ha sido diseñado bajo los criterios más avanzados de protección sísmica, con el objetivo de asegurar que la estructura no sufrirá ningún daño durante la ocurrencia de un terremoto severo. El principio fundamental es que la estructura no pierda en ningún momento la condición de servicio.

La estrategia de protección sísmica seleccionada por los ingenieros estructurales fue con base en el principio de aislamiento sísmico, mediante el alargamiento del periodo de vibrar de la estructura, lo cual fue posible mediante el diseño de un sistema de aislamiento sísmico formado por 64 aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, los cuales fueron colocados sobre los primeros 4 niveles de estacionamiento, y localizados a nivel del suelo del terreno donde se ubica el edificio. La diferencia de cargas en cada columna generó el diseño de tres diferentes tipos de dispositivos, dependiendo de la capacidad de carga vertical. Además, también se utilizaron 44 deslizadores sísmicos con la idea de permitir los desplazamientos horizontales, sin participar activamente en el sistema de aislamiento sísmico del edificio. Esto permitió optimizar significativamente los costos del proyecto. (Galindo et al., 2016).



**Figura 2.6. Edificio Sky Building (Redacción, 2019).**

## **2.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA DINÁMICA ESTRUCTURAL.**

Cuando ocurre un sismo, la energía de deformación acumulada se libera, provocando desplazamientos y un reacomodo de las placas en las zonas de contacto. Esto provoca que se genere un complejo movimiento vibratorio del terreno, que da como resultado varios tipos de ondas, con distintas frecuencias, amplitudes y tiempos de ocurrencia. Estas ondas de movimiento llegan a la base de la estructura y provocan movimiento en su cimentación.

Cuando el movimiento del terreno llega a la cimentación de la estructura, se transmite al resto de esta y la hace vibrar. Dependiendo de las características de las oscilaciones que llegan a la base y de las propiedades mecánicas de la estructura (su geometría y materiales que la componen), la estructura se moverá de diferentes formas, con un movimiento irregular. Los desplazamientos de los diferentes puntos de la estructura provocarán fuerzas en los elementos que la componen. Dichas fuerzas pueden vencer la resistencia de algunos elementos, y provocar el colapso de estos y desplazamientos importantes.

La respuesta de una estructura sometida a acciones dinámicas en general y en particular a terremotos, depende fundamentalmente de las características de la estructura y de la excitación como el intervalo de frecuencias, amplitud, duración e historia temporal (Bazán y Meli, 1999).

### **2.3.1 Periodo de vibración de una estructura (T)**

Para obtener las frecuencias propias de oscilación de los sistemas de varios grados de libertad sometidos a una acción dinámica son necesarios una serie de cálculos que requieren información detallada y precisa sobre las características estructurales. Incluso con métodos analíticos, a menudo se realizan simplificaciones razonables, como suponer una masa concentrada para cada nivel de piso y usar aproximaciones o fórmulas directas. La expresión (1) se utiliza para evaluar el periodo fundamental de vibrar de la estructura (México, 2017).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum W_i X_i^2}{g \sum F_i X_i}} \quad (1)$$

Donde:

$T$  = Periodo

$W_i$  = Peso de la  $i$ -ésima masa sobre el desplante

$F_i$  = La fuerza lateral que actúa en el  $i$ -ésimo nivel

$X_i$  = Desplazamiento del nivel  $i$

$g$  = Aceleración de la gravedad

La ASCE 7-16, brinda una expresión para la obtención de un valor aproximado del periodo fundamental de vibrar de un edificio (ASCE, 2017).

$$T = 0.1N \quad (2)$$

Donde  $N$ , es el número de niveles.

La respuesta dinámica de una edificación durante un sismo depende de la relación entre el período de vibración de las ondas sísmicas y su propio periodo de vibración. En la medida en que los dos periodos igualen sus valores y su relación se acerque a la unidad la edificación entra en resonancia, aumentando significativamente las deformaciones y aceleraciones de la edificación y en consecuencia los esfuerzos en sus elementos estructurales (Ingeniería, 2014).

### 2.3.2 Espectro de respuesta (T)

El registro de movimiento vibratorio se caracteriza por los valores de la amplitud  $A$  y del periodo  $T$  siendo  $A$  el mayor valor del registro de desplazamiento (o velocidad o aceleración) y  $T$  el tiempo en segundos de una oscilación (Ingeniería, 2014).

Para construir un espectro de respuesta es necesario calcular la respuesta dinámica de varios osciladores de 1GL con diferentes periodos de vibrar  $T$  y con igual factor de amortiguamiento. Para todos y cada uno de ellos se exhibirá una respuesta diferente. Una vez calculada la respuesta de los osciladores, se determina el máximo (en valor absoluto, dado que el signo no tiene importancia) de cada uno de ellos y se coloca en un gráfico en función del periodo de vibración, para obtener así un espectro de respuesta. Es decir, que la respuesta máxima de cada oscilador con periodo  $T$  representa un punto del espectro (Hinojosa, 2009).

Una vez que se tiene el espectro de aceleraciones elástico sin reducir, se procede al cálculo del espectro de desplazamientos de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$S_d = S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (3)$$

### 2.3.3 Formas modales y periodos superiores de vibración

Los edificios, al igual que todos los cuerpos materiales, poseen distintas formas de vibrar ante cargas dinámicas que, en la eventualidad de un terremoto, pueden afectar la misma en mayor o menor medida (Figura 2.7). Estas formas de vibrar se conocen como modos de vibración.



Figura 2.7. a) Primer modo, b) Segundo modo y c) Tercer modo de vibrar (Arnold, 2006)

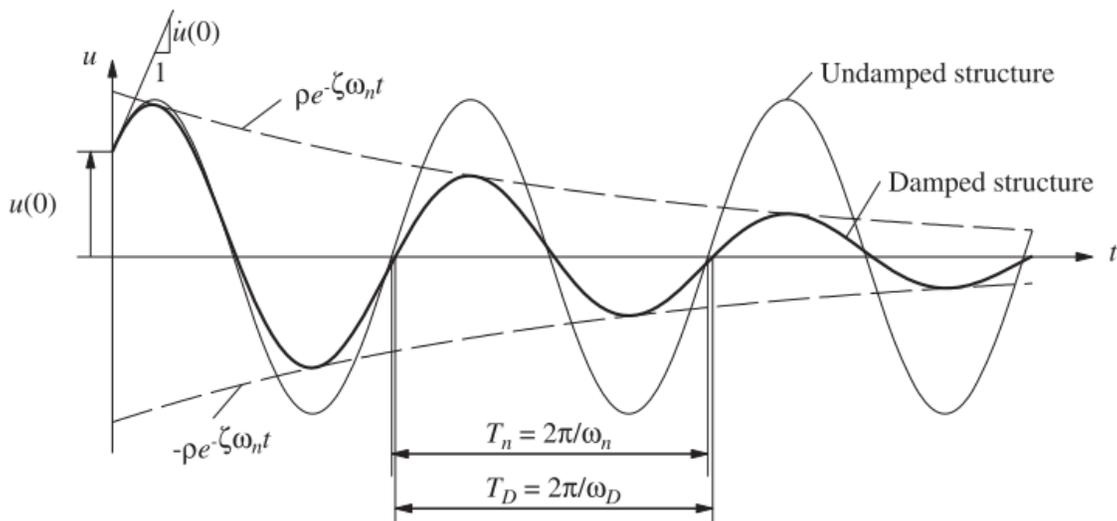
### 2.3.4 Distorsión de entrepiso

La distorsión de entrepiso se define como la diferencia entre los desplazamientos laterales de los pisos consecutivos que lo delimitan dividida entre la diferencia de elevaciones correspondiente. (México, 2017). Dichos valores resultan más convenientes para conocer las demandas máximas de desplazamientos y repartir en cada uno de los entrepisos (distorsiones de entrepisos).

### 2.3.5 Amortiguamiento

El amortiguamiento se define como la capacidad de cuerpo o sistema para disipar energía cinética en otro tipo de energía (ver Figura 2.8). El amortiguamiento estructural está limitado por la capacidad de disipación de energía de los materiales, generalmente acero y concreto.

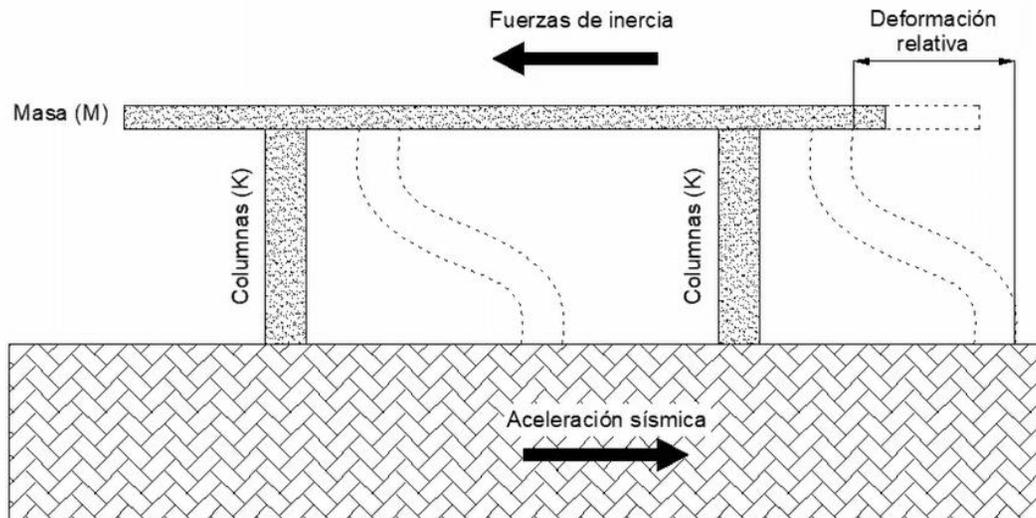
La amortiguación determina la amplitud de la vibración en la resonancia y el tiempo de persistencia de la vibración después que culmina la excitación.



**Figura 2.8. Efectos de amortiguación en vibración libre. (Chopra, 2001)**

### 2.3.6 Fuerzas inerciales en una estructura

La manera en que ingresa un sismo a la estructura es a través de un movimiento en el suelo. Posteriormente el movimiento viaja a través de la subestructura desplazándola hacia un extremo (flecha inferior de Figura 2.9), esto ocasiona que debido a las fuerzas de inercia las losas comienzan a tener un movimiento en sentido opuesto del movimiento del suelo.



**Figura 2.9. Fuerzas inerciales en una estructura**

Una forma de explicar el ingreso de las ondas sísmicas a un sistema estructural es de acuerdo con lo siguiente:

1. Las ondas sísmicas ingresan al sistema estructural a través de la cimentación.
2. La sección inferior del sistema estructural se desplazará, generando fuerzas de inercia.
3. El desplazamiento del sistema estructural se dará en función de las formas modales.
4. Las masas superiores se moverán independientemente provocando distorsiones de entrepiso.
5. La aceleración experimentada dependerá en gran parte de su periodo de vibración.
6. El movimiento comenzará a decaer y cesará conforme a la capacidad de amortiguamiento.

## 2.4 ECUACIÓN DE MOVIMIENTO

En los últimos años, las nuevas formas en innovación de diseño estructural se basan en el desarrollo de sistemas de mejor desempeño a costos muy razonables.

Desde un punto de vista energético, los sistemas de protección sísmica disipan energía sísmica introducida a la estructura con mecanismos de amortiguamiento suplementario y/o limitan la transmisión de energía sísmica a la estructura principal por medio del aislamiento de base (Christopoulos y Filiatrault, 2006).

Las ecuaciones de movimiento para una estructura dinámicamente excitada se pueden formular en términos de la segunda ley de Newton. Esta ecuación (4), la forman los siguientes elementos:

- $F_{inercia}$ : Es aquella fuerza determinada por la aceleración que adquiere la masa de la estructura por acción del movimiento.
- $F_{amortiguamiento}$ : Es la fuerza asociada a los mecanismos de amortiguamiento, que se idealiza a partir del amortiguamiento viscoso equivalente.
- $F_{estructura}$ : También llamada fuerza estática, es aquella fuerza que se desarrolla internamente en la estructura debido a los desplazamientos que sufre.
- $F_{externa}$ : Fuerza inducida por la ocurrencia de un evento sísmico, inducida por el movimiento del suelo.

$$F_{inercia} + F_{amortiguamiento} + F_{estructura} = F_{externa}$$

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g \quad (4)$$

Como resultado de la ecuación diferencial antes mencionada, es la historia en el tiempo de movimiento de la estructura. De esta manera, la respuesta de la estructura se puede cambiar, modificando cualquiera de los elementos de la ecuación de movimiento. Con el propósito de mejorar la respuesta de una estructura se puede modificar su amortiguamiento, rigidez, masa o limitar las aceleraciones inducidas a esta. Esto se puede lograr mediante la implementación de un sistema de protección sísmica adecuado.

## 2.5 PROPIEDADES AISLADOR ELASTOMÉRICO.

Los aisladores elastoméricos se componen de una serie de caucho, capas de acero y núcleo de plomo. Los aisladores tienen una gran rigidez vertical y flexibilidad horizontal, por lo que pueden soportar grandes deformaciones horizontales mientras soportan presión.

### 2.5.1 Módulo de corte (G)

Rigidez que posee un material al deformarse bajo fuerzas de corte, los aisladores se fabrican usualmente con un material cuyo módulo de corte se encuentra entre 0.4 a 1 MPa. (Tabla 2-1).

Tabla 2-1. Propiedades mecánicas del hule natural vulcanizado (CFE, 2015).

Dureza Shore	Módulo de elasticidad E (MPa)	Módulo de cortante G (MPa)	Constante del material k	Deformación mínima de rotura (%)
37	1.35	0.40	0.87	650
40	1.50	0.45	0.85	600
45	1.80	0.54	0.80	600
50	2.20	0.64	0.73	500
55	3.25	0.81	0.64	500
60	4.45	1.06	0.57	400

### 2.5.2 Rigidez horizontal o lateral ( $k_{lh}$ )

El aislador elastomérico puede aproximarse como una viga vertical de corte (Skinner et al., 1980), ya que las láminas de acero vulcanizadas inhiben las deformaciones de flexión permitiendo deformaciones por corte, esta propiedad es una de las más importantes para el diseño del aislador.

$$k_{lh} = \frac{GA_b}{T_r} \quad (5)$$

Donde:

$G$  = Módulo de rigidez al corte del elastómero (Tabla 2-1).

$A_b$  = Área efectiva en planta de la sección transversal del apoyo elastomérico.

$T_r$  = Suma de espesores de las capas de goma.

### 2.5.3 Factor de forma ( $S_i$ )

El factor de forma de una capa interna de hule,  $S_i$ , está definido como la superficie del área cargada dividida entre el área perimetral libre de expandirse.

Para un apoyo circular,  $S_i$ , está dado por:

$$S_i = \frac{D_b}{4t_i} \quad (6)$$

Para un apoyo rectangular:

$$S_i = \frac{B_b L_b}{2t_i(B_b + L_b)} \quad (7)$$

Donde:

$B_b$  y  $L_b$  = Ancho y la longitud efectivos del apoyo de goma en planta (Figura 2.10)

$D_b$  = Diámetro efectivo del apoyo circular.

$t_i$  = Espesor de una capa.

### 2.5.4 Rigidez vertical ( $k_{vh}$ )

La rigidez vertical del apoyo se calcula con:

$$k_{vh} = \frac{E_c A_r}{T_r} \quad (8)$$

Donde:

$k_{vh}$  = Rigidez vertical de un apoyo

$E_c$  = Módulo de compresibilidad efectiva de la goma.

$A_r$  = Área reducida de la goma.

El módulo de compresibilidad efectiva es función del factor de forma y de las propiedades del material:

$$E_c = E(1 + 2kS_i^2) \quad (9)$$

Donde:

$E$  = Módulo de elasticidad del material (Tabla 2-1).

$k$  = Constante del material (Tabla 2-1).

$S_i$  = Factor de forma

El área reducida del apoyo,  $A_r$ , es igual al área traslapada entre la cara superior e inferior del apoyo debido al desplazamiento horizontal total de diseño “x” que experimenta el apoyo, que en cualquier caso deberá ser menor que  $B_b$ , (Figura 2.10).

Para un apoyo rectangular:

$$A_r = A_b \left(1 - \frac{x}{B_b}\right) \quad (10)$$

Para un apoyo circular:

$$A_r = \frac{D_b^2}{4} (\delta - \text{sen}\delta) \quad (11)$$

Donde:

$B_b$  = Ancho efectivo del apoyo (Figura 2.10a)

$A_b$  = Área efectiva del apoyo en planta ( $A_b = B_b L_b$ , Figura 2.10a)

$D_b$  = Diámetro efectivo del apoyo circular (Figura 2.10b)

$\delta$  = Factor adimensional que se calcula con  $\delta = 2\cos^{-1}\left(\frac{x}{D_b}\right)$

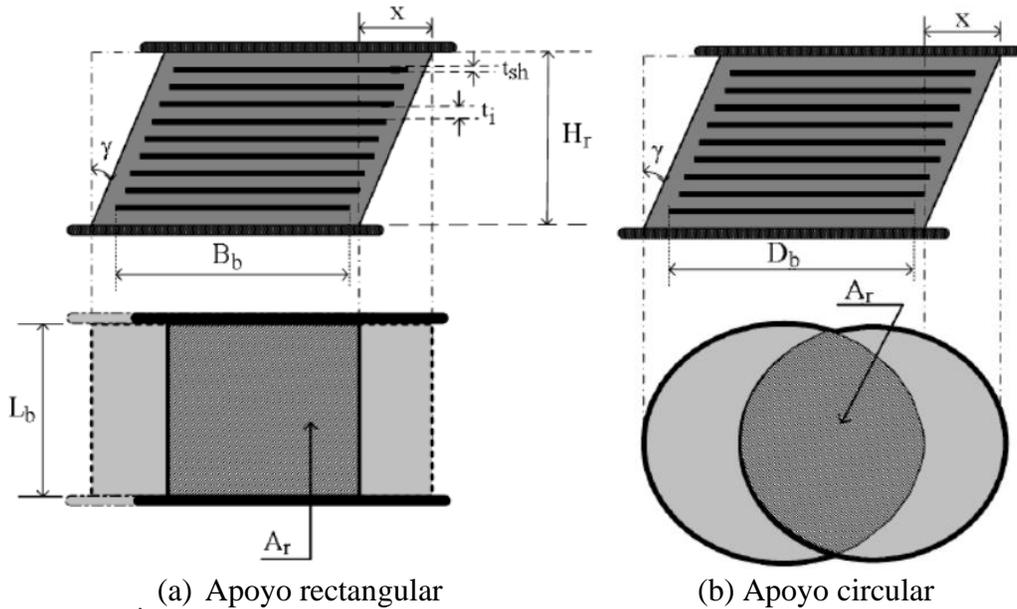


Figura 2.10. Área efectiva a la compresión (el área achurada es el área traslapada) (CFE, 2015)

### 2.5.5 Deformaciones límite ( $\gamma$ )

Las deformaciones angulares máximas que se admiten para los apoyos elastoméricos son:

$$\gamma_{sc} \leq 2.5 \quad (12)$$

$$\gamma_{sc} + \gamma_{sn} + \gamma_{sr} \leq 5.0 \quad (13)$$

$$\gamma_{sc} + \gamma_{ss} + 0.5\gamma_{sr} \leq 5.5 \quad (14)$$

Donde:

$\gamma_{sc}$  = Deformación angular por cortante debida a compresión (15) o (16).

$\gamma_{sn}$  = Deformación angular debida al desplazamiento por efectos no sísmicos.

$\gamma_{sr}$  = Deformación originada por la rotación del apoyo (17)

$\gamma_{ss}$  = Deformación debida al desplazamiento “x” por efecto sísmico (18)

Para  $S_i \leq 15$ :

$$\gamma_{sc} = \frac{3S_i N}{2A_r G(1 + 2kS_i^2)} \quad (15)$$

Para  $S_i > 15$ :

$$\gamma_{sc} = \frac{3N \left(1 + \frac{8GkS_i^2}{E_\infty}\right)}{4GkS_i A_r} \quad (16)$$

Donde:

$E_\infty$  = Mód. de rigidez de compresibilidad volumétrica del hule, usualmente de 2,000 MPa.

$N$  = Carga vertical máxima de servicio correspondiente a la combinación de cargas que se revisa.

$$\gamma_{sr} = \frac{B_b^2 \theta}{2t_i T_r} \quad (17)$$

Donde:

$\theta$  = Rotación del apoyo

$T_r$  = Suma de los espesores de todas las capas de hule

$$\gamma_{ss} = \frac{x}{T_r} \quad (18)$$

### 2.5.6 Capacidad de carga contra el pandeo

Debe revisarse la estabilidad del apoyo ante desplazamiento lateral nulo y ante desplazamiento lateral máximo. Para desplazamiento lateral nulo, la carga crítica de pandeo elástico  $P_{cr}$  se calcula con la ecuación (19).

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 E_c I G A_b}{3 T_r^2}} \quad (19)$$

Donde:

$I$  = Momento de inercia mínimo del apoyo en planta

Cuando existe desplazamiento lateral, la carga crítica de pandeo  $P'_{cr}$  se calcula con la ecuación (20).

$$P'_{cr} = P_{cr} \frac{A_r}{A_b} \quad (20)$$

Donde:

$A_r$  = Área reducida del elastómero (10) o (11)

$A_b$  = Área efectiva del apoyo en planta

La carga crítica de pandeo obtenida con las ecuaciones (19) y (20), dividida entre el factor de seguridad  $F_s = 3$ , debe ser mayor o igual que la carga vertical máxima de servicio correspondiente a la combinación de cargas que se revisa.

## 2.6 PROPIEDADES AISLADOR ELASTOMÉRICO CON NÚCLEO DE PLOMO (LRB)

Estos aisladores suelen ser fabricados con caucho natural de bajo amortiguamiento, con una o más perforaciones en las que se inserta un elemento de plomo. Dichos aisladores tienen propiedades mecánicas que proporcionan un buen desempeño bajo cargas de servicio.

### 2.6.1 Rigidez lateral

Los LRB tienen una relación fuerza–desplazamiento no lineal. En la Figura 2.11 se muestra un ciclo histerético típico, donde:

$F_y$  = Fuerza de fluencia del aislador (21)

$F_0$  = Fuerza para un desplazamiento nulo en el ciclo histerético (22)

$k_e$  = Rigidez elástica (23)

$k_p$  = Rigidez posterior a la fluencia o rigidez postfluencia (24)

$x_y$  = Desplazamiento de fluencia (25)

$x_m$  = Desplazamiento máximo

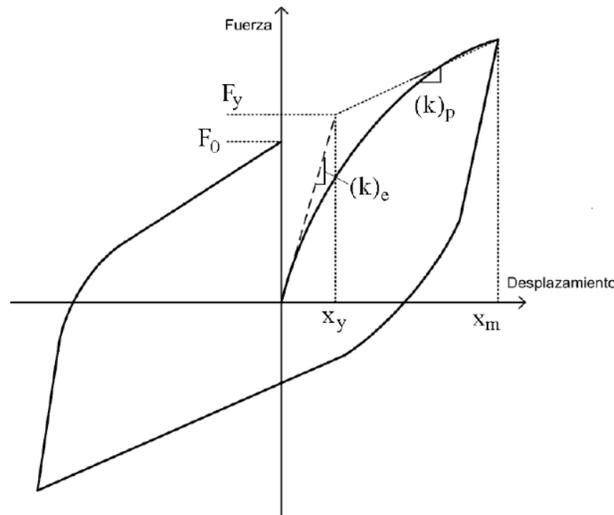


Figura 2.11. Ciclo histerético típico de un LRB (CFE, 2015)

La fuerza de fluencia  $F_y$  para un LRB está dada por la ecuación:

$$F_y = \sigma_y A_{pl} \quad (21)$$

Donde:

$\sigma_y$  = Esfuerzo de fluencia a cortante del plomo, que se puede suponer igual a 9 MPa.

$A_{pl}$  = Área de la sección transversal del corazón de plomo

La fuerza para desplazamiento nulo está dada aproximadamente por:

$$F_0 = 0.9F_y \quad (22)$$

La rigidez elástica  $k_e$ , se calcula con:

$$k_e = \frac{10GA_b}{T_r} \quad (23)$$

Donde:

$A_b$  = Área efectiva del apoyo en planta, descontando el área del corazón de plomo

Y la rigidez postfluencia  $k_p$ , se obtiene con:

$$k_p = 0.1k_e \quad (24)$$

Conocidas  $F_y$  y  $k_p$ , el desplazamiento de fluencia  $x_y$  es igual a:

$$x_y = \frac{F_y}{9k_p} \quad (25)$$

### 2.6.2 Fuerza de autocentrado

El conjunto de los apoyos LRB debe tener una rigidez mínima posterior a la fluencia después de un evento sísmico. Se recomienda que dicha rigidez cumpla con:

$$\sum k_p \geq 0.05 \frac{W_T}{x_m} \quad (26)$$

Donde:

$W_T$  = Peso total de la estructura en condiciones de servicio

$x_m$  = Desplazamiento máximo de los LRB

### 2.6.3 Capacidad de carga contra el pandeo

Del mismo modo que los elastómeros sin núcleo de plomo, debe revisarse la estabilidad del apoyo ante desplazamiento lateral nulo y ante desplazamiento lateral máximo. Para desplazamiento lateral nulo, la carga crítica de pandeo elástico  $P_{cr}$  se calcula utilizando la ec. (19). En presencia de desplazamiento lateral, la condición crítica de pandeo de los LRB depende del tipo de conexión del apoyo con la estructura, es decir, de si éstos pueden soportar cortante y momento flexionante o solo cortante. Para el caso de apoyos sujetos a cortante y flexión, la carga crítica para el apoyo desplazado se calcula con la ec. (20). Cuando los apoyos se instalan para actuar solo bajo a cortante, éstos pueden experimentar un levantamiento parcial, y el desplazamiento que los vuelve inestables se calcula mediante la ec.(27).

$$D_{cr} = \frac{NB_b - F_0 H_r}{N + k_p H_r} \quad (27)$$

Donde:

$D_{cr}$  = Desplazamiento crítico de pandeo de un LRB

$H_r$  = Altura efectiva de un LRB (Figura 2.10)

### 2.6.4 Amortiguamiento efectivo

El amortiguamiento efectivo,  $\xi_{ef}$ , se puede estimar a partir de la energía disipada por histéresis:

$$\xi_{his} = \frac{2(1 - \alpha) \left(1 - \frac{1}{\mu}\right)}{\pi[1 + \alpha(\mu - 1)]} \quad (28)$$

$$\mu = \frac{x_m}{x_y} \quad (29)$$

$$\alpha = \frac{k_p}{k_e} \quad (30)$$

La ecuación (28) define la energía disipada por histéresis del sistema de aislamiento únicamente, por lo que deberá sumarse el amortiguamiento viscoso  $\xi_v$  para obtener el amortiguamiento efectivo total del sistema de aislamiento, es decir:

$$\xi_{ef} = \xi_{his} + \xi_v \quad (31)$$

El amortiguamiento del sistema conjunto estructura-aislador se podrá estimar con:

$$\xi_{sis} = \frac{\xi_{ef} + \left(\frac{\xi_e k_{eftotal}}{K_e}\right)}{1 + \frac{k_{eftotal}}{K_e}} \quad (32)$$

Donde:

$K_e$  = Rigidez de la estructura como cuerpo rígido, se obtiene aplicando una fuerza en la azotea en la estructura con base rígida

$$K_e = \frac{V}{\Delta} \quad (33)$$

## 2.7 MÉTODOS DE ANÁLISIS

De acuerdo con el manual de la CFE, se admiten cuatro métodos de análisis para un sistema con aislamiento en la base:

- a) Análisis estático lineal
- b) Análisis dinámico modal
- c) Análisis estático no lineal
- d) Análisis paso a paso (tiempo historia)

La elección dependerá de la fase de diseño, del nivel esperado de comportamiento no lineal y la complejidad de la estructura. En los métodos de análisis que se proponen deben considerarse, cuando sean importantes, los efectos de la interacción suelo–estructura, la no linealidad geométrica y la no linealidad de los materiales.

En el presente estudio, se realizarán los análisis: estático lineal, dinámico modal y análisis tiempo historia dinámico no lineal.

### 2.7.1 Análisis estático lineal

#### 2.7.1.1 *Valuación de fuerzas sísmicas sin estimar el periodo fundamental*

Para un análisis preliminar, se estiman las fuerzas laterales equivalentes mediante la ecuación 3.10 del manual de la (CFE, 2015). Cabe recalcar que estas corresponden a una aceleración máxima en la cresta del espectro; puesto que, de entrada, no se conoce el periodo de la estructura. En la Figura 2.12, se ejemplifica el significado de algunas variables empleadas en la ecuación antes mencionada.

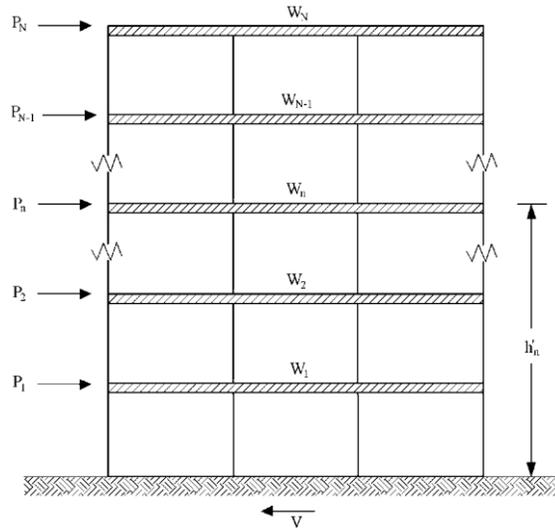


Figura 2.12. Fuerzas sísmicas en un edificio (CFE, 2015).

$$P_n = W_n h'_n = \frac{\sum_{n=1}^{N_e} W_n}{\sum_{n=1}^{N_e} W_n h'_n} \frac{a}{Q'R\rho} \quad (34)$$

Donde:

$P_n$  = Es la fuerza lateral que actúa sobre la masa del nivel n.

$W_n$  = Peso del nivel n, incluyendo cargas muertas y vivas

$h'_n$  = Altura del nivel n sobre el desplante

$N_e$  = Número de masas concentradas, igual al número de niveles del edificio

### 2.7.1.2 Valuación de fuerzas sísmicas estimando el periodo fundamental

Se podrán adoptar fuerzas cortantes menores que las calculadas en la ecuación (34), siempre que se tome el valor aproximado del periodo fundamental de la estructura,  $T_{e0}$ . Éste se podrá obtener de manera aproximada a partir del cociente de Schwartz (35).

$$T_{e0} = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} = \left[ \frac{\sum_{n=1}^{N_e} W_n X_n^2}{\sum_{n=1}^{N_e} P_n X_n} \right]^{1/2} \quad (35)$$

Donde:

$X_n$  = Es el desplazamiento del nivel n en la dirección de la fuerza.

## 2.7.2 Análisis modal espectral

De acuerdo con el manual de la CFE, el método de análisis dinámico consta de los mismos pasos que el estático, con la salvedad de que las fuerzas laterales aplicadas en los centros de masa de los pisos se determinan a partir de la respuesta dinámica de la estructura.

### 2.7.2.1 Revisión por cortante basal

Si con el método dinámico aplicado se encuentra que, en la dirección considerada, la relación:

$$\frac{V_0}{W_T} < \frac{0.7a}{Q'R\rho} \quad (36)$$

Todas las fuerzas de diseño y los desplazamientos laterales correspondientes aumentarán en una proporción tal que  $\frac{V_0}{W_T}$  iguale a este valor. Esta condición significa que siempre se debe realizar un análisis estático independientemente de las limitaciones del uso de este método. Considerando el periodo fundamental de la estructura, la fuerza cortante basal de diseño no puede ser menor que 70% de la que suministraría dicho análisis.

### 2.7.3 Método paso a paso

Dada la naturaleza no lineal de la mayor parte de los aisladores de base, se recomienda el análisis paso a paso para el diseño final del sistema estructural. Dentro de las situaciones en donde es imperativa su aplicación están los sistemas altamente asimétricos.

A pesar de que se da preferencia al uso de acelerogramas naturales, es razonable el empleo de acelerogramas artificiales. El programa PRODISIS brinda acelerogramas contruidos a partir de los espectros de peligro uniforme para periodo de retorno óptimo o del espectro de diseño elástico. Se recomienda usar al menos cuatro movimientos representativos y usar los valores máximos de la respuesta para el diseño.

### **3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

#### **3.1 HIPÓTESIS**

Mediante la implementación de aisladores LRB en el análisis de una estructura asimétrica, se producen reducciones en el efecto de torsión, del golpeteo con estructuras adyacentes, las distorsiones de entrepiso y daños estructurales, debido a que se obtienen cambios favorables en el centro de rigidez y de masa, produciendo un alargamiento del periodo de vibración fundamental e incremento en la capacidad global de amortiguamiento.

#### **3.2 OBJETIVO GENERAL**

Realizar el análisis estructural de un edificio asimétrico de 10 niveles, considerando las propiedades mecánicas principales de los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB), analizando así el comportamiento de la estructura bajo esas condiciones.

#### **3.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Analizar la estructura irregular con base fija.
- b) Calcular las propiedades iniciales del aislador LRB.
- c) Analizar la misma estructura irregular agregando los resultados obtenidos del aislador LRB.
- d) Realizar un análisis comparativo entre ambos modelos, con y sin aislamiento.

## 4. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología seguida en esta investigación. Las etapas de esta se muestran esquemáticamente en la Figura 4.1

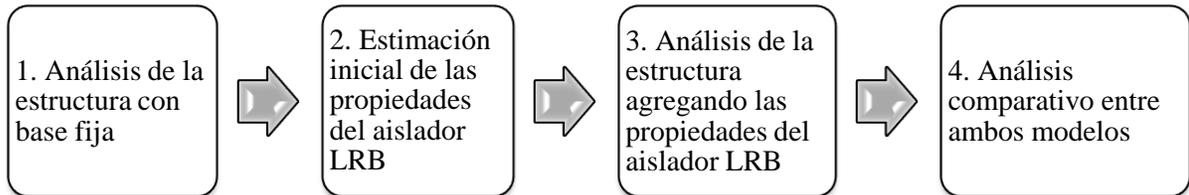


Figura 4.1. Resumen de metodología a seguir

### 4.1 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA IRREGULAR CON BASE FIJA

#### 4.1.1 Definición de las características del edificio

Como primer paso, con la información de los elementos columnas, traveses y losas de concreto; se procedió al modelamiento de la estructura en el software ETABS. Una vez modelada la estructura, se alimentó con información el modelo para poder realizar el análisis de la estructura:

#### 4.1.2 Análisis de cargas gravitacionales

El uso del edificio se considera de oficinas. El peso propio de los elementos: columnas, traveses y losa se consideran en el modelo.

#### 4.1.3 Obtención del espectro de aceleraciones

El Manual de Diseño de Obras Civiles, establece que, para la elaboración de un análisis sísmico modal, los espectros de diseño se deben obtener a través del programa PRODISIS. Sin embargo, para fines comparativos, de igual forma se obtuvieron los espectros mediante la implementación de las fórmulas establecidas de acuerdo con el manual de la CFE.

El espectro de diseño se construyó en función de la clasificación estructural, es decir, de la importancia, el tamaño y la relación con el sector energético o industrial (CFE, 2015). Para las estructuras B1, el espectro de diseño depende de la aceleración máxima en roca ( $a^F_0$ ).

Para terrenos Tipo I, la aceleración máxima del terreno ( $a_0$ ) y la aceleración máxima espectral ( $c$ ), para 5% de amortiguamiento estructural, se obtienen con el programa PRODISIS (Figura 4.2).

$a_0^r =$	462.47 cm/s <sup>2</sup>	$v_{m\acute{a}x}^r =$	46 cm/s	$d_{m\acute{a}x}^r =$	75 cm
$c^r =$	994.49 cm/s <sup>2</sup>	$T_r =$	197.45 años	Zona sísmica: <b>D</b>	

**Figura 4.2. Parámetros de referencia para el espectro de diseño, obtenidos de PRODISIS.**

Para estructuras tipo Edificios, se consideraron las reducciones por: ductilidad, sobrerresistencia y redundancia. Del mismo modo, correcciones por irregularidad cuando no se satisfagan las condiciones de regularidad especificadas en la CFE.

#### 4.1.4 Análisis estático

Se obtuvieron como resultados la valuación de fuerzas sísmicas sin estimar y estimando el periodo fundamental  $T_{e0}$ . Dichos resultados ayudaron para poder realizar la revisión por cortante basal.

#### 4.1.5 Análisis modal espectral

Se obtuvieron como resultado las masas modales efectivas, las propiedades dinámicas del edificio de base rígida, distorsiones de entrepiso y la descarga en columnas.

## 4.2 ESTIMACIÓN INICIAL DE LAS PROPIEDADES DEL AISLADOR LRB

Una vez desarrollado el primer análisis de la estructura sin aislar, se procedió a realizar el diseño del aislador LRB. Se trata de un proceso iterativo en el cual se proponen 3 valores: el factor de incremento del periodo de la estructura ( $n_{obj}$ ) y los amortiguamientos, del aislamiento ( $\xi_{ef}$ ) y del sistema estructura-aislador ( $\xi_{sis}$ ), con los que, mediante los cálculos indicados se obtienen las dimensiones para el aislador. Estas dimensiones deberán redondearse para fines constructivos, para con ellas recalculer las propiedades del dispositivo usando los lineamientos del MDOC-CFE 2015.

Al término de los pasos del diseño, se obtuvieron como resultados tres valores nuevos  $n_{obj}$ ,  $\xi_{ef}$  y  $\xi_{sis}$  que deberán ser sustituidos al inicio del proceso, en el paso 1. Las iteraciones continuaron hasta que los 3 valores propuestos y las propiedades del dispositivo variaron muy poco.

El amortiguamiento límite para el aislador es del 30%, lo cual no quiere decir que sea el límite máximo, pero generalmente es el límite saludable para que no se presenten otros retos en el diseño. Por lo que es recomendable iniciar el proceso de iteración con un  $\xi_{ef} < 30\%$ , y el  $\xi_{sis}$  siempre será menor a  $\xi_{ef}$ .

Paso 1. Periodo de vibración objetivo.

$$T_{obj} = n_{obj} T_e \quad (37)$$

$$\omega_{obj} = \frac{2\pi}{T_{obj}} \quad (38)$$

Donde:

$T_{obj} = T_{sa}$  = Periodo objetivo del sistema aislado

$T_e$  = Periodo de la estructura con base fija

$\omega_{obj}$  = Frecuencia circular del sistema aislado

Paso 2. Rigidez efectiva total.

$$k_{eftotal} = M_s \omega_{obj}^2 \quad (39)$$

$$M_s = \frac{W_s}{g} \quad (40)$$

Donde:

$M_s$  = Masa total del edificio

$W_s$  = Peso del edificio

Paso 3. Rigidez de un aislador.

$$k_{ef} = \frac{k_{eftotal}}{n_a} \quad (41)$$

Donde:

$n_a$  = Número de aisladores

Paso 4. Desplazamiento de la estructura con el periodo objetivo.

$$x_m = \frac{\beta S_a T_{sa}^2}{4\pi^2} \quad (42)$$

Donde:

$S_a = ag$ ; pseudoaceleración obtenida del espectro elástico con 5% de amortiguamiento, para el periodo  $T_{obj}$

$\beta$  = Factor de modificación de respuesta por amortiguamiento suplementario, obtenido de acuerdo con la (CFE, 2015).

Paso 5. Energía disipada en un ciclo de histéresis.

$$E_D = 2\pi k_{ef} x_m^2 \xi_{ef} \quad (43)$$

Donde:

$\xi_{ef}$  = % de amortiguamiento del aislador (efectivo). Dato propuesto inicial (< 30%)

#### Paso 6. Fuerza característica

$$F_0 = \frac{E_D}{4(x_m - x_y)} \quad (44)$$

Donde:

$x_y$  = Desplazamiento de fluencia

El cálculo de  $x_y$ , se trata de un proceso iterativo, en el que, se supone  $x_y = 0$  en la primera iteración y el valor obtenido al final es sustituido al inicio de la siguiente iteración, repitiendo el proceso del paso 6 al 8, hasta que los valores final e inicial sean casi iguales.

#### Paso 7. Rigidez post-fluencia

$$k_p = k_{ef} - \frac{F_0}{x_m} \quad (45)$$

#### Paso 8. Cálculo del desplazamiento de fluencia

$$k_e = 10k_p \quad (46)$$

$$F_y = k_e x_y \quad (47)$$

$$F_0 = F_y - k_p x_y = 9k_p x_y \quad (48)$$

$$x_y = \frac{F_0}{9k_p} \quad (49)$$

De donde:

$k_e$  = Rigidez inicial

El valor obtenido de  $x_y$ , se sustituye al inicio del paso 6 y se recalculan los valores hasta obtener el mismo valor al final del proceso.

#### Paso 9. Fuerza de fluencia

De la ecuación (48), se despeja  $F_y$

#### Paso 10. Cálculo del diámetro del núcleo de plomo

$$A_{pl} = \frac{F_0}{\sigma_y} \quad (50)$$

$$\emptyset_{pl} = \sqrt{\frac{4A_{pl}}{\pi}} \quad (51)$$

Donde:

$A_{pl}$  = Área de núcleo de plomo

$\sigma_y$  = Esfuerzo cortante de fluencia de plomo, que se puede suponer igual a 9MPa

Después del paso 10, se proponen las dimensiones del aislador, como se indican en los siguientes pasos.

Aquí se pueden proponer valores cercanos a este cálculo, hay que recordar que el proceso es iterativo y que se está en la etapa de prediseño. Se propone un  $\emptyset_{pl\ real}$  de acuerdo con los resultados obtenidos, para fines constructivos.

#### Paso 11. Cálculo del área del caucho

Para calcular el diámetro y área de caucho es necesario estimar primero el diámetro total del aislador. Como parámetro de puede considerar:

$$\emptyset_{total} \approx 2.5 \text{ a } 3x_m \quad (52)$$

Del mismo modo que el paso 10, se propone un  $\emptyset_{total\ real}$  para fines constructivos. Ahora es posible obtener el área total,  $A_{total}$ , y con ello el área del caucho:

$$A_r = A_{total} - A_{pl} \quad (53)$$

### Paso 12. Espesor del caucho

$$T_r = \frac{GA_r}{k_p} \quad (54)$$

Donde:

$G$  = Módulo de cortante del caucho, 0.45 MPa es considerado un valor típico

### Paso 13. Cálculo de propiedades del aislador con las dimensiones propuestas

Una vez que se cuenta con la propuesta de diámetro del núcleo de plomo, diámetro total del aislador y espesor del plomo, las propiedades antes obtenidas deben recalcularse de forma inversa con el fin de obtener los valores con el amortiguamiento del aislador y del sistema real. Algunas fórmulas a continuación se ilustraron en el apartado 4.3 y 4.4 (fórmulas (5)-(31), otras vienen de las enumeradas en los pasos anteriores. Se colocará la propiedad calculada y la referencia de la fórmula utilizada.

- a) Rigidez elástica,  $k_e$  (23)
- b) Rigidez post-fluencia,  $k_p$  (24)
- c) Fuerza característica,  $F_0$ , despejando de (50)
- d) Desplazamiento de fluencia,  $x_y$ , (49)
- e) Fuerza de fluencia,  $F_y$ , despejando de (48)
- f) Rigidez efectiva,  $k_{ef}$ , despejando de (45)
- g) Rigidez efectiva total,  $k_{eftotal}$ , despejando de (41)

- h) Amortiguamiento del aislador,  $\xi_{ef}$ , (31)
- i) Amortiguamiento del sistema,  $\xi_{sis}$ , (32)
- j) Energía disipada en un ciclo de histéresis,  $E_D$ , despejando de (44)
- k) Frecuencia y periodo del sistema de aislamiento,  $\omega_{sa}$  y  $T_{sa}$ , despejando (39)
- l) Factor de incremento del periodo de la estructura,  $n_{obj}$ , despejando de (37)

Es así como se obtienen los datos de la primera iteración, es recomendable el uso herramientas de cálculo que permitan automatizar el proceso.

### 4.3 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA AGREGANDO LAS PROPIEDADES DEL AISLADOR LRB

Obtenida la información anterior, fue posible realizar un segundo análisis (modal espectral y análisis tiempo historia no lineal) de la estructura agregando las propiedades del aislador LRB.

#### 4.3.1 Propiedades mecánicas principales

Los datos que se introducen en el software ETABS son los siguientes:

- Rigidez vertical
- Rigidez efectiva
- Rigidez elástica o inicial
- Fuerza de fluencia
- Razón de rigidez post-fluencia
- Amortiguamiento, c

### 4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE AMBOS MODELOS

Finalmente, con ayuda de los resultados obtenidos, se procedió a realizar un análisis comparativo entre ambos modelos: con y sin aislamiento.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se comienza describiendo los parámetros considerados en el edificio. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos del análisis modal espectral y del análisis tiempo historia no lineal de los modelos de estructura fija y base aislada. Finalmente, se realiza una comparativa de los resultados obtenidos.

### 5.1 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA IRREGULAR CON BASE FIJA

#### 5.1.1 Características del edificio

El edificio se ubicará, hipotéticamente, en la ciudad de Acapulco Juárez en el estado de Guerrero. Es un edificio de forma irregular de concreto conformado por 10 niveles, el nivel 1 tiene una altura de 4.2 m y el resto de los niveles 3.4 m cada uno, sumando una altura total de: 34.8m. Cuenta con 5 crujiás de 8m en cada sentido (Figura 5.1).

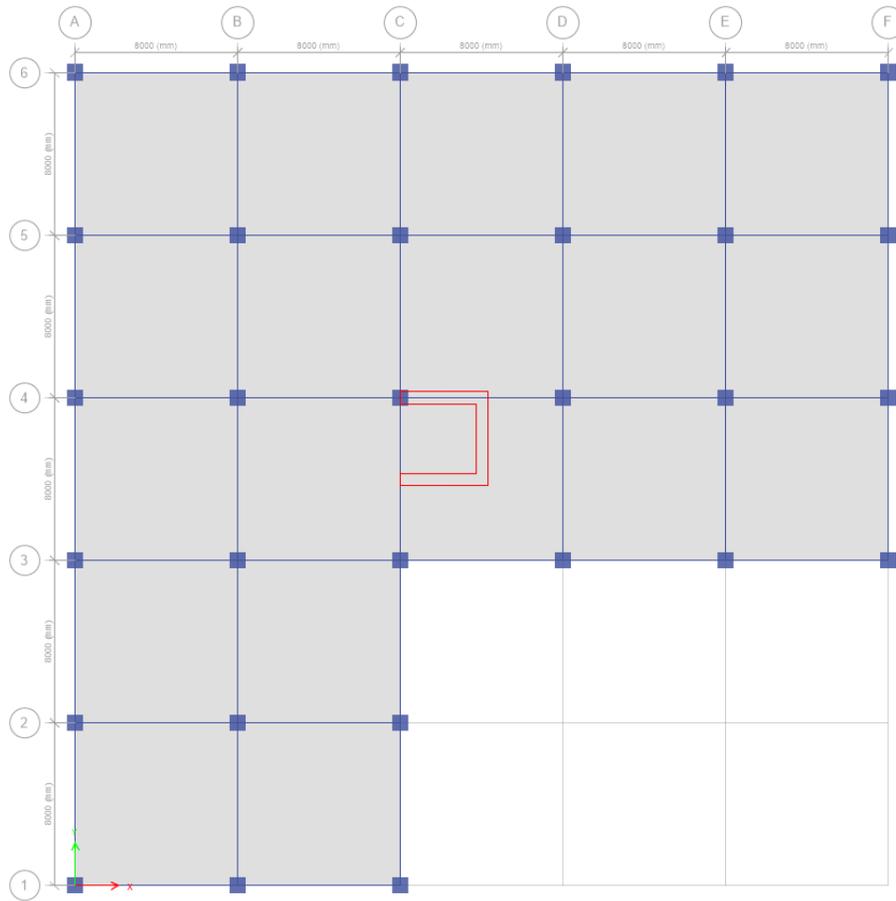
La estructuración se resolvió con marcos tridimensionales ortogonales de concreto, con un sistema de piso formado por vigas y losa nervada.

Se tienen columnas de sección transversal cuadrada, de 80x80cm y trabes de 40x80cm. La losa nervada tiene un peralte de 35cm.

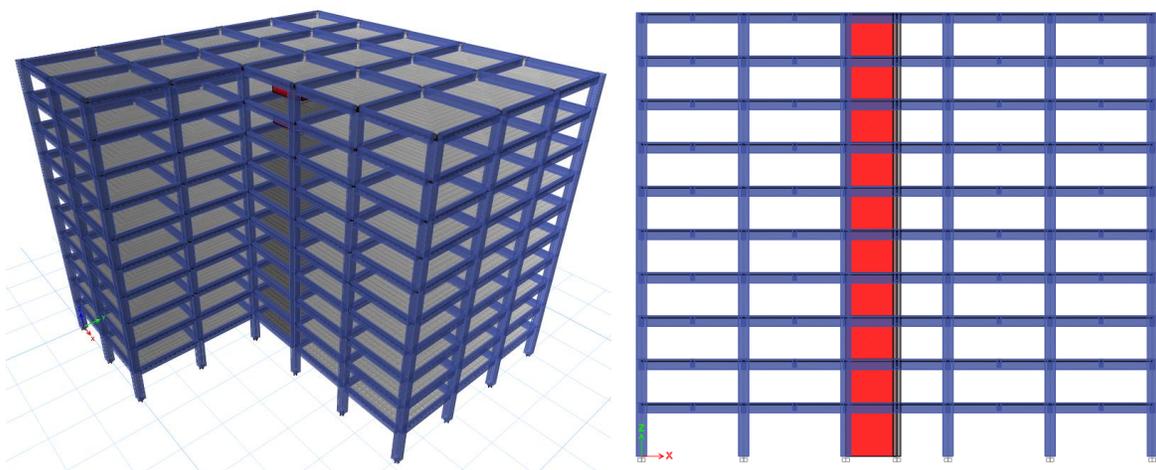
El concreto utilizado fue Concreto Clase 1 con una resistencia a la compresión  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ , con un peso volumétrico de  $2.4 \text{ ton/m}^3$  y módulo elástico calculado, según las NTC-17 con la ecuación  $14000\sqrt{f'c}$ .

Para la modelación y análisis del edificio se utiliza el programa ETABS v20.2.0, en el que el edificio se modela como un sistema esquelético formado por columnas y trabes, con elementos tipo Shell para modelar la losa (Figura 5.2).

La estructuración del edificio se plantea solo con el objetivo de poder ilustrar los resultados de los análisis en el presente trabajo.



**Figura 5.1. Vista en planta del modelo**



**Figura 5.2. Vista 3D y elevación longitudinal del modelo**

## 5.1.2 Cargas gravitacionales

Las cargas consideradas en el análisis serán de acuerdo con la Figura 5.3.

### 1. Azotea

Relleno fluido	240 kg/m <sup>2</sup>
Impermeabilizante	10 kg/m <sup>2</sup>
Instalaciones	20 kg/m <sup>2</sup>
Plafón acústico	7 kg/m <sup>2</sup>
Sobrecarga reglamento	40 kg/m <sup>2</sup>

CM =	<b>317</b> kg/m <sup>2</sup>
CVmax =	<b>100</b> kg/m <sup>2</sup>
CVinst =	<b>70</b> kg/m <sup>2</sup>

### 2. Entrepisos

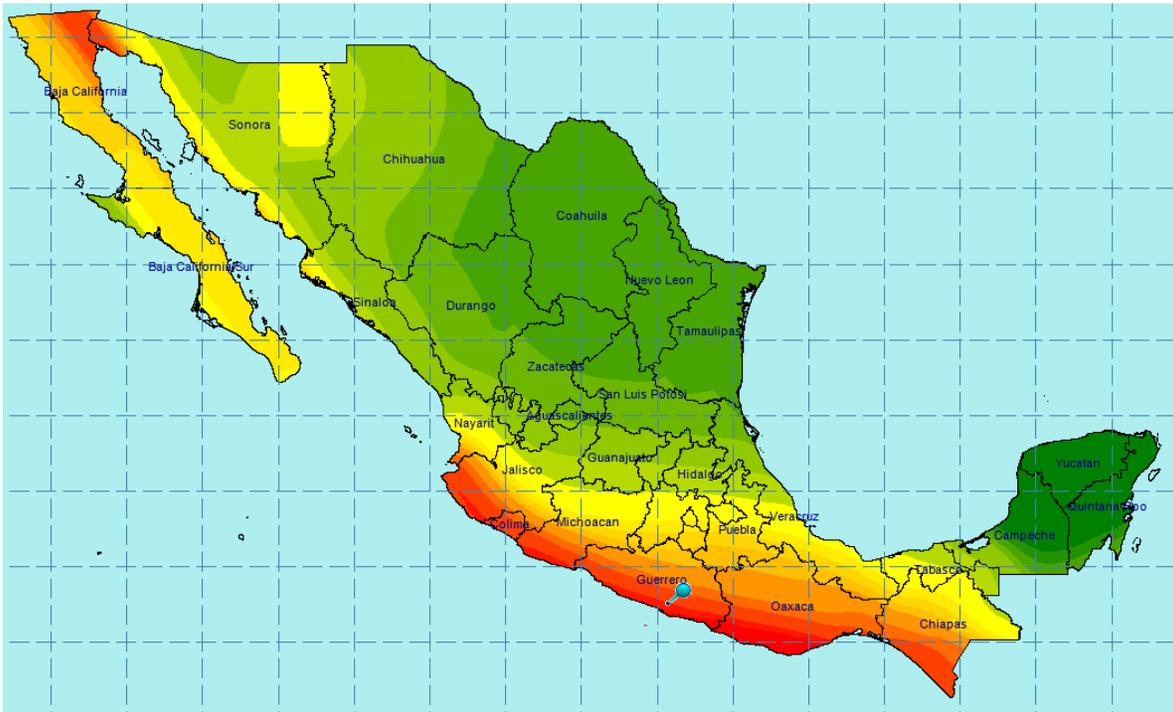
Loseta cerámica	25 kg/cm <sup>2</sup>
Pegazulejo	18 kg/cm <sup>2</sup>
Firme de niv (5cm)	110 kg/cm <sup>2</sup>
Instalaciones	15 kg/cm <sup>2</sup>
Plafón acústico	18 kg/cm <sup>2</sup>
Sobrecarga reglamento	40 kg/cm <sup>2</sup>

CM =	<b>226</b> kg/cm <sup>2</sup>
CVmax =	<b>250</b> kg/cm <sup>2</sup>
CVinst =	<b>180</b> kg/cm <sup>2</sup>

**Figura 5.3. Análisis de cargas gravitacionales**

### 5.1.3 Espectro de aceleraciones

La localización del predio en el que se supone ubicado el edificio es en la ciudad de Acapulco de Juárez, Guerrero, la cual tiene una zona sísmica D (Figura 5.4). La clasificación de la estructura corresponde al grupo B1, ya que su uso se considera para oficinas y la estructura cuenta con una altura  $> 13\text{m}$ . El tipo de terreno corresponde a tipo I.



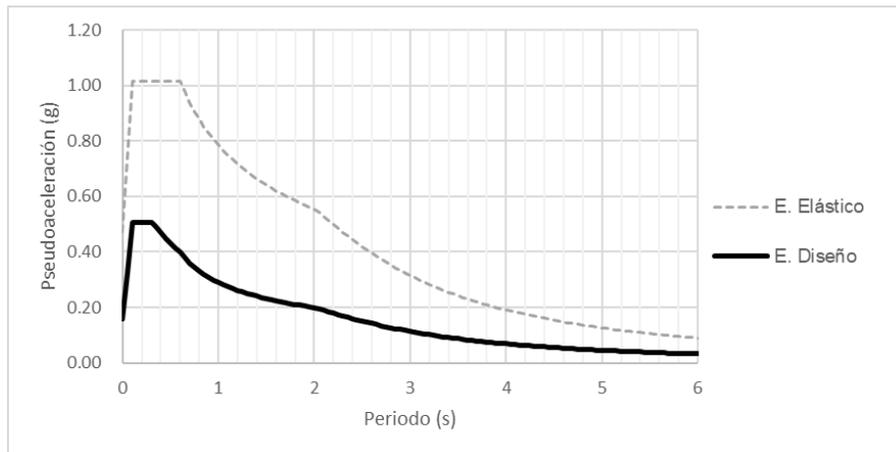
**Figura 5.4. Regionalización de México. PRODISIS**

Para la obtención del espectro de diseño se considera lo siguiente:

- Factor de comportamiento sísmico  $Q = 2$ , debido a que la resistencia es suministrada por elementos de concreto: losas planas, marcos conformados por columnas y trabes. Y muros de concreto en la zona de elevadores.
- Factor reductor por sobrerresistencia  $R_0 = 2$ , debido a que se tienen marcos y losas de concreto diseñados con  $Q = 2$ .

- Factor por redundancia  $\rho = 1$ , debido a que se cuenta con al menos dos marcos en las direcciones de análisis y cada marco tiene al menos dos crujeías.
- Corrección por irregularidad de 0.7, debido a que se tiene una estructura fuertemente irregular.

Finalmente, al considerar los valores antes mencionados, se obtienen los espectros de respuesta siguientes (Figura 5.5).



**Figura 5.5. Espectros de respuesta obtenidos: espectro elástico y espectro de diseño.**

#### 5.1.4 Estados límites

Las combinaciones de carga para la revisión del estado límite de falla son:

$$1.3CM + 1.5CV$$

$$1.1(CM + CV + 1.1SX + 0.33SY)$$

$$1.1(CM + CV + 1.1SY + 0.33SX)$$

Para la revisión del estado límite de servicio se utiliza la combinación de carga vertical sin factorizar y los sismos elásticos para la revisión de los desplazamientos laterales.

## 5.1.5 Análisis estático

### 5.1.5.1 Valuación de fuerzas sísmicas sin estimar el periodo fundamental

**Tabla 5-1. Fuerzas sísmicas sin estimar  $T_{e0}$**

Nivel	$W_n$ (Ton)	$h'_n$ (m)	$W_n h'_n$ (T-m)	$P_n$ (Ton)	$V_0$ (Ton)
1	1566	4.2	6576	172	7761
2	1540	7.6	11707	307	7589
3	1540	11.0	16944	444	7283
4	1540	14.4	22182	581	6839
5	1540	17.8	27419	718	6258
6	1540	21.2	32656	855	5540
7	1540	24.6	37893	992	4685
8	1540	28.0	43131	1129	3693
9	1540	31.4	48368	1266	2564
10	1424	34.8	49538	1297	1297
<b>Total</b>	<b>15312</b>		<b>296415</b>		

### 5.1.5.2 Valuación de fuerzas sísmicas estimando el periodo fundamental

**Tabla 5-2. Obtención del periodo fundamental**

Nivel	$W_n$ (Ton)	$P_n$ (Ton)	$X_n$ (cm)	$W_n X_n^2$	$P_n X_n$
1	1566	172	1.58	3888	271
2	1540	307	4.04	25091	1237
3	1540	444	7.08	77159	3140
4	1540	581	10.40	166698	6042
5	1540	718	13.79	292960	9901
6	1540	855	17.08	449261	14603
7	1540	992	20.15	625382	19992
8	1540	1129	22.94	810321	25903
9	1540	1266	25.42	995635	32199
10	1424	1297	27.61	1085315	35816
<b>Total</b>				<b>4531710</b>	<b>149105</b>
$T_{e0} =$	1.106				

**Tabla 5-3. Fuerzas sísmicas estimando  $T_{e0}$**

Nivel	$W_n$ (Ton)	$h'_n$ (m)	$W_n h'_n$ (T-m)	$P_n$ (Ton)	$V_0$ (Ton)
1	1558	4.2	6546	93	4169
2	1533	7.6	11652	165	4076
3	1533	11.0	16864	238	3912
4	1533	14.4	22077	312	3673
5	1533	17.8	27289	386	3361
6	1533	21.2	32502	459	2975
7	1533	24.6	37714	533	2516
8	1533	28.0	42927	607	1983
9	1533	31.4	48139	680	1376
10	1414	34.8	49221	696	696
<b>Total</b>	<b>15238</b>		<b>294929</b>		

### 5.1.6 Análisis modal espectral

#### 5.1.6.1 Masas modales efectivas

Es importante verificar si los 12 modos definidos por defecto en el programa para un análisis modal sean suficientes para representar con buena precisión el comportamiento de la estructura, para ello, se obtuvieron las masas modales efectivas y su porcentaje acumulado respecto a la masa total. Como se puede ver en la Tabla 5-4, no fue necesario aumentar el número de modos; se resalta en rojo el momento en el que se alcanza el 90% de la fracción de masa efectiva.

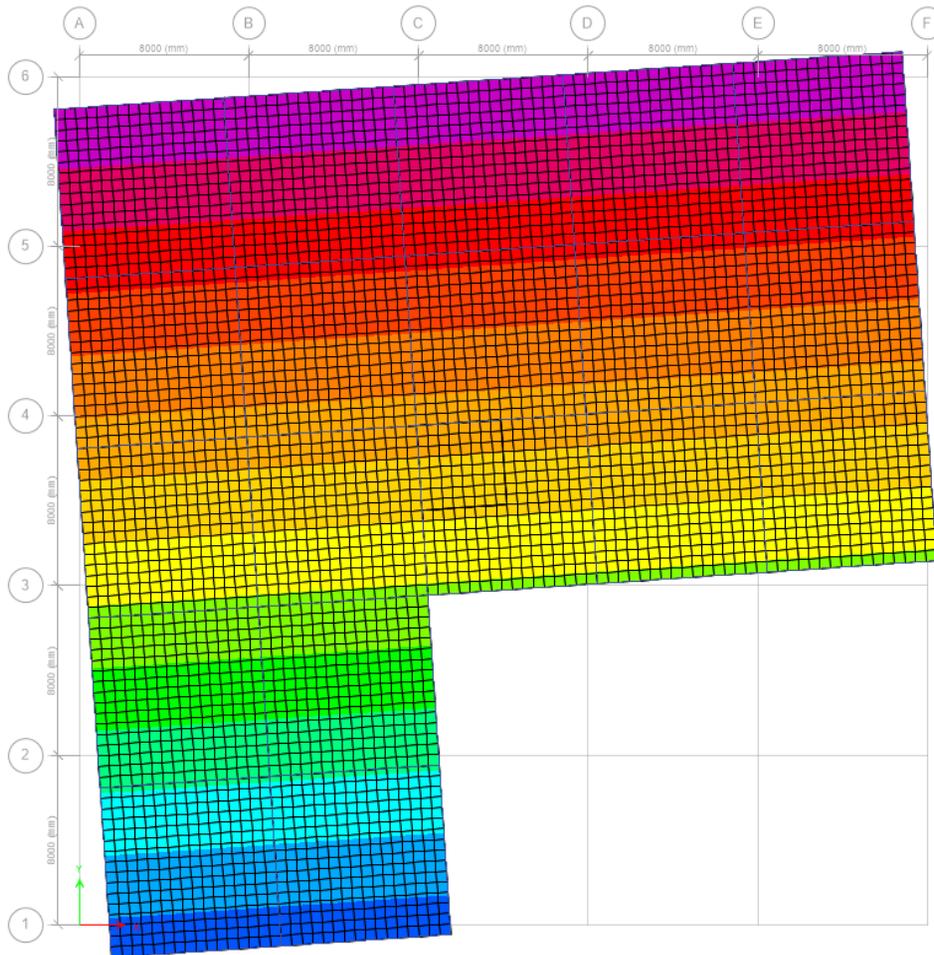
**Tabla 5-4. Masa efectiva que se desplaza en cada dirección de análisis**

Modo	T (s)	$U_x$	$U_y$	$R_z$	SumUX	SumUY	SumRZ
1	1.208	0.0046	0.0724	0.7479	0.0046	0.0724	0.7479
2	1.017	0.7215	0.0254	0.0002	0.7261	0.0978	0.7481
3	0.991	0.0219	0.6631	0.0738	0.7481	0.7609	0.8219
4	0.388	0.0007	0.0078	0.0896	0.7487	0.7687	<b>0.9115</b>
5	0.284	0.0004	0.1384	0.0109	0.7491	<b>0.9071</b>	0.9224
6	0.281	0.1414	0.0000	0.0011	0.8905	0.9071	0.9234
7	0.218	0.0002	0.0032	0.0330	0.8907	0.9103	0.9564
8	0.145	0.0003	0.0010	0.0199	0.8910	0.9112	0.9763
9	0.142	0.0000	0.0470	0.0002	0.8910	0.9582	0.9764
10	0.133	0.0564	0.0000	0.0006	<b>0.9474</b>	0.9582	0.9770
11	0.104	0.0001	0.0003	0.0099	0.9475	0.9586	0.9870
12	0.092	0.0000	0.0207	0.0008	0.9476	0.9792	0.9878

De acuerdo con la Tabla 5-4, se puede observar el periodo fundamental de la estructura como torsional.

### 5.1.6.2 Propiedades dinámicas del edificio de base rígida

Para poder hacer una comparativa entre modelos estructura base fija vs estructura base aislada, es necesario considerar la máxima respuesta sísmica bajo la que estarán sometidos. Para el caso del sistema base fija, se considera en el modelo el espectro elástico para un 5% de amortiguamiento. Al realizar el análisis de la estructura con base fija, se puede observar su periodo fundamental de  $T = 1.017$  seg., siendo su primer modo torsional (ver Figura 5.6). Las aceleraciones obtenidas se muestran en la Tabla 5-5.



**Figura 5.6. Primer modo de vibrar de la estructura: torsional.**

**Tabla 5-5. Propiedades dinámicas de edificio con base rígida**

<b>Modo</b>	<b>T (s)</b>	<b>Acel. (mm/s<sup>2</sup>)</b>
1	1.208	7007.73
2	1.017	7637.55
3	0.991	7734.73
4	0.388	9941.98
5	0.284	9941.98
6	0.281	9941.98
7	0.218	9941.98
8	0.145	9941.98
9	0.142	9941.98
10	0.133	9941.98
11	0.104	9941.98
12	0.092	9492.98

### 5.1.6.3 Distorsiones de entrepiso

Para la condición de prevención de colapso, se consideró una distorsión de entrepiso permisible  $\gamma_{perm} = 0.015$ , ya que la estructuración consiste en marcos de concreto de ductilidad baja. Para la revisión del requisito del estado límite de servicio la distorsión de entrepiso debe limitarse a un valor máximo de  $\gamma_{perm} = 0.002$  si los elementos no estructurales están ligados a la estructura y no son capaces de soportar deformaciones apreciables o  $\gamma_{perm} = 0.004$  si los elementos no estructurales están desligados de la estructura o son capaces de soportar deformaciones laterales apreciables.

Se obtuvieron las distorsiones de entrepiso (Tabla 5-6), las cuales son menores a la distorsión límite para el estado contra colapso. Sin embargo, no cumple para la condición del estado límite de servicio.

**Tabla 5-6. Distorsiones de entrepiso estructura base fija**

	Nivel	hi (cm)	Desplazamientos absolutos		Desplazamientos relativos	Distorsiones de entrepiso
			Dx (cm)	Dy (cm)	Δ (cm)	γ
SISMO EN X	10	340	29.71	4.06	2.421	0.0071
	9	340	27.30	3.79	2.730	0.0080
	8	340	24.59	3.48	3.049	0.0090
	7	340	21.56	3.12	3.354	0.0099
	6	340	18.23	2.72	3.584	0.0105
	5	340	14.68	2.27	3.687	0.0108
	4	340	11.02	1.80	3.611	0.0106
	3	340	7.44	1.32	3.288	0.0097
	2	340	4.19	0.83	2.607	0.0077
	1	420	1.62	0.37	1.665	0.0040
SISMO EN Y	10	340	15.35	34.11	2.543	0.0075
	9	340	14.73	31.64	3.054	0.0090
	8	340	13.83	28.72	3.509	0.0103
	7	340	12.66	25.41	3.920	0.0115
	6	340	11.22	21.77	4.244	0.0125
	5	340	9.55	17.87	4.447	0.0131
	4	340	7.69	13.83	4.494	0.0132
	3	340	5.69	9.80	4.342	0.0128
	2	340	3.63	5.98	3.914	0.0115
	1	420	1.64	2.61	3.082	0.0073

#### 5.1.6.4 Revisión por cortante mínimo

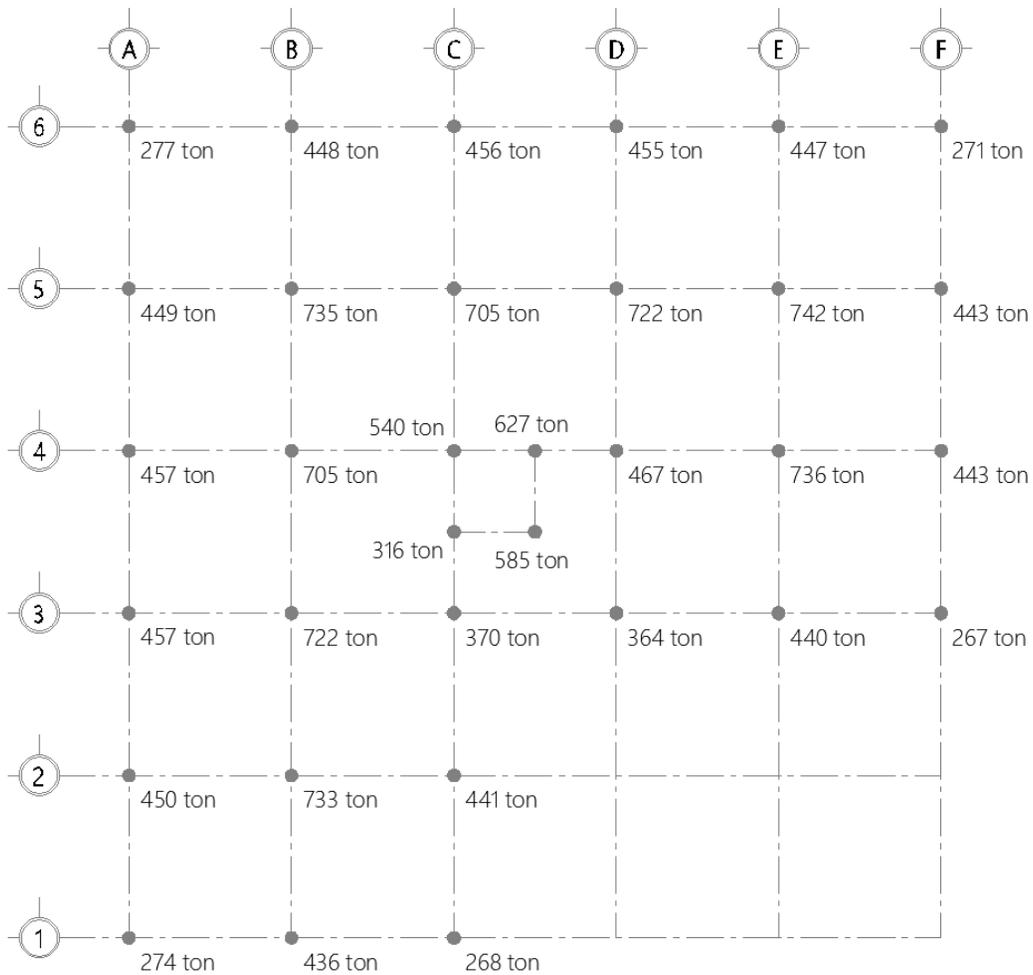
De acuerdo con la relación (36):

$$\frac{V_0}{W_T} < \frac{0.7a}{Q'R\rho} \quad \rightarrow \quad 3480 \text{ ton} < 2918.12 \text{ ton}$$

Debido a que no se cumple la relación, no se deben incrementar las fuerzas de diseño y los desplazamientos laterales.

#### 5.1.7 Descarga en columnas

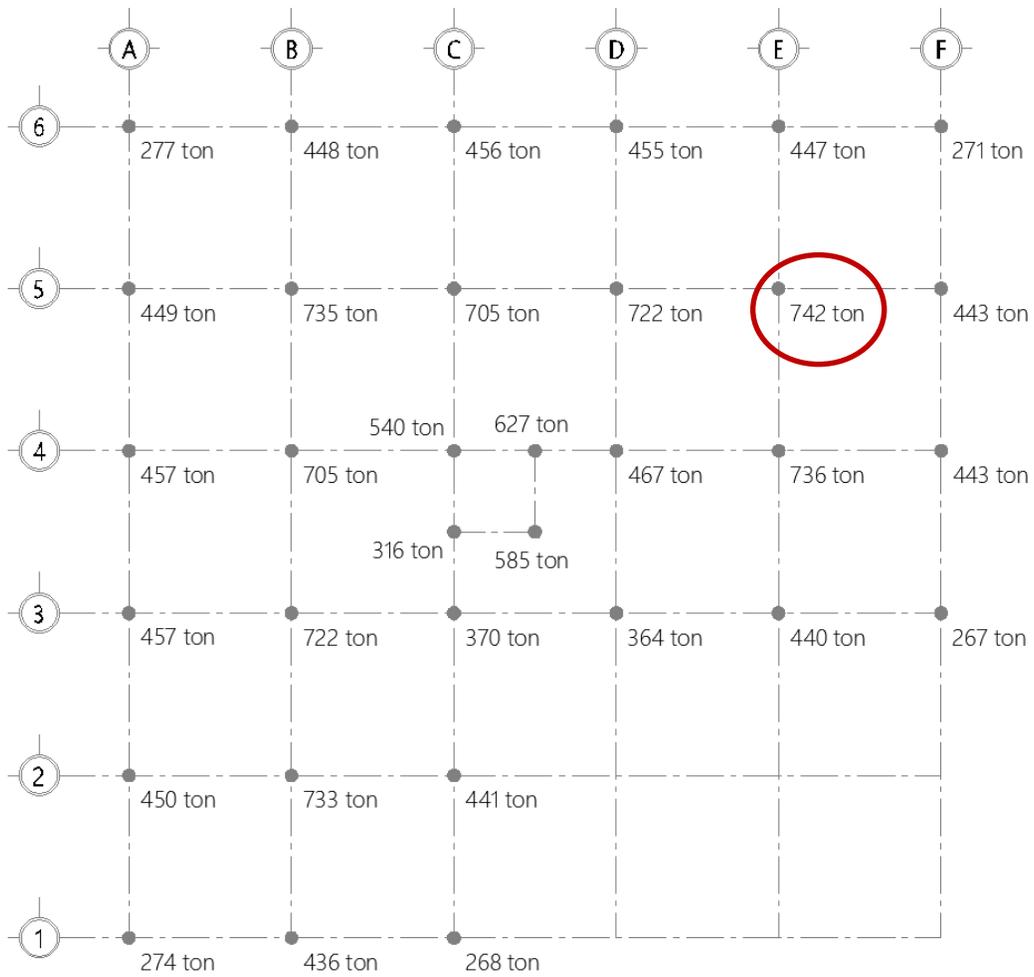
Se muestran las reacciones en la base en condiciones de servicio (Figura 5.7).



**Figura 5.7. Reacciones en la base en condiciones de servicio.**

La capacidad de carga del aislador debe ser suficiente para soportar al menos la descarga máxima que pudiese presentarse en él. Las reacciones en la base se pueden agrupar, prácticamente, en 3 grupos dependiendo del orden de la magnitud: reacciones en columnas de esquina, reacciones en columnas perimetrales y reacciones en columnas centrales

Usualmente, se proponen 2 o 3 tipos de aisladores de acuerdo con lo anterior. Otras veces, y como se realiza en el presente trabajo, se propone un aislador que tenga capacidad de carga suficiente para soportar la descarga más grande y se considera su ubicación para todas las columnas. En este caso, dicha descarga corresponde a la ubicación “5E” de 742 ton. (Figura 5.8), siendo 745 ton el valor que se tomará para futuros cálculos.



**Figura 5.8. Máxima descarga en columnas**

El número total de columnas es: 33, por lo que corresponde al número total de aisladores que se consideran. En el siguiente apartado se ilustran los resultados del proceso para el cálculo de las propiedades del dispositivo.

## 5.2 ESTIMACIÓN INICIAL DE LAS PROPIEDADES DEL DISPOSITIVO

### 5.2.1 Proceso iterativo

Para dar inicio con los cálculos, es necesario contar con cierta información obtenida del análisis modal de la estructura. Asimismo, proponer los valores antes mencionados de:  $n_{obj}$ ,  $\xi_{ef}$  y  $\xi_{sis}$ . En la Tabla 5-7 se muestran los datos preliminares.

**Tabla 5-7. Datos preliminares para la estimación inicial del dispositivo**

Datos obtenidos del modelo base fija		Datos propuestos para el inicio de cálculos	
Ws [kN]	156,906	$n_a$	3
T [s]	1.017	$\xi_{ef}$	15%
Cvmax [kN]	7,306	$\xi_{sis}$	10%

#### Paso 1. Periodo de vibración objetivo.

$$T_{obj} = 3.051 \text{ seg}$$

$$\omega_{obj} = 2.06 \text{ rad/s}$$

#### Paso 2. Rigidez efectiva total.

$$M_s = 15.995 \text{ kNs}^2/\text{mm}$$

$$k_{ef\text{total}} = 67.83 \text{ kN/mm}$$

#### Paso 3. Rigidez de un aislador.

$$k_{ef} = 2.056 \text{ kN/mm}$$

Paso 4. Desplazamiento de la estructura con el periodo objetivo.

$$S_a = 3008.10 \text{ mm/s}^2$$

$$\beta = 0.7231$$

$$x_m = 513 \text{ mm}$$

Paso 5. Energía disipada en un ciclo de histéresis.

$$E_D = 509.635 \text{ kNm}$$

Paso 6. Fuerza característica

$$x_y = 0$$

$$F_0 = 248.412 \text{ kN}$$

Paso 7. Rigidez post-fluencia

$$k_p = 1.5712 \text{ kN/mm}$$

Paso 8. Cálculo del desplazamiento de fluencia

$$k_e = 15.712 \text{ kN/mm}$$

$$x_y = 17.56 \text{ mm}$$

A este punto, se ilustró el proceso de la primera iteración, suponiendo  $x_y = 0$ , en la tabla se ilustra los resultados del proceso de iteración de los pasos 6-8 para obtener el valor final de  $x_y$ .

**Tabla 5-8. Resultados de las iteraciones, pasos 6-8.**

Iteración	$x_y$ (mm)	$F_0$ (kN)	$k_p$ (kN/mm)	$k_e$ (kN/mm)	$x_y$ (mm)
0	0	248.412	1.571	15.712	17.567
1	17.567	257.221	1.554	15.541	18.391
2	18.391	257.650	1.553	15.532	18.431
3	18.431	257.671	1.553	15.532	18.433
4	18.433	257.672	1.553	15.532	18.433
5	18.433	257.672	1.553	15.532	18.433
6	18.433	257.672	1.553	15.532	18.433
7	18.433	257.672	1.553	15.532	18.433
8	18.433	257.672	1.553	15.532	18.433
9	18.433	257.672	1.553	15.532	18.433
10	18.433	257.672	1.553	15.532	18.433

Valores finales:

$$x_y = 18.433 \text{ mm}$$

$$F_0 = 257.672 \text{ kN}$$

$$k_p = 1.553 \text{ kN/mm}$$

$$k_e = 15.532 \text{ kN/mm}$$

Paso 9. Fuerza de fluencia

$$F_y = 286.30 \text{ kN}$$

Paso 10. Cálculo del diámetro del núcleo de plomo

$$A_{pl} = 24,540 \text{ mm}^2$$

$$\emptyset_{pl} = 176.76 \text{ mm}$$

$$\varnothing_{pl\ real} = 180\ mm$$

$$A_{pl\ real} = 25,447\ mm^2$$

#### Paso 11. Cálculo del área del caucho

$$\varnothing_{total} = 1280\ mm$$

$$A_{total} = 1,286,796\ mm^2$$

$$A_r = 1,261,349\ mm^2$$

#### Paso 12. Espesor del caucho

$$T_r = 365\ mm$$

Es importante señalar que los datos iniciales propuestos ayudan a definir las dimensiones del aislador y que se pueden cambiar las dimensiones del aislador si así conviene para resultados más favorables.

#### Paso 13. Cálculo de propiedades del aislador con las dimensiones propuestas

Se procede a mostrar los resultados de la primera iteración de los cálculos obtenidos de acuerdo con las dimensiones propuestas:

- a) Rigidez elástica,  $k_e = 15.55 \text{ kN/mm}$
- b) Rigidez post-fluencia,  $k_p = 1.55 \text{ kN/mm}$
- c) Fuerza característica,  $F_0 = 267.19 \text{ kN}$
- d) Desplazamiento de fluencia,  $x_y = 19.09 \text{ mm}$
- e) Fuerza de fluencia,  $F_y = 296.88 \text{ kN}$
- f) Rigidez efectiva,  $k_{ef} = 2.08 \text{ kN/mm}$
- g) Rigidez efectiva total,  $k_{eftotal} = 68.61 \text{ kN/mm}$
- h) Amortiguamiento del aislador,  $\xi_{ef} = 15.45\%$
- i) Amortiguamiento del sistema,  $\xi_{sis} = 8.87\%$
- j) Energía disipada en un ciclo de histéresis,  $E_D = 524.40 \text{ kNm}$
- k) Frecuencia y periodo del sistema de aislamiento,  $\omega_{sa} = 2.07$  y  $T_{sa} = 3.03 \text{ s}$
- l) Factor de incremento del periodo de la estructura,  $n_{obj} = 2.98$

En la Tabla 5-9 y Tabla 5-10, se muestran los resultados obtenidos del proceso de iteración.

**Tabla 5-9. Resultados de las iteraciones (parte 1), pasos 1-13**

Iteración	$n_{obj}$	$k_{ef}$ (kN/mm)	$\xi_{sis}$	$\xi_{ef}$	$T_{sa}$ (s)
0	3	67.83393	0.10	0.15	3.05100
1	2.98518	68.50928	0.08703	0.15000	3.03592
2	2.98296	68.61099	0.08864	0.15445	3.03367
3	2.98287	68.61518	0.08865	0.15448	3.03358
4	2.98287	68.61536	0.08865	0.15448	3.03358
5	2.98287	68.61536	0.08865	0.15448	3.03358
6	2.98287	68.61536	0.08865	0.15448	3.03358
7	2.98287	68.61536	0.08865	0.15448	3.03358
8	2.98287	68.61536	0.08865	0.15448	3.03358
9	2.98287	68.61536	0.08865	0.15448	3.03358
10	2.98287	68.61536	0.08865	0.15448	3.03358

**Tabla 5-10. Resultados de las iteraciones (parte 2), pasos 1-13**

Iteración	$D_{total}$ (mm)	$k_e$ (kN/mm)	$k_p$ (kN/mm)	$F_0$ (kN)	$x_y$ (mm)	$E_D$ (kNm)
0	512.894	15.551	1.555	267.1925	18.4333	509.6353
1	509.878	15.551	1.555	267.1925	19.0909	528.4648
2	509.754	15.551	1.555	267.1925	19.0909	524.5380
3	509.749	15.551	1.555	267.1925	19.0909	524.4059
4	509.749	15.551	1.555	267.1925	19.0909	524.4004
5	509.749	15.551	1.555	267.1925	19.0909	524.4002
6	509.749	15.551	1.555	267.1925	19.0909	524.4002
7	509.749	15.551	1.555	267.1925	19.0909	524.4002
8	509.749	15.551	1.555	267.1925	19.0909	524.4002
9	509.749	15.551	1.555	267.1925	19.0909	524.4002
10	509.749	15.551	1.555	267.1925	19.0909	524.4002

Se observa, que el factor de incremento del periodo final queda como  $n_{obj} = 2.98$ , el cual resulta en una adecuada relación de rigideces.

## 5.2.2 Propiedades geométricas y mecánicas del aislador

**Tabla 5-11. Dimensiones del apoyo**

$D_b$	=	1251	mm	Diámetro efectivo apoyo circular
$H_r$	=	437	mm	Altura efectiva de un aislador
$A_{pl}$	=	25447	mm <sup>2</sup>	Área de sección transversal corazón de plomo
$A_b$	=	1,203,309	mm <sup>2</sup>	Área efectiva del apoyo en planta
$A_r$	=	609,280	mm <sup>2</sup>	Área reducida del hule
Dimensiones internas				
$t_{sh}$	=	3	mm	Espesor placa de refuerzo
$t_i$	=	14.6	mm	Espesor capa de hule
$n$	=	25		Número de capas de hule
$T_r$	=	365	mm	Suma espesores de las capas de hule

**Tabla 5-12. Propiedades del material y geométricas**

$G$	=	0.00045	kN/mm <sup>2</sup>	Módulo de rigidez al corte del hule
$S_i$	=	21.42		Factor de forma
$E_c$	=	1.17	kN/mm <sup>2</sup>	Módulo de compresibilidad efectiva
$E_\infty$	=	2.0	kN/mm <sup>2</sup>	Módulo de rigidez de compresibilidad volumétrica del hule
$\sigma_y$	=	0.011	kN/mm <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia a cortante del plomo
$F_y$	=	296.88	kN	Fuerza de fluencia para un ALNP
$F_0$	=	267.19	kN	Fuerza para desplazamiento nulo
$x_y$	=	19	mm	Desplazamiento de fluencia
$x$	=	510	mm	Desplazamiento máximo
$\mu$	=	26.70		Ductilidad del aislador
$\alpha$	=	0.10		Relación entre $k_p$ y $k_e$

**Tabla 5-13. Rigidez y amortiguamiento del LRB**

$k_{vh}$	=	1,955	kN/mm	Rigidez vertical
$k_e$	=	15.55	kN/mm	Rigidez elástica
$k_p$	=	1.555	kN/mm	Rigidez postfluencia
$k_{ef}$	=	2.08	kN/mm	Rigidez equivalente (efectiva)
$\xi$	=	0.15	%	Grado de amortiguamiento

### 5.2.3 Condiciones

**Tabla 5-14. Dimensiones del apoyo**

<b>Deformaciones límite</b>				
$\gamma_{sc}$	=	1.868		Deformación angular por cortante debida a compresión
$\gamma_{sn}$	=	1.397		Deformación angular por desplazamiento por efectos no sísmicos
$\gamma_{sr}$	=	0.440		Deformación originada por la rotación del apoyo
$\gamma_{ss}$	=	1.397		Deformación debida al desplazamiento "x" por efecto sísmico
		1.868	≤	2.5 <i>OK</i>
		3.705	≤	5.0 <i>OK</i>
		3.485	≤	5.5 <i>OK</i>
<b>Capacidad de carga contra el pandeo</b>				
$P_{cr}$	=	43,379	kN	Carga crítica de pandeo elástico (desplazamiento nulo)
$P'_{cr}$	=	21,964	kN	Carga crítica de pandeo elástico (desplazamiento lateral)
		7,321	>	7,306 <i>OK</i>
$D_{cr}$	=	1130	mm	Desplazamiento crítico de pandeo del aislador
<b>Fuerza de autocentrado</b>				
$k_p$	=	1.56	kN/mm	
$k_{p,tot}$	=	51.32	kN/mm	
		51.32	>	15.3906 <i>OK</i>

### 5.2.4 Resumen de propiedades del aislador

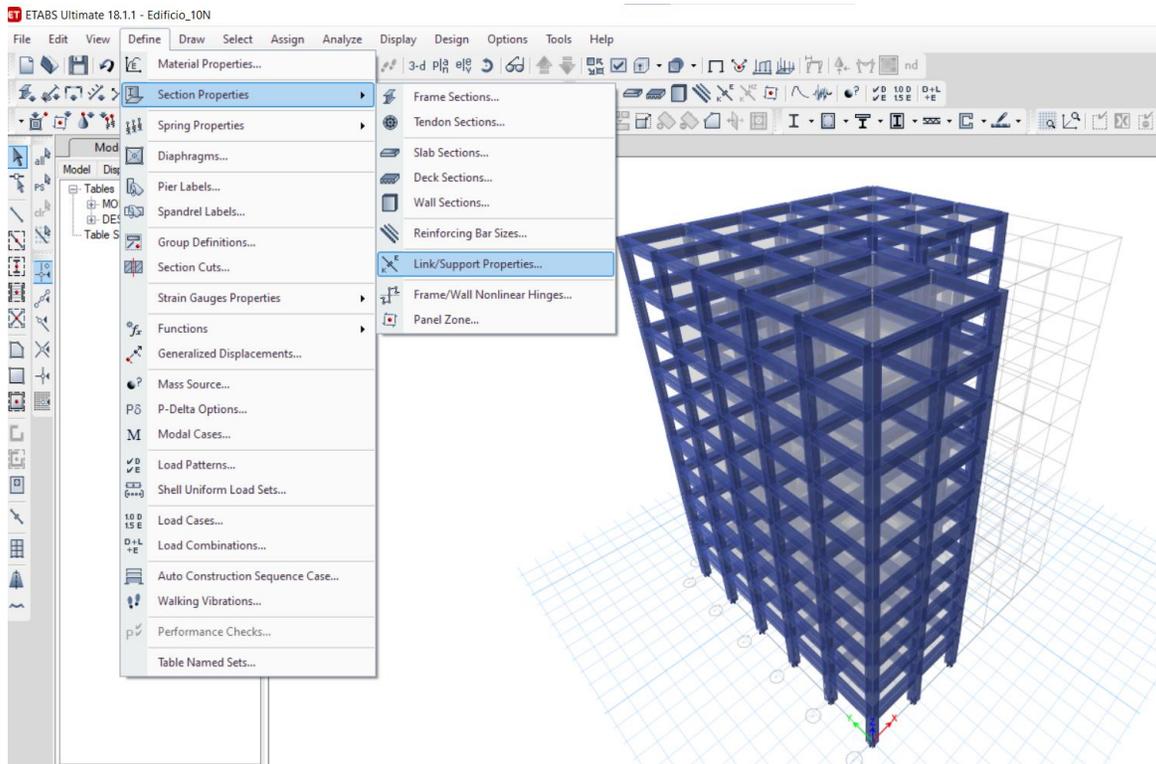
**Tabla 5-15. Resumen de propiedades**

<b>Propiedades</b>	
Número de aisladores	33
Periodo objetivo [s]	3.051
Amortiguamiento efectivo [%]	15%
Rigidez vertical [kN/mm]	1,955
Rigidez efectiva [kN/mm]	2.08
Rigidez elástica [kN/mm]	15.55
Rigidez post-fluencia [kN/mm]	1.555
Desplazamiento de la estructura [mm]	510
Energía disipada [kN-m]	524.40
Fuerza característica [kN]	267.19
Desplazamiento de fluencia [mm]	19.09
Fuerza de fluencia [kN]	296.88

## 5.3 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA AGREGANDO LAS PROPIEDADES DEL AISLADOR LRB

### 5.3.1 Modelación de aislador LRB en el software

En los programas comunes de análisis y diseño estructural, los aisladores se pueden modelar como “Links” (Figura 5.9).



**Figura 5.9. Definición del elemento “link” en ETABS**

Tal objeto de este tipo conecta dos puntos  $i$  y  $j$  con una distancia  $L$ . A los Links se les pueden ingresar propiedades lineales, no lineales y de amortiguamiento en cada uno de sus 6 grados de libertad internos.

Se pueden definir diferentes tipos de link según lo que se desee modelar. En este caso, se utiliza un link de tipo “Rubber Isolator”.

El peso y la masa de los aisladores se pueden no tomar en cuenta durante las iteraciones, debido a que, aunque suelen ser dispositivos pesados, su peso es muy pequeño en comparación con el de la estructura y por ende, se puede ignorar.

**Link Property Data**

**General**

Link Property Name: LRB

Link Type: Rubber Isolator

Link Property Notes: Modify/Show Notes...

P-Delta Parameters: Modify/Show...

Acceptance Criteria: Modify/Show...  
None specified

**Total Mass and Weight**

Mass: 0 kN-s<sup>2</sup>/mm

Weight: 0 kN

Rotational Inertia 1: 0 kN-mm-s<sup>2</sup>

Rotational Inertia 2: 0 kN-mm-s<sup>2</sup>

Rotational Inertia 3: 0 kN-mm-s<sup>2</sup>

**Factors for Line and Area Springs**

Link/Support Property is Defined for This Length When Used in a Line Spring Property: 1000 mm

Link/Support Property is Defined for This Area When Used in an Area Spring Property: 1000000 mm<sup>2</sup>

**Directional Properties**

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

Fix All    Clear All

**Stiffness Options**

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases: Effective Stiffness

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping: Effective Stiffness (KE)

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor: 1

OK    Cancel

**Figura 5.10. Ventana del link “Rubber Isolator”**

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name	LRB
Direction	U1
Type	Rubber Isolator
NonLinear	No

Linear Properties

Effective Stiffness	1955	kN/mm
Effective Damping	0	kN-s/mm

OK Cancel

Figura 5.11. Ventana de acuerdo con los resultados obtenidos (dirección U1).

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name	LRB
Direction	U2
Type	Rubber Isolator
NonLinear	Yes

Linear Properties

Effective Stiffness	2.08	kN/mm
Effective Damping	0	kN-s/mm

Shear Deformation Location

Distance from End-J	0	mm
---------------------	---	----

Nonlinear Properties

Stiffness	15.55	kN/mm
Yield Strength	296.88	kN
Post Yield Stiffness Ratio	0.1	

OK Cancel

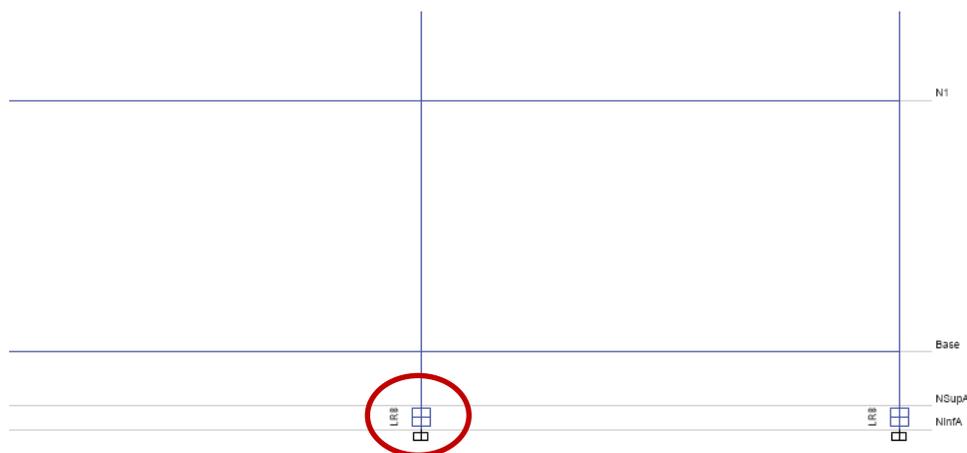
Figura 5.12. Ventana de acuerdo con los resultados obtenidos (dirección U2 y U3).

Tal como se ilustra en la Figura 5.11 y Figura 5.12, los parámetros relacionados con el dispositivo LRB que se introducen en el programa ETABS son:

- Rigidez vertical
- Rigidez efectiva
- Rigidez elástica o inicial
- Fuerza de fluencia
- Razón de rigidez post-fluencia
- Amortiguamiento,  $c$

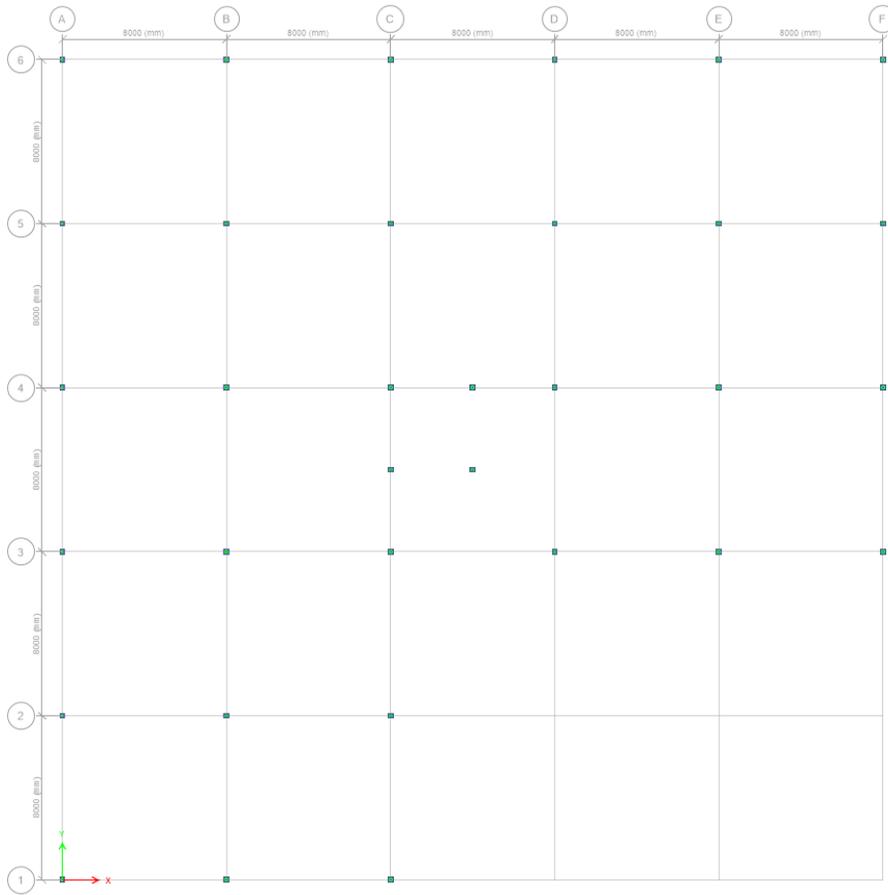
Sin embargo, el amortiguamiento “ $c$ ”, se considera como 0 en el presente trabajo. Esto debido a que el amortiguamiento que brinda el dispositivo se ve reflejado directamente en su espectro de diseño, dicho espectro se explica e ilustra en el capítulo 6.3.2.

El proceso para modelar los apoyos se realizó definiendo 2 niveles hipotéticos debajo de la base, esto con el objetivo de poder tener los nodos  $i$  y  $j$  con los que se pueda trazar el link.

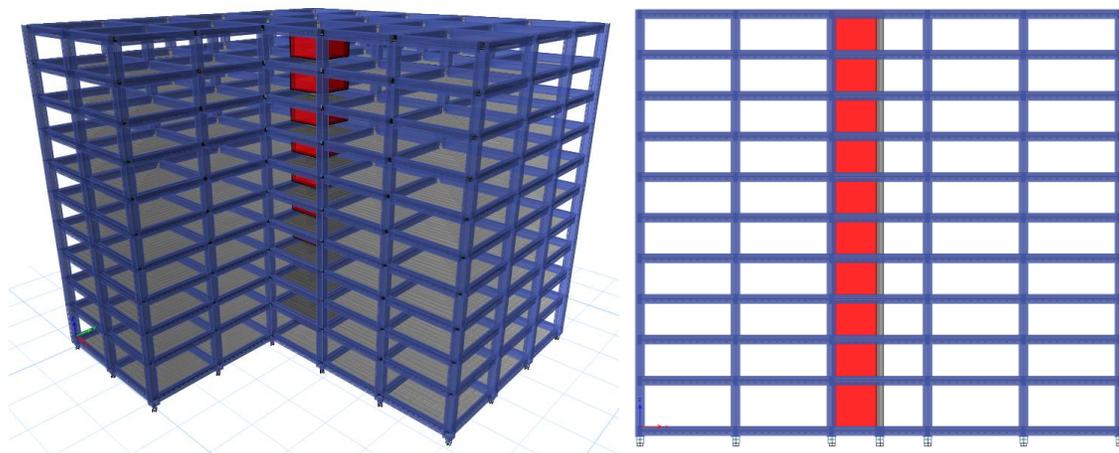


**Figura 5.13. Detalle de elementos Links.**

A continuación, se muestra el modelo analítico del sistema con el aislamiento sísmico.



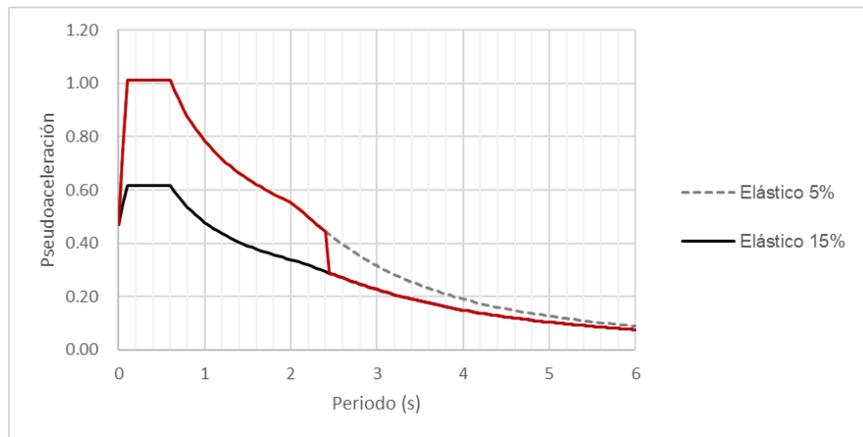
**Figura 5.14. Vista en planta de ubicación de los aisladores.**



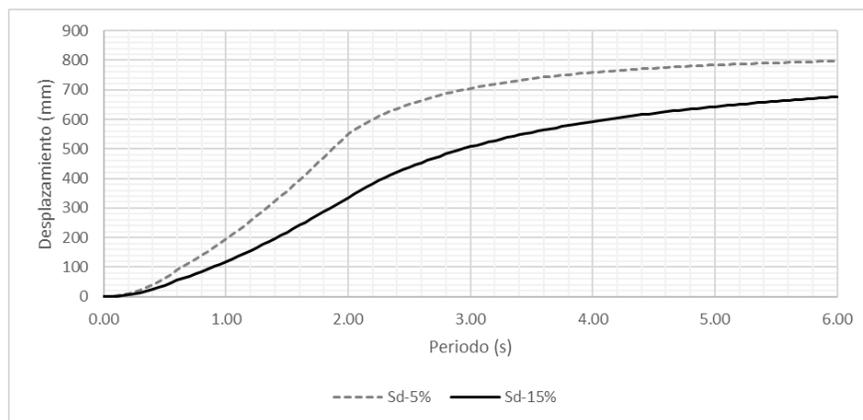
**Figura 5.15. Vista 3D y elevación longitudinal del modelo base aislada.**

### 5.3.2 Análisis modal espectral

De acuerdo con el MDOC-2015 (CFE, 2015), se establece que la reducción por amortiguamiento del espectro de diseño se deberá realizar de acuerdo con lo siguiente: el amortiguamiento efectivo se considerará únicamente para los modos afectados por el comportamiento inelástico del aislador. Para ello, se recomienda considerar el amortiguamiento efectivo para el modo fundamental y para todos los modos cuyos periodos sean mayores que 80% del periodo fundamental. Para el resto de los modos deberá conservarse el espectro amortiguado con 5%.



**Figura 5.16. Espectro de diseño a considerar (marcado en rojo, 5-15%)**

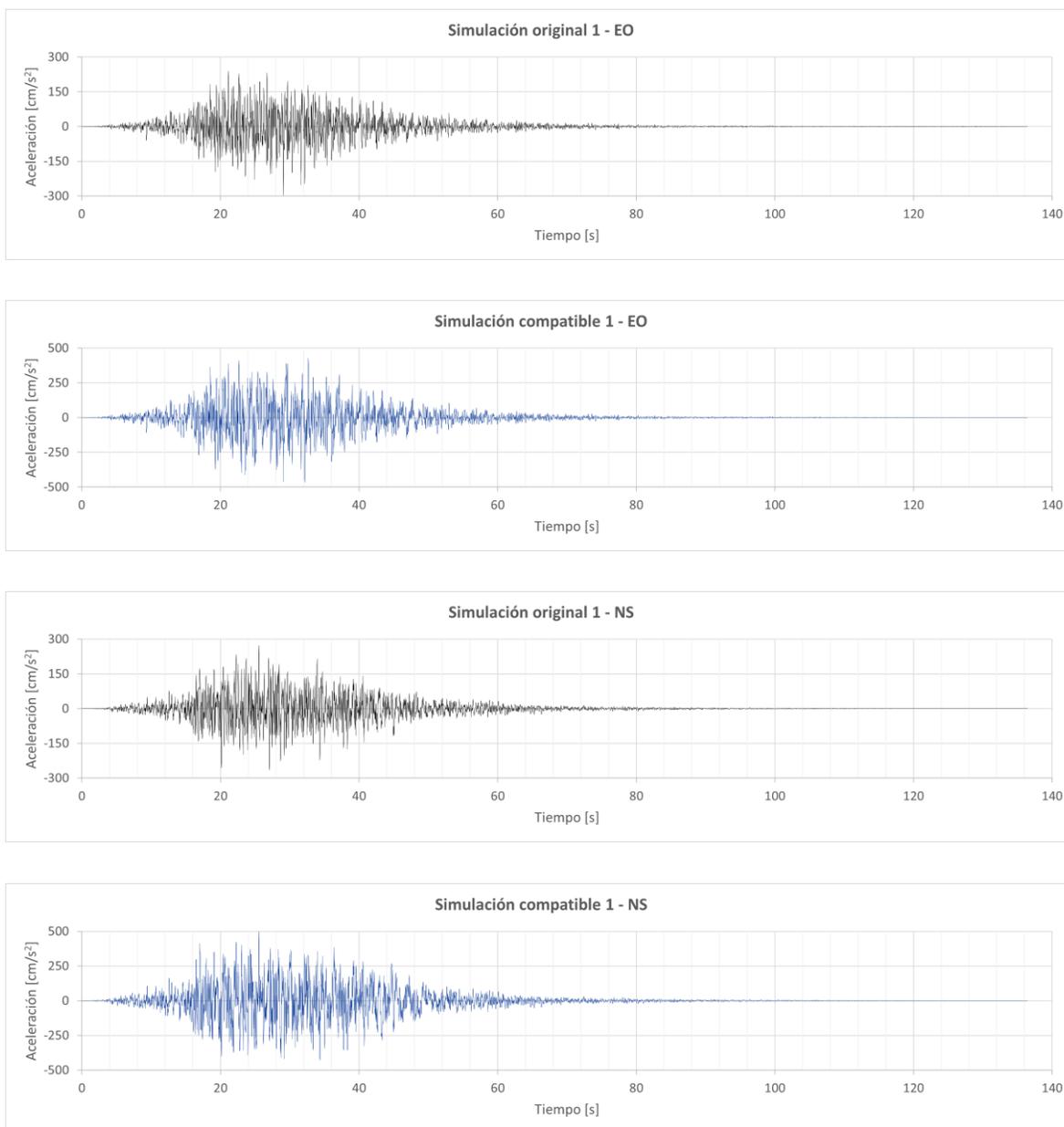


**Figura 5.17. Espectro de desplazamientos.**

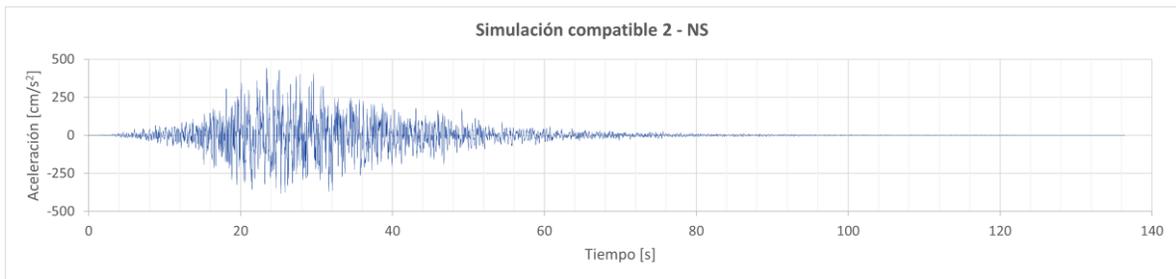
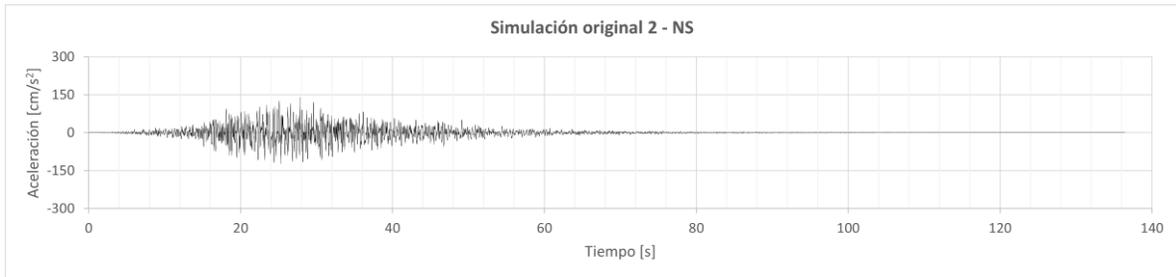
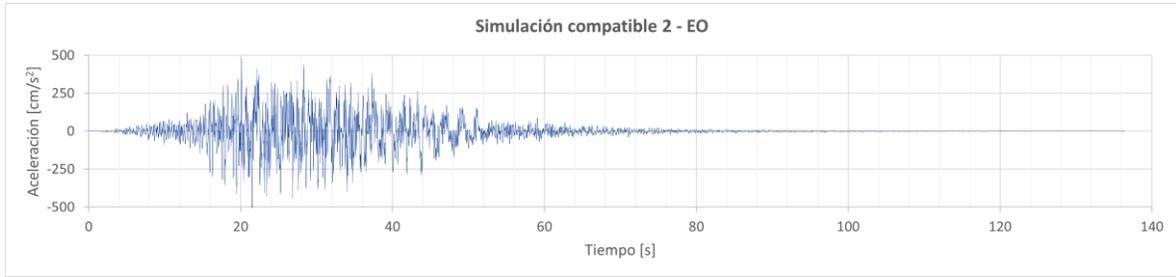
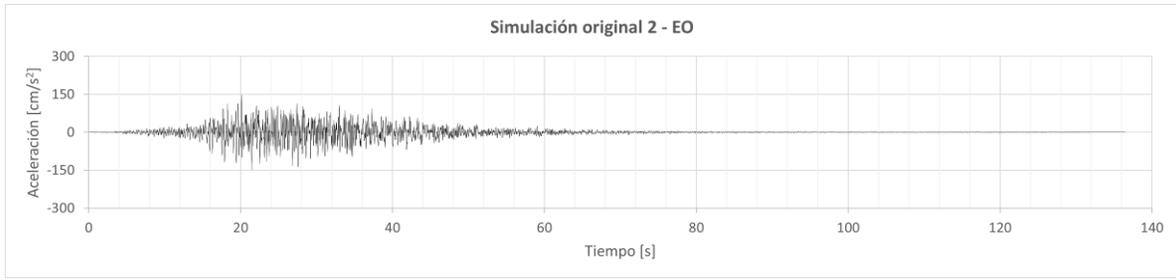
### 5.3.3 Análisis tiempo historia modal no lineal

#### 5.3.3.1 Registros sísmicos

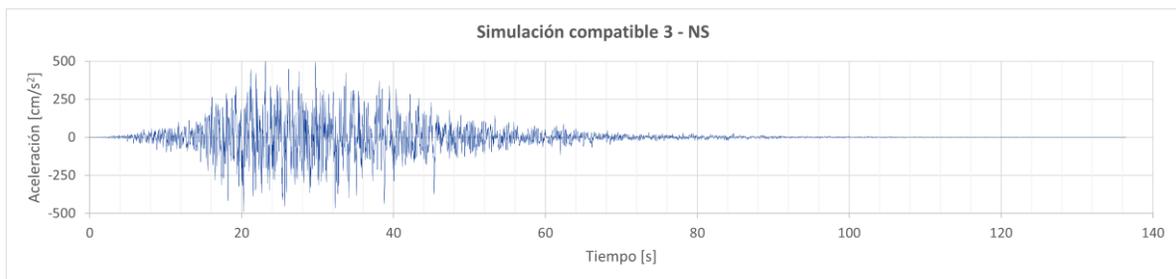
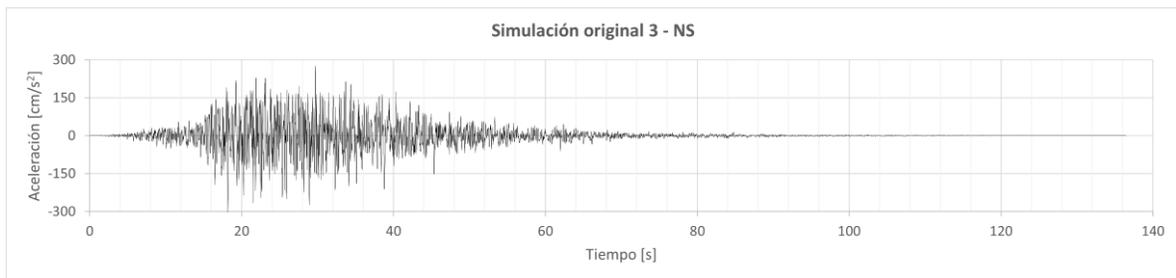
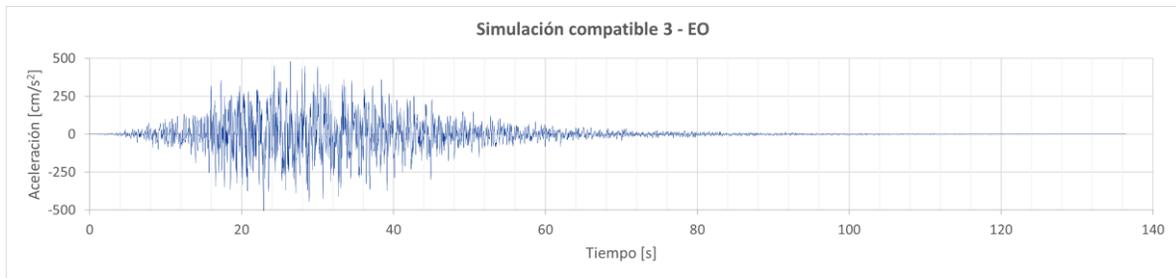
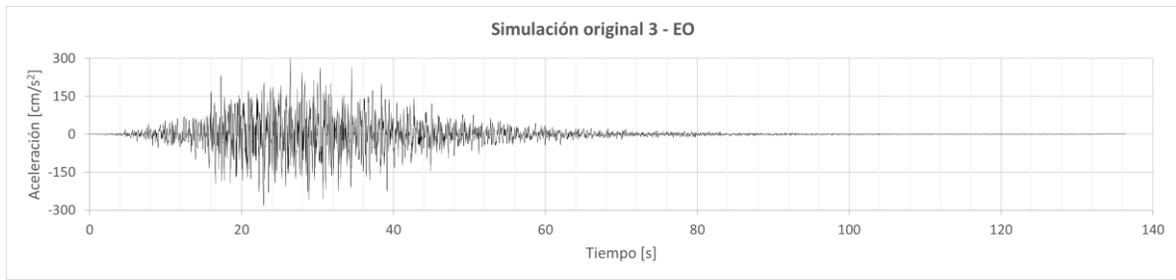
Desde la Figura 5.18 a la Figura 5.21 se muestran los acelerogramas utilizados con componentes EO y NS, cada uno representa una simulación de movimiento representativo.



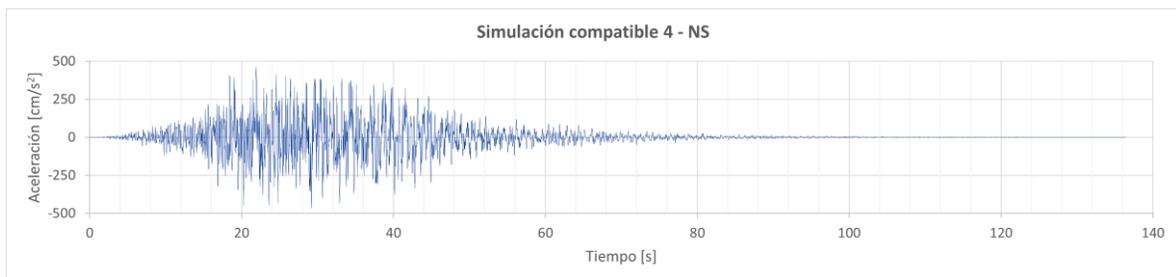
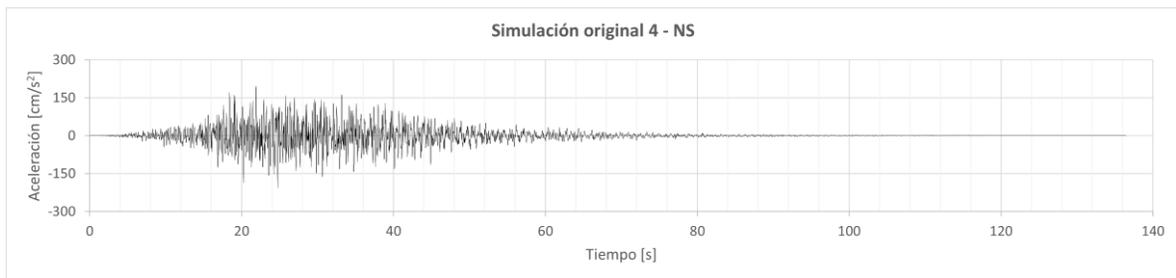
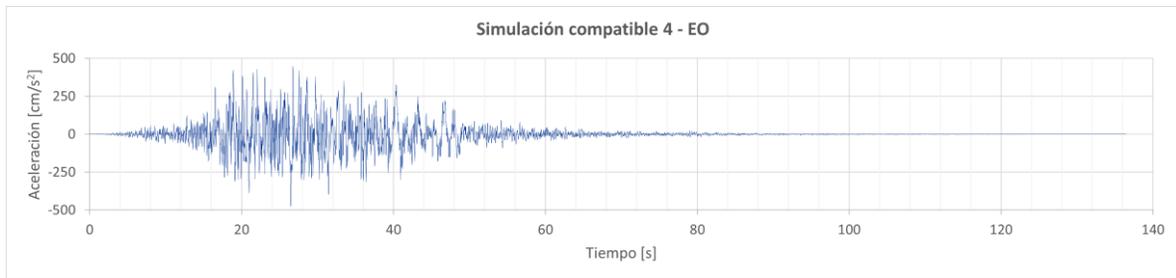
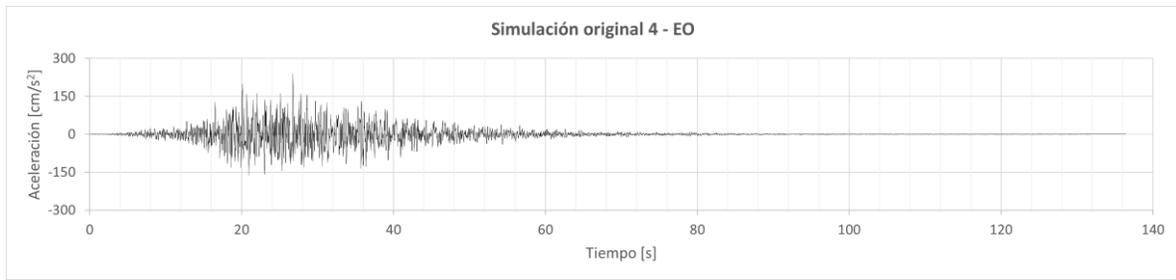
**Figura 5.18. Simulaciones de mov. 1, original y compatible, en sus componentes EO y NS.**



**Figura 5.19. Simulaciones de mov. 2, original y compatible, en sus componentes EO y NS.**



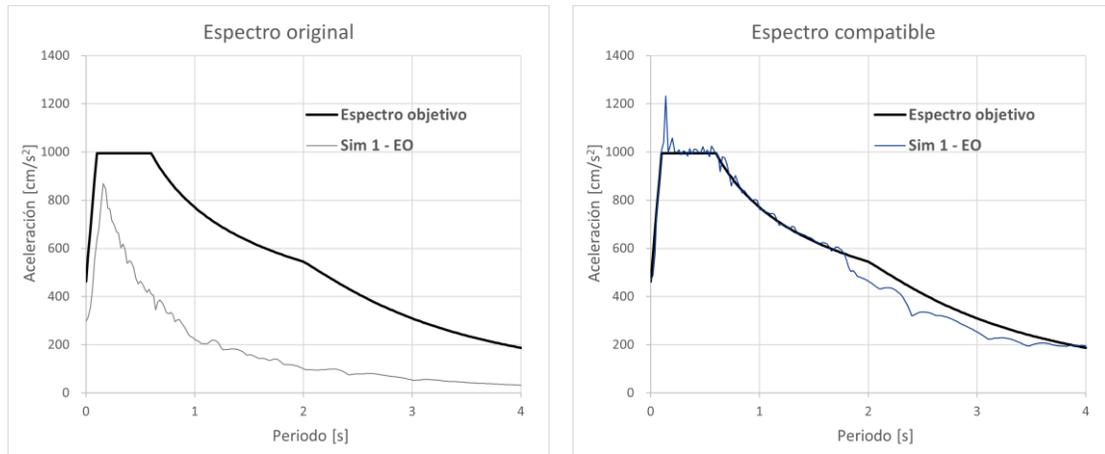
**Figura 5.20. Simulaciones de mov. 3, original y compatible, en sus componentes EO y NS.**



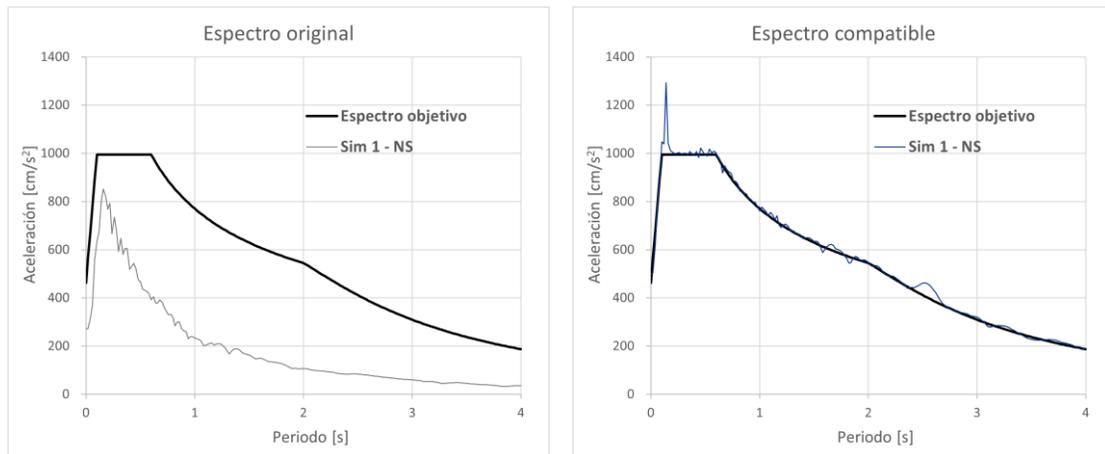
**Figura 5.21. Simulaciones de mov. 4, original y compatible, en sus componentes EO y NS.**

### 5.3.3.2 Espectros

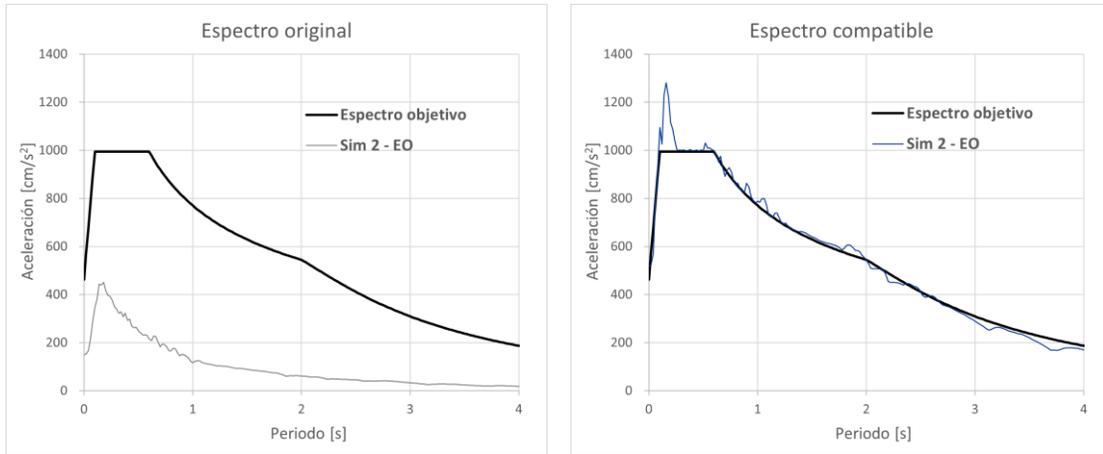
Desde la Figura 5.22 a la Figura 5.29, se muestran los espectros de pseudoaceleración utilizados en el análisis tiempo historia.



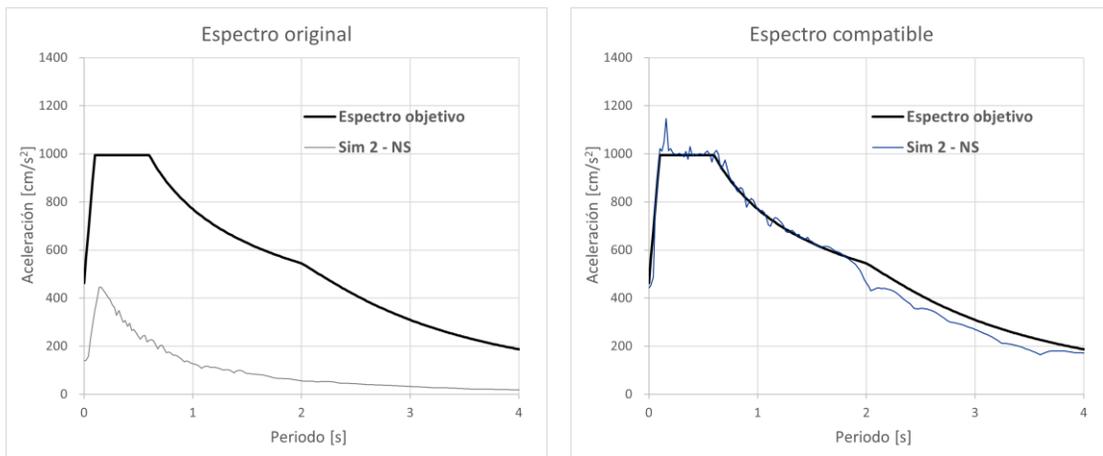
**Figura 5.22. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 1, componente EO.**



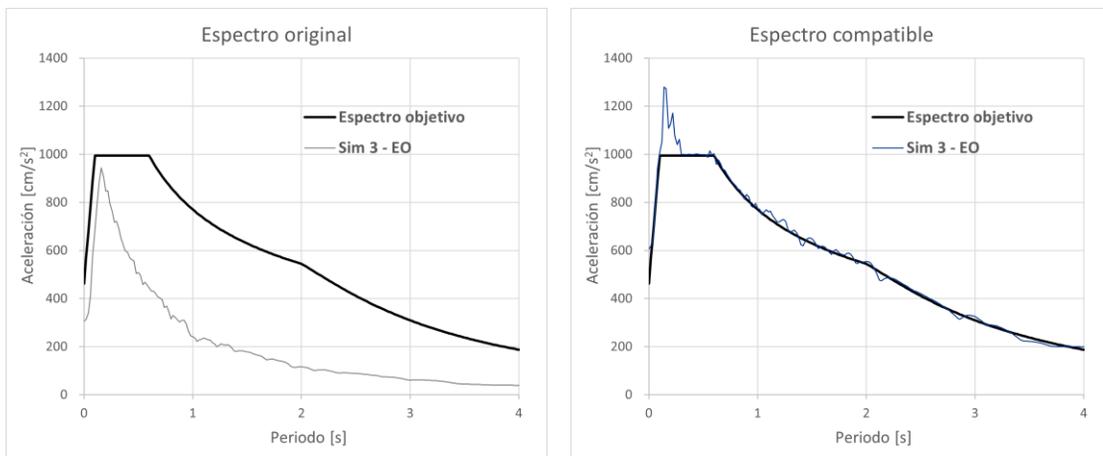
**Figura 5.23. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 1, componente NS.**



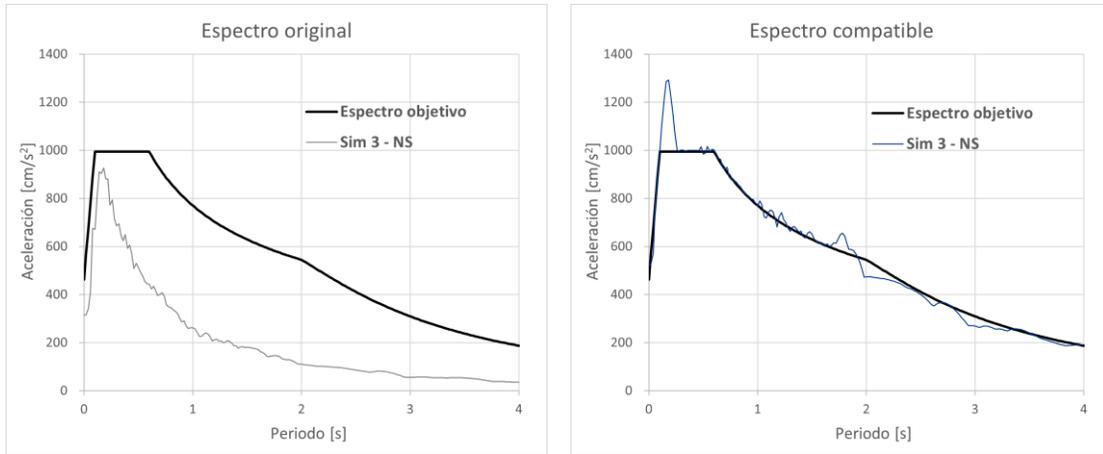
**Figura 5.24. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 2, componente EO.**



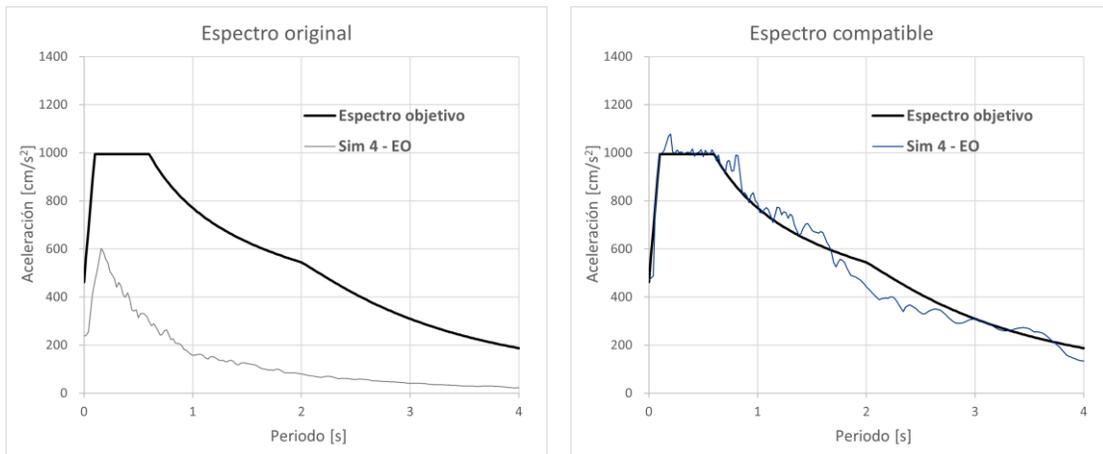
**Figura 5.25. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 2, componente NS.**



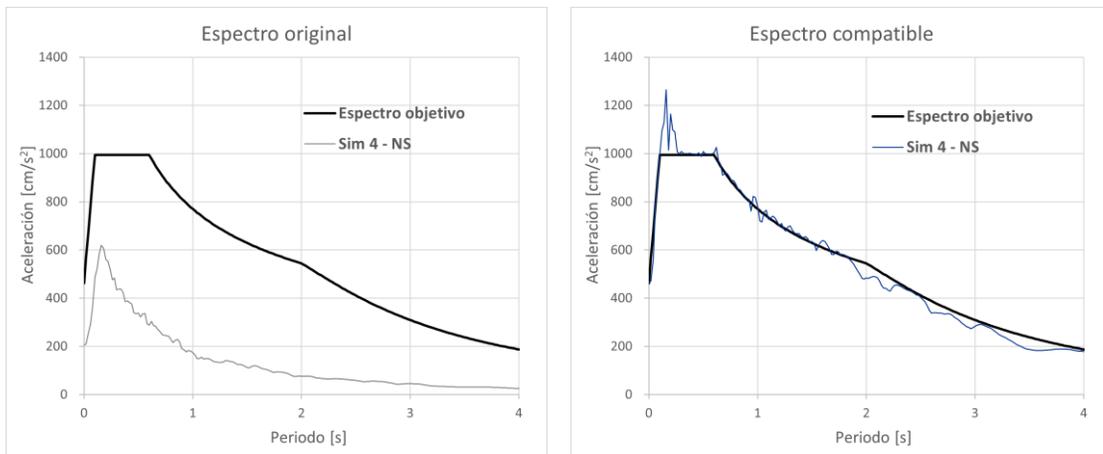
**Figura 5.26. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 3, componente EO.**



**Figura 5.27. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 3, componente NS.**



**Figura 5.28. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 4, componente EO.**



**Figura 5.29. Espectro de pseudo-aceleración de la simulación 4, componente NS.**

## 5.4 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE AMBOS MODELOS

### 5.4.1 Análisis modal espectral

A continuación, se muestran los resultados del análisis modal realizado de acuerdo con lo indicado anteriormente en ambos modelos. Se comparan los periodos, participaciones de masa traslacional y torsional, así como las aceleraciones espectrales. Se agregan los resultados del sistema convencional (sin sistema de aislamiento sísmico), para fines comparativos.

#### 5.4.1.1 Masas efectivas

**Tabla 5-16. Resultados comparativos de análisis modal de sistemas**

Sistema Base Fija							
Modo	Periodo (s)	UX	UY	RZ	Sum UX	Sum UY	Sum RZ
1	1.208	0.0046	0.0724	0.7479	0.0046	0.0724	0.7479
2	1.017	0.7215	0.0254	0.0002	0.7261	0.0978	0.7481
3	0.991	0.0219	0.6631	0.0738	0.7481	0.7609	0.8219
4	0.388	0.0007	0.0078	0.0896	0.7487	0.7687	0.9115
5	0.284	0.0004	0.1384	0.0109	0.7491	0.9071	0.9224
6	0.281	0.1414	0.0000	0.0011	0.8905	0.9071	0.9234
7	0.218	0.0002	0.0032	0.0330	0.8907	0.9103	0.9564
8	0.145	0.0003	0.0010	0.0199	0.8910	0.9112	0.9763
9	0.142	0.0000	0.0470	0.0002	0.8910	0.9582	0.9764
10	0.133	0.0564	0.0000	0.0006	0.9474	0.9582	0.9770
11	0.104	0.0001	0.0003	0.0099	0.9475	0.9586	0.9870
12	0.092	0.0000	0.0207	0.0008	0.9476	0.9792	0.9878

Sistema Base Aislada							
Modo	Periodo (s)	UX	UY	RZ	Sum UX	Sum UY	Sum RZ
1	3.316	0.9544	0.0011	0.0409	0.9544	0.0011	0.0409
2	3.313	0.0029	0.9835	0.0098	0.9573	0.9846	0.0506
3	3.055	0.0390	0.0116	0.9441	0.9963	0.9962	0.9948
4	0.631	0.0006	0.0021	0.0017	0.9969	0.9983	0.9965
5	0.618	0.0023	0.0000	0.0015	0.9991	0.9984	0.9979
6	0.601	0.0007	0.0015	0.0016	0.9999	0.9999	0.9995
7	0.310	0.0000	0.0000	0.0004	0.9999	0.9999	0.9999
8	0.239	0.0001	0.0000	0.0000	1.0000	0.9999	0.9999
9	0.233	0.0000	0.0001	0.0000	1.0000	1.0000	0.9999
10	0.199	0.0000	0.0000	0.0001	1.0000	1.0000	1.0000
11	0.140	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000
12	0.130	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000

### 5.4.1.2 Aceleraciones espectrales

**Tabla 5-17. Aceleraciones espectrales de estructura base fija y aislada**

Modo	Aceleraciones [mm/s <sup>2</sup> ]	
	Fijo	Aislado
1	7007.7	2611.4
2	7637.6	2615.0
3	7734.7	3001.3
4	9942.0	9702.1
5	9942.0	9802.4
6	9942.0	9930.8
7	9942.0	9942.0
8	9942.0	9942.0
9	9942.0	9942.0
10	9942.0	9942.0
11	9942.0	9942.0
12	9493.0	9942.0

### 5.4.1.3 Resumen de resultados

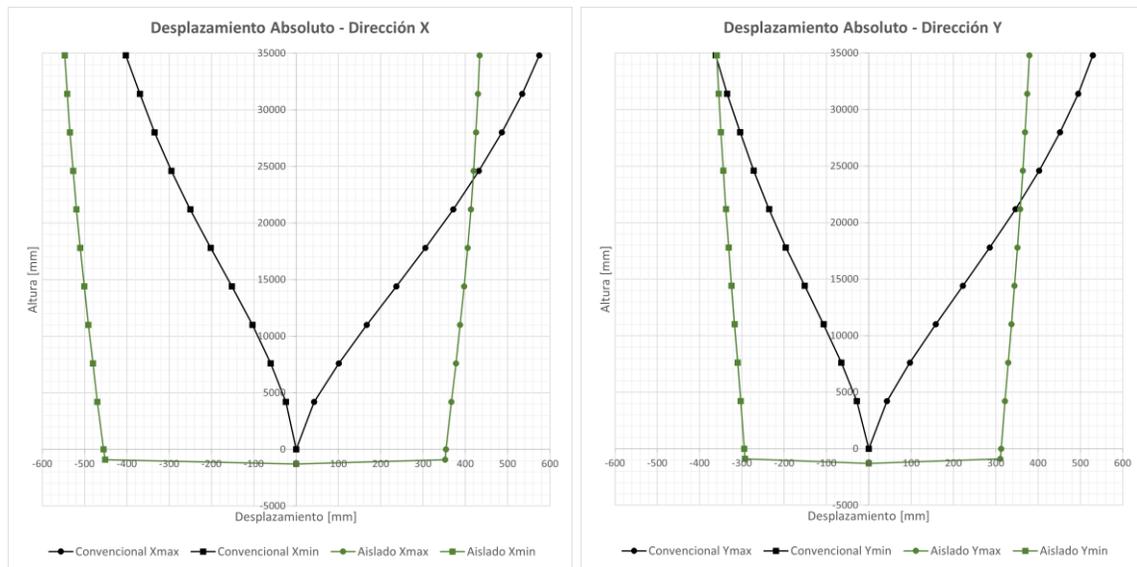
- i. De acuerdo con la Tabla 5-16, se observa cómo se modificaron las propiedades modales del sistema con aislamiento sísmico y como se concentra la mayor participación de masa en los modos 1 y 2 (modos traslacionales); en comparación de los resultados mostrados del sistema de base fija, en el que las masas se concentran en el modo 2 y modo 3 (modo rotacional).
- ii. De acuerdo con la Tabla 5-17, se observa una disminución en las aceleraciones para los primeros 3 modos de vibrar para el sistema aislado, el cual resulta en el comportamiento esperado de acuerdo con el espectro de aceleraciones seleccionado.

## 5.4.2 Análisis tiempo historia modal no lineal

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de desplazamiento máximo de techo, distorsiones máximas de piso, corte sísmico máximo, aceleración máxima de piso y pseudoaceleración máxima del espectro de piso para los valores máximos de los registros sísmicos considerados en el análisis estructural. Los resultados se presentan considerando una razón de amortiguamiento inherente del 2% constante para todos los modos de vibración. También, se incluye la distribución de energía acumulada normalizada para el registro sísmico.

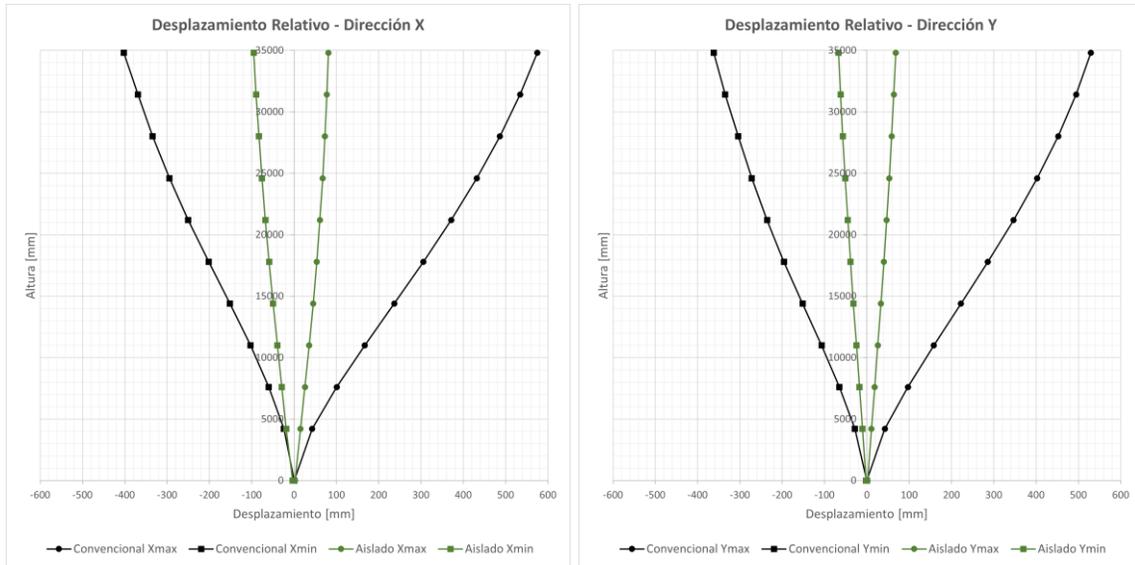
### 5.4.2.1 Desplazamientos

Con el sistema de base fija se tienen desplazamientos máximos absolutos de techo de 574.79 mm en dirección X y de 529.22 mm en dirección Y. En el caso del sistema de aislado, se tienen 546.76 mm en dirección X y 379.29 en dirección Y (Figura 5.30).



**Figura 5.30. Desplazamiento absoluto en X y Y.**

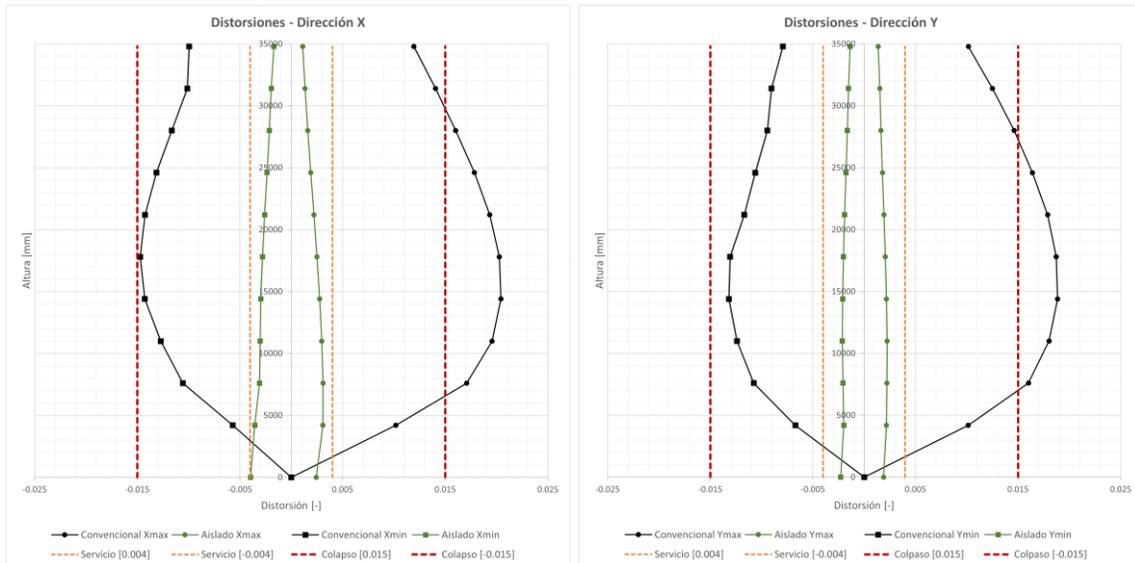
De acuerdo con la Figura 5.31, se observa que el desplazamiento máximo relativo en techo con el sistema fijo es de 574.79 mm en dirección X y 529.22 mm en dirección Y. En el caso del sistema de aislado, se tienen 95.47 mm en X y 68.31 mm en Y.



**Figura 5.31. Desplazamiento relativo en X y Y.**

#### 5.4.2.2 Distorsiones de entrepiso

Para el sistema fijo, sus distorsiones son de 0.02042 en dirección X y 0.01885 en dirección Y, mientras que con el sistema aislado se tienen 0.00397 en X y 0.00228 en Y. Con la ayuda del sistema de aislamiento, las distorsiones de entrepiso ahora cumplen con el requisito del estado límite de servicio (Figura 5.32).



**Figura 5.32. Distorsiones en X y Y.**

### 5.4.2.3 Corte sísmico

De acuerdo con la Figura 5.33, se observa en el sistema fijo un cortante basal de 161,734 kN en dirección X y 153,312 kN en dirección Y. Mientras que en el caso aislado se tienen 31,070 kN en dirección X y 25,965 kN en dirección Y.

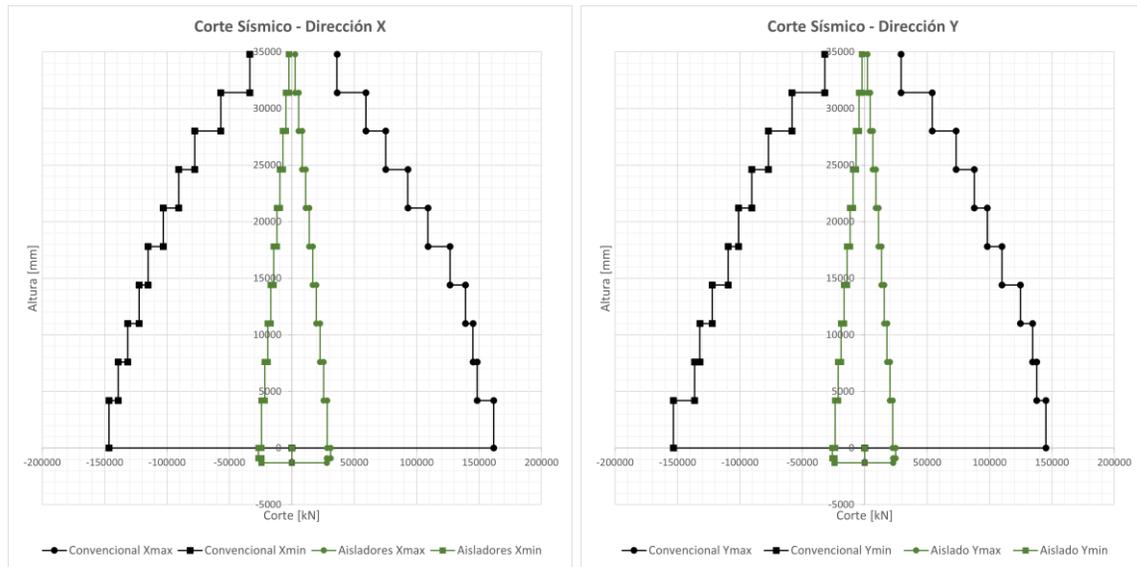


Figura 5.33. Cortante sísmico en X y Y.

A continuación, se presentan los datos del aislador previamente obtenidos (Tabla 5-18), los resultados de cortantes y desplazamientos presentados en los apoyos de la estructura de acuerdo con cada simulación (Tabla 5-19 a Tabla 5-22). Esto con el objetivo de poder visualizar la demanda existente en cada apoyo y hacer una comparativa con lo seleccionado para el diseño de los aisladores.

Tabla 5-18. Datos del dispositivo.

Datos del aislador	
$D_{max}$ [mm]	510
$x_y$ [mm]	19
$k_{ef}$ [kN/mm]	2.08
$V_{max}$ [kN]	1,060
$\mu$	26.70

Como se puede observar en la Tabla 5-18, la demanda de ductilidad máxima, la cual es capaz de soportar el dispositivo, es de 26.70, y el cortante máximo es de 1,060 kN.

**Tabla 5-19. Resultados de los análisis no lineales, caso de carga “Simulación 1”.**

Simulación 1	Dirección X			Dirección Y		
	Apoyo	D <sub>max</sub> [mm]	V <sub>max</sub> [kN]	Demanda de ductilidad	D <sub>max</sub> [mm]	V <sub>max</sub> [kN]
A1	252.29	656.9	<b>13.22</b>	290.33	716.6	15.21
A2	250.35	653.8	13.11	291.02	718.5	15.24
A3	248.37	650.7	13.01	291.72	719.1	15.28
A4	246.38	647.6	12.91	291.72	719.8	15.28
A5	244.40	644.7	12.80	292.26	720.4	15.31
A6	240.88	637.9	12.62	291.72	719.7	15.28
B1	251.71	<b>657.4</b>	13.19	294.34	722.9	15.42
B2	249.77	654.4	13.08	295.06	724.8	15.46
B3	247.79	651.3	12.98	295.67	725.3	15.49
B4	245.88	648.4	12.88	295.64	725.9	15.49
B5	243.69	644.9	12.77	296.20	726.4	15.52
B6	242.59	641.8	12.71	294.80	724.5	15.44
C1	251.32	656.6	13.17	298.20	728.8	15.62
C2	249.39	653.6	13.06	298.84	730.3	15.65
C3	247.63	650.9	12.97	299.34	731.9	15.68
C4	245.33	647.3	12.85	298.94	731.0	15.66
C5	243.66	644.6	12.76	299.81	732.6	15.71
C6	242.57	639.9	12.71	297.71	729.0	15.60
D3	247.64	650.7	12.97	302.28	736.5	15.83
D4	246.09	648.3	12.89	303.21	737.6	15.88
D5	243.68	644.5	12.76	303.41	738.2	15.89
D6	241.33	640.9	12.64	303.08	737.3	15.88
E3	247.66	650.4	12.97	306.12	742.4	16.04
E4	245.72	647.3	12.87	307.16	743.8	16.09
E5	243.70	644.2	12.77	307.16	744.0	16.09
E6	241.60	641.0	12.66	306.86	743.1	16.07
F3	247.26	649.4	12.95	309.99	748.4	16.24
F4	245.34	646.4	12.85	310.87	749.5	16.28
F5	243.31	643.2	12.75	310.88	<b>749.7</b>	<b>16.28</b>
F6	241.17	639.9	12.63	310.51	748.7	16.27

En la simulación 1, se observa que el dispositivo se comporta correctamente debido a que:

- En la dirección X, el  $V_{\max} = 657.4$  kN, en el apoyo B1 (Figura 5.34) y  $\mu = 13.22$  en el apoyo A1, debido al desplazamiento presentado de 252.29 mm (Figura 5.35).
- En la dirección Y, el  $V_{\max} = 749.7$  kN y  $\mu = 16.28$  en el apoyo F5, debido al desplazamiento presentado de 310.88 mm (Figura 5.36).

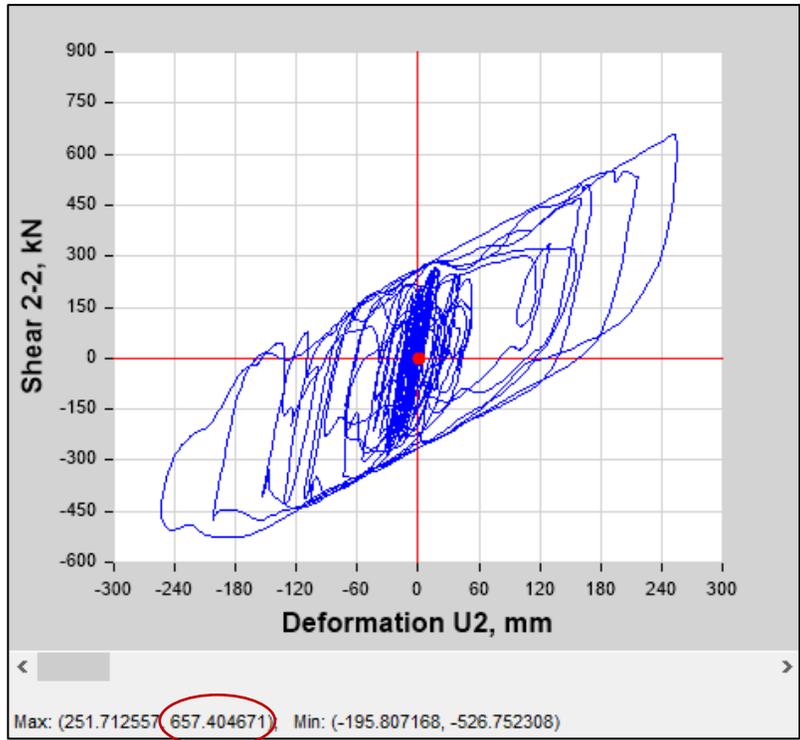


Figura 5.34. Curva de histéresis de la simulación 1, apoyo B1 en dirección X.

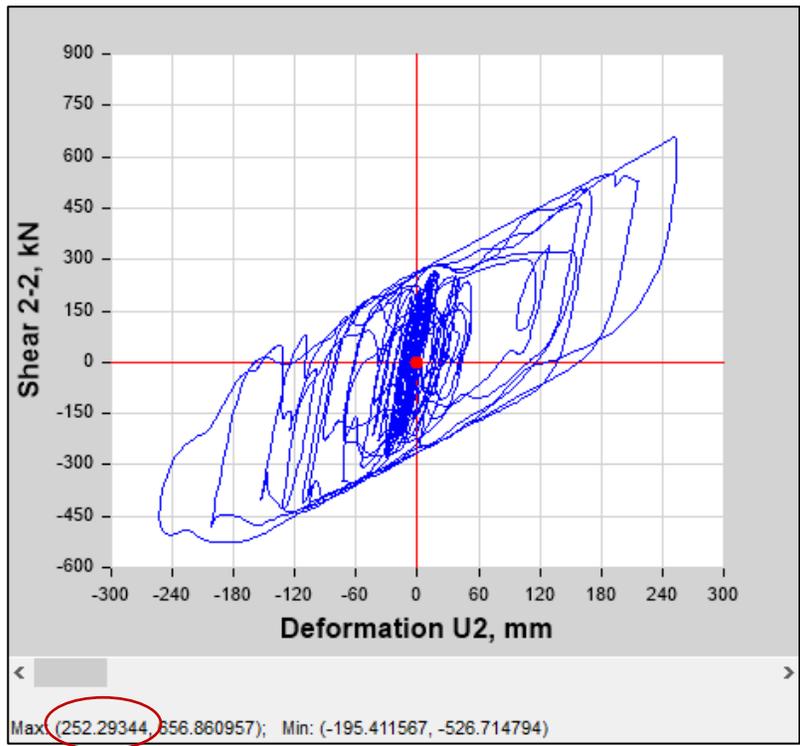


Figura 5.35. Curva de histéresis de la simulación 1, apoyo A1 en dirección X.

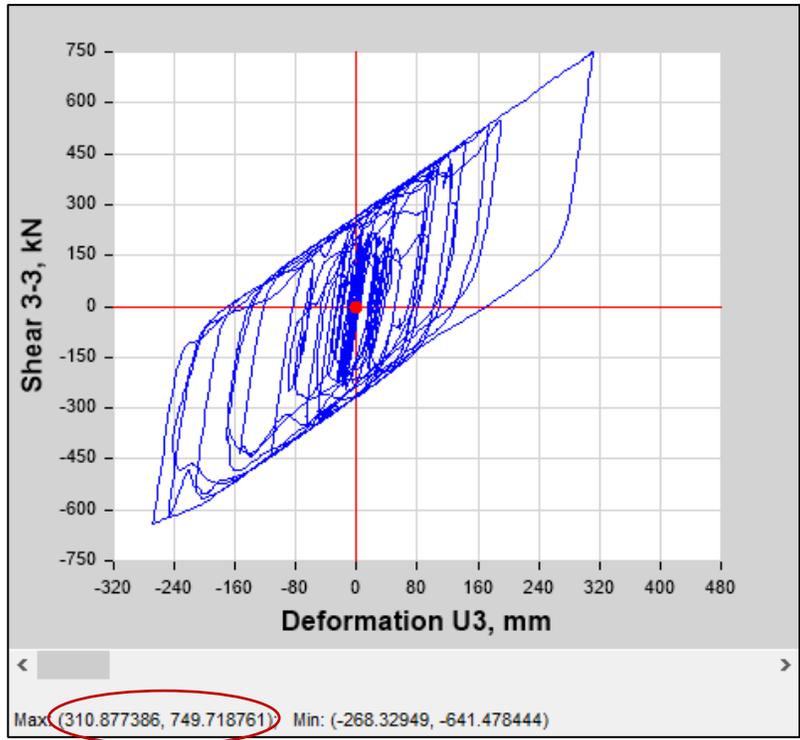


Figura 5.36. Curva de histéresis de la simulación 1, apoyo F5 en dirección Y.

**Tabla 5-20. Resultados de los análisis no lineales, caso de carga “Simulación 2”.**

Simulación 2	Dirección X			Dirección Y		
	Apoyo	D <sub>max</sub> [mm]	V <sub>max</sub> [kN]	Demanda de ductilidad	D <sub>max</sub> [mm]	V <sub>max</sub> [kN]
A1	313.64	694.6	16.43	257.38	625.0	13.48
A2	312.85	692.1	16.39	257.89	<b>625.5</b>	13.51
A3	309.78	689.7	16.23	257.86	625.0	13.51
A4	306.70	687.1	16.07	257.82	624.6	13.51
A5	303.63	684.5	15.91	258.21	624.3	<b>13.53</b>
A6	302.37	681.1	15.84	254.86	621.7	13.35
B1	316.30	698.3	<b>16.57</b>	231.97	620.9	12.15
B2	313.35	696.0	16.41	232.54	621.4	12.18
B3	310.33	693.6	16.26	232.48	620.9	12.18
B4	307.38	691.2	16.10	232.49	620.6	12.18
B5	306.48	688.4	16.05	248.48	620.2	13.02
B6	302.95	683.1	15.87	246.88	618.2	12.93
C1	315.74	700.3	16.54	229.21	616.6	12.01
C2	312.74	697.9	16.38	229.68	616.9	12.03
C3	310.08	695.9	16.24	229.89	616.8	12.04
C4	306.69	692.8	16.07	229.38	615.7	12.02
C5	306.39	691.4	16.05	230.06	616.2	12.05
C6	302.92	684.1	15.87	228.28	614.6	11.96
D3	310.14	699.1	16.25	226.68	612.0	11.87
D4	310.02	697.8	16.24	226.86	611.7	11.88
D5	306.41	694.2	16.05	227.04	611.7	11.89
D6	302.91	690.5	15.87	226.62	609.9	11.87
E3	312.28	702.1	16.36	223.76	607.5	11.72
E4	309.42	699.8	16.21	224.27	607.9	11.75
E5	306.46	697.2	16.05	224.27	607.4	11.75
E6	305.52	694.5	16.00	223.89	606.5	11.73
F3	311.70	<b>704.2</b>	16.33	221.00	603.2	11.58
F4	308.79	701.7	16.18	221.43	603.4	11.60
F5	307.82	699.1	16.12	221.43	603.1	11.60
F6	304.87	696.5	15.97	221.04	602.1	11.58

En la simulación 2, se observa que el dispositivo se comporta correctamente debido a que:

- En la dirección X, el  $V_{\max} = 704.2$  kN, en el apoyo F3 (Figura 5.37) y  $\mu = 16.57$  en el apoyo B1, debido al desplazamiento presentado de 316.30 mm (Figura 5.38).
- En la dirección Y, el  $V_{\max} = 625.5$  kN, en el apoyo A2 (Figura 5.39) y  $\mu = 13.53$  en el apoyo A5, debido al desplazamiento presentado de 258.21 mm (Figura 5.40).

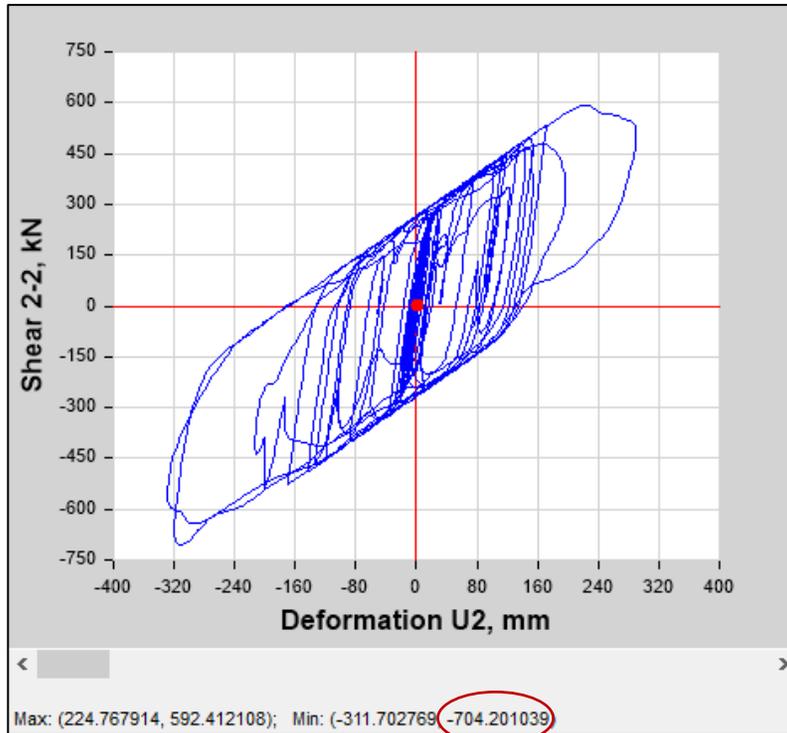


Figura 5.37. Curva de histéresis de la simulación 2, apoyo F3 en dirección X.

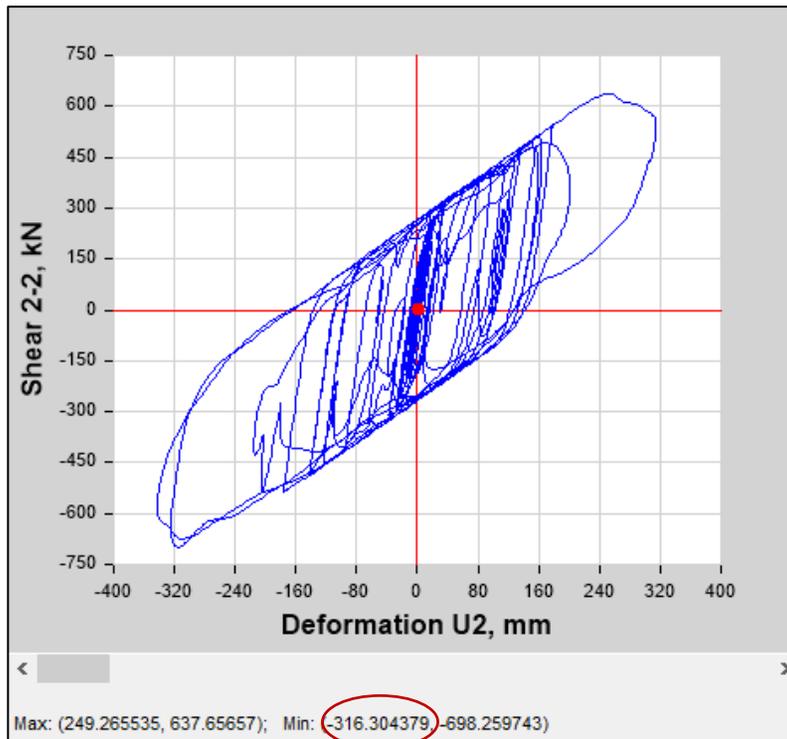


Figura 5.38. Curva de histéresis de la simulación 2, apoyo B1 en dirección X.

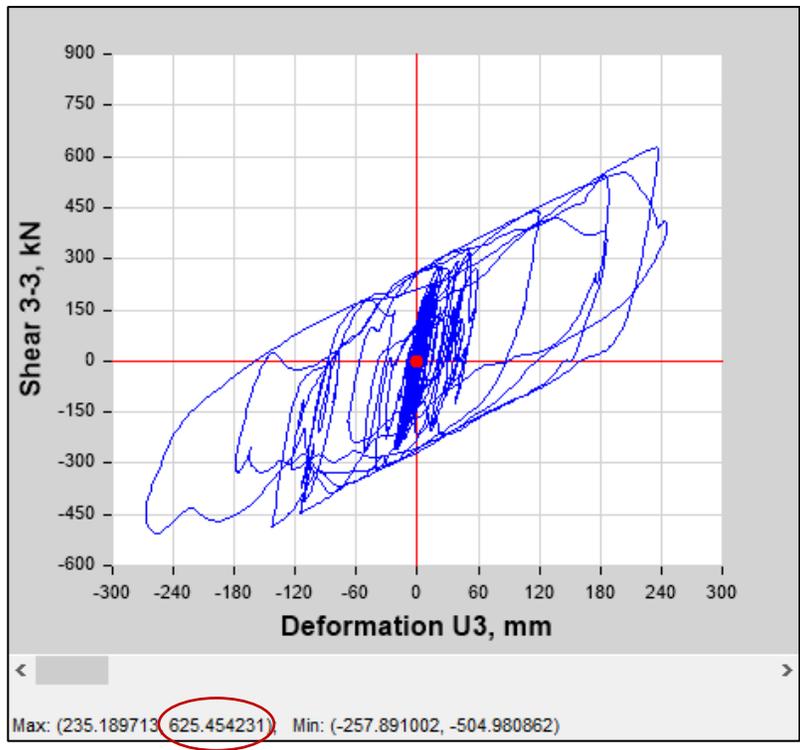


Figura 5.39. Curva de histéresis de la simulación 2, apoyo A2 en dirección Y.

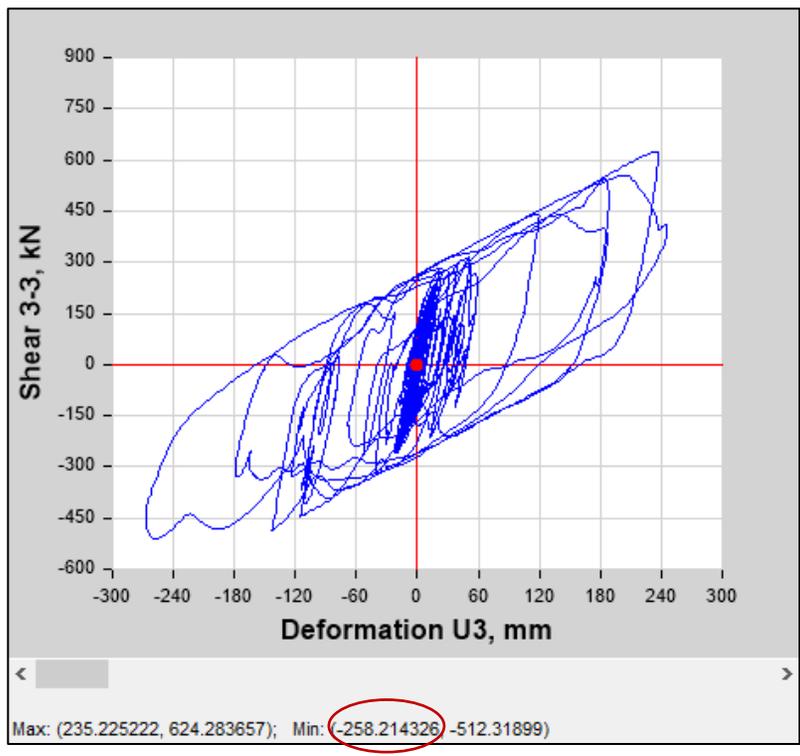


Figura 5.40. Curva de histéresis de la simulación 2, apoyo A5 en dirección Y.

**Tabla 5-21. Resultados de los análisis no lineales, caso de carga “Simulación 3”.**

Simulación 3	Dirección X			Dirección Y		
	Apoyo	D <sub>max</sub> [mm]	V <sub>max</sub> [kN]	Demanda de ductilidad	D <sub>max</sub> [mm]	V <sub>max</sub> [kN]
A1	437.89	841.7	22.94	298.13	727.1	15.62
A2	437.62	839.8	22.92	298.78	728.2	<b>15.65</b>
A3	437.31	838.2	22.91	298.74	728.2	15.65
A4	443.00	838.4	23.21	298.75	728.3	15.65
A5	442.58	839.8	23.18	298.76	<b>728.3</b>	15.65
A6	451.48	845.2	23.65	298.49	727.9	15.64
B1	438.49	846.5	22.97	298.01	726.9	15.61
B2	438.28	844.8	22.96	298.68	728.1	15.65
B3	441.39	843.6	23.12	298.62	728.0	15.64
B4	443.92	844.6	23.25	298.62	728.1	15.64
B5	443.34	846.0	23.22	298.70	728.3	15.65
B6	452.42	854.8	23.70	298.07	727.4	15.61
C1	437.78	849.0	22.93	297.76	726.6	15.60
C2	437.51	847.4	22.92	298.33	727.5	15.63
C3	444.03	847.4	23.26	298.69	728.2	15.65
C4	443.02	848.1	23.21	297.96	727.1	15.61
C5	443.22	850.9	23.22	298.68	728.3	15.65
C6	452.37	864.2	23.70	297.50	726.6	15.58
D3	446.53	852.5	23.39	297.75	726.7	15.60
D4	447.08	856.3	23.42	298.05	727.3	15.61
D5	452.97	857.1	23.73	298.25	727.6	15.62
D6	452.35	875.8	23.70	297.72	726.7	15.60
E3	446.64	858.0	23.40	297.39	726.2	15.58
E4	446.13	860.2	23.37	297.99	727.2	15.61
E5	453.00	869.5	23.73	297.98	727.3	15.61
E6	452.12	884.2	23.68	297.63	726.6	15.59
F3	448.01	862.3	23.47	297.15	725.9	15.57
F4	453.06	865.8	<b>23.73</b>	297.66	726.7	15.59
F5	452.12	880.3	23.68	297.66	726.8	15.59
F6	451.29	<b>894.3</b>	23.64	297.20	726.1	15.57

En la simulación 3, se observa que el dispositivo se comporta correctamente debido a que:

- En la dirección X, el  $V_{\max} = 894.3$  kN, en el apoyo F6 (Figura 5.41) y  $\mu = 23.73$  en el apoyo F4, debido al desplazamiento presentado de 453.06 mm (Figura 5.42).
- En la dirección Y, el  $V_{\max} = 728.3$  kN, en el apoyo A5 (Figura 5.43) y  $\mu = 15.65$  en el apoyo A2, debido al desplazamiento presentado de 298.78 mm (Figura 5.44).

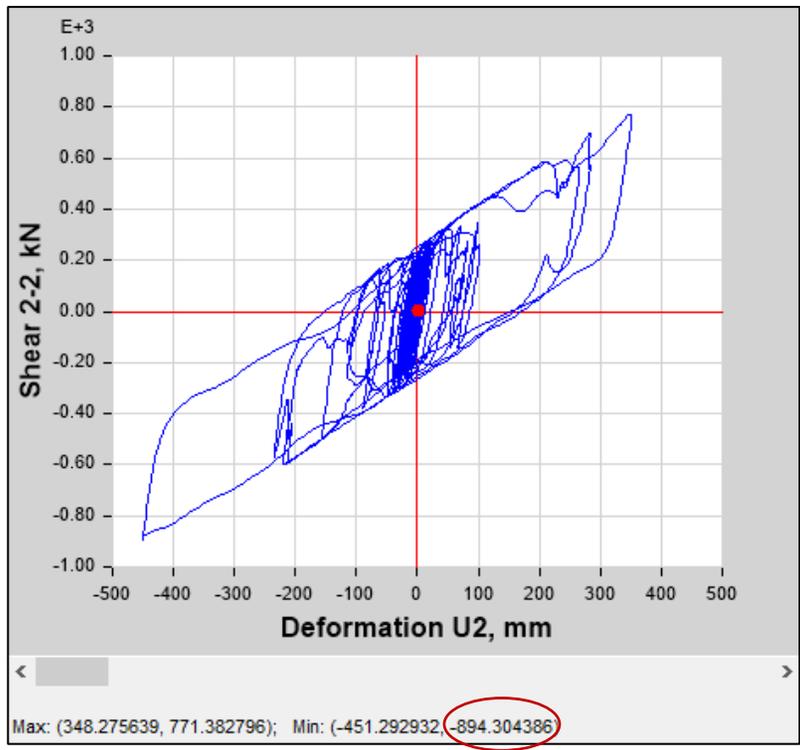


Figura 5.41. Curva de histéresis de la simulación 3, apoyo F6 en dirección X.

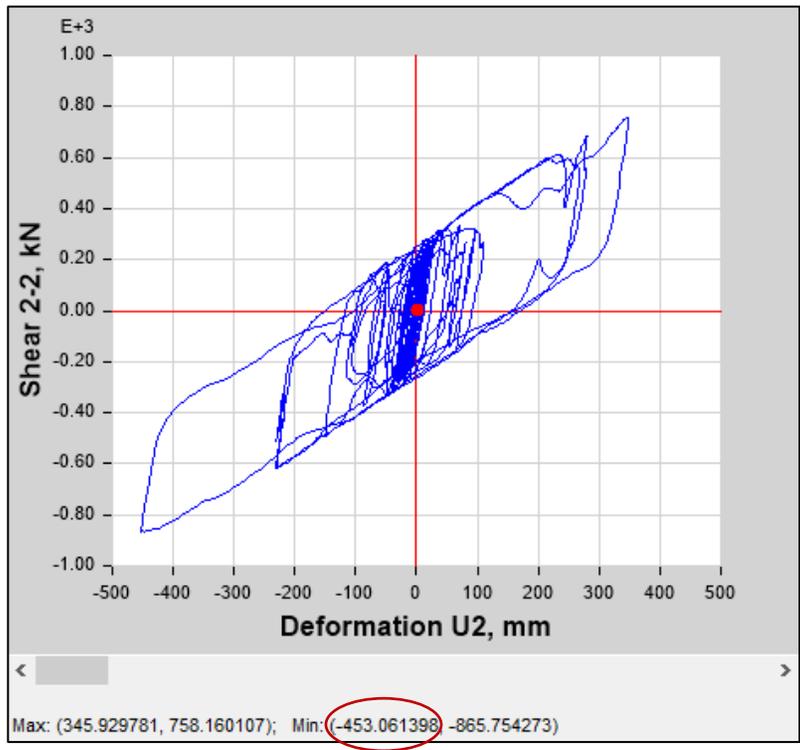


Figura 5.42. Curva de histéresis de la simulación 3, apoyo F4 en dirección X.

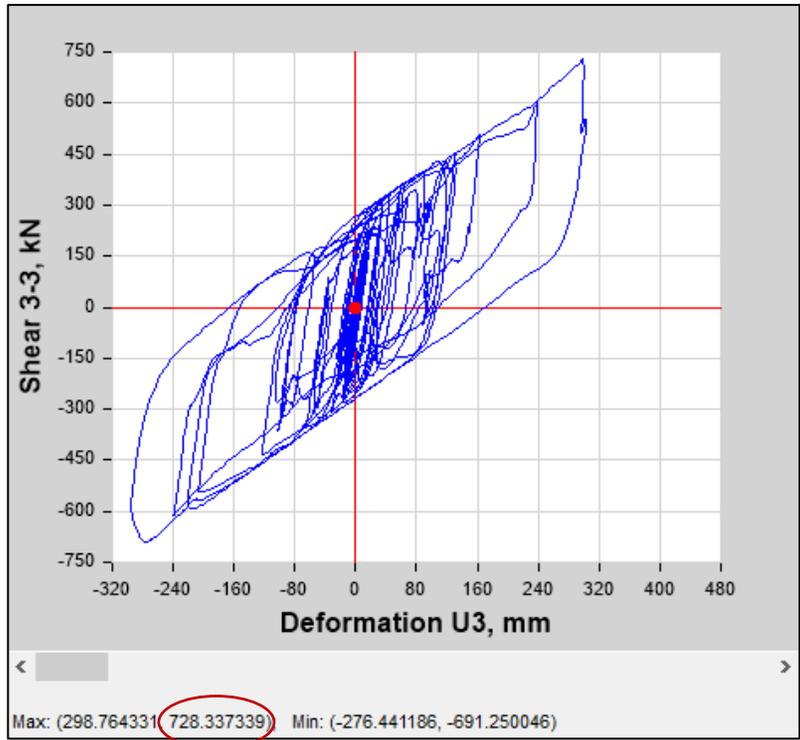


Figura 5.43. Curva de histéresis de la simulación 3, apoyo A5 en dirección Y.

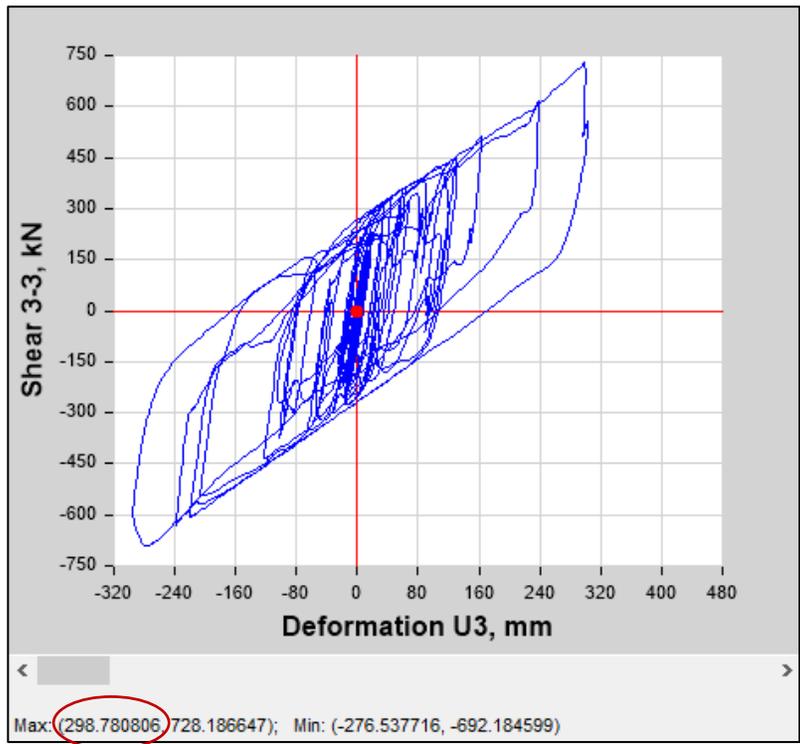


Figura 5.44. Curva de histéresis de la simulación 3, apoyo A2 en dirección Y.

**Tabla 5-22. Resultados de los análisis no lineales, caso de carga “Simulación 4”.**

Simulación 4	Dirección X			Dirección Y		
	Apoyo	D <sub>max</sub> [mm]	V <sub>max</sub> [kN]	Demanda de ductilidad	D <sub>max</sub> [mm]	V <sub>max</sub> [kN]
A1	315.32	727.4	16.52	244.52	641.8	12.81
A2	315.55	728.7	16.53	245.09	643.3	12.84
A3	317.66	730.3	16.64	245.06	643.8	12.84
A4	317.83	732.1	16.65	245.05	644.3	12.84
A5	317.97	733.0	16.66	246.06	645.1	12.89
A6	316.45	<b>740.4</b>	16.58	243.29	642.6	12.74
B1	315.97	725.4	16.55	244.18	641.2	12.79
B2	316.18	726.8	16.56	244.72	642.6	12.82
B3	316.27	728.5	16.57	244.68	643.1	12.82
B4	318.73	730.6	16.70	244.64	643.6	12.82
B5	318.66	731.3	16.69	244.86	644.4	12.83
B6	317.08	736.3	16.61	242.86	640.8	12.72
C1	315.27	720.8	16.51	242.56	640.3	12.71
C2	315.42	722.3	16.52	244.11	641.6	12.79
C3	315.91	724.7	16.55	244.61	643.0	12.81
C4	315.69	726.3	16.54	243.66	642.0	12.76
C5	318.57	728.0	16.69	244.56	643.9	12.81
C6	319.09	731.2	<b>16.72</b>	242.48	639.1	12.70
D3	316.16	722.4	16.56	243.27	640.8	12.74
D4	316.78	725.0	16.59	243.59	641.9	12.76
D5	316.32	725.5	16.57	243.79	642.7	12.77
D6	317.06	723.6	16.61	243.85	642.3	12.77
E3	316.09	719.4	16.56	285.70	641.6	14.97
E4	316.31	721.0	16.57	286.08	641.7	14.99
E5	316.39	722.7	16.57	243.19	641.7	12.74
E6	316.41	724.7	16.57	242.64	641.3	12.71
F3	315.43	714.9	16.52	292.37	651.4	15.32
F4	315.58	716.6	16.53	292.75	<b>651.6</b>	<b>15.34</b>
F5	315.65	718.5	16.53	292.74	651.1	15.33
F6	315.63	720.4	16.53	292.33	649.8	15.31

En la simulación 4, se observa que el dispositivo se comporta correctamente debido a que:

- En la dirección X, el  $V_{\max} = 740.4$  kN, en el apoyo A6 (Figura 5.45) y  $\mu = 16.72$  en el apoyo C6, debido al desplazamiento presentado de 319.09 mm (Figura 5.46).
- En la dirección Y, el  $V_{\max} = 651.6$  kN y  $\mu = 15.34$  en el apoyo F4, debido al desplazamiento presentado de 292.75 mm (Figura 5.47).

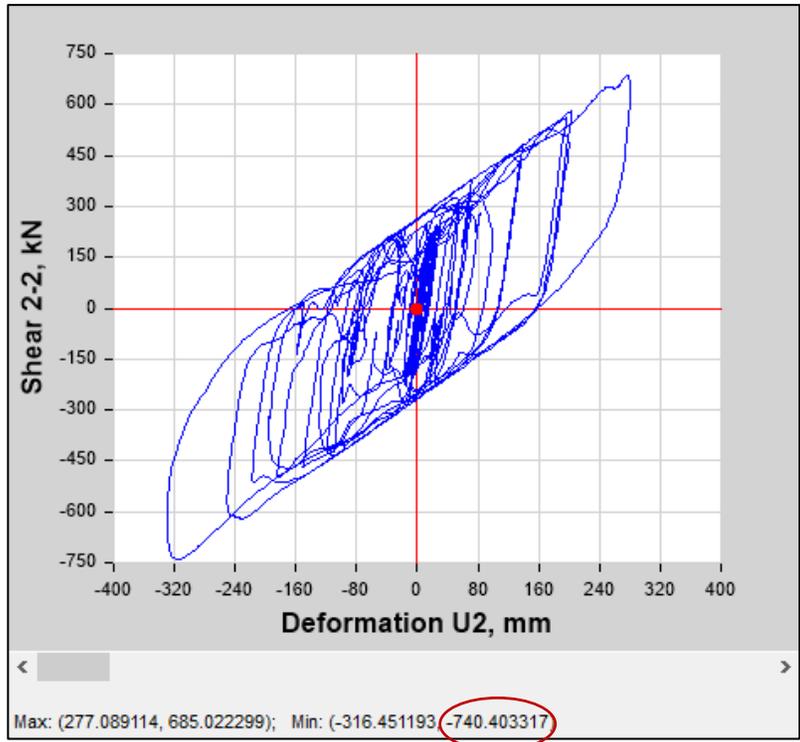


Figura 5.45. Curva de histéresis de la simulación 4, apoyo A6 en dirección X.

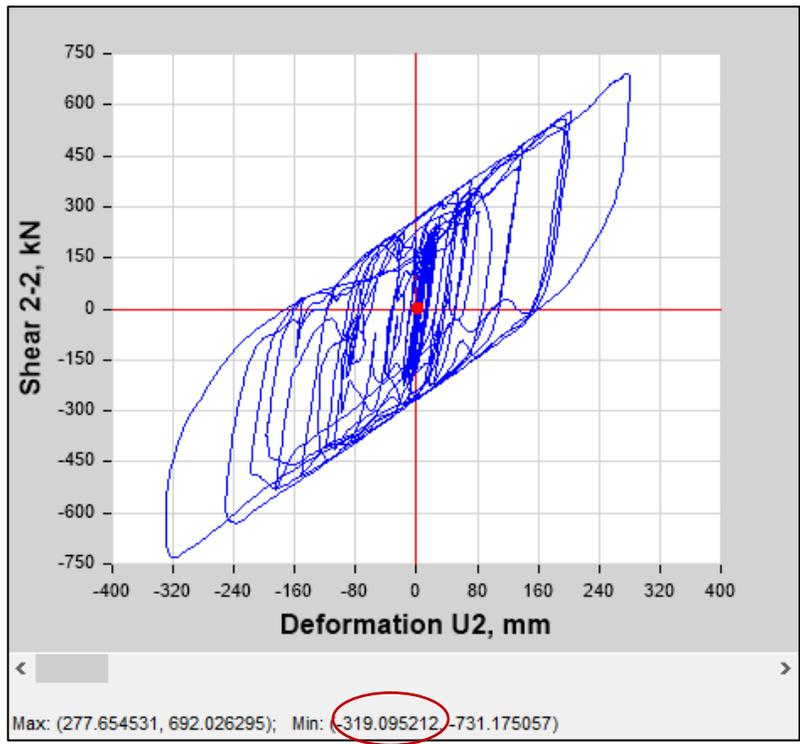


Figura 5.46. Curva de histéresis de la simulación 4, apoyo C6 en dirección X.

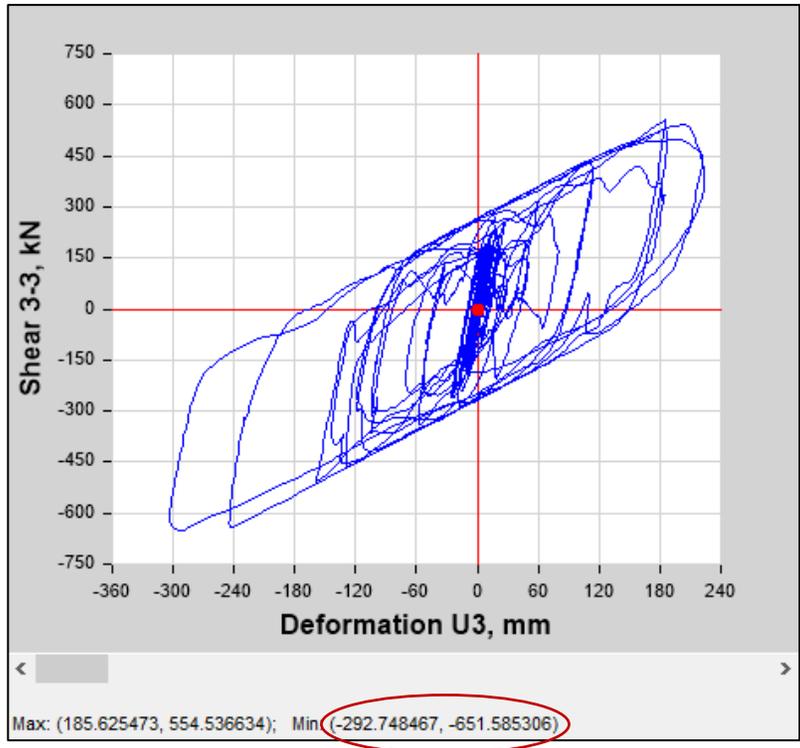
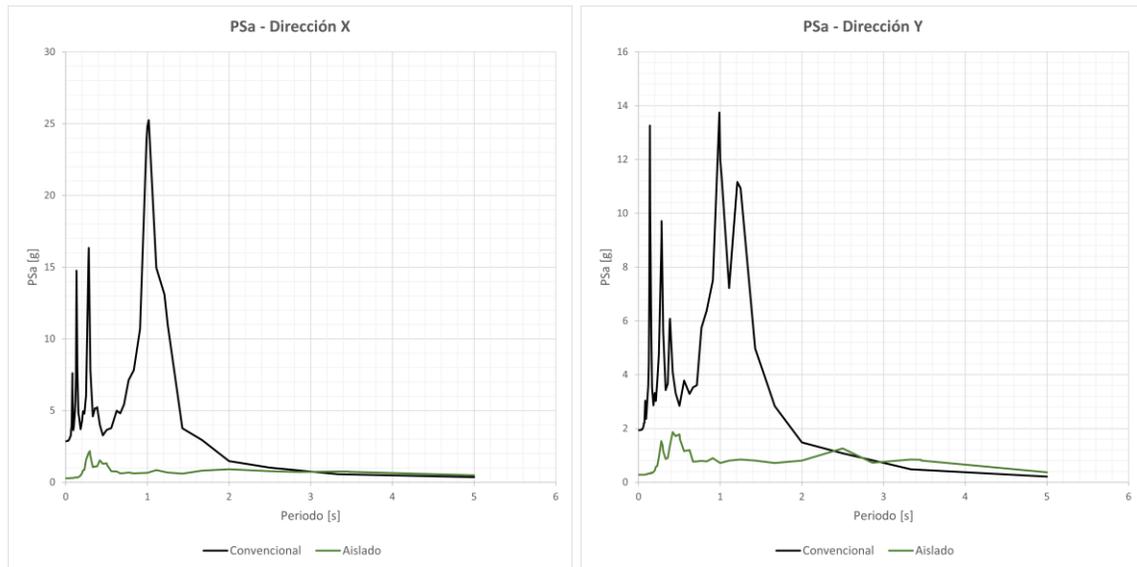


Figura 5.47. Curva de histéresis de la simulación 4, apoyo F4 en dirección Y.

#### 5.4.2.4 Aceleración máxima de piso



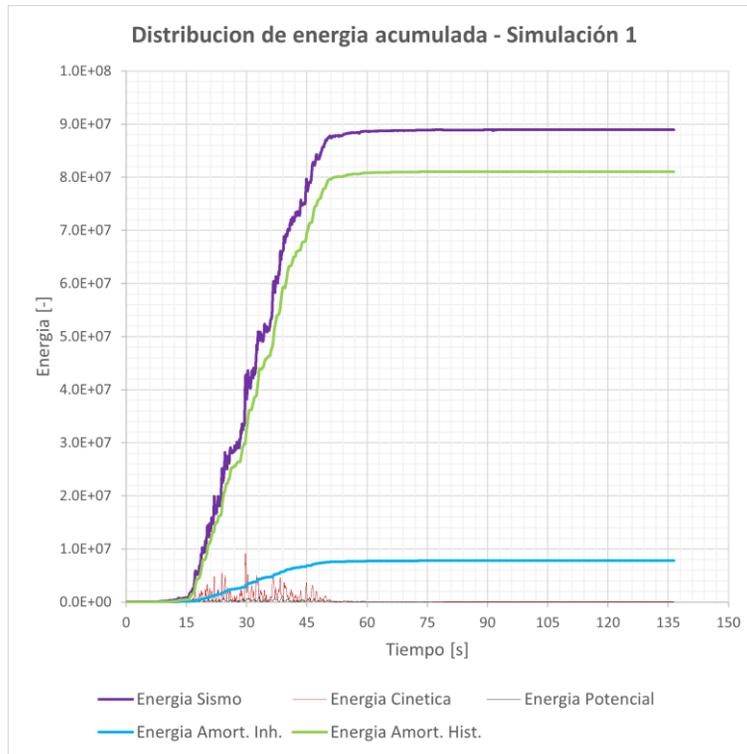
**Figura 5.48. Espectros de piso en dirección X y Y.**

Asimismo, se puede observar en la Figura 5.48 cómo los valores de las pseudoaceleraciones de piso disminuyen en el sistema aislado.

La aceleración máxima de piso en el sistema fijo es de 2.85g en dirección X y 1.93g en dirección Y. Mientras que en el sistema aislado es de 0.29g en dirección X y 0.28g en dirección Y.

La pseudo-aceleración máxima del espectro de piso en el sistema fijo es de 25.24 g en dirección X y 13.75g en dirección Y. Mientras que en el sistema aislado es de 2.18g en dirección X y 1.86g en dirección Y.

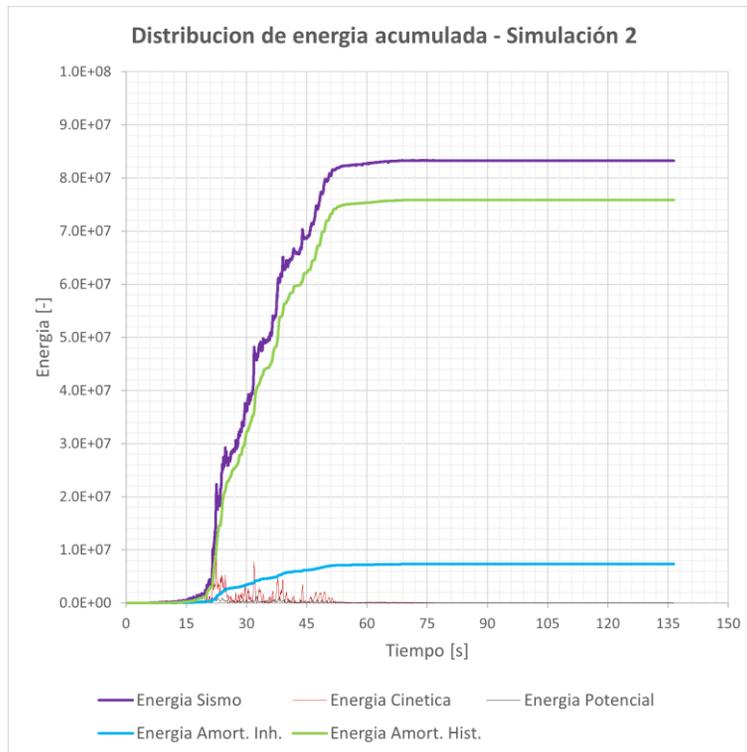
### 5.4.2.5 Energía acumulada



**Figura 5.49. Distribución de energía acumulada en simulación 1.**

**Tabla 5-23. Resultados de energía total acumulada en simulación 1.**

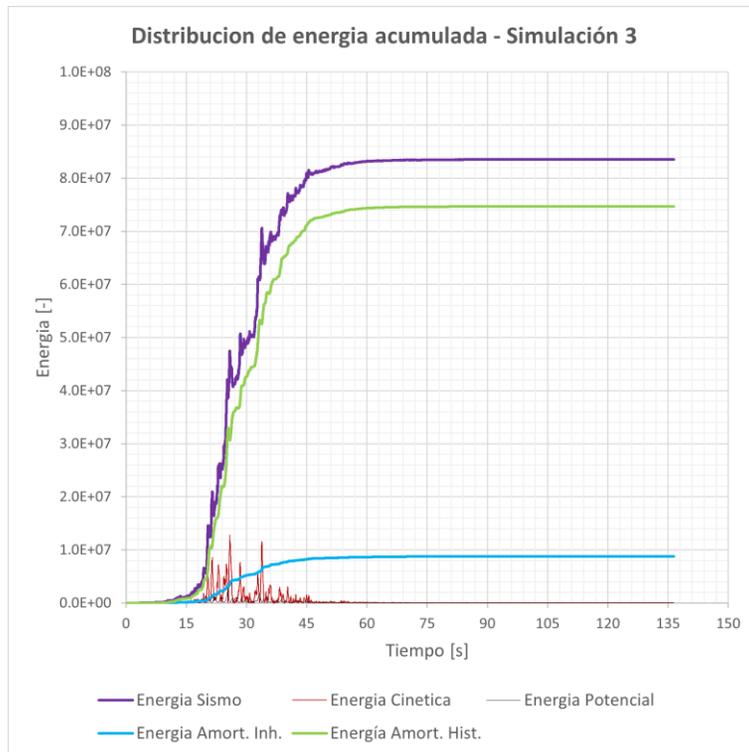
<b>Time History Plot - Simulación 1</b>	
Time [sec]	136.43
EI [kN-mm]	88,926,116
EK [kN-mm]	4.95
EP [kN-mm]	25,313
ED [kN-mm]	7,821,814
ENLVD [kN-mm]	80,716,379
ED / EI	8.8%
ENLVD / EI	90.8%



**Figura 5.50. Distribución de energía acumulada en simulación 2.**

**Tabla 5-24. Resultados de energía total acumulada en simulación 2.**

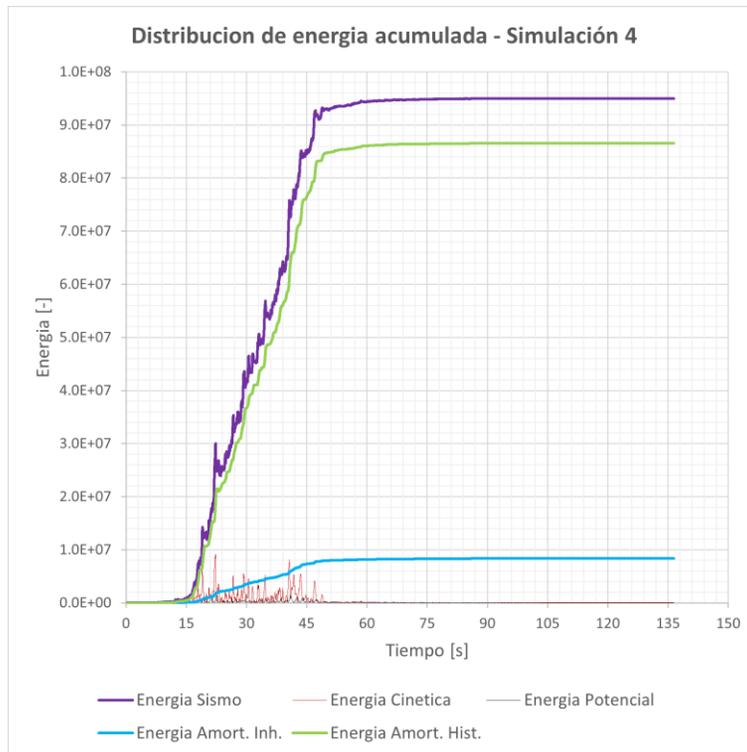
<b>Time History Plot - Simulación 2</b>	
Time [sec]	136.43
EI [kN-mm]	83,293,714
EK [kN-mm]	21.04
EP [kN-mm]	25,310
ED [kN-mm]	7,372,232
ENLVD [kN-mm]	75,894,654
ED / EI	8.9%
ENLVD / EI	91.1%



**Figura 5.51. Distribución de energía acumulada en simulación 3.**

**Tabla 5-25. Resultados de energía total acumulada en simulación 3.**

<b>Time History Plot - Simulación 3</b>	
Time [sec]	136.43
EI [kN-mm]	83,535,162
EK [kN-mm]	289.98
EP [kN-mm]	25,345
ED [kN-mm]	8,811,603
ENLVD [kN-mm]	74,696,172
ED / EI	10.5%
ENLVD / EI	89.4%



**Figura 5.52. Distribución de energía acumulada en simulación 4.**

**Tabla 5-26. Resultados de energía total acumulada en simulación 4.**

<b>Time History Plot - Simulación 4</b>	
Time [sec]	136.43
EI [kN-mm]	94,996,474
EK [kN-mm]	300.25
EP [kN-mm]	25,545
ED [kN-mm]	8,403,769
ENLVD [kN-mm]	86,564,914
ED / EI	8.8%
ENLVD / EI	91.1%

#### 5.4.2.6 Resumen de resultados

Los resultados del análisis tiempo historia modal no lineal son los siguientes:

**Tabla 5-27. Resumen de resultados entre sistema base fija y base aislada.**

Respuesta	Sistema		
	Fijo	Aislado	Reducción
Despl. max. absoluto de techo X [mm]	574.79	546.76	-5%
Despl. max. absoluto de techo Y [mm]	529.22	379.29	-28%
Despl. max. relativo de techo X [mm]	574.79	95.47	-83%
Despl. max. relativo de techo Y [mm]	529.22	68.31	-87%
Distorsión de entrepiso X [-]	0.02042	0.00397	-81%
Distorsión de entrepiso Y [-]	0.01885	0.00228	-88%
Cortante basal X [kN]	161,734	31,070	-81%
Cortante basal Y [kN]	153,312	25,965	-83%
Aceleración max. Piso X [g]	2.85	0.29	-90%
Aceleración max. Piso Y [g]	1.93	0.28	-86%
Psa de piso X [g]	25.24	2.18	-91%
Psa de piso Y [g]	13.75	1.86	-86%

- i. El desplazamiento máximo absoluto en techo se reduce aproximadamente en 5% en dirección X y 28% en dirección Y.
- ii. El desplazamiento máximo relativo de techo se reduce aproximadamente 83% en dirección X y 87% en dirección Y
- iii. La distorsión de entrepiso se reduce aproximadamente 81% en dirección X y 88% en dirección Y.
- iv. El corte basal máximo se reduce aproximadamente 81% en dirección X y 83% en dirección Y.
- v. La aceleración máxima de piso se reduce aproximadamente 90% en dirección X y 86% en dirección Y.
- vi. La pseudo-aceleración máxima del espectro de piso se reduce aproximadamente 91% en dirección X y 86% en dirección Y.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Al definir de una manera adecuada las propiedades mecánicas de un aislador LRB dentro del análisis de una estructura, se produce un incremento del periodo de vibración fundamental e incremento en la capacidad de disipación de energía, reflejado con un alto amortiguamiento.
- Aunque el beneficio principal del aislamiento sísmico es desacoplar la estructura del suelo, éste del mismo modo tiene el beneficio de proporcionar amortiguamiento al sistema, lo cual se refleja en tener fuerzas sísmicas menores.
- Los resultados del análisis modal espectral mostraron que los aisladores mejoran el comportamiento de la estructura, disminuyendo de manera importante sus desplazamientos, distorsiones y cortantes de entrepiso.
- Debido a que la mayoría de los desplazamientos se concentran en el sistema de aislamiento, hay una reducción importante en las distorsiones de entrepiso para los niveles superiores y así, se evita el daño estructural.
- Se destaca la gran mejora que se tienen en las masas participativas en el análisis modal espectral del sistema aislado, corrigiendo la torsión existente en la estructura con base fija. Se logran respuestas muy favorables, en el que sin el sistema de aislamiento sísmico se tiene un primer modo torsional, y al incluir el sistema de aislamiento el primer modo se convierte en traslacional. Cumpliendo así con el objetivo del presente trabajo.
- Es de importancia recordar, que la propuesta preliminar mostrada en el presente trabajo fue obtenida bajo el supuesto en que todos los aisladores estarían sometidos a la misma carga vertical actuando en ellos (la máxima presentada en las columnas existentes). Sin embargo, se recomienda en la práctica profesional agrupar las

reacciones en la base de acuerdo con el orden de sus magnitudes, un buen inicio puede ser agruparlas en: reacciones en columnas de esquina, reacciones en columnas perimetrales y reacciones en columnas centrales. Teniendo por ejemplo así, 3 diseños de aisladores.

- Al realizar de 2 a 3 configuraciones en los diseños de aisladores se puede observar una mejora todavía mayor en las masas participativas para los primeros modos de vibrar, representando mayores ventajas sobre todo en estructuras irregulares. Tomando en cuenta lo anterior, es necesaria su consideración cuando el uso de un solo diseño de aislador no sea suficiente para corregir la torsión de estructuras asimétricas.
- Se puede observar el impacto favorable que se puede obtener en la inclusión de los aisladores sísmicos en las edificaciones. Siempre con el objetivo de garantizar la protección de la vida y la seguridad de las estructuras, evitando el daño en elementos estructurales, no estructurales y contenidos.

## 7. REFERENCIAS

- Arnold, C. 2006. DEPREMİN YAPILAR ÜZERİNDEKİ ETKİSİ 4. En: Designing for Earthquakes A Manual for Architects.
- ASCE. 2017. ASCE/SEI 7-16. En: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. Vol. 7–16. American Society of Civil Engineers, Virginia.
- ASCE/SEI 41-17. 2017. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings.
- Bazán, E., y R. Meli. 1999. Diseño Sísmico de edificios. México.
- Buckle, I., M. Constantinou, M. Dicleli, y H. Ghasemi. 2006. Seismic Isolation of Highway Bridges. MCEER. 194.
- Cardone, D., G. Perrone, y V. Plesco. 2018. Developing collapse fragility curves for base-isolated buildings. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 48:78–102. doi:10.1002/eqe.3126.
- CFE. 2015. Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad.
- Chopra, A. K. 2001. Dynamics of Structures. Theory and applications to Earthquake Engineering. Prentice H.
- Christopoulos, C., y A. Filiatrault. 2006. Principles of passive supplemental damping and seismic. IUSS PRESS. Italia.
- Farzad, N., y J. M. Kelly. 1999. Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice.
- Galindo, C. M., J. N. Higuera, J. Carlos, y D. Trejo. 2016. Aplicaciones Recientes de Sistemas de Protección Sísmica en América Latina. Soc. Mex. Ing. Estructural. 0–11.
- Genatios, C., y M. Lafuente. 2016. INTRODUCCIÓN AL USO DE AISLADORES Y DISIPADORES EN ESTRUCTURAS. Paolo Mara.
- Hanson, R. D. 1993. Supplemental damping for improved seismic performance. Earthq. Spectra. 9:319–334. doi:10.1193/1.1585719.

Hinojosa, O. 2009. Obtención de espectros de respuesta. 10. Available from: <http://www.dds-mexico.com.mx/dinamica>

IBC. 2000. International Building Code, 2000 edition. Int. Conf. Build. Off. Whittier, Calif.

Ingeniería, R. de arquitectura e. 2014. Periodos de vibración de las edificaciones. 13. Available from: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193932724001%0A>

Ismail, M. 2018a. Seismic isolation of structures. Part I: Concept, review and a recent development. *Hormigón y Acero*. 69:147–161. doi:10.1016/j.hya.2017.10.002. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hya.2017.10.002>

Ismail, M. 2018b. Seismic isolation of structures, Part II: A case study using the RNC isolator. *Hormigón y Acero*. 69:177–195. doi:10.1016/j.hya.2017.12.001. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hya.2017.12.001>

Kirikov, B. 1992. History of Earthquake Resistant Construction. Instituto. Madrid.

Mageba. 2020. Instalación de aisladores sísmicos en Espacio Condesa. Available from: [https://www.mageba-group.com/global/en/1023/Latin\\_America/Mexico/183052/Espacio-Condesa-Building.htm](https://www.mageba-group.com/global/en/1023/Latin_America/Mexico/183052/Espacio-Condesa-Building.htm)

Méndez Galindo, C. 2013. Beneficios y ventajas de los sistemas de protección sísmica. XII Semin. Ing. Estructural y Sísmica. 10.

México, G. O. de la C. de la C. de. 2017. Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo. En: CMDX. p. 44–83.

Redacción. 2019. Innovar para hacer estructuras más resistentes en Guayaquil. El universo. Available from: <https://www.eluniverso.com/noticias/2019/07/25/nota/7441098/innovar-hacer-estructuras-mas-resistentes-guayaquil/>

Skinner, R. I., R. G. Tyler, A. J. Heine, y W. H. Robinson. 1980. HYSTERETIC DAMPERS FOR THE PROTECTION OF STRUCTURES FROM EARTHQUAKES. En: Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering. p. 36.

Spuler, T., M. Brüninghold, y C. Mendez-galindo. 2017. Pendulum-type bearings / seismic isolators – solutions and case studies. 39th IABSE Symp. – Eng. Futur. Sept. 21-23 2017, Vancouver, Canada. doi:10.2749/vancouver.2017.1726.

SSN. 2022. Reporte Especial: Sismo del 7 de septiembre de 2021, Guerrero (M 7.1). Univ. Nac. Autónoma México. 1–11.

Tafheem, Z., T. A. Arafat, A. Chowdhury, y A. Iqbal. 2015. Seismic Isolation Systems in Structures-the State of Art Review. Glob. Eng. Sci. Technol. Conf. 18 - 19 December.

Tena-colunga, A. 2004. Propuesta de lineamientos para el diseño por sismo de estructuras con aislamiento de base. Fundamentos. Div. Ciencias Básicas e Ing. Univ. Autónoma Metrop.

Tena-colunga, A. 2021. Conditions of structural irregularity . Relationships with observed earthquake damage in Mexico City in 2017. Soil Dyn. Earthq. Eng. 143:106630. doi:10.1016/j.soildyn.2021.106630. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106630>

Tena-colunga, A., y J. L. Escamilla-Cruz. 2007. Torsional amplifications in asymmetric base-isolated structures. 237–247. doi:10.1016/j.engstruct.2006.03.036.

Tena-Colunga, A., y L. Gómez-Soberón. 2002. Torsional response of base-isolated structures due to asymmetries in the superstructure. Eng. Struct. 24:1587–1599. doi:10.1016/S0141-0296(02)00102-5.

Tena Colunga, A. 2005. DEVELOPMENT OF GUIDELINES FOR THE SEISMIC DESIGN OF BASE ISOLATED STRUCTURES IN MEXICO. 9th World Semin. Seism. Isol. Energy Dissipation Act. Vib. Control Struct.

UBC. 1997. Uniform Building Code, 1997 edition. Int. Conf. Build. Off. Whittier, Calif. 2.

Zayas, V. A., S. S. Low, y S. A. Mahin. 1990. A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation. Earthq. Spectra. 6:317–333. doi:10.1193/1.1585573.