



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
VICE RECTORIA INVESTIGACION Y DESARROLLO
DIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

PROGRAMA DE MAESTRIA INGENIERIA ESTRUCTURAL Y SISMICA

Tesis para optar al título de Máster

“Análisis comparativo del comportamiento sísmico de un edificio esbelto con aislamiento de base convencional versus aislamiento de base en doble interface”

PRESENTADO POR:

ING. DWANE ROBERTO AMADOR ROCHA

TUTOR:

ING. NICOLÁS PERALTA. MSC. PHD

Nicaragua, noviembre 2021

INDICE

1.	INTRODUCCION.....	1
2.	ANTECEDENTES	3
3.	PLANTEAMIENTO SITUACIONAL.....	5
4.	OBJETIVOS:.....	6
4.1.	OBJETIVO GENERAL:.....	6
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	6
5.	JUSTIFICACIÓN.....	7
6.	MARCO TEORICO	8
6.1.	FILOSOFÍA DEL DISEÑO SISMO-RESISTENTE CONVENCIONAL:	9
6.2.	DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN EN ESTRUCTURAS:.....	10
6.3.	CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA:	11
6.4.	AISLADORES DE BASE	13
6.5.	AISLACIÓN EN DOBLE INTERFACE (AISLAMIENTO MÚLTIPLE)	17
6.6.	ANÁLISIS DE RESPUESTA EN EL TIEMPO (TIME HISTORY)	25
7.	MODELADO ESTRUCTURAL	30
7.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO.....	30
7.2.	UBICACIÓN DEL EDIFICIO Y CARACTERÍSTICAS DEL SUELO.	30
7.3.	GEOMETRÍA DEL MODELO.	32
	33	
7.4.	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.....	33
7.5.	SECCIONES DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....	34
8.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.	35
8.1.	ANÁLISIS DEL MODELO EN BASE FIJA.	35
8.1.1.	Resultados del análisis respuesta en el tiempo en el edificio convencional.	38
8.2.	EDIFICIO CON BASE AISLADA	44
1.1.1.	Definición del sistema aislado con Apoyo Laminado con Núcleo de Plomo (ALNP) 47	
1.1.2.	Diseño Final de aisladores.	66
1.1.3.	Resultados del análisis sísmico de la estructura con base aislada usando ALNP 71	
8.3.	MODELO CON SISTEMA DE AISLACIÓN EN DOBLE INTERFACE.....	76
8.3.1.	Definición del sistema aislado con apoyo deslizante (AD).	77
8.3.2.	Diseño Final de AD en doble interface.	86
8.3.3.	Resultados del análisis sísmico de la estructura con aislamiento en doble interface.87	
8.4.	AISLAMIENTO SÍSMICO DE PISOS SUPERIORES.....	92
8.4.1.	Análisis de resultados del aislamiento en los pisos superiores.	96
9.	ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO EN LOS DISTINTOS MODELOS EVALUADOS.	99
10.	CONCLUSIONES.	110
11.	RECOMENDACIONES	112
12.	REFERENCIAS	113

Resumen

El trabajo realizado en este estudio analiza la respuesta sísmica de un edificio con total de 20 niveles de uso hospitalario. El edificio es una estructura idealizada y está estructurada a base de marcos y muros de concreto armado situado en la ciudad de Managua, Nicaragua. Se analizó la respuesta sísmica del edificio con base rígida y se propuso alternativas aislamiento sísmico que aportaran un mejor comportamiento sísmico en la estructura.

Estas alternativas fueron agregar aislamiento sísmico en la base con aisladores de goma y núcleo de plomo, además se utilizó una configuración con aislamiento múltiple o en doble interface que consiste en la colocación de dos capas de aislamiento sísmico que conviertan a la estructura en dos bloques rígidos. También se analizó la posibilidad de que los edificios esbeltos se comporten mejor con sistemas de aislación sísmica fuera de la base, esto se logró aislando los pisos superiores de manera independiente y analizando su respuesta sísmica. En total se realizaron 14 modelos matemáticos en el software ETABS V17. La demanda sísmica fue definida por la norma ASCE 7-16 de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles. La respuesta de la estructura a cada uno de los registros seleccionados es obtenida mediante un análisis lineal de respuesta en el tiempo.

Los análisis realizados muestran como el edificio con base aislada es poco eficiente para control de distorsiones de entrepiso y aceleraciones en edificios esbeltos, esto se debe a la presencia del efecto de los modos superiores en los modelos analizados. Es por ello que se estudia la alternativa del modelo en doble interface, obtenido como resultado que el modelo en doble interface elimina por completo el efecto de los modos superiores y lleva a la estructura a alcanzar valores de distorsiones, aceleraciones que están por debajo de los límites establecidos, así como también se obtiene una reducción importante en las demandas de los elementos de la superestructura.

Abstract

The work done in this study analyzes the seismic response of a building with a total of 20 levels of hospital use. The building is an idealized building and is structured based on frames and reinforced concrete walls located in the Managua, Nicaragua. The seismic response of the building with a rigid base was analyzed and seismic isolation alternatives were proposed that would provide better seismic behavior in the structure. These alternatives were to add seismic isolation in the base with rubber isolators with lead core, in addition a configuration with multiple isolation or in double interface was used that consists of the placement of two layers of seismic isolation that turn the structure into two rigid blocks. The possibility that slender buildings perform better with seismic isolation systems outside the base was also analyzed, this was achieved by isolating the upper floors independently and analyzing their seismic response. In total 14 mathematical models were made in the ETABS V17 software. The seismic demand was defined in accordance with the the ASCE 7-16 standard of the American Society of Civil Engineers. The response of the structure to each of the selected seismic records is obtained through a linear time-history analysis.

Our findings show how the building with an isolated base is not very efficient for controlling stories distortions and accelerations in slender buildings, this is due to the presence of the effect of the higher modes in the models analyzed. That is why the alternative of the double interface model is studied, obtained as a result that the double interface model completely eliminates the effect of the higher modes and leads the structure to reach distortion values, accelerations that are below the established limits, as well as a significant reduction in the demands of the superstructure elements is obtained.

1. INTRODUCCION

El conocimiento que se tiene sobre los diferentes sistemas de protección sísmica en la actualidad, se ha ido desarrollando debido a la necesidad de construir infraestructuras más resistentes a sismos, ya que las edificaciones vulnerables representan una alta peligrosidad y provocan que los sismos causen mayor daño debido a las fallas, generando de esta forma un comportamiento indebido o colapso en las estructuras. Dejando como consecuencia un daño mayor a la sociedad en general.

En los últimos años la ingeniería sísmica en todo el mundo ha enfocado mucho de sus esfuerzos a investigar e implementar métodos para mitigar la amenaza sísmica en lugares más vulnerables. Entre estos, los sistemas de aislamiento sísmico con aisladores de base elastoméricos han adquirido gran auge, siendo este un sistema que disminuye la energía de entrada producida por un sismo, además hace que la superestructura se comporte como un cuerpo rígido, y que el mayor desplazamiento o deformación se dé en la interfaz de aislación, haciendo que el periodo fundamental de la estructura aislada sea mucho mayor que el de la misma estructura con base fija.

La principal limitación de la aislación de base, es que a medida que se aumenta la altura de las edificaciones esta genera una menor eficiencia en el comportamiento de los aisladores en la base, por lo que esta investigación busca determinar que una configuración de aislamiento en doble interface puede contrarrestar estos efectos en estructuras esbeltas.

Para demostrar esta hipótesis se requiere utilizar un edificio cuyo periodo natural de vibración supere la meseta del espectro de diseño nicaragüense RNC-07. Dado que en Nicaragua no existe un edificio que cumpla con las características antes mencionadas, se hará uso de un edificio ficticio modelado para simular las propiedades dinámicas antes mencionadas. El edificio será situado en la ciudad de Managua (Zona Sísmica C) y se le asignarán cargas vivas para un uso hospitalario, cabe destacar que la localización puede ser variable ya que puede que las

características sísmicas de Managua no lleven al edificio a los límites deseados para probar la hipótesis inicial.

Por medio de un estudio comparativo, se presentarán (de forma cuantitativa) las ventajas que ofrecen los dispositivos de aislación sísmica. Y dado las problemáticas que la aislación sísmica presenta en edificios esbeltos, se ha presentado la alternativa de aislación en doble interface.

Se evaluará el desempeño a partir de los resultados obtenidos con un análisis dinámico lineal (Tiempo Historia) del diseño actual del edificio de estudio. Luego, se procederá a incorporar, aisladores sísmicos, para hacer un análisis del comportamiento de la estructura con o sin el uso de estos dispositivos. En cuanto a los aisladores sísmicos, el presente estudio se enfocará en los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (conocidos como LRB por sus siglas en inglés), tanto para la aislación en la base como para la aislación en doble interface.

Las métricas a ser utilizadas para comparar el desempeño estructural con y sin los sistemas de protección sísmica incluyen: los porcentajes de reducción de derivas de piso, aceleraciones pico de los pisos y demandas en los elementos estructurales. Estas reducciones se esperan gracias al uso del sistema de protección sísmica, que ayuda a controlar estos efectos negativos que se producen en la estructura.

2. ANTECEDENTES

El interés del hombre por tener la capacidad de entender y enfrentar los mismos es tan antiguo como los sismos mismos, con el pasar de los tiempos se han desarrollado dos áreas: la sismología que se preocupa por el tema desde el punto de vista de las ciencias de la tierra y la ingeniería civil que tiene como preocupación generar construcciones confiables y seguras.

Los eventos sísmicos son un fenómeno natural que nos ha acompañado desde siempre y que inevitablemente nos seguirán acompañando en el futuro, incluso con mayor frecuencia; existen lugares donde estos eventos se concentran más, ya sea en cantidad como en intensidad.

Nicaragua es cada vez más vulnerable a sufrir daños causados por sismos debido al incremento de la frecuencia e intensidad de la actividad sísmica, ya que está ubicada en una de las regiones sísmicamente activas, situándose sobre dos placas tectónicas, Caribe y Cocos. Un claro ejemplo de esto es el sismo que sufrió Nicaragua en el año 1972 en la ciudad de Managua, este fue uno de los más grandes terremotos en intensidad que se han registrado en la historia del país. Esto evidenció el alto grado de vulnerabilidad que tenía la vieja Managua y el cual hoy en día es necesario reducir mediante buenas prácticas constructivas y el uso de tecnologías que doten a las estructuras de resistencia ante los sismos.

Por todo lo anterior Nicaragua presenta múltiples desafíos ante problemas sísmicos y toma relevancia la investigación acerca de mecanismos de disipación de energía que brinden a las estructuras la sismo resistencia necesaria, tanto desde el punto de vista estructural como funcional.

El uso de dispositivos de aislamiento sísmico ha sido una de las técnicas con mayor crecimiento en el mundo en los últimos años, sin embargo, las limitantes de este sistema que se abordarán en este documento, han obligado a los especialistas a investigar configuraciones en el uso de aisladores que permitan utilizar dichos dispositivos en casos donde el aislamiento basal por si solo sería inefectivo. Una

de estas configuraciones es el aislamiento múltiple o aislamiento de doble interface, que consiste en colocar no una sino dos o mas capas de aislamiento, que aporten a la capa de aislamiento basal a combatir esas deficiencias.

Este innovador sistema continua en investigación, pero estudios recientes como el realizado por los ingenieros japoneses Toshiyuki Sueoka y Shingo Torii en su investigación titulada: THE APPLICATION OF RESPONSE CONTROL DESIGN USING MIDDLE-STORY ISOLATION SYSTEM TO HIGH-RISE BUILDING.

También los ingenieros japones Kohei Fujita y Toshiya Miura analizan el comportamiento del sistema de aislamiento múltiple en su investigación titulada: EXPERIMENTAL STUDY ON INFLUENCE OF HARDENING OF ISOLATOR IN MULTIPLE ISOLATION BUILDING.

En ambos estudios se mencionan las virtudes del sistema de aislamiento múltiple, virtudes que se busca corroborar en el presente documento.

3. PLANTEAMIENTO SITUACIONAL

En Nicaragua, el terremoto de 1972 fue uno de los desastres más importantes ocurridos poco tiempo después de la adopción de la nueva teoría general de las placas tectónicas, lo que alentó a una gran cantidad de estudios a nivel nacional e internacional (Strauch, 1999)¹. El sismo de 1972, marca un avance importante, dado que de ahí se iniciaron esfuerzos por conocer mejor la geología local de la capital y establecer un monitoreo continuo de la sismicidad². La mayor incidencia sísmica en el país es en la región del pacífico, donde se encuentra la mayor cantidad de edificaciones y población, lo que la convierte en un foco de riesgo frente a desastres de origen sísmico.

Debido a las grandes ventajas que presenta la técnica de aislación basal frente a la de base fija y a la necesidad inminente de difundir el conocimiento en el medio nicaragüense, surge la oportunidad de incursionar en este tipo de estudios, que se realiza para demostrar los beneficios que tiene la incorporación de los dispositivos de aislación en estructuras, sobre las que su diseño es por método convencional, y así promover la implementación de estos que son más eficientes para la protección de los elementos principales de la estructura, evitando que estas colapsen, ahorrando costos y preservando la vida humana. El patrón constructivo de los últimos años es la construcción de edificios de mediana altura, sin embargo, pronto surgirá la necesidad de incursionar en la construcción de edificios por encima de los 15 niveles por lo que el presente estudio es una gran oportunidad para entender el comportamiento de esta clase de edificios y además no se debe perder de vista que los resultados no solo serían aplicables a Nicaragua, sino que también serían un aporte interesante para el resto de países de la región.

¹ Tomado de la publicación "Microzonificación sísmica de Managua". 2000. Fuente: INETER.

² Favio Francisco Segura. Reseña de la sismicidad en Nicaragua con énfasis en la depresión nicaragüense.

Fuente: https://webservice2.ineter.gob.ni/sis/literatura/FavioSegura_SismicidadEnNicaragua.pdf

4. OBJETIVOS:

4.1. Objetivo general:

- Realizar un análisis comparativo del comportamiento sísmico de un edificio esbelto con aislamiento de base convencional versus usando aislación en doble interface.

4.2. Objetivos específicos:

- Determinar el comportamiento sísmico de la estructura con base fija aplicando el análisis dinámico lineal (Time-History).
- Determinar el comportamiento sísmico de la estructura con el uso de aisladores en la base o aislamiento convencional, aplicando el análisis dinámico lineal (Time-History).
- Determinar el comportamiento sísmico de la estructura con el uso de aisladores en doble interface, aplicando el análisis dinámico lineal (Time-History).
- Comparar el comportamiento sísmico del edificio convencional versus usando aislación en doble interface, considerando las derivas de piso, aceleraciones pico de los pisos, así como también las demandas en los elementos principales.
- Establecer las ventajas que ofrecen los dispositivos de aislación sísmica a la edificación en base fija.

5. JUSTIFICACIÓN

Dada la vulnerabilidad de nuestro país de sufrir daños causados por sismos debido al incremento de la ocurrencia e intensidad de estos y la necesidad de construir edificaciones seguras que mejoren el comportamiento sísmico, sobre todo las que están ubicadas en zonas de alta peligrosidad sísmica en la ciudad de Managua, evidencian la creciente necesidad de técnicas nuevas que pueden ser no muy conocidas pero muy efectivas, sumando gran importancia en la construcción en la actualidad, esto con el objetivo de evitar que los daños causados por sismos tengan un mayor impacto, previniendo pérdidas humanas, económicas y daños notables a las infraestructuras del país.

Hoy en día en muchos países se ha venido implementando el uso de mecanismos de aislación basal, como aisladores elastoméricos; estos dispositivos son una alternativa de solución ante la necesidad expuesta anteriormente ya que aportan a las estructuras la capacidad de disipar la cantidad de energía necesaria para garantizar un seguro comportamiento de la estructura, salvaguardando los elementos estructurales, no estructurales y contenidos del edificio y por ende de las personas manteniendo el funcionamiento inmediato después de un sismo, esto se logra debido a la reducción de gran parte de la energía sísmica de entrada evitando que se traspase a la estructura aislada.

Esta tecnología es ideal para la protección de infraestructuras y en especial para aquellas edificaciones esenciales encargadas de atender servicios y emergencias después de un sismo (hospitales, escuelas, edificaciones gubernamentales, puentes entre otros).

El propósito de esta investigación es presentar el proceso de análisis dinámico de un edificio con sistema de protección sísmica basal, mediante el uso de aisladores sísmicos elastoméricos en doble interface , de los cuales se desconoce su aplicación en Nicaragua, al incorporar esta tecnología se dispone de dispositivos y conceptos innovadores para el diseño y la construcción de

estructuras sismo resistentes, de esta manera esta investigación significaría un gran aporte respecto al tema y lograr así tener documentos de consulta orientativos y actualizados para las demandas actuales que favorezcan un uso y diseño óptimo de estos dispositivos resultando viable tanto para estructuras sismo resistentes como económicamente.

6. MARCO TEORICO

Managua, capital de Nicaragua, “Con una población de 1,024,850 habitantes, es una de las ciudades con mayor densidad de fallas geológicas en el mundo (0.69 Km^{-1}). En el siglo pasado fue destruida por los terremotos de 1931 y 1972 y según estudios recientes pueden ocurrir sismos más fuertes” **(Aiser Sarria Norwin Reyes, Julio Maltez; Metodología para la determinación de la vulnerabilidad sísmica en edificaciones).**

“Durante su vida útil, las estructuras son sometidas a diversas solicitaciones de servicio, como las provenientes de las cargas propias del uso del edificio y de fenómenos naturales. Entre estos últimos, las mayores demandas o solicitaciones sobre una estructura son causadas, generalmente, por eventos sísmicos” **(Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT); Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía; 2011; p.7).**

Lo anterior motiva la necesidad de promover en nuestro país el uso de tecnologías -probadas a nivel internacional-, orientadas a mejorar la respuesta sísmica de las estructuras, más allá de los requisitos mínimos de la normativa nacional vigente.

6.1. Filosofía del diseño sismo-resistente convencional:

Cuando ocurre un sismo, la energía liberada en la fuente se propaga a través del suelo en forma de ondas. Esta energía, que es transmitida luego a las estructuras y sus contenidos, y que se manifiesta fundamentalmente como movimiento, aceleración y deformación de los componentes y sistemas estructurales y no estructurales, se disipa a través de daño de dichos componentes.

“En el caso de edificios, la disipación de energía se produce típicamente en la interacción entre el suelo y las fundaciones, en el daño de elementos estructurales tales como muros, vigas, losas, columnas, encuentros viga-columna, conexiones, y en la interacción entre el sistema estructural y sistemas no estructurales, principalmente muros” **(Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT); Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía; 2011; p.7).**

“En el diseño sismo-resistente convencional, el desempeño aceptable de una estructura durante un evento sísmico está basado en que el sistema resistente de fuerza lateral sea capaz de absorber y disipar energía de una manera estable por un largo número de ciclos. La disipación de energía ocurre en regiones de rótulas plásticas dúctiles espacialmente detalladas en las vigas y en las columnas, las cuales también forman parte del sistema de carga por gravedad. Estas características de diseño son aceptables por sus consideraciones económicas, por supuesto, que el colapso estructural es prevenido y que la seguridad de la vida de las personas está asegurada” **(Genner Villarreal Castro, Ricardo Oviedo Sarmiento; Edificaciones con disipadores de energía; 2009; p. 10).**

El diseño sismo-resistente convencional se fundamenta en la capacidad de las estructuras para disipar la energía que le entrega el sismo por medio de deformaciones inelásticas, las que implican un daño controlado de la estructura.

“En el diseño estructural, la capacidad de disipación de energía en elementos que conforman los sistemas resistentes a fuerzas dinámicas, como las impartidas por la actividad sísmica y eólica, es suministrada por un minucioso detallado del acero de refuerzo y dimensiones en las secciones transversales de los elementos” **(José Luis Ahumada Villafañe; Sistemas de control en estructuras; 2010).**

Esta práctica es realizada bajo muchas suposiciones que en algunas ocasiones no corresponden a la realidad, y como es de esperarse, producen resultados inexactos y un desconocimiento del desempeño de la estructura. Por lo anterior es riesgoso confiar el 100% de la capacidad estructural del diseño sismo-resistente convencional a los elementos sobre todo cuando conforman sistemas estructurales diseñados en zonas de amenaza sísmica alta.

6.2. Desarrollo de los sistemas de protección en estructuras:

En las últimas dos décadas ha ganado aceptación entre la comunidad de la ingeniería estructural, el uso de sistemas de protección sísmica en estructuras. En la actualidad estos sistemas incluyen diseños relativamente simples hasta avanzados sistemas totalmente automatizados.

“Un número importante de avances para mejorar el desempeño en la respuesta sísmica y el control de daño en los edificios, puentes y otras estructuras han sido desarrolladas, y otras están por venir en el futuro cercano” **(Genner Villarreal Castro, Ricardo Oviedo Sarmiento; Edificaciones con disipadores de energía; 2009; p. 6).**

“Los sistemas de control son una serie de dispositivos adaptados a las estructuras que absorben gran parte de la energía sísmica y liberan los elementos estructurales en gran porcentaje de la acción sísmica, logrando disminuir en ellas las sollicitaciones (fuerzas internas) y las respuestas (derivadas) con el objetivo de conseguir un buen desempeño, limitar el daño y abaratar los costos de reparación

de fallas localizadas” **(José Luis Ahumada Villafañe; Sistemas de control en estructuras; 2010).**

“Los sistemas de control han repercutido enormemente en la ingeniería estructural, desde su etapa inicial en el año 1950, han estado vinculados con aplicaciones en el campo militar donde se solucionó el problema presentado por las vibraciones en el uso de armas, equipos de guerra y vehículos de uso militar. La solución fue conseguir dispositivos que permitieran el amortiguamiento, aislamiento y absorción entre las piezas constitutivas de la estructura” **(Ibídem).**

“En 1972 se realizó el primer estudio conceptual aplicado a la ingeniería civil. El uso de sistemas de control permite liberar la estructura de las fuerzas externas producidas por el sismo y el viento concentrando gran cantidad de fuerzas en estos dispositivos y absorber por esta vía la energía impartida”. **(Ibídem).**

Los sistemas de protección aplicados a las estructuras corresponden a un avance significativo en la optimización de sistemas estructurales para controlar las respuestas ante fuerzas sísmicas. Representan una solución acertada para lograr estructuras más seguras para proteger vidas humanas y garantizar daños leves de bajo costo de reparación ante sismos moderados y frecuentes.

6.3. Clasificación de los sistemas de protección sísmica:

Los sistemas de protección sísmica de estructuras utilizados en la actualidad incluyen desde diseños relativamente simples hasta avanzados sistemas totalmente automatizados. “Los sistemas de protección sísmica se pueden clasificar en tres categorías: 1) sistemas activos, 2) sistemas semi-activos y 3) sistemas pasivos” **(Corporación de Desarrollo Tecnológico; Artículo: Protección sísmica de estructuras; 2012).**

Sistemas activos:

“Los sistemas activos, los cuales requieren la participación activa de dispositivos mecánicos cuyas características están hechas para cambiar durante la respuesta sísmica basándose en medidas de respuesta; los sistemas pasivos, tales como aislamiento en la base y dispositivos suplementarios de disipación de energía; y sistemas híbridos, los cuales combinan los sistemas pasivos y activos en una manera tal que la seguridad del edificio no esté comprometida incluso si el sistema activo fallase” **(Genner Villarreal Castro; Edificaciones con disipadores de energía; 2009; p. 6).**

Sistemas semi-activos:

“Los sistemas semi-activos de protección sísmica, al igual que los activos, cuentan con un mecanismo de monitoreo en tiempo real de la respuesta estructural. Sin embargo, a diferencia de los sistemas activos no aplican fuerzas de control directamente sobre la estructura. Los sistemas semi-activos actúan modificando, en tiempo real, las propiedades mecánicas de los dispositivos de disipación de energía. Ejemplos de estos sistemas son los amortiguadores de masa semi-activos, los dispositivos de fricción con fricción controlable, y los disipadores con fluidos electro -o magneto- reológicos”**(Corporación de Desarrollo Tecnológico; Artículo: Protección sísmica de estructuras; 2012).**

Sistemas pasivos:

Los sistemas pasivos “son los dispositivos de protección sísmica más comúnmente utilizados en la actualidad. A esta categoría corresponden los sistemas de aislación sísmica de base y los disipadores de energía. Los sistemas pasivos permiten reducir la respuesta dinámica de las estructuras a través de sistemas mecánicos especialmente diseñados para disipar energía por medio de calor” **(Corporación de Desarrollo Tecnológico; Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía; 2011; p.13).**

Los sistemas de protección pasivos representan las opciones más económicas, debido a su fácil fabricación y disponibilidad de materia prima para su elaboración lo que los hace más recomendables para usar en países en vías de desarrollo.

“Pruebas realizadas en estructuras reales con sistema de control pasivo de aislamiento de base demostraron que este dispositivo permite una disminución del 78% de la aceleración máxima impartida por un sismo. La adaptación de sistemas pasivos de disipación de energía permite la disminución de la primera forma de vibración hasta en un 52%, además disminuyen los desplazamientos máximos, las fuerzas axiales máximas y los momentos flectores” **(José Luis Ahumada Villafañe; Sistemas de control en estructuras; 2010).**

Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica y a diferencia del resto de sistemas no precisan de aporte energético para funcionar. Se clasifican en sistemas de: 1) aislamiento de base, 2) disipación de energía y 3) osciladores resonantes.

6.4. Aisladores de base

Un aislador sísmico es un elemento muy flexible que se coloca entre la estructura y fundación, a fin de transmitir la menor cantidad de movimiento a la estructura, en el momento de ocurrencia de un sismo. De no existir el aislador, la fundación transmitiría gran cantidad de vibraciones en la estructura. La estructura sin aislador será denominada, de ahora en adelante, estructura de base fija.

Los aisladores de base, situados sobre la cimentación y soportando al edificio, desacoplan parcialmente al edificio del suelo, disminuyendo la energía de entrada y por consiguiente su respuesta estructural. El aislamiento sísmico es

utilizado para la protección sísmica de diversos tipos de estructuras, tanto nuevas como estructuras existentes que requieren de refuerzo o rehabilitación.

“Los sistemas de aislación sísmica limitan la energía que el sismo trasfiere a la superestructura, reduciendo considerablemente los esfuerzos y deformaciones de la estructura aislada, previniendo el daño estructural y no estructural. La Figura 1 muestra una comparación del comportamiento, ante la acción de un sismo, de un edificio sin aislación y un edificio con aislación sísmica” (**Corporación de Desarrollo Tecnológico; Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía; 2011; p.8**).

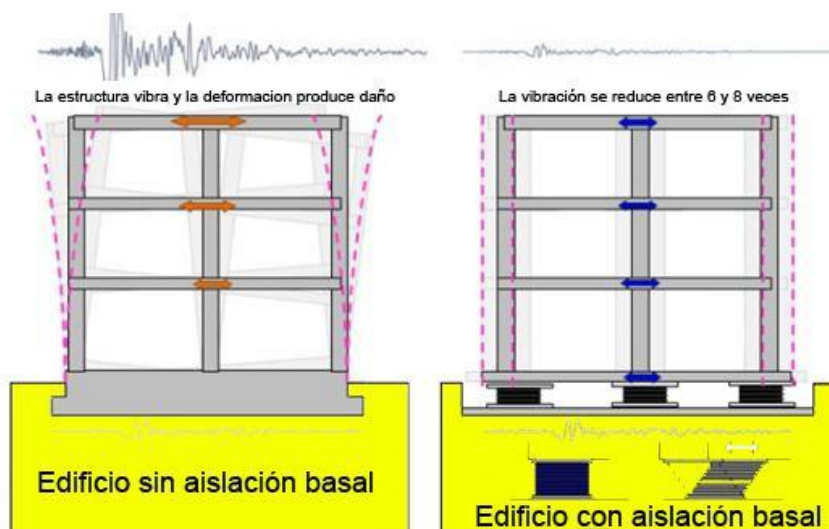


Figura 1 Comparación de respuesta sísmica de edificio sin aislación y edificio con aislamiento basal. Fuente: Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT).

A diferencia de las técnicas convencionales de reforzamiento de estructuras, el aislamiento sísmico busca reducir las demandas a niveles que puedan ser resistidos por la estructura existente, simultáneamente reduce las derivas de entrepiso y aceleraciones de suelo para limitar o incluso evitar daños, en toda la estructura. Debido a esto último, la aislación sísmica de base es especialmente útil para la protección y refuerzo de edificios históricos y patrimoniales así como también de edificios de tipo esencial o clase A según RNC-07.

La incorporación y uso cada vez más difundido de aisladores sísmicos en edificaciones en la actualidad, constituye una innovación en el campo de la ingeniería sísmica. Sin embargo, el esfuerzo por generar mecanismos de aislamiento no es una idea reciente.

El primer documento para el diseño de estructuras con aislación sísmica de base fue publicado en 1986 por el SEAOC (Structural Engineering Association of California). Estados Unidos y Japón son los principales precursores del uso de estas tecnologías de protección. Los sistemas de protección sísmica presentaron su mayor auge luego de los terremotos de Northridge (EEUU) en 1994 y Kobe (Japón) en 1995.

En ambos terremotos se observó que las construcciones que poseían sistemas de aislación sísmica se comportaron de excelente forma, lo que estimuló la masificación de este tipo de tecnología. La experiencia internacional muestra que el uso de tecnologías de protección sísmica no solo aplica para estructuras nuevas, sino que también es utilizada como estrategia de refuerzo o rehabilitación (retrofit) de estructuras ya existentes. El Ayuntamiento de Los Ángeles, de 27 pisos, es el edificio más alto puesto sobre aisladores sísmicos.

El aislamiento de la base es más recomendable en estructuras rígidas sobre terrenos rígidos y en las que no haya una relación elevada de altura-anchura. El principal inconveniente que se presenta en estructuras con una elevada relación altura-ancho son los elevados momentos de volteo que pueden suponer la pérdida de equilibrio. Además, al incrementarse la altura las ventajas obtenidas al variar el período de vibración disminuyen **(Carmona P., Rosas A.; Análisis Comparativo del Comportamiento Sísmico Dinámico del diseño normativo sismo-resistente de un sistema dual frente al modelo con aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDR) de un sistema aporticado, del Edificio de Oficinas Schell de seis pisos ubicado en la Provincia de Lima – Perú; 2015; p. 10).**

La implementación del aislamiento resulta ser de gran utilidad en países como Nicaragua por encontrarse en una zona de alta actividad sísmica con el peligro latente de sucumbir ante un terremoto de escala moderada. Se ha demostrado el excelente comportamiento que puede lograr una estructura con aislamiento sísmico en la preservación de la vida como de la protección de estructuras al estar sometidas a movimientos sísmicos de moderada a severos magnitud.

Existen diversos tipos de aisladores elastoméricos -con o sin núcleo de plomo-, donde la selección de cualquiera de ellos depende del diseño estructural y las sollicitaciones sísmicas del proyecto. Los aisladores sísmicos elastoméricos se utilizan para controlar la interacción de las cargas y movimientos de un sismo entre las vigas y columnas que soportan una determinada estructura de una edificación, su uso principal es en los edificios donde tenemos un centro de gravedad bajo.

Los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo están conformados por láminas de caucho natural intercaladas con placas de acero, las cuales son vulcanizadas entre sí y poseen, a diferencia de los dispositivos SI, un núcleo de plomo que aumenta su capacidad de amortiguamiento. El amortiguamiento que se logra con la inclusión del núcleo de plomo es mayor al 20%. Estos dispositivos son fabricados a medida para cada proyecto, de acuerdo a la rigidez horizontal, rigidez vertical, desplazamiento, capacidad de carga y capacidad de amortiguamiento requerida.

6.5. Aislación en doble interface (aislamiento múltiple)

“El sistema de aislamiento múltiple se ha propuesto recientemente para mejorar el rendimiento de la supresión de la vibración sísmica de los edificios aislados con base aislada existente. Aunque el sistema de aislamiento de base para la construcción de estructuras es bien conocido como un mecanismo efectivo para controlar las desviaciones y aceleraciones entre pisos de las superestructuras existe una gran preocupación. que los movimientos de tierra de largo período y de larga duración pueden causar graves daños a los aisladores. Para evitar el daño a los aisladores sísmicos y la colisión a los muros de contención debido a la gran deformación de los aisladores, se han estudiado varios enfoques hasta ahora, por ejemplo, el sistema de aislamiento múltiple. El sistema de aislamiento múltiple es una de estas soluciones donde la deformación de los aisladores de base se puede disminuir mediante la distribución de una parte de la energía de entrada a los aisladores de la mitad del piso.” (Kohei Fujita, **Experimental Study on Influence of Hardening of Isolator in Multiple Isolation Building**, Kyoto University, Japan 2016).

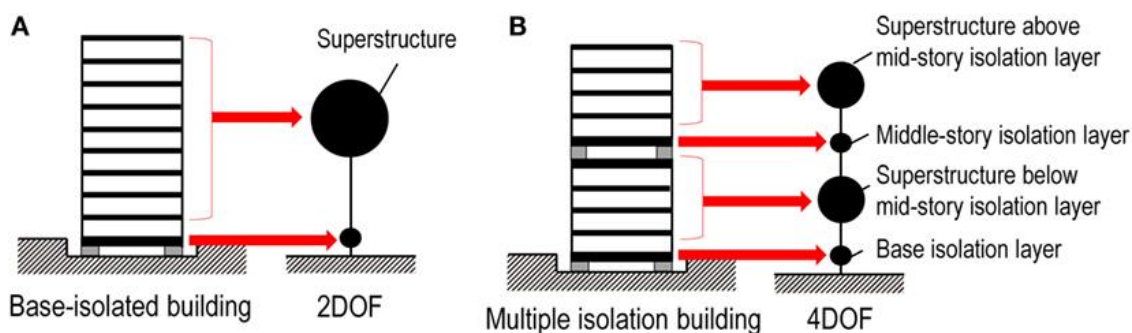


Figura 2 Modelo analítico simplificado de edificio aislado: (A) Base aislada (B) Doble Interface. Kohei Fujita

“Mientras que muchos edificios con base aislada han sido probados y se ha verificado su gran eficacia para movimientos de periodos cortos con contenidos de frecuencias no resonantes, su resiliencia para sismos para periodos largos no es necesariamente buena. Esto se debe a que la resonancia de los edificios de base aislada generada por eventos de periodos largos puede ser catástrofica. Los movimientos de largos periodos (5s-8s) han sido de gran interés en el campo de la tecnología de aislamiento basal en edificios de gran altura y rascacielos desde el terremoto de Tokachi en 2003 y donde se demostró como punto crítico de observación durante el terremoto de Tohoku en 2011 donde quedó en evidencia la ineffectividad de los sistemas de aislamiento basal en edificios de gran altura. Por otro lado, también es cierto, que los edificios que incluyen sistemas pasivos de disipación de energía son efectivos para eventos de largos periodos pero no son necesariamente efectivos para movimientos de tipo pulso o de periodos muy cortos. La solución a estas interrogantes es profundamente deseada en el campo de la ingeniería sismorresistente” **(Masaki Taniguchi, Kohei Fujita, Hybrid Control System for Greater Resilience Using Multiple Isolation and Building Connection, Kyoto University, Japan 2016).**

“Si bien el aislamiento basal disminuye con éxito las aceleraciones transmitidas a una estructura, una compensación son los grandes desplazamientos desfavorables en la capa de aislamiento. Un sistema innovador, denominado "aislamiento dual", que aplica dos capas de aislamiento en la base y en la mitad del piso para resolver este problema. Esto crea una base para evaluar el comportamiento de varios tipos de sistemas de protección sísmica y para seleccionar la amortiguación y la relación de masa que optimiza el rendimiento del método propuesto. Luego se examina la respuesta dinámica de un ejemplo de sistema doble aislado a conjuntos seleccionados de movimientos del suelo. Además de disminuir el desplazamiento de la primera capa de aislamiento, el sistema de aislamiento dual puede disminuir en gran medida las aceleraciones del piso de la parte superior del edificio, protegiendo aún más los componentes del edificio y mejorando la comodidad y seguridad de los residentes. **(Becker TC, Ezazi A, Enhanced performance through a dual isolation seismic protection system, Berkeley University, USA 2016).**

Tipos De Aisladores Sísmicos

Existen diversos tipos de aisladores sísmicos, cada uno con características propias en cuanto a sus mecanismos de acción, materiales, costos de implementación, estudios teóricos y tipos de estructuras en donde es más conveniente su uso. Entre los aisladores sísmicos más desarrollados se encuentran los aisladores elastoméricos, los aisladores deslizantes y los aisladores basados en resortes helicoidales y amortiguadores viscosos (Mendo Rodríguez , 2015, pág. 17).

Aisladores Elastoméricos

Estos dispositivos están conformados por un conjunto de láminas planas de elastómeros intercaladas con capas de acero vulcanizadas entre sí. Las láminas de elastómeros proporcionan la flexibilidad lateral necesaria para permitir el desplazamiento horizontal relativo entre la estructura y el suelo, mientras que las láminas de acero proporcionan la rigidez vertical del sistema de aislamiento, estos aisladores dependen de la amplitud de la deformación a la que son sometidos, y en menor grado a la temperatura, el envejecimiento y la frecuencia del movimiento (Mendo Rodríguez , 2015, pág. 17). Entre estos dispositivos tenemos:

Aisladores Elastoméricos De Bajo Amortiguamiento (LRD)

Este tipo de dispositivos son los más simples dentro de los aisladores elastoméricos y consisten en un conjunto intercalado de capas de acero y caucho, el cual es vulcanizado para lograr la adherencia entre ambos materiales. Al intercalar el caucho con el acero se aumenta su capacidad para resistir cargas de gravedad y su estabilidad para soportar cargas laterales. En estos dispositivos, también se colocan placas de acero en la zona superior e inferior que sirven para

confinar el núcleo y evitar la compresión del caucho ante cargas de gravedad (Mendo Rodríguez , 2015, pág. 18).

a) Características:

- * Pueden ser de goma natural o sintética.
- * Su comportamiento es lineal–elástico a bajas deformaciones y lineal-viscoso a altas deformaciones.
- * Tienen una razón de amortiguamiento crítico menor a 7% para valores de deformaciones angulares menores a 200%.

b) Ventajas:

- * Son simples de fabricar.
- * Son fáciles de modelar (modelo lineal).
- * No tienen una respuesta muy sensible a las variaciones de carga en el tiempo, la temperatura o el envejecimiento.

c) Desventajas:

- * Necesitan sistemas de amortiguamiento suplementario.

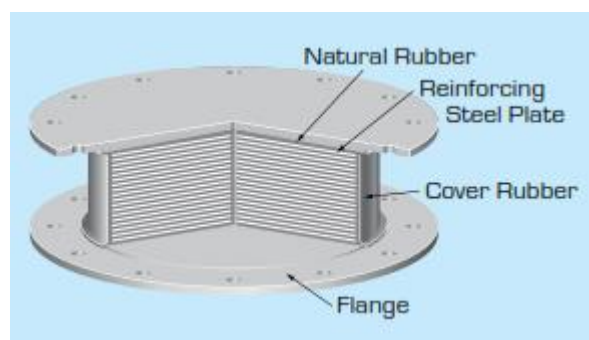


Figura 3 Aislador elastomérico de bajo amortiguamiento (Bridgestone, 2015, pág. 2)

Aisladores Elastoméricos De Alto Amortiguamiento (HDR)

Una característica importante de estos aisladores es que sus propiedades dinámicas son sensibles al cambio de frecuencia y temperatura que generan reducción de rigidez y amortiguamiento. Por ejemplo, cuando los dispositivos están sujetos a ciclos de movimiento, presentan mayor rigidez para los primeros ciclos de carga, que generalmente se estabilizan luego del tercer ciclo de carga. Por lo tanto, su comportamiento inicial puede ser apreciablemente diferente bajo distintos ciclos de carga y deformación, siendo sus propiedades iniciales recuperables en el tiempo (horas o días) (Mendo Rodríguez , 2015, pág. 18).

a) Características:

- * Alcanzan grandes deformaciones de corte (γ) de 2 a 3.5.
- * Incrementar el amortiguamiento por incorporación de carbón negro extrafino, aceites o resinas.
- * Su razón de amortiguamiento crítico es de 10 a 20% para una deformación de corte igual a 100%.
- * Su módulo de elasticidad de corte varía de 17 a 64 Kg/cm².
- * El amortiguamiento efectivo depende de los elastómeros, de la presión de contacto, la velocidad de carga y de los incrementos de temperatura ambiente.

b) Ventajas:

- * Combinan la flexibilidad y disipación de energía en un solo elemento
- * Su fabricación es relativamente sencilla

c) Desventajas:

- * A elevadas temperaturas su rigidez horizontal y su amortiguamiento decrecen.
- * Con el incremento de la carga axial su rigidez horizontal tiende a disminuir.
- * Las propiedades mecánicas del caucho natural se pueden degradar con la exposición prolongada al oxígeno y al ozono.

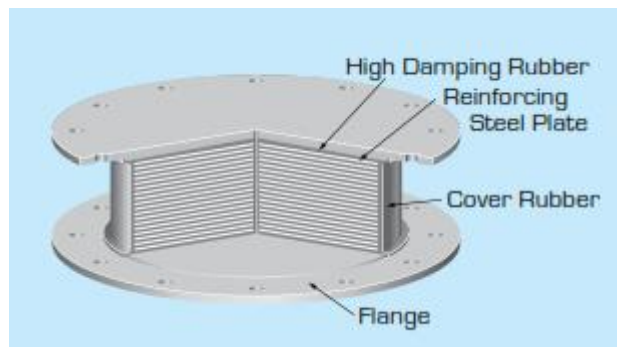


Figura 4 Aislador elastomérico de alto amortiguamiento (Bridgestone, 2015, pág. 2)

Aisladores Elastoméricos Con Núcleo De Plomo (ALNP)

Estos aisladores son similares a los LDR, pero incluyen un núcleo de plomo ubicado en el centro del aislador, que permite aumentar su rigidez inicial (proporciona restricción a la carga del viento) y aumenta la capacidad de disipación de energía mediante el incremento del nivel de amortiguamiento del sistema entre 25 y 30%. Al deformarse lateralmente el aislador durante la acción de un sismo, el núcleo de plomo fluye incurriendo en deformaciones plásticas, y disipando energía en forma de calor. Al término de la acción sísmica, la goma del aislador retorna la estructura a su posición original, mientras que el núcleo de plomo se recristaliza quedando en condiciones similar al original para soportar un nuevo evento sísmico (Mendo Rodríguez , 2015, pág. 19).

a) Características:

- * Su módulo de elasticidad de corte varía de 5 a 7 Kg/cm² para una deformación de corte del 100%.
- * Las variaciones de sus propiedades no son significativas como ocurre con los aisladores tipo HDR, debido a que la máxima deformación de corte no es mayor a 200% (varía de 125% a 200%).
- * La respuesta histerética es fuertemente dependiente del desplazamiento lateral.
- * Tienen una alta rigidez inicial, debido a que el esfuerzo de fluencia del plomo alcanza valores que varían alrededor de 105 Kg/cm².
- * El esfuerzo de fluencia se reduce con ciclos repetidos debido al aumento de temperatura.
- * Típicamente el núcleo de plomo abarca del 15 al 33% del diámetro total del aislador.

b) Ventajas:

- * El plomo es un material que tiene alta rigidez horizontal antes de alcanzar su fluencia y presenta un comportamiento perfectamente plástico después de su fluencia.
- * El plomo es un material en el cual se producen los procesos de recuperación y re cristalización ocurren simultáneamente a temperatura ambiente, por lo que puede recuperar sus propiedades mecánicas después de una acción inelástica.
- * Las propiedades mecánicas del núcleo de plomo no presentan cambios significativos durante el periodo de vida útil de las estructuras (50años).

c) Desventajas:

- * Los incrementos de temperatura ambientales pueden afectar su rigidez horizontal.
- * Con el incremento de la carga axial su rigidez horizontal tiende a disminuir.
- * Las propiedades del aislador LRB dependen de la historia de carga. Con el incremento de ciclos la rigidez del núcleo de plomo y el amortiguamiento decrecen.

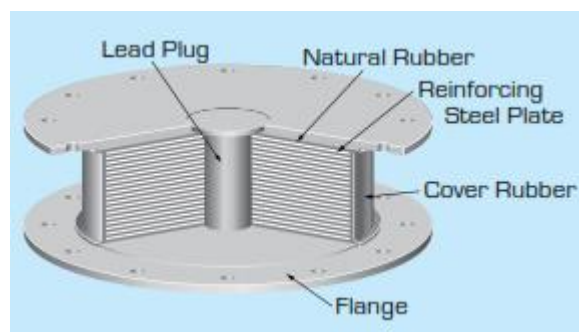


Figura 5 Aislador elastomérico con núcleo de plomo

Aisladores De Fricción O Deslizadores Friccionales

Péndulo de fricción simple (PFS)

El péndulo de fricción simple cóncavo es el sistema de péndulo de fricción original descrito por Zayas et al. [1987] y representa el primer deslizador fabricado para hacer uso del concepto de péndulo. Este consiste de un deslizador articulado que descansa sobre una superficie esférica cóncava. El deslizador está recubierto con un forro compuesto de PTFE (politetrafluoroetileno), y la superficie esférica está cubierta por acero inoxidable pulido. En la Figura 6 se muestra una imagen que muestra un deslizador PFS y una sección transversal, que indica los componentes descritos anteriormente (**Morgan & Mahin, 2011, pág. 21**).

La forma curva del aislador produce una fuerza restauradora que sirve para centrar al deslizador en su posición de inicio. Las propiedades de rigidez y

amortiguamiento están determinadas por el radio de curvatura (R) y el coeficiente de fricción (μ).

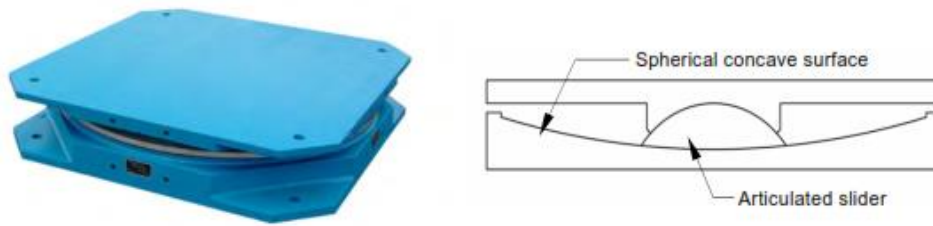


Figura 6 Aislador péndulo de fricción simple (Morgan & Mahin, 2011, pág. 22)

6.6. Análisis de Respuesta en el tiempo (Time History)

El análisis de respuesta en el tiempo, es un método de análisis estructural dinámico paso a paso, en el cual un modelo numérico de una estructura es sometido a la acción de un conjunto de acciones dinámicas (variables en el tiempo). Este tipo de análisis busca reproducir la respuesta más acertada de una estructura cuando esta está sometida a distintos tipos de excitaciones dinámicas que pueden ser sismos, vientos, oleajes, vibraciones de maquinaria ó tráfico. En dicha respuesta se pueden obtener parámetros de vital importancia en el análisis de una estructura y que son de interés para su diseño.

En un análisis Tiempo-Historia lineal podemos darnos una idea de cuánto tendrá que resistir nuestra estructura y por cuánto tiempo en estado de fluencia, siempre y cuando conozcamos el punto mencionado. Por ser lineal este análisis las condiciones de la estructura no cambiarán conforme va pasando el tiempo, por ello, aunque conozcamos el tiempo del desplazamiento máximo, si este está después del punto de fluencia será engañoso y posiblemente el punto de fluencia encuentre antes. Con un análisis Tiempo Historia no lineal, podremos darnos una idea más clara ya que incorpora las propiedades inelásticas de los materiales.

La principal diferencia es que el sismo, sólo puede ser modelado usando una función de historias en el tiempo, el cual implica una evaluación paso a paso de la respuesta del edificio.

Procedimiento para el análisis de respuesta en el tiempo en edificios aislados según ASCE 7-16.

Los análisis tiempo-historia se realizarán utilizando las dos componentes horizontales de registros de acelerogramas apropiadamente seleccionados y escalados a partir de los registros de no menos de 7 pares de eventos sísmicos, estos acelerogramas deben poseer las características de magnitud, distancia a la falla, mecanismos de falla y efectos del suelo, consistentes con aquellos parámetros que controlen el sismo de diseño.

Cuando no se disponga de al menos 7 eventos sísmicos, se utilizarán acelerogramas artificiales para generar el número de registros y de componentes requeridos.

Para cada par de componentes horizontales de los acelerogramas, debe construirse la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los espectros característicos del sitio, para una fracción del amortiguamiento respecto al crítico de 5,00%.

Los acelerogramas deben ser escalados de tal forma que el valor promedio de los espectros provenientes de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los espectros de los registros no se encuentre por debajo del espectro de aceleraciones amortiguado al 5% del sismo de diseño para períodos entre $0.75 T_{lower}$ y $1.25 T_{upper}$

Selección de Registros Sísmicos.

Actualmente, existe un gran número de registros reales disponibles en bases de datos en internet. Esto facilita la identificación de registros que cumplan con las características sismogénicas definidas como deseables. Sin embargo esta abundancia de registros dificulta la selección objetiva e imparcial de registros. Esto

lleva a que el proceso de selección sea más aleatorio. Si bien es cierto que existen muy pocas directrices que guíen en el proceso de selección de registros, el realizar la búsqueda basándose en un espectro de diseño específico o en función de un registro en particular puede generar una mejor coherencia en la selección de los registros. Para este proceso de selección se hizo uso del espectro de diseño establecido por el reglamento nacional de la construcción (RNC-07). En la figura 7 se muestra el proceso de búsqueda de registros, mientras que en la tabla 1 se muestra un resumen de los registros seleccionados.

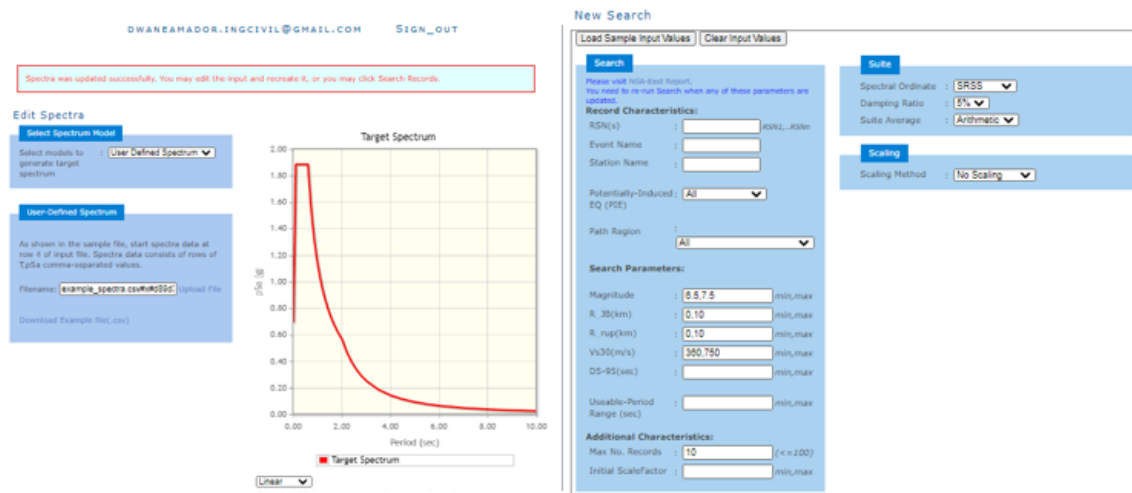


Figura 7. Selección de Registros Sísmicos en PEER

Tabla 1 Lista de Registros seleccionados

N°	Evento	Estación	Año	Magnitud	Mecanismo	Vs30 (m/sec)	Rjb (km)	Rrup (km)
1	"Managua_Nicaragua-01"	"Managua_ESSO"	1972	6.24	strike slip	288.77	3.51	4.06
2	"Imperial Valley-02"	"El Centro Array #9"	1940	6.95	strike slip	213.44	6.09	6.09
3	"Parkfield"	"Cholame - Shandon"	1966	6.19	strike slip	289.56	9.58	9.58
4	"Victoria_Mexico"	"Victoria Hospital So"	1980	6.33	strike slip	242.05	6.07	7.27
5	"Kobe_Japan"	"KJMA"	1995	6.9	strike slip	312	0.94	0.96
6	"Superstition Hills-02"	"Parachute Test Site"	1987	6.54	strike slip	348.69	0.95	0.95
7	"Morgan Hill"	"Anderson Dam (Dov"	1984	6.19	strike slip	488.77	3.22	3.26

Filtrado y corrección de línea base.

Una vez seleccionado los registros es necesario someterlos a un proceso de filtrado que reduzca los efectos generados por señales externas al evento sísmico y que influyen en el comportamiento de las demandas sísmicas. Para realizar el filtrado y corrección de línea base se hizo uso del software SeismoSignal 4.3. En la figura 8 se muestra un ejemplo del filtrado en uno de los registros sísmicos.

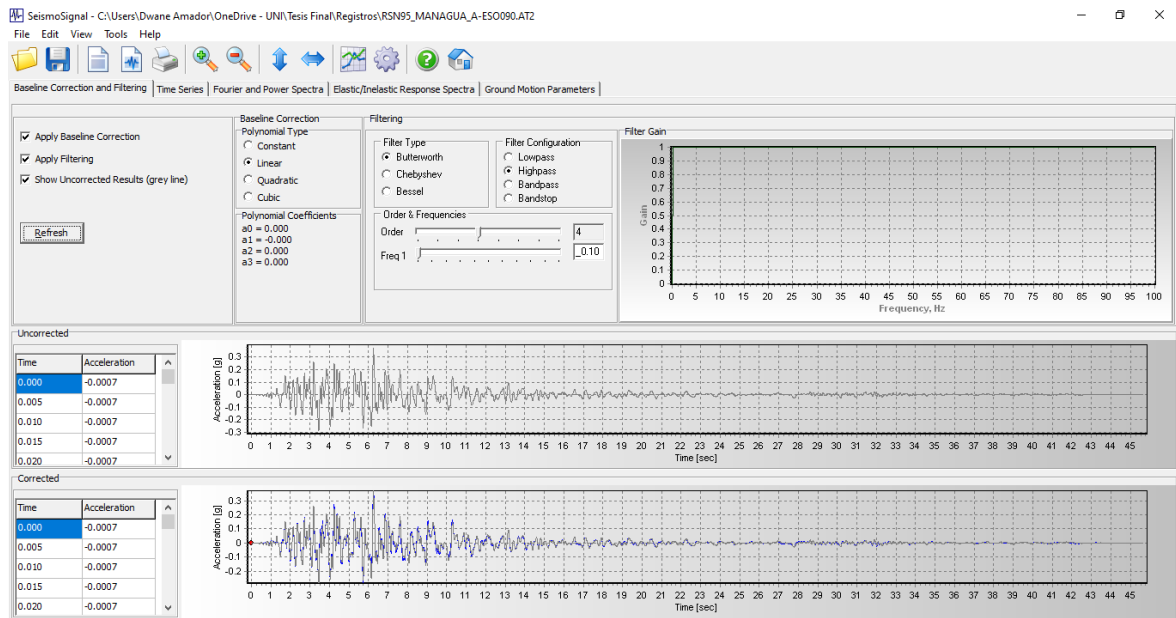


Figura 8. Proceso de filtrado y corrección de registros. SeismoSignal 4.3

Escalado de registros a espectro de diseño.

Una vez seleccionados y filtrados los registros sísmicos, es necesario escalar dichos registros de manera que se ajusten a la intensidad de los terremotos esperados para el emplazamiento específico del proyecto en estudio. En general este ajuste consiste en aplicar de factores de escala lineales de manera que el espectro de aceleraciones de los registros se ajuste al espectro de diseño definido por la normativa utilizada en un rango de periodos cercanos al periodo natural de la estructura.

El procedimiento del escalamiento se realizó en el software ETABS V17 tomando como espectro objetivo el espectro de diseño del RNC-07. En la figura 9 se muestra un ejemplo del proceso de escalamiento.

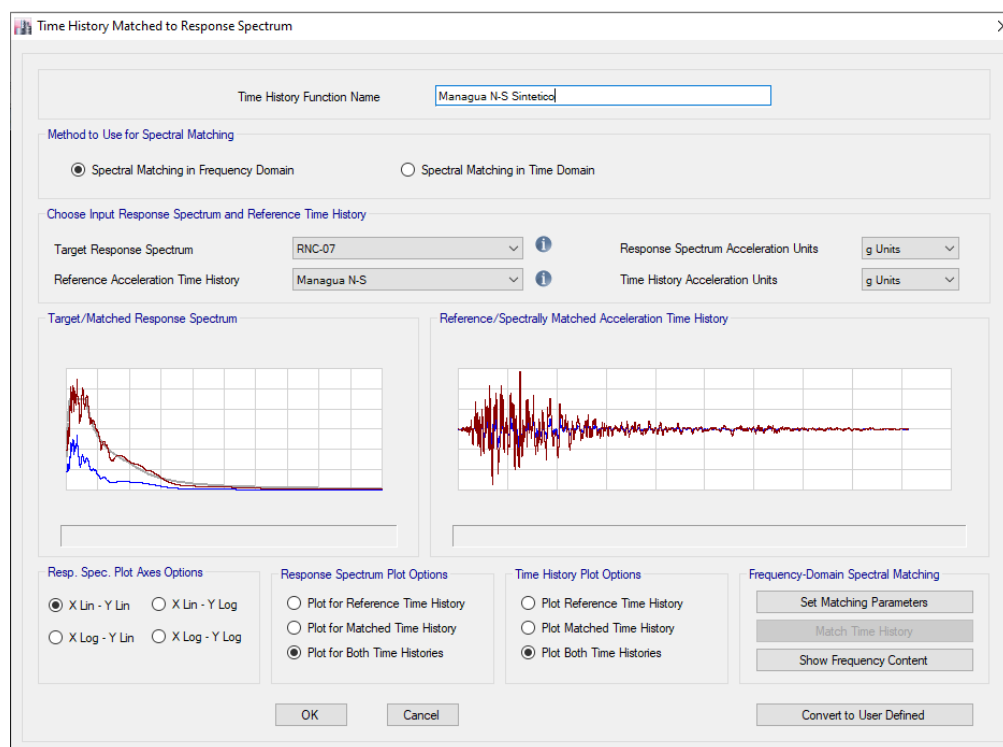


Figura 9. Proceso de escalamiento de registros al espectro de diseño seleccionado. ETABS V17

7. Modelado Estructural.

Para el estudio se analizarán 4 modelos principales:

- Modelo convencional o con base rígida.
- Modelo con base aislada.
- Modelo con aislamiento múltiple o doble interfase (base aislada + aislación en piso intermedio).
- Piso intermedio aislado.

Dado que el enfoque del sistema va a dirigido a estructuras del tipo esencial, de los cuales se espera un nivel de desempeño de ocupación inmediata, los 4 modelos serán sometidos a las mismas demandas y se espera que los 4 modelos alcancen el mismo nivel de servicio que será controlado a partir de las distorsiones de entrepiso y aceleraciones de piso. Para que la comparación sea válida se plantea un modelo de base rígida en sobrerresistencia.

7.1. Descripción general del Modelo.

El modelo del edificio de análisis es ficticio y tiene una geometría regular y será asignado a uso hospitalario, estructurado a base de Marcos con un núcleo de muros de concreto en la zona de elevadores y escaleras y muros de corte en los extremos de una dirección del edificio.

7.2. Ubicación del edificio y características del suelo.

El edificio se emplazará en Managua y a falta de datos de estudios de suelos, se tomará un suelo tipo 2 según el reglamento nacional de la construcción (RNC-07).

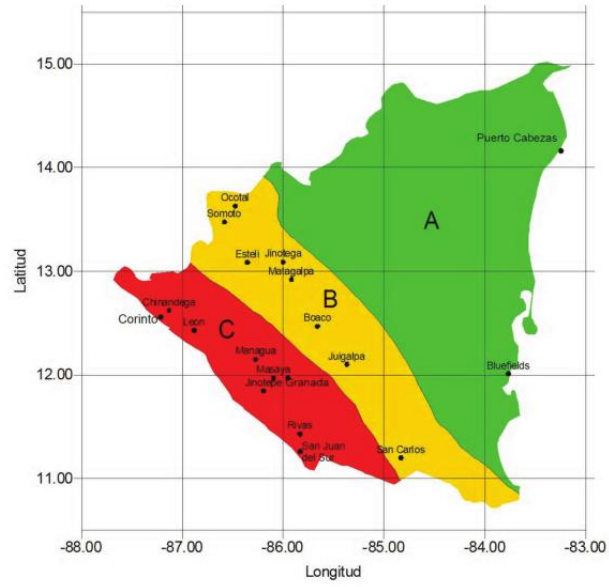


Figura 10. Mapa de zonificación sísmica. (RNC-07)

Tabla 2. Clasificación de Suelos (RNC-07)

Zona Sísmica	Tipo de suelo		
	I	II	III
A	1.0	1.8	2.4
B	1.0	1.7	2.2
C	1.0	1.5	2.0

7.3. Geometría del Modelo.

El edificio tiene una planta regular 31 m x 20.5 m, con un área total en planta de 635.5 m². En secciones de columnas se tiene un total 12.54 m², correspondiente al 1.97% del total de la planta. En muros se tiene 47.6 m lineales, con un área de 14.16 m², siendo el 2.22% del total de la planta. La altura del edificio es de 68.8 m, con un total de 20 niveles.

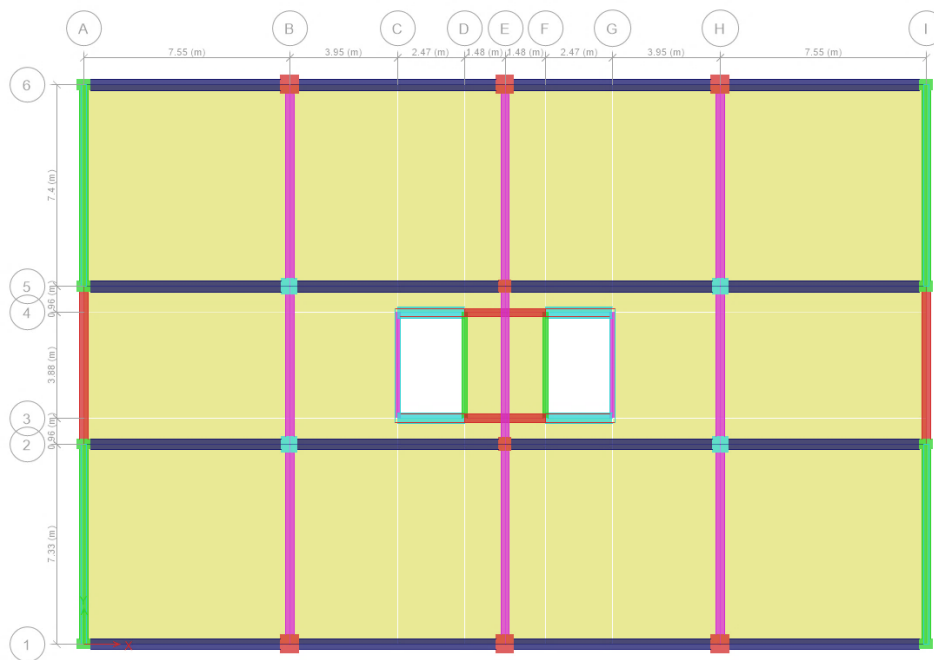


Figura 11. Planta de edificio

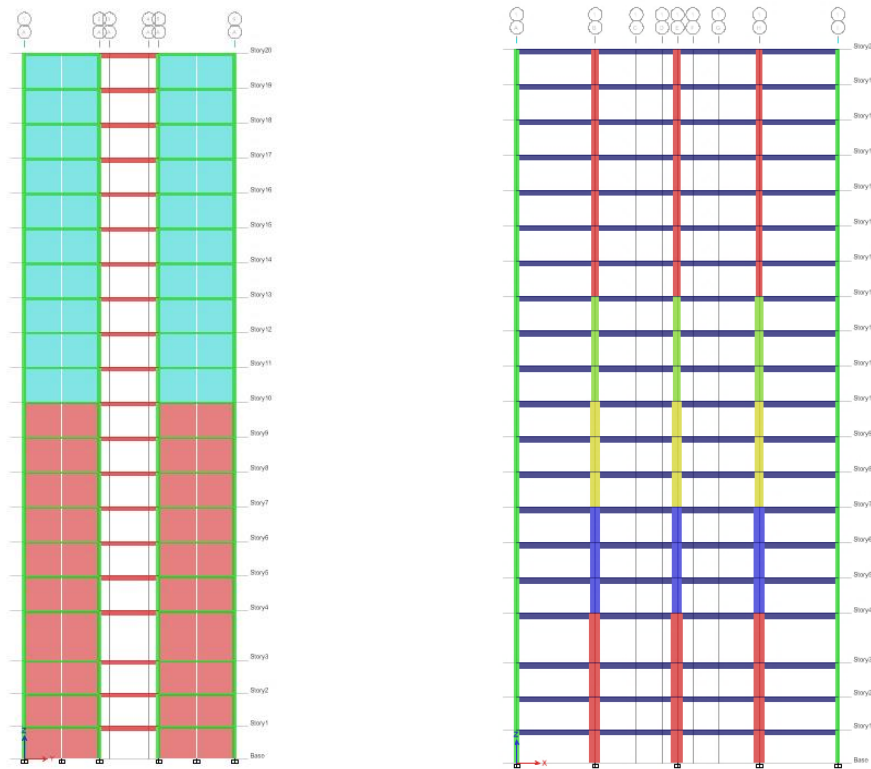


Figura 12. Elevaciones del edificio

7.4. Propiedades de los materiales del sistema Estructural.

Las propiedades de los materiales que componen las vigas, columnas y muros son:

a) Concreto

Resistencia a la compresión a los 28 días del concreto $F'_c=350 \text{ Kg/cm}^2$ y un peso específico de 2400 Kg/m^3 .

b) Acero de Refuerzo

Se utilizó acero A630-420H con $F_y=4200 \text{ Kg/cm}^2$ y una resistencia última $F_u=6300 \text{ Kg/cm}^2$ y un peso específico de 7800 kg/m^3 .

7.5. Secciones de los elementos estructurales.

Se utilizaron dos secciones de vigas, una de 40 x 60 cm correspondiente al eje X y otra de 30x60 cm en el eje Y. Se utilizaron secciones cuadradas de columnas, con dimensiones en la base de 110 cm, de 100 cm y de 80 cm. Las tres secciones de columnas se reducen en 10 cm cada cierto número de niveles, terminando en secciones de 70 cm, 60 cm y 50 cm respectivamente.

Con respecto a los muros, se tienen 2 tipos de muros, uno longitudinal con un ancho de 30 cm en los primeros 10 niveles y de 20 cm en los últimos 9 niveles con columnas de borde; y otro muro en forma de "C" con alas de 40 cm y un alma de 20 cm en los primeros 10 niveles, en el resto de niveles se reduce el ala a 30 cm y el alma se mantiene en 20 cm. Las secciones de los elementos se detallan en la tabla 3.

Tabla 3 Dimensiones de Columnas

Dimensiones de columnas por Niveles(cm)												
Nivel	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
N1	110	100	100	110	110	80	80	110	110	100	100	110
N2	110	100	100	110	110	80	80	110	110	100	100	110
N3	110	100	100	110	110	80	80	110	110	100	100	110
N4	110	100	100	110	110	80	80	110	110	100	100	110
N5	100	90	90	100	100	70	70	100	100	90	90	100
N6	100	90	90	100	100	70	70	100	100	90	90	100
N7	100	90	90	100	100	70	70	100	100	90	90	100
N8	90	80	80	90	90	60	60	90	90	80	80	90
N9	90	80	80	90	90	60	60	90	90	80	80	90
N10	90	80	80	90	90	60	60	90	90	80	80	90
N11	80	70	70	80	80	60	60	80	80	70	70	80
N12	80	70	70	80	80	60	60	80	80	70	70	80
N13	80	70	70	80	80	60	60	80	80	70	70	80
N14	70	60	60	70	70	50	50	70	70	60	60	70
N15	70	60	60	70	70	50	50	70	70	60	60	70
N16	70	60	60	70	70	50	50	70	70	60	60	70
N17	70	60	60	70	70	50	50	70	70	60	60	70
N18	70	60	60	70	70	50	50	70	70	60	60	70
N19	70	60	60	70	70	50	50	70	70	60	60	70
N20	70	60	60	70	70	50	50	70	70	60	60	70

8. Análisis Estructural.

8.1. Análisis del modelo en base fija.

En esta sección se describe los criterios empleados para el desarrollo y análisis del modelo matemático con base fija, el cual es el punto de partida para la comparación de los análisis posteriores con aislamiento convencional y en doble interface.

Para el análisis modal espectral se hizo uso del espectro de diseño establecido en el reglamento nacional de la construcción (RNC-07) y para el análisis de respuesta en el tiempo se hizo uso de 7 juegos de eventos sísmicos debidamente escalados al espectro de diseño tal y como se recomienda en la norma ASCE 7-16 en su capítulo 17 y tomando la respuesta promedio de los 7 registros utilizados.

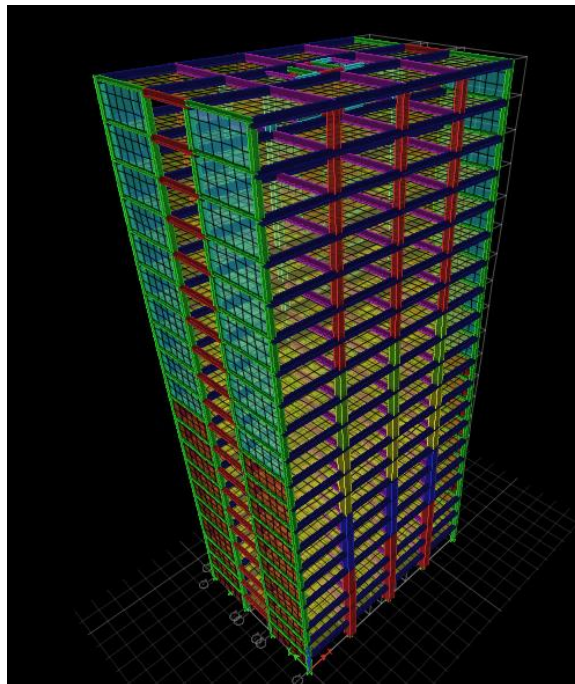


Figura 13 Modelo Matemático ETABS v 17

Suposiciones del modelo matemático.

- a) La masa sísmica está definida como el 100% de la carga muerta, el 100% de la sobre carga muerta y el 50% de la carga viva.
- b) Se considera diafragma rígido en los sistemas de entrepiso
- c) El edificio se considera totalmente empotrado en la base, no se considera interacción suelo-estructura.
- d) Dado que se considera un edificio regular se toma el 10% de excentricidad accidental.

Amortiguamiento del modelo.

El amortiguamiento utilizado en este modelo fue amortiguamiento tipo Rayleigh, en el cual se definieron sus valores de masa y rigidez proporcional respecto al primer y tercer modos de la estructura, asignando un 5% de amortiguamiento crítico cada uno de los modos.

Modos de vibración de la estructura en base fija.

El primer Modo corresponde en la dirección X con un periodo de $T_1= 1.87$ seg, el segundo modo es en la dirección Y con un periodo de $T_2=1.619$ seg y el tercer modo es torsional de $T_3=1.277$ seg. En la tabla 4 se detallan los periodos y los factores de participación modal del modelo.

Tabla 4 Periodos y participación de masas para el modelo convencional

Modos	Periodos	SUM UX	SUM UY	RUM RZ
1	1.87	0.7427	0	7.794E-07
2	1.619	0.7427	0.6643	1.147E-06
3	1.277	0.7428	0.6643	0.6696
4	0.615	0.8657	0.6643	0.6696
5	0.414	0.8657	0.8278	0.6696
6	0.338	0.8657	0.8278	0.8255
7	0.329	0.9064	0.8278	0.8255
8	0.217	0.9309	0.8278	0.8255
9	0.181	0.9309	0.8918	0.8255
10	0.157	0.9495	0.8918	0.8255
11	0.149	0.9495	0.8918	0.8896
12	0.121	0.9638	0.8918	0.8896
13	0.106	0.9638	0.9266	0.8897
14	0.097	0.9724	0.9266	0.8897
15	0.087	0.9724	0.9266	0.9256
16	0.079	0.9773	0.9266	0.9256
17	0.072	0.9773	0.9492	0.9256
18	0.065	0.9802	0.9492	0.9256
19	0.059	0.9802	0.9492	0.9484
20	0.055	0.9826	0.9492	0.9484

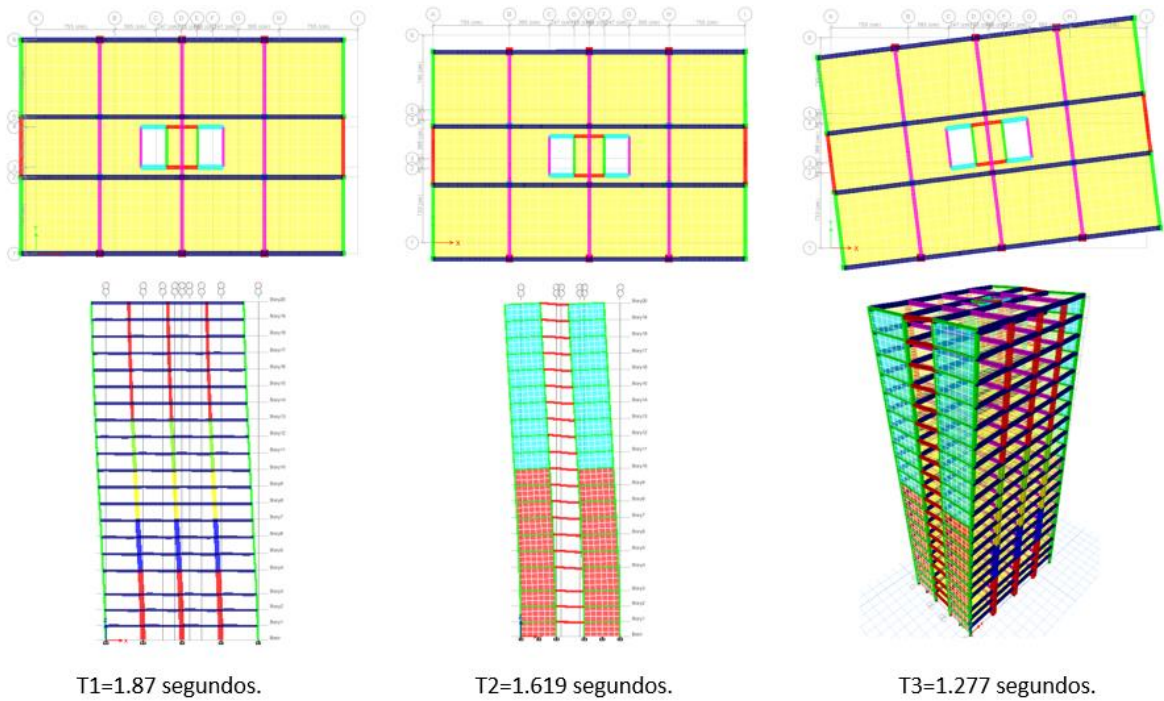
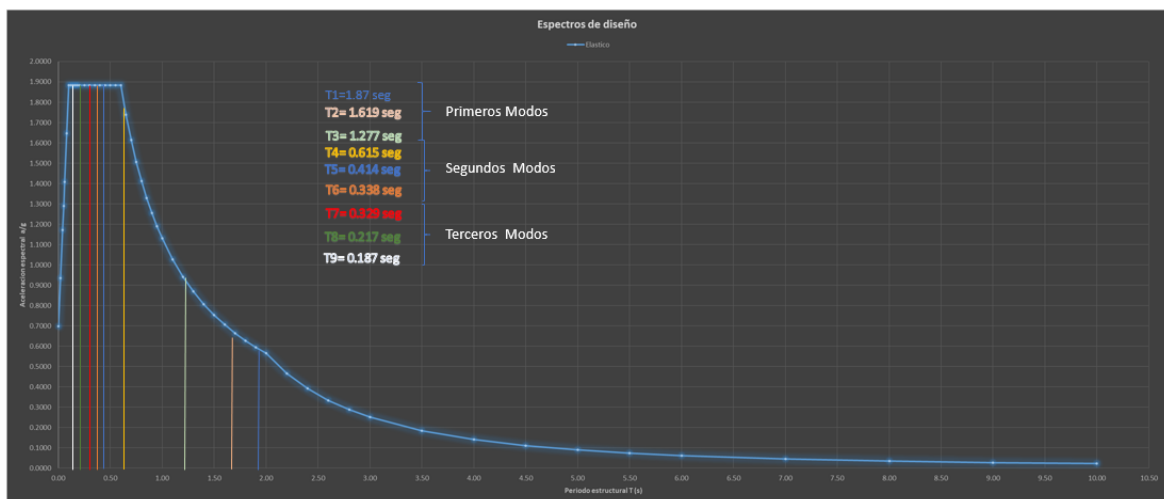


Figura 14. Modos de Vibración en Modelo Convencional. ETABS v17

Como se logra notar en la gráfica 1, los segundos y terceros modos están dentro de la meseta del espectro de diseño por lo que se puede considerar que estos modos superiores están influenciando el comportamiento de la estructura y que las aceleraciones de los pisos se verán afectadas por el aporte de los modos superiores en el edificio con base fija. Y dado que se trata de un edificio hospitalario es de vital importancia mantener las aceleraciones controladas para que no se vean afectados los elementos no estructurales.



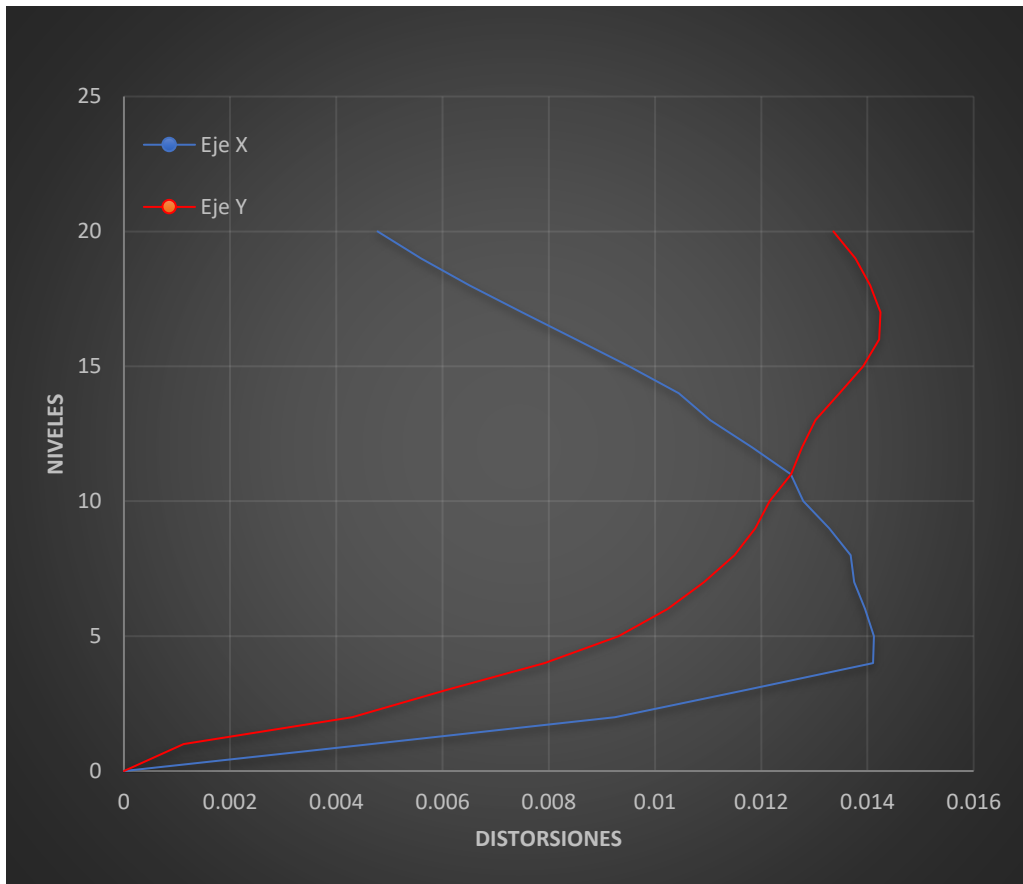
Gráfica 1 Periodos vs Espectro de diseño. Modelo Convencional

8.1.1. Resultados del análisis respuesta en el tiempo en el edificio convencional.

Distorsiones de entrepiso.

Las distorsiones de entrepiso o story drift ratio son un parámetro importante de diseño debido a que está relacionado de manera muy directa con el daño a elementos estructurales y no estructurales, por lo tanto, su eficiencia en este aspecto se traduce en una mayor protección de la estructura.

En la gráfica 2 se muestra el comportamiento de las derivas en cada uno de los niveles. En el comportamiento de la curva se nota como influyen las formas de los modos superiores.



Gráfica 2 Distorsiones de Entrepiso Modelo Convencional.

El reglamento nacional de la construcción (RNC-07) en su artículo 34 inciso **c** estipula unas derivas máximas permisibles para condiciones de servicio de 0.002 pero no considera el aislamiento sísmico por lo que es necesario avocarse a una normativa internacional. La normativa ASCE7-16 en su capítulo 17 establece valores máximos permisibles de distorsiones que varían entre 0.015 y 0.020. La norma chilena Nch 2745 2013 en su capítulo 8 establece valores máximos permisibles entre 0.0025 y 0.003. La distante diferencia entre ambas normativas se debe a que la normativa chilena trabaja con la sección bruta y no agrietada. Puesto que los valores de la norma chilena se asemejan un poco más a los valores de la normativa nicaragüense en condiciones de servicio se adoptó 0.002 como el valor máximo permisible para el presente documento.

Tabla 5 Distorsiones de Entrepiso. Modelo Convencional

Niveles	Altura de Piso (cm)	Desplazamiento en X (cm)	Distorsión en el eje X	Chequeo
Story20	340	72.8237	0.004777647	No Cumple
Story19	340	71.1993	0.005596765	No Cumple
Story18	340	69.2964	0.006504118	No Cumple
Story17	340	67.085	0.007495882	No Cumple
Story16	340	64.5364	0.008515588	No Cumple
Story15	340	61.6411	0.009510588	No Cumple
Story14	340	58.4075	0.010448235	No Cumple
Story13	340	54.8551	0.011036471	No Cumple
Story12	340	51.1027	0.011827353	No Cumple
Story11	340	47.0814	0.012556471	No Cumple
Story10	340	42.8122	0.012789412	No Cumple
Story9	340	38.4638	0.013282941	No Cumple
Story8	340	33.9476	0.013682647	No Cumple
Story7	340	29.2955	0.013751471	No Cumple
Story6	340	24.62	0.013956765	No Cumple
Story5	340	19.8747	0.014122353	No Cumple
Story4	480	15.0731	0.014105208	No Cumple
Story3	320	8.3026	0.011715	No Cumple
Story2	320	4.5538	0.009246875	No Cumple
Story1	320	1.5948	0.00465625	No Cumple
Base	0	0.1048	0	

Niveles	Altura de Piso (cm)	Desplazamiento en Y (cm)	Distorsión en el eje Y	Chequeo
Story20	340	76.2566	0.013357941	No Cumple
Story19	340	71.7149	0.013772941	No Cumple
Story18	340	67.0321	0.014054412	No Cumple
Story17	340	62.2536	0.014245882	No Cumple
Story16	340	57.41	0.014219706	No Cumple
Story15	340	52.5753	0.013922059	No Cumple
Story14	340	47.8418	0.013471765	No Cumple
Story13	340	43.2614	0.013022647	No Cumple
Story12	340	38.8337	0.012766176	No Cumple
Story11	340	34.4932	0.012560882	No Cumple
Story10	340	30.2225	0.012157941	No Cumple
Story9	340	26.0888	0.01189	No Cumple
Story8	340	22.0462	0.011496765	No Cumple
Story7	340	18.1373	0.010924412	No Cumple
Story6	340	14.423	0.010234412	No Cumple
Story5	340	10.9433	0.009316471	No Cumple
Story4	480	7.7757	0.007923333	No Cumple
Story3	320	3.9725	0.00606875	No Cumple
Story2	320	2.0305	0.004301875	No Cumple
Story1	320	0.6539	0.00112375	Cumple
Base	0	0.2943	0	

Como se puede apreciar en la tabla 5, la distorsión permisible en la estructura de base fija excede los 0.002 que establece el reglamento hasta en un 706%.

Aceleraciones por piso.

La aceleración de entrepiso es importante en edificaciones de uso hospitalario debido al alto costo que representa el contenido y equipamiento en general con relación al costo total del edificio.

Los ingenieros Shahram Taghavi y Eduardo Miranda en su estudio del 2003 titulado “**Response Assessment of Nonstructural Buildings Elements**”, establecen que el costo de los elementos no estructurales que conforman una edificación hospitalaria asciende hasta en un 80% el costo total de la edificación. Por lo que es de vital importancia el control de las aceleraciones de entrepiso para asegurar el funcionamiento del hospital ante un evento adverso.

Múltiples investigaciones establecen que las aceleraciones permisibles máximas para evitar afectaciones en los elementos no estructurales deben ser no mayores al 30% de la aceleración de la gravedad. Dado que el hospital es una edificación que debe mantenerse funcionando antes durante y después del evento sísmico, se establece en esta investigación un límite más conservador del 20% de la aceleración de la gravedad.

Tabla 6 Aceleraciones de Piso. Modelo Convencional

Nivel	Aceleración en X (g)	Chequeo	Aceleración en Y (g)	Chequeo
Story20	1.462477064	No Cumple	1.881916412	No cumple
Story19	1.228287462	No Cumple	1.51930683	No cumple
Story18	1.103863405	No Cumple	1.258267074	No cumple
Story17	0.971478084	No Cumple	0.964352701	No cumple
Story16	0.974862385	No Cumple	0.955657492	No cumple
Story15	1.052222222	No Cumple	0.87637105	No cumple
Story14	1.069337411	No Cumple	0.923231397	No cumple
Story13	0.939582059	No Cumple	0.9772579	No cumple
Story12	0.76911315	No Cumple	0.999979613	No cumple
Story11	0.693200815	No Cumple	0.997635066	No cumple
Story10	0.813690112	No Cumple	1.00783894	No cumple
Story9	0.944964322	No Cumple	0.963333333	No cumple
Story8	0.851569827	No Cumple	0.918450561	No cumple
Story7	0.941926606	No Cumple	0.97146789	No cumple
Story6	0.979164118	No Cumple	1.036248726	No cumple
Story5	0.798022426	No Cumple	1.042966361	No cumple
Story4	0.741325178	No Cumple	0.960570846	No cumple
Story3	0.899928644	No Cumple	0.912782875	No cumple
Story2	0.939021407	No Cumple	0.838012232	No cumple
Story1	0.81861366	No Cumple	0.835769623	No cumple
Base	0.840876656	No Cumple	1.340234455	No cumple

Como se puede apreciar en la tabla 6, las aceleraciones de entrepiso exceden hasta en 731% los 0.2 g que se estableció como la aceleración máxima permisible.

Cortante de Pisos

Como se aprecia en la tabla 7 el cortante basal máximo tiene una magnitud de 5891.3246 tonf en el eje X, mientras que en el eje Y se tiene un valor máximo de 8214.3784 tonf.

Tabla 7 Cortantes de Piso. Modelo Convencional

Nivel	Cortante en X(tonf)	Cortante en Y(tonf)
Story20	857.1453	1029.7979
Story19	1662.4304	2050.7812
Story18	2434.0389	2897.9881
Story17	3099.8015	3566.016
Story16	3653.7103	4054.8633
Story15	4091.8208	4431.3339
Story14	4400.0096	4659.5284
Story13	4581.9798	4803.1207
Story12	4664.2539	4819.2231
Story11	4699.7247	4921.6265
Story10	4871.0303	5292.9534
Story9	5147.4896	5576.352
Story8	5410.3964	5941.7645
Story7	5603.2355	6385.5364
Story6	5713.4002	6873.489
Story5	5702.2214	7298.9286
Story4	5843.3739	7683.911
Story3	5902.1028	7930.8873
Story2	5913.7887	8099.0125
Story1	5891.3246	8214.3784
Base	0	0

8.2. Edificio con Base Aislada

En esta sección se describe los criterios empleados para el desarrollo y análisis del modelo matemático con base aislada, cuyo objetivo será disminuir los esfuerzos generados en la estructura con base rígida y lograr un comportamiento lineal en la súper estructura.

Los sistemas de aislamiento tienen como propósito fundamental reducir la demanda de aceleraciones mediante el incremento del periodo de vibración del sistema, alejándolo de la zona en la que se concentra la energía sísmica. De esta manera, los sistemas de aislamiento constituyen una alternativa atractiva para mejorar la respuesta sísmica de estructuras nuevas y en proyectos de rehabilitación de estructuras.

El aislamiento sísmico consiste fundamentalmente en apoyar la estructura sobre una base suficientemente flexible, que filtra las frecuencias altas del movimiento y alarga el periodo natural de vibración de la estructura. Si, además, el aislador está equipado con un disipador de energía, como en el caso de los apoyos laminados con un elemento de plomo insertado en el centro (ALNP), la mayor parte de la energía se disipa en el elemento aislador – disipador, en vez de hacerlo a través del daño estructural de los elementos que constituyen la estructura, lo que incrementa la eficiencia del sistema.

Requisitos del modelamiento para base aislada

En general, el sistema de aislamiento debe tener las siguientes características:

- a) Tener capacidad para modificar el periodo de vibración del sistema de forma que efectivamente se reduzcan las ordenadas de los espectros.
- b) Contar con la suficiente rigidez y resistencia vertical para soportar las acciones permanentes y accidentales.

- c) Tener suficiente rigidez para limitar los desplazamientos laterales bajo condiciones de servicio tales como sismos frecuentes, efectos de viento, etc.
- d) Contar con una fuerza de recuperación o capacidad de auto centrarse después de la deformación.
- e) Tener suficiente estabilidad vertical y capacidad rotacional bajo las condiciones de servicio y extremas.
- f) Que su fuerza y desplazamiento de fluencia sean apropiados para reducir efectivamente la respuesta de la estructura.
- g) Que su capacidad de desplazamiento último y comportamiento antes del colapso sean apropiados para el sistema en el que se pretende utilizar.
- h) Que su comportamiento no se vea afectado significativamente por efecto de las condiciones ambientales, temperatura y envejecimiento.

Para este análisis se hará uso de los mismos registros sísmicos utilizados en el edificio convencional.

El objetivo de utilizar aislamiento sísmico en este estudio es lograr un comportamiento de aislamiento total, lo que equivale a un comportamiento de la súper estructura totalmente lineal llevando el periodo de la estructura aislada mínimo a 2.5 veces el periodo de la estructura con base fija. Así como también reducir el efecto de los modos superiores en la estructura.

Ubicación de los aisladores.

El modelo matemático del sistema con base aislada está representado por dos secciones, la primera sección llamada superestructura, la cual es similar al modelo matemático de base rígida, con la salvedad que se añade un piso rígido en el nivel 0.00, con la función de transmitir los efectos sísmicos de la base aislada a la superestructura.

La segunda sección es el sistema de aislación basal, su modelo matemático está compuesto por los elementos que representan las relaciones constitutivas fuerza-deformación de los aisladores. La representación gráfica del modelo de base aislada se detalla en la Figura 15.

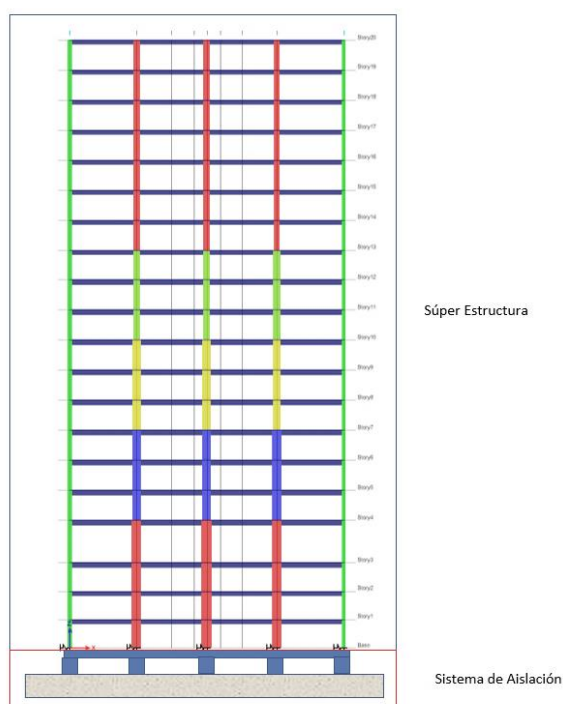


Figura 15. Modelo de Base Aislada. ETABS v17

La geometría del edificio determinó en este caso la ubicación de los aisladores, al tener en su mayoría columnas aisladas, se colocará un aislador en cada columna como apoyo de éstas, adicionalmente, en los muros de concreto se añaden aisladores.

Una correcta distribución de los aisladores depende esencialmente de la carga gravitacional, la cual debe ser distribuida de forma uniforme. Realizando un análisis para conocer la fuerza axial atribuida a cada aislador, se determinó manejar 3 grupos de aisladores, en el que cada grupo se le asigna un diámetro diferente para lograr que los aisladores estén sometidos al mismo esfuerzo gravitacional. En la figura 16 se aprecia la distribución de los aisladores.

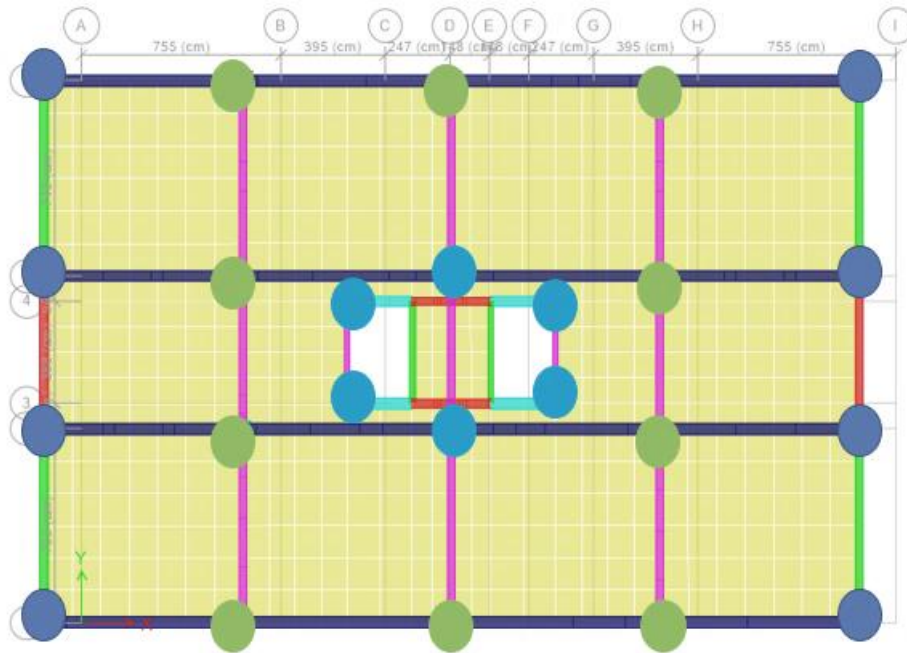


Figura 16. Distribución en Planta de los grupos de aisladores

1.1.1. Definición del sistema aislado con Apoyo Laminado con Núcleo de Plomo (ALNP)

Los apoyos laminados con núcleo de plomo (ALNP) normalmente son contruidos con hule natural de bajo amortiguamiento, con una o más perforaciones en las cuales se coloca un elemento de plomo. Estos aisladores ALNP son elementos con múltiples capas de hule y acero, donde las láminas de acero proveen la rigidez vertical del sistema y las capas de hule la rigidez lateral. Los ALNP tienen características mecánicas que aseguran un buen comportamiento bajo cargas de

servicio. Las características de comportamiento del ALNP constituyen una fuerza y amortiguamiento no lineal. La figura 17 se detalla de forma esquemática un aislador ALNP.

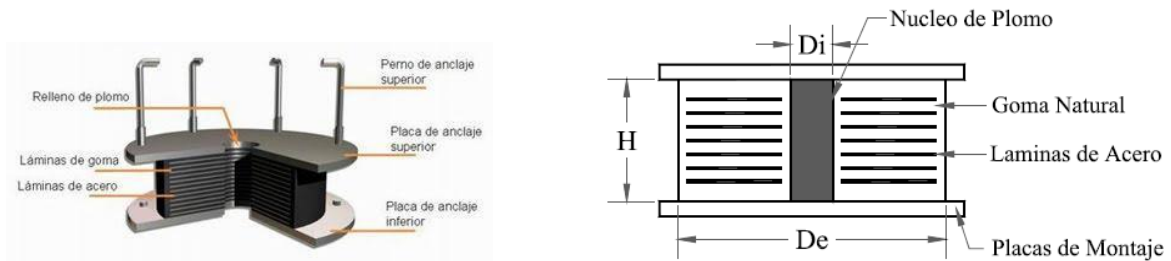


Figura 17 Esquema de Apoyo Laminado con Núcleo de Plomo (ALNP)

Goma usado en los aisladores.

La goma usada en los aisladores tiene una dureza “Shore” comprendida entre 37 y 60, con las propiedades listadas en la Tabla 8. La constante del material ajusta las ecuaciones analíticas con los resultados experimentales y se obtiene experimentalmente.

Tabla 8. Propiedades básicas de la goma extraída de catálogo.

Dureza Shore	Módulo de Elasticidad Kg/cm ²	Módulo de cortante Kg/cm ²	Constante del material K	Deformación mínima de ruptura %
37	13.75	4.07	0.87	650
40	15.28	4.58	0.85	600
45	18.34	5.5	0.8	600
50	22.41	6.52	0.73	500
5	33.11	8.25	0.64	500
60	45.34	10.8	0.57	400

Definición de las propiedades ALNP

Para el diseño del ALNP se debe determinar su rigidez lateral, rigidez lateral efectiva, fuerza de auto centrado, capacidad de carga contra el pandeo, rigidez vertical, deformaciones máximas, amortiguamiento efectivo, tensiones de placas intermedias y frecuencia vertical.

Rigidez lateral.

Los ALNP tienen una relación Fuerza-Deformación No Lineal. En la figura 18 se muestra un ciclo histerético típico para un ALNP.

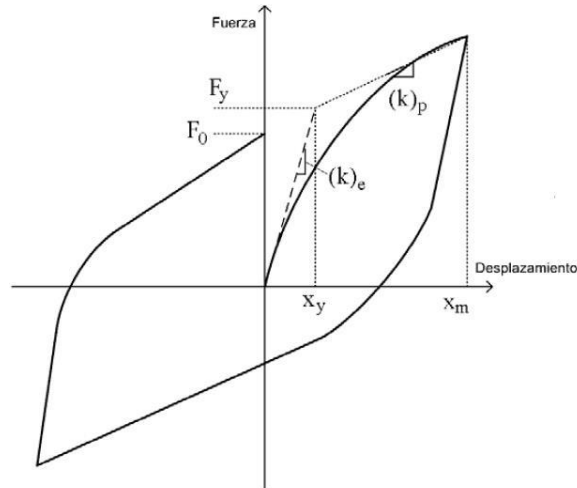


Figura 18 Ciclo histerético para aislador de goma con núcleo de plomo

Los parámetros de la curva histerética del ALNP son la fuerza de fluencia del ALNP F_y , la cual se determina con la ecuación:

$$F_y = \sigma_y A_{pl} \quad (1)$$

Donde

- σ_y es el esfuerzo de fluencia a cortante del plomo, que se puede suponer 91.71 kg/cm^2 .
- A_{pl} es el área de la sección transversal del corazón de plomo.
- De la ecuación anterior se aprecia que, a mayor diámetro del núcleo de plomo, se obtendrá mayor fuerza de fluencia.
- La fuerza F_0 para desplazamiento nulo está dada aproximadamente por $F_0 = 0.9F_y$

La rigidez elástica $(k)_e$ se calcula con la ecuación 2:

$$(k)_e = \frac{100GA_b}{T_r} \quad (2)$$

Donde:

- A_b es el área efectiva del apoyo en planta, descontando el área del corazón de plomo.
- T_r es el espesor total de las capas de hule.
- G es el módulo de cortante.
- El área efectiva del apoyo en planta A_b se obtiene con la ecuación 3:

$$A_b = \frac{\pi(D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{4} \quad (3)$$

La rigidez post fluencia $(k)_p$ se obtiene con:

$$(k)_p = \frac{1.1GA_b}{T_r} \quad (4)$$

Si se relaciona las ecuaciones de rigidez elástica y rigidez post fluencia se obtiene un factor de 0.11, sin importar cualquier cambio en la geometría o propiedades del ALNP. El desplazamiento de fluencia x_y es igual a:

$$x_y = \frac{F_y}{(k)_e} \quad (5)$$

Rigidez lateral efectiva.

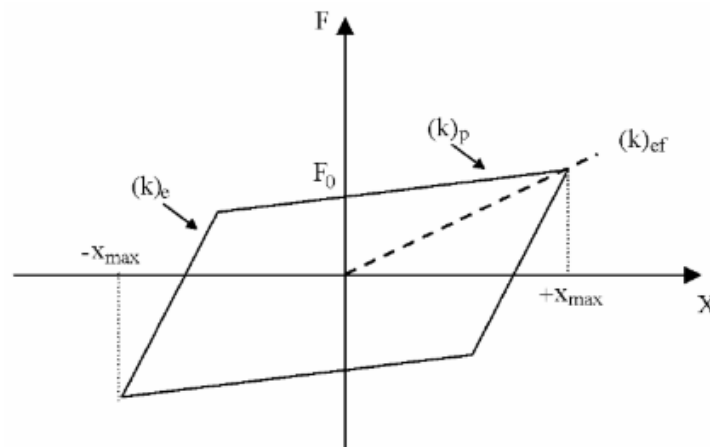


Figura 19 Rigidez lateral efectiva

En la figura 19 se muestran los parámetros con los que se determina la rigidez efectiva $(k)_{ef}$, cuyo ciclo histérico es bilineal. El sistema tiene una rigidez inicial $(k)_e$, una rigidez inelástica $(k)_p$, una rigidez secante relacionada al desplazamiento máximo $(k)_{ef}$ y una fuerza característica F_0 , correspondiente a un desplazamiento cero. A partir de relaciones geométricas, se encuentra que la rigidez equivalente del aislador $(k)_{ef}$, correspondiente a desplazamiento de diseño es:

$$(k)_{ef} = (k)_e \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu} \quad (6)$$

Donde:

μ es la ductilidad del aislador, definida como el desplazamiento x_{max} del aislador, y se obtiene de la ecuación siguiente:

$$\mu = \frac{x_{max}}{x_y} \quad (7)$$

Y α representa la relación de la rigidez inelástica entre la rigidez elástica:

$$\alpha = \frac{(k)_p}{(k)_e} \quad (8)$$

Fuerza de auto centrado.

Es de vital importancia que el sistema de aislamiento cuente con un mecanismo que le permita regresar a su posición inicial una vez terminado el movimiento. De esta forma se evita la necesidad de regresar a la estructura a su posición inicial una vez que haya cesado el movimiento. Por otro lado, si el sistema no cuenta con una capacidad de auto centrado, su posición durante el movimiento puede afectar la respuesta y el comportamiento esperado del sistema. Algunas normativas recomiendan que el sistema de una fuerza de recuperación tal que el periodo calculado con la rigidez tangente correspondiente al desplazamiento de diseño sea menor a 6 segundos, esto se logra con la ecuación 9.

$$\Sigma(k)_p \geq \frac{4\pi^2 W}{36g} \quad (9)$$

Además, se recomienda que el conjunto de los apoyos ALNP deberá contar con una rigidez post fluencia mínima tal que garantice el auto centrado de la estructura después de la ocurrencia de un evento sísmico, satisfaciendo la ecuación 10.

$$\Sigma(k)_p \geq 0.05 \frac{W}{x_{max}} \quad (10)$$

Donde

- W es el peso total de la estructura en condiciones de servicio
- x_{max} es el desplazamiento máximo de los ALNP

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 11. Cuando existe desplazamiento lateral, la condición crítica de pandeo de los ALNP depende del tipo de conexión del apoyo con la estructura, es decir, de si estos pueden soportar cortante y momento flexionante ó únicamente cortante. Para el caso de apoyos que se ven sometidos a cortante y flexión, la carga crítica para el apoyo desplazado se calcula con la ecuación 15. Cuando los apoyos se instalan para que únicamente trabajen a cortante, éstos pueden experimentar un levantamiento parcial, y el desplazamiento que los vuelve inestables se calcula con la ecuación 18.

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 E_c I G A_b}{3T_r^2}} \quad (11)$$

Donde:

- I es el momento de inercia del apoyo en planta.
- E_c es el módulo de compresibilidad efectiva del hule.

Ambos parámetros se calculan con las siguientes ecuaciones respectivamente

$$I = \frac{\pi((D_{ext}/2)^4 - (D_{int}/2)^4)}{4} \quad (12)$$

$$E_c = E(1 + 2kS_i^2) \quad (13)$$

Donde:

- k es la constante del material
- S_i es el factor de forma

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

$$S_i = \frac{D_{ext} - D_{int}}{4t_r} \quad (14)$$

Para el caso que existe desplazamiento lateral, la carga crítica de pandeo P'_{cr} es:

$$P'_{cr} = P_{cr} \frac{A_r}{A_b} \quad (15)$$

Donde:

A_r es el área reducida del hule.

El área reducida del hule 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 D_b .

$$A_r = \frac{D_b^2(\delta - \sin\delta)}{4} \quad (16)$$

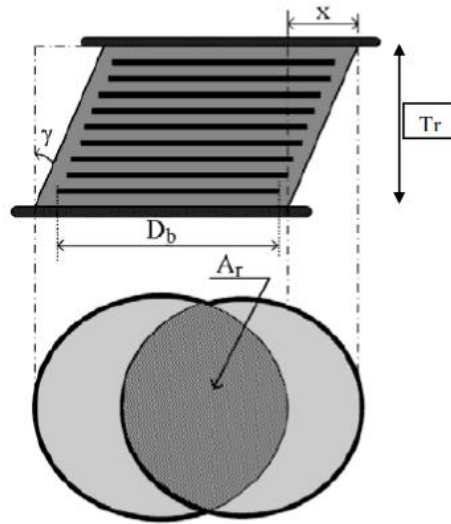


Figura 20 Área efectiva de compresión

$$\delta = 2\cos^{-1}\left(\frac{x}{D_b}\right) \quad (17)$$

Finalmente, para el caso de aisladores que solo trabajan a cortante, el desplazamiento que los vuelve inestables es:

$$D_{cr} = \frac{ND_b - F_0 T_r}{N + (k)_p T_r} \quad (18)$$

Donde:

- D_{cr} es el desplazamiento crítico de pandeo de un ALNP
- N es la carga vertical de servicio sobre un aislador

Deformaciones máximas del ALNP

La capacidad de deformación lateral está controlada principalmente por los límites en la deformación unitaria en el hule, y la estabilidad lateral del dispositivo. Las deformaciones angulares máximas que se admiten para los ALNP son:

$$\gamma_{sc} \leq 2.5 \quad (19)$$

$$\gamma_{sc} + \gamma_{sn} + \gamma_{sr} \leq 5 \quad (20)$$

$$\gamma_{sc} + \gamma_{ss} + 0.5\gamma_{sr} \leq 5.5 \quad (21)$$

Donde:

- γ_{sc} es la deformación angular por cortante debida a compresión
- γ_{sn} es la deformación angular debida al desplazamiento por efectos no sísmicos, como los producidos por temperatura, pre esfuerzo, contracción, flujo plástico, etc.
- γ_{sr} es la deformación originada por la rotación del apoyo
- γ_{ss} es la deformación debida al desplazamiento x por efecto sísmico

$$\gamma_{sc} = \frac{3S_i N}{2 A_r G (1 + 2kS_i^2)} \quad (22)$$

$$\gamma_{sc} = \frac{3N \left(1 + 8GkS_i^2 / E_\infty \right)}{4GkS_i A_r} \quad (23)$$

Donde:

E_∞ es el módulo de rigidez de compresibilidad volumétrica, generalmente de 20380 kg/cm².

$$\gamma_{sr} = \frac{D_b^2 \theta}{2t_r T_r} \quad (24)$$

Donde:

θ es la rotación inducida en el apoyo, en general, para edificios es cero puesto que se tiene losa rígida a nivel de la base, y por lo general en puentes no es cero, ya que no se tiene esta losa en la base.

Y finalmente, la deformación debida al desplazamiento por efecto sísmico.

$$\gamma_{ss} = \frac{x}{T_r} \quad (25)$$

Rigidez Vertical.

La rigidez vertical del apoyo depende del péndulo de compresibilidad efectiva del hule, del área reducida del hule y de la altura total de las capas de hule, y se calcula como se muestra en la ecuación 26.

$$(k)_{vh} = \frac{E_c A_r}{T_r} \quad (26)$$

Amortiguamiento Efectivo.

El amortiguamiento efectivo ζ_{ef} para ALNP se puede estimar a partir de la energía disipada por histéresis ζ_{his} como una medida de la capacidad de disipación de energía del dispositivo, y se determina con la ecuación 27.

$$\zeta_{his} = \frac{2(1-\alpha)(1-\frac{1}{\mu})}{\pi[1+\alpha(\mu-1)]} \quad (27)$$

La ecuación anterior define la energía disipada por histéresis del sistema de aislamiento únicamente, por lo que deberá sumarse el amortiguamiento viscos ζ_v

para obtener el amortiguamiento equivalente total del sistema de aislamiento, el cual es:

$$\zeta_{ef} = \zeta_{his} + \zeta_v \quad (28)$$

El valor de ζ_v debe corresponder al tipo de dispositivo de aislamiento que se trate, generalmente es el 5%.

Tensiones en placas Intermedias

El diseño de las placas intermedias de acero en un aislador se basa en el uso de la ecuación 29. La tensión de corte en la goma es máxima en la zona de contacto con la placa de acero y a lo largo del perímetro del aislador. Esta tensión de corte que actúa por ambos lados de la placa intermedia en el aislador induce a una tracción en la placa cuya magnitud se quiere determinar.

$$\sigma_s = 1.5 \frac{t_r}{t_s} \sigma_c \quad (29)$$

Donde:

- σ_s es el esfuerzo de compresión en la placa de acero
- σ_c es el esfuerzo de compresión del aislador
- t_s es el espesor de la placa de acero
- t_r es el espesor de la capa de goma

El esfuerzo de compresión en el aislador es:

$$\sigma_c = \frac{W_{max}}{A_b} \quad (30)$$

Donde:

W_{max} es la carga máxima ocurrida a corto plazo.

La condición de diseño es:

$$\sigma_s \leq 0.75\sigma_y \quad (31)$$

Donde:

σ_y es la resistencia de la placa de acero, que generalmente es $2.4 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}^2}$

De la condición previa podemos obtener el espesor de la placa

$$t_s \geq \frac{1.5t_r\sigma_c}{0.75\sigma_y} \quad (32)$$

Generalmente los espesores de placas resultan pequeños, pero no se recomienda usar espesores menores a 0.2 cm.

Frecuencia Vertical

La frecuencia vertical se determina con la ecuación 33, donde la condición de diseño es que sea mayor a 10 Hertz.

$$f_v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g(k)_{vh}}{N}} \quad (33)$$

Donde

- g es la aceleración de la gravedad
- $(k)_{vh}$ es la rigidez vertical

- N es la carga vertical de servicio.

Generalmente la frecuencia vertical no es problema para los edificios.

Procedimiento de diseño de aisladores con núcleo de plomo (ALNP)

Paso 1. Definir las propiedades del sistema

Las propiedades que se deben definir desde un inicio es periodo deseado T_D , cargas gravitacionales del edificio W , rigidez y amortiguamiento efectivo K_{eff} y ζ_{eff}

Periodo deseado

El periodo deseado debe responder a alejar la estructura de la mayor demanda sísmica, separarlo al menos 2 veces del periodo del edificio con base rígida, alejarlo del periodo fundamental del suelo entre otras consideraciones.

Peso gravitacional aplicado al sistema de aislación

Las cargas gravitacionales participantes en el sistema de aislación serán definidas conforme al reglamento nacional de la construcción, haciendo un análisis estático con la combinación de cargas correspondiente. Teniendo que los aisladores reciben una carga total W , con una carga promedio por aislador de W_{ais} .

Rigidez efectiva del sistema

La rigidez efectiva del sistema se determina como se muestra en la ecuación 34, para un peso equivalente a una masa $m = W/g$, y para un periodo deseado equivalente a la frecuencia circular de $\omega = 2\pi/T_D$. Posteriormente, se define la

rigidez de cada aislador dividiendo la rigidez efectiva total entre el número de aisladores como se muestra en la ecuación 35.

$$K_{eff} = \omega^2 m \quad (34)$$

$$K_{eff_ais} = \frac{K_{eff}}{n} \quad (35)$$

Amortiguamiento efectivo del sistema

El amortiguamiento efectivo del sistema de aislación se determina de acuerdo a la ecuación 36, para un factor de amortiguamiento propuesto ζ , una masa m y una frecuencia circular ω previamente definidas. El amortiguamiento efectivo se divide entre el número de aisladores para conocer el amortiguamiento de cada aislador como muestra la ecuación 37.

$$C_{eff} = 2\zeta\omega m \quad (36)$$

$$C_{eff_ais} = \frac{C_{eff}}{n} \quad (37)$$

Desplazamiento máximo

La definición de desplazamiento máximo del sistema se puede estimar de varias maneras, como puede ser del espectro de pseudo desplazamientos introduciendo el periodo deseado, de un análisis estático o correr un análisis lineal o simplemente esperar un desplazamiento razonable e indicar uno arbitrariamente, de cualquier manera, se deberá iterar hasta converger con el correcto desplazamiento y el resto de las propiedades del aislador.

Paso 2. Compresión a largo plazo.

De la compresión a largo plazo se definirá el diámetro interior y exterior del aislador. La compresión a largo plazo σ_{LP} queda definida con la ecuación 38, y la condición de diseño se define con la ecuación 39. El esfuerzo admisible σ_{adm} es comúnmente 120 kg/cm^2 .

$$\sigma_{LP} = \frac{N}{A_b} \quad (38)$$

$$\sigma_{LP} < \sigma_{adm} \quad (39)$$

Con la condición anterior y proponiendo un diámetro interior D_{int} correspondiente al diámetro del núcleo de plomo, se puede definir el diámetro exterior.

$$D_{ext} \geq \sqrt{\frac{N}{(\pi/4)\sigma_{adm}} + D_{int}^2} \quad (40)$$

Se debe verificar que el diámetro del núcleo de plomo propuesta en suma del total de los aisladores tenga una fuerza de fluencia F_y mayor al cortante basal generado por las acciones generadas a largo plazo, como las cargas gravitacionales, viento, etc.

Paso 3. Determinación de rigidez elástica y post fluencia.

Determinada la rigidez efectiva del aislador en el paso 1, se puede hacer uso de la ecuación 41 que relaciona la rigidez efectiva y la elástica.

$$(k)_{ef} = (k)_e \frac{1+\alpha(\mu-1)}{\mu} \quad (41)$$

En esta ecuación interviene, además de la rigidez elástica, la relación de rigideces α y la ductilidad del aislador μ . A su vez, la ductilidad está compuesta del desplazamiento máximo X_{max} y el desplazamiento de fluencia X_y , que a su vez interviene nuevamente en la rigidez elástica y la fuerza de fluencia, la cual se compone del área del núcleo de plomo. Relacionando estos conceptos se obtiene:

$$(k)_{ef} = (k)_e \frac{1+\alpha\left(\frac{X_{max}}{F_y/(k)_e}-1\right)}{\frac{X_{max}}{F_y/(k)_e}} \quad (42)$$

Esta ecuación se puede resolver de forma iterativa proponiendo valores de $(k)_e$ hasta converger con la igualdad, o se puede hacer uso de la ecuación 42 para despejar el valor de $(k)_e$.

$$(k)_e = \frac{F_y^2\alpha - (F_y^2 - (k)_{ef}X_{max}F_y) + \sqrt{F_y^4\alpha^2 - \alpha(2F_y^4 - 2(k)_{ef}X_{max}F_y^3) + F_y^4 - 2(k)_{ef}X_{max}F_y^3 + (k)_{ef}^2X_{max}^2F_y^2}}{2X_{max}F_y\alpha} \quad (43)$$

Una vez definida la rigidez elástica se puede determinar la rigidez post fluencia sabiendo de ante mano que la relación de rigideces $\alpha = 0.11$.

$$(k)_p = \alpha(k)_e \quad (44)$$

Paso 4. Fuerza de auto centrado.

Ya determinada la rigidez post fluencia en el paso 3, se debe verificar que cumpla la fuerza necesaria de auto centrado después de ocurrido el sismo. Esta condición se define en la ecuación siguiente:

$$(k)_p \geq 0.05 \frac{N}{X_{max}} \quad (45)$$

De no cumplir esta condición, se deberá regresar al paso 2, proponer nuevas dimensiones de los diámetros e iterar hasta cumplir con la condición.

Paso 5. Determinación de la altura de goma

En base a la ecuación 4, se define la ecuación 46 para definir la altura de goma. Se deberá elegir una goma con una dureza de la tabla 7 que defina el módulo de cortante G.

$$T_r = \frac{1.1GA_b}{(k)_p} \quad (46)$$

Paso 6. Deformación angular máxima.

De la deformación angular máxima se define el factor de forma. De la ecuación 22 se sustituyen sus valores dejando como incógnita el factor de forma S_i , quedando la ecuación 47 y 48 según sea el caso.

$$\frac{3N \left(1 + \frac{8GkS_i^2}{E_\infty} \right)}{4GkS_iA_r} + \frac{X_{max}}{T_r} \leq 5.5 \quad \text{Si } S_i > 15 \quad (47)$$

$$\frac{3S_iN}{4GA_r(1+2kS_i^2)} + \frac{X_{max}}{T_r} \leq 5.5 \quad \text{Si } S_i \leq 15 \quad (48)$$

Paso 7. Cálculo de espesor de goma.

Para calcular el espesor de goma tomamos de referencia la ecuación 14 en la que conoce de los pasos anteriores los diámetros y el factor de forma, por lo que se puede definir la ecuación 49.

$$t_r = \frac{D_{ext} - D_{int}}{4S_i} \quad (49)$$

Conociendo ahora el espesor de goma y la altura total de las gomas, se puede determinar el número de gomas.

$$n_r = \frac{T_r}{t_r} \quad (50)$$

Paso 8. Frecuencia vertical

La frecuencia vertical se determina con la ecuación 33 y a su vez la rigidez vertical con la ecuación 26. Se verifica que cumpla con la condición de que la frecuencia vertical debe ser mayor a 10 Hz.

Paso 9. Estabilidad

La condición de cumplir la estabilidad es utilizar un factor de seguridad adecuado, el cual puede ser 1.5, pero es recomendable usar un factor de seguridad de 2. Se verifican las ecuaciones de carga crítica P_{cr} , ecuación 11 para desplazamiento nulo, ecuación 15 para desplazamiento máximo ó ecuación 18 si es que el aislador está conectado solo a trabajar por cortante.

Paso 10. Amortiguamiento efectivo.

El amortiguamiento efectivo se determina con la ecuación 28 a partir de amortiguamiento histerético definido en la ecuación 27 y del amortiguamiento

viscoso del 5%. Se verifica tener el amortiguamiento efectivo propuesto inicialmente.

Paso 11. Esfuerzos en placas intermedias.

Se determina el espesor de las placas intermedias con la ecuación 32 se debe tener presente que muy posiblemente se obtendrá espesores muy pequeños, pero se recomienda no usarlos tan delgados, un valor aceptado sería $t_s = 0.2 \text{ cm}$.

1.1.2. Diseño Final de aisladores.

En este punto se detalla el diseño final de los aisladores siguiendo la teoría de la sección anterior. En la tabla 9 se presentan las propiedades del sistema determinadas conforme al paso 1. Este fue el mayor periodo al que se logró llegar, puesto que no se tienen la rigidez post fluencia necesaria de auto centrado para un periodo mayor cumpliendo con todos los requisitos determinados en el paso a paso.

Propiedades del sistema

Tabla 9. Propiedades del sistema

T_D	W	m	ω	$(k)_{ef}$
4	16424.0347	16.7421353	1.57	41.2676892
n	$(k)_{ef_aisl}$	$\zeta_D(\%)$	C_{ef}	C_{ef_aisl}
28	1.473846044	20	10.5140609	0.37550218

Al tener 3 grupos de aisladores, los siguientes resultados se presentan con los valores promedio de cada grupo para representarlos. En la tabla 10 se presenta el cálculo del paso 2 para determinar el diámetro exterior con un diámetro interior propuesto de 12 cm. La compresión a largo plazo no fue lo que determinó las dimensiones de los aisladores, ya que están incluso por debajo del 60% de su capacidad.

Tabla 10. Compresión a largo plazo

Aislador Grupo	N	D_{int}	D_{ext}	A_p	σ_{LP}	Radio (%)
1	443.7	12	110	9390.2424	0.04725118	39.3759803
2	839.45	12	130	13160.1624	0.06378721	53.1560056
3	653.05	12	120	11196.6624	0.05832542	48.6045139

En la tabla 11 se presenta el paso 3, en el cual se determinó la rigidez elástica a partir de la rigidez efectiva y posteriormente la rigidez post fluencia. Se muestra también el desplazamiento máximo presentado por los aisladores. El promedio de las rigideces efectivas es de 1.687 tonf/cm , lo cual está por encima de la estimada en el paso 1 y presentada en la tabla 8, esto se debe principalmente a que los aisladores están sometidos a diferentes cargas y esfuerzos axiales y se tienen ciertas variaciones respecto al pre diseño inicial en que se supone que los 28 aisladores están bajo la misma carga.

Tabla 11. Cálculo de rigideces

Aislador Grupo	A_{PL}	F_y	$X_{max} (cm)$	α	$(k)_{ef}$	$(k)_e$	$(k)_p$
1	113.0976	10.3721809	24	0.11	1.47654106	9.92641834	1.09190602
2	113.0976	10.3721809	24	0.11	1.9081969	13.8505623	1.52356186
3	113.0976	10.3721809	24	0.11	1.68337615	11.8067373	1.29874111

En la tabla 12 se muestra la fuerza de auto centrado especificada en el paso 4 de cada grupo de aislador en la que indica que el segundo grupo no cumple con el requisito, pero en la tabla 13 se presenta la fuerza de auto centrado total de los 28 aisladores en que si cumple con el requisito puesto que se reparte la fuerza en todos los aisladores. Este requisito fue el que controló la rigidez post fluencia y a su vez la que determinó el periodo ya que se está al limite

Tabla 12. Fuerza de auto centrado de cada grupo de aisladores

Aislador Grupo	$N(\text{tonf})$	X_{max}	$(k)_p_{min}$	$(k)_p_{aisl}$	Radio %
1	443.7	24	0.924375	1.091906017	84.6570112
2	839.45	24	1.748854167	1.523561857	114.787211
3	653.05	24	1.360520833	1.298741107	104.756893

Tabla 13. Fuerza de auto centrado total de los aisladores

W	x_{max}	$(k)_p_{min}$	$\Sigma(k)_p_{min}$	Radio (%)
16424.0347	24	34.216739	36.1309374	94.7020515

En la tabla 14 se define la altura total de la goma correspondiente al paso 5. Se manejó una dureza Shore de 40 con un módulo de cortante $G = 4.59 \text{ kg/cm}^2$. Se obtuvo una altura total de goma $T_r = 43.51 \text{ cm}$ y se propone usar 44 cm .

Tabla 14. Cálculo de altura de goma

Aislador Grupo	Dureza Shore	G	A_b	$(k)_p$	T_r
1	40	0.00458	9390.2424	1.091906017	43.3261109
2	40	0.00458	13160.1624	1.523561857	43.5170373
3	40	0.00458	11196.6624	1.298741107	43.4334332

En el paso siguiente se calculan las deformaciones máximas de los aisladores, de donde se obtiene el factor de forma S_i , se utilizó una constante del material $k = 0.85$ propia del material.

Tabla 15 Deformaciones máximas del aislador

Aislador Grupo	N	X_{max}	D_b	δ	A_r	T_r	S_i
1	443.7	24	110	2.701690624	6884.4154	44	30.625
2	839.45	24	130	2.770231642	10171.0438	44	36.875
3	653.05	24	120	2.738876812	8449.05043	44	33.75

En la tabla 16 se determina el cálculo del espesor de goma y el número de capas de goma perteneciente al paso 7.

Tabla 16. Espesor de goma y numero de capas

Aislador Grupo	D_{int}	D_{ext}	S_i	t_r	T_r	n_r
1	12	110	30.625	0.8	44	55
2	12	130	36.875	0.8	44	55
3	12	120	33.75	0.8	44	55

El paso siguiente corresponde a la determinación de la frecuencia vertical, en el que se calcula primero la rigidez vertical. En la tabla 17 se muestra que los aisladores tienen una frecuencia vertical mayor a 10 Hz y cumple con la condición de diseño.

Tabla 17. Frecuencia vertical

Aislador Grupo	E_c	A_r	T_r	$(k)_{vh}$	N	F_V
1	24.3779269	6884.415396	44	3814.267616	428.462851	14.6792677
2	35.3365519	10171.04377	44	8168.400357	828.744675	15.445911
3	29.6035675	8449.050431	44	5684.591699	649.210594	14.5583527

El paso 9 consiste en revisar la estabilidad del aislador. En la tabla 18 se aprecia que la carga crítica no es problema para los aisladores, ya que trabajan a menos de un 20% de su capacidad.

Tabla 18. Estabilidad de los aisladores.

Aislador Grupo	E_c	I	A_b	A_r	T_r
1	24.3858	7185882.997	9390.2424	6994.026	44
2	35.3269	14018863	13160.1624	10301.46	44
3	29.6	10177766	11196.6624	8569.08	44

Aislador Grupo	P_u	P_{cr}	Radio %	P'_{cr}	Radio%
1	443.7	3578.634131	12.39858515	2665.432807	16.6464523
2	839.45	7122.133467	11.78649633	5575.035535	15.0573031
3	653.05	5123.735522	12.74558371	3921.320303	16.6538296

El paso 10 consiste en calcular el amortiguamiento efectivo de cada aislador. En la tabla 19 se muestra el amortiguamiento efectivo de los aisladores, con un promedio de todos los aisladores de $\zeta_{ef} = 0.2$, amortiguamiento que se había definido previamente como el deseado.

Tabla 19. Amortiguamiento efectivo de aisladores

Aislador Grupo	α	μ	ζ_{hist}	ζ_v	ζ_{efe}
1	0.11	22.61677951	0.16	0.05	0.21
2	0.11	31.69678466	0.13	0.05	0.18
3	0.11	26.96761531	0.14	0.05	0.19

El último paso es determinar los esfuerzos en las placas de acero para obtener el espesor de las placas. En la tabla 20 se determinan los esfuerzos y espesores de las placas de acero, y como ya se había mencionado, los espesores de las capas de acero suelen ser muy pequeños, pero es preferible usar placas de 0.2 cm de espesor como mínimo.

Tabla 20. Determinación de esfuerzos en placas de acero.

Aislador Grupo	W_{max}	t_r	A_b	σ_c	t_s
1	443.7	0.8	9390.242	0.0473	0.032
2	839.45	0.8	13160.162	0.0638	0.043
3	653.05	0.8	11196.662	0.0583	0.039

A manera de resumen, las propiedades de los aisladores requeridas para el modelamiento en el software Etabs se muestra en la tabla 21.

Tabla 21. Propiedades finales del aislador para ETABS

Aislador Grupo	$(k)_{ef}$	$(k)_e$	$(k)_{vh}$	ζ_{efe}	α	F_y
1	1.47654106	9.92641834	3814.27	0.21	0.11	10.37
2	1.9081969	13.8505623	8168.40	0.18	0.11	10.37
3	1.68337615	11.8067373	5684.59	0.19	0.11	10.37

1.1.3. Resultados del análisis sísmico de la estructura con base aislada usando ALNP

El primer modo corresponde a la dirección en X con periodo $T_1 = 3.801 \text{ seg}$, el segundo modo es en la dirección Y con un periodo de $T_2 = 3.689 \text{ seg}$ y el tercer modo es torsional, con un periodo $T_3 = 3.293 \text{ seg}$.

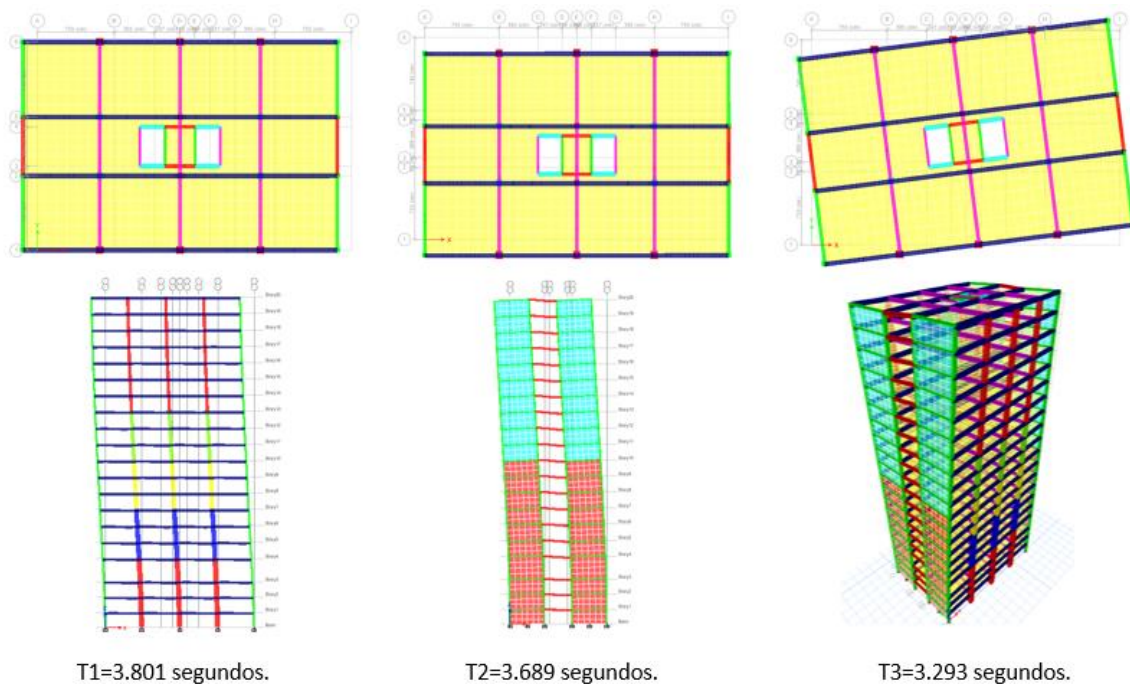


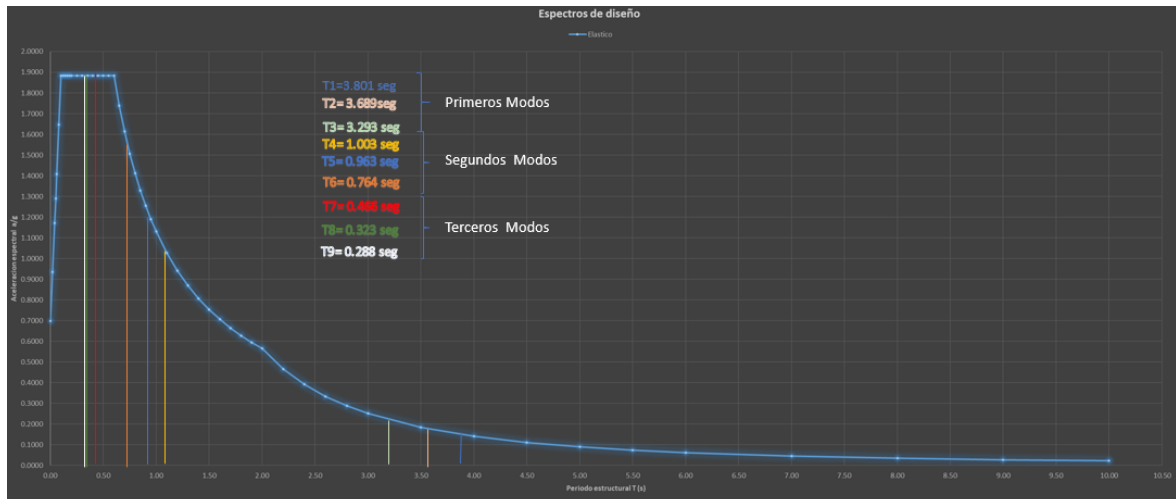
Figura 21. Modos de vibración de modelo con base aislada

Tabla 22 Participación de masas del modelo con base aislada

Modos	Periodos	SUM UX	SUM UY	RUM RZ
1	3.801	0.9858	0	0.0001
2	3.689	0.9858	0.9881	0.0001
3	3.293	0.9858	0.9882	0.9933
4	1.003	0.9991	0.9882	0.9933
5	0.963	0.9991	0.9998	0.9933
6	0.764	0.9991	0.9998	0.9999
7	0.466	0.9999	0.9998	0.9999
8	0.323	0.9999	1	0.9999
9	0.288	1	1	0.9999
10	0.267	1	1	1
11	0.198	1	1	1
12	0.158	1	1	1
13	0.146	1	1	1
14	0.13	1	1	1
15	0.113	1	1	1
16	0.096	1	1	1
17	0.092	1	1	1
18	0.079	1	1	1
19	0.077	1	1	1
20	0.067	1	1	1

Como se puede apreciar en la tabla 22 se alcanza el 97% de participación de masas en los primeros 3 modos de vibración.

En la gráfica 4 se puede apreciar como en los primeros modos hay un incremento en el periodo que los deja en una zona de aceleraciones muy bajas mientras que en los segundos y terceros modos este incremento no es tan determinante ya que los modos superiores siguen quedando en una zona de altas aceleraciones en el espectro.



Gráfica 4 Periodos vs Espectro de diseño. Modelo en Base Aislada.

Distorsiones de entrepiso.

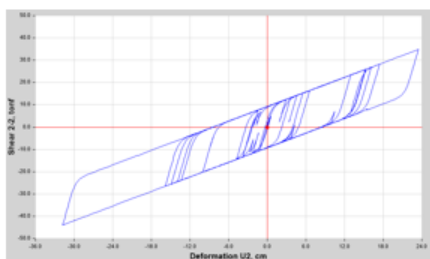
Como se puede apreciar en la tabla 23 las distorsiones de piso sufren una reducción de hasta un 75% con respecto al modelo de base rígida, pero sigue excediendo el valor máximo permisible hasta en un 60%.

Tabla 23 Distorsiones de entrepiso del modelo de base aislada

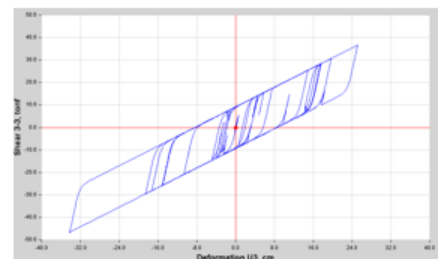
Niveles	Altura de Piso (cm)	Desplazamiento en X (cm)	Distorsión en el eje X	Chequeo
Story20	340	49.7301	0.001292	Cumple
Story19	340	49.5325	0.001552	Cumple
Story18	340	49.3122	0.001834	Cumple
Story17	340	49.061	0.002118	No Cumple
Story16	340	48.7666	0.002378	No Cumple
Story15	340	48.4179	0.002598	No Cumple
Story14	340	48.0056	0.002761	No Cumple
Story13	340	47.5225	0.00279	No Cumple
Story12	340	46.9788	0.002838	No Cumple
Story11	340	46.3602	0.002838	No Cumple
Story10	340	45.6643	0.002726	No Cumple
Story9	340	44.9234	0.002736	No Cumple
Story8	340	44.1196	0.002835	No Cumple
Story7	340	43.2572	0.002905	No Cumple
Story6	340	42.3539	0.002995	No Cumple
Story5	340	41.4023	0.003084	No Cumple
Story4	480	40.3976	0.003175	No Cumple
Story3	320	38.9073	0.002789	No Cumple
Story2	320	38.0231	0.002434	No Cumple
Story1	320	37.2446	0.001948	Cumple
Aislamiento	50	36.6227	0.732455	No Cumple
Base	0	0	0	Cumple

Niveles	Altura de Piso (cm)	Desplazamiento en Y (cm)	Distorsión en el eje Y	Chequeo
Story20	340	50.6625	0.002161	No Cumple
Story19	340	50.1539	0.002228	No Cumple
Story18	340	49.6327	0.002288	No Cumple
Story17	340	49.0987	0.002348	No Cumple
Story16	340	48.5457	0.002397	No Cumple
Story15	340	47.975	0.002432	No Cumple
Story14	340	47.3813	0.002452	No Cumple
Story13	340	46.7681	0.002445	No Cumple
Story12	340	46.1362	0.00244	No Cumple
Story11	340	45.4856	0.002425	No Cumple
Story10	340	44.8213	0.00237	No Cumple
Story9	340	44.1536	0.002326	No Cumple
Story8	340	43.4815	0.002252	No Cumple
Story7	340	42.8139	0.00214	No Cumple
Story6	340	42.1579	0.002006	No Cumple
Story5	340	41.5202	0.001836	Cumple
Story4	480	40.913	0.00163	Cumple
Story3	320	40.1308	0.001391	Cumple
Story2	320	39.6862	0.00115	Cumple
Story1	320	39.3197	0.000834	Cumple
Aislamiento	50	39.0551	0.781101	No Cumple
Base	0	0	0	

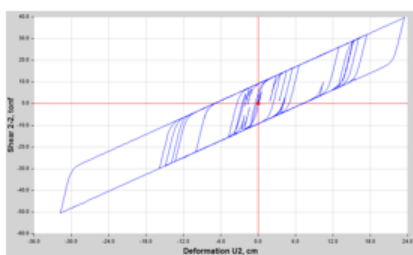
En la figura 22 se muestra el comportamiento histerético de los aisladores donde se tomaron en cuenta un aislador de borde y uno interior donde se muestra que en cada dirección el comportamiento de los aisladores es muy similar, así como también sus desplazamientos máximos se asemejan mucho, lo que implica que la capa de aislamiento tiene un buen comportamiento.



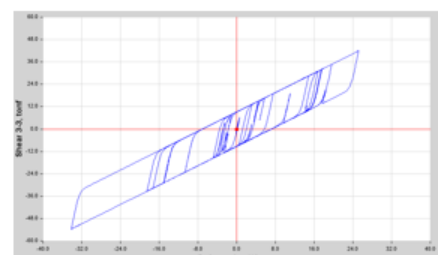
Aislador de Borde desplazado en X (36.22 cm)



Aislador de Borde desplazado en Y (39.10 cm)



Aislador Interno desplazado en X (36.22 cm)



Aislador Interno desplazado en Y (39.07 cm)

Figura 22. Comportamiento histerético de los aisladores de borde e internos. Fuente: Propia vía ETABS

Aceleraciones por piso.

Como se puede apreciar en la tabla 24, las aceleraciones de piso sufren una reducción de hasta 80% con respecto a las aceleraciones del modelo en base fija, sin embargo, siguen sin ser lo suficientemente seguras para una edificación con fines hospitalarios ya que excede hasta en un 60% la aceleración objetivo.

Tabla 24 Aceleraciones de piso para modelo de base aislada.

Nivel	Aceleración en X (g)	Chequeo	Aceleración en Y (g)	Chequeo
Story20	0.328277268	No Cumple	0.309102956	No Cumple
Story19	0.305300714	No Cumple	0.283985729	No Cumple
Story18	0.292915392	No Cumple	0.259643221	No Cumple
Story17	0.275300714	No Cumple	0.24304791	No Cumple
Story16	0.246330275	No Cumple	0.227747197	No Cumple
Story15	0.210601427	No Cumple	0.209663609	No Cumple
Story14	0.207869521	No Cumple	0.188990826	Cumple
Story13	0.203863405	No Cumple	0.166574924	Cumple
Story12	0.17648318	Cumple	0.149123344	Cumple
Story11	0.178328236	Cumple	0.129317023	Cumple
Story10	0.179174312	Cumple	0.126269113	Cumple
Story9	0.18058104	Cumple	0.129184506	Cumple
Story8	0.169714577	Cumple	0.130530071	Cumple
Story7	0.161141692	Cumple	0.131834862	Cumple
Story6	0.151457696	Cumple	0.140448522	Cumple
Story5	0.15853211	Cumple	0.147278287	Cumple
Story4	0.18058104	Cumple	0.152466871	Cumple
Story3	0.21196738	No Cumple	0.169653415	Cumple
Story2	0.226727829	No Cumple	0.177206932	Cumple
Story1	0.235688073	No Cumple	0.192629969	Cumple
Aislamiento	0.239877676	No Cumple	0.202456677	No Cumple
Base	0.820897044	No Cumple	0.820897044	No Cumple

8.3. Modelo con sistema de aislación en doble interface.

En este capítulo se estudiará la respuesta del edificio con un sistema de aislamiento en doble interface dividiendo el edificio en dos bloques rígidos en altura. Este modelo nace con el objetivo de lograr un mejor comportamiento que el modelo de base aislada.

Como se determinó en el capítulo anterior, el modelo de base aislada tuvo problemas en cumplir el periodo deseado de al menos 2.5 veces el de base fija, y también presentó problemas de levantamientos en algunos apoyos. Es por eso que surge la alternativa del estudio de la estructura con aislamiento a doble interface, colocando el aislamiento en la base y a la mitad de la altura del edificio como se aprecia en la figura 23.

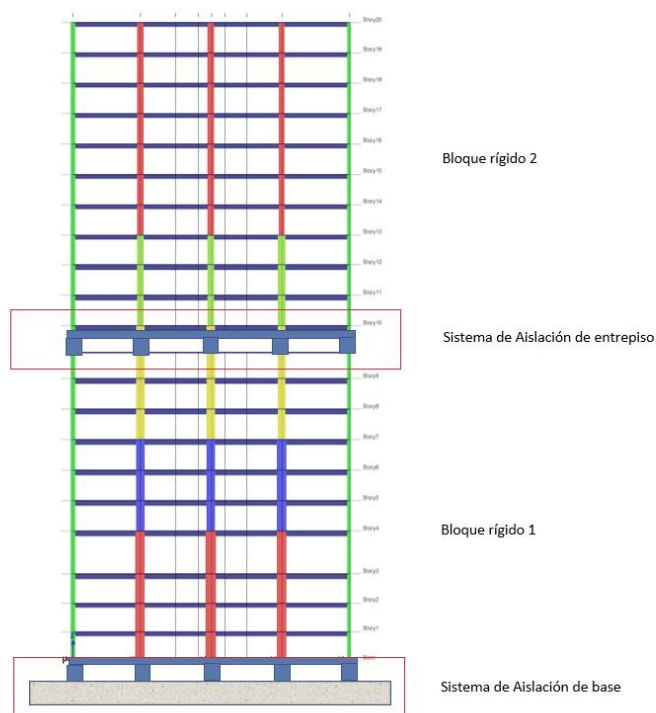


Figura 23 Esquema de edificio con aislamiento múltiple o en doble interface.

El sistema de aislamiento en doble interface será con aisladores del tipo deslizante, por el hecho que se no tiene el problema de la fuerza de auto centrado y se puede flexibilizar la estructura en mayor medida.

La distribución de los aisladores en plantas será la misma que se manejó en el capítulo anterior. Con esta doble interface, se logra flexibilizar la estructura en dos zonas, dándole un menor desplazamiento en la interface superior, reduciendo de esta forma la posibilidad de incrementar el efecto de segundo orden y en la base asignar un mayor desplazamiento para lograr la flexibilidad necesaria para llevar a la estructura a al menos 2.5 veces el periodo de la base fija.

Para el modelamiento de doble interface se consideró colocar una doble losa rígida entre los niveles 10 y 11, altura en la que se colocó el sistema de aislación.

8.3.1. Definición del sistema aislado con apoyo deslizante (AD).

Los aisladores deslizantes consisten en dos superficies en contacto: la primera es un material suave, usualmente politetrafluoretileno (PTFE), que se desliza sobre una segunda de material rígido (normalmente acero inoxidable). El polímero PTFE tiene propiedades que lo hacen atractivo para su uso en sistemas de aislamiento debido fundamentalmente a su bajo coeficiente de fricción, su impermeabilidad y que además bajo temperaturas extremas no se modifican sus propiedades mecánicas. Las superficies rígidas deben ser de materiales inoxidables con buena resistencia a la corrosión y con rugosidad no mayor a $0.8 \mu m$.

Desde el punto de vista sísmico, los sistemas de aislamiento deslizante tienen como principal objetivo, el desacoplar el movimiento lateral de una estructura del movimiento de su cimentación, mediante la colocación de un dispositivo entre ambos que permita el deslizamiento.

En este estudio se analizó el aislador deslizante llamado péndulo de fricción, el cual consiste en una superficie cóncava de acero anclada a la cimentación sobre la cual se desliza la estructura, lo que implica que esta se mueve verticalmente al

desplazarse lateralmente. La figura 24 detalla de forma esquemática un aislador de péndulo de fricción.

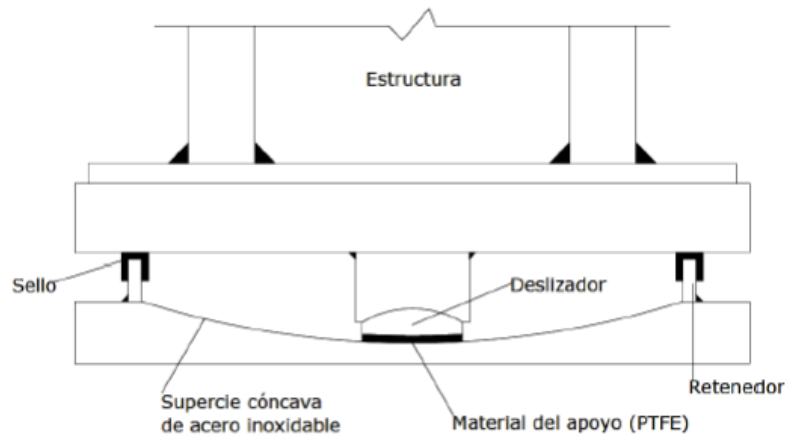


Figura 24 Esquema de apoyo deslizante

Por la geometría del aislador, el periodo no depende de la carga vertical aplicada y su rigidez es directamente proporcional a la carga lo que hace que la torsión provocada por concentraciones de masa en la estructura disminuya en el nivel de aislamiento. El sistema combina en un solo elemento la flexibilidad y disipación de energía que caracterizan a un sistema de aislamiento, en un elemento compacto de acero. Cuando el apoyo se activa durante un sismo, el dispositivo se mueve sobre una superficie cóncava, originando que la estructura de soporte experimente pequeños movimientos semejantes a los de un péndulo.

La fuerza de fricción dinámica que se genera durante el movimiento proporciona el amortiguamiento necesario para absorber la energía del sismo. Su comportamiento histerético corresponde al de un material rígido cuando no se ha vencido la fuerza de fricción y proporcional a la rigidez lateral cuando la demanda de fuerza lateral supera la fuerza de fricción del dispositivo. Estos apoyos deslizantes son dispositivos que se deslizan una vez que la fuerza de fricción es excedida, es así que el comportamiento lateral de estos aisladores queda regido por la fricción entre la estructura y los balines de soporte. Una vez superada la fuerza de fricción estática, el movimiento de la estructura corresponde al equilibrio dinámico bajo las acciones sísmicas con la fuerza de fricción dinámica que se

produce entre las superficies en contacto. Cuando existe buena lubricación entre la superficie de la placa de acero y los balines, se logra que la fuerza de fricción sea despreciable y que el asilamiento sea más efectivo.

Propiedades en placas PTFE.

Los valores admisibles de esfuerzos de compresión en la zona de contacto de placas de PTFE se muestran en la tabla 25. Los coeficientes de fricción entre las superficies de contacto cuando se utilizan placas PTFE pueden determinarse como función del valor medio del esfuerzo en compresión en condiciones de servicio, como se muestra en la tabla 26. Para valores intermedios de los esfuerzos indicados, puede usarse interpolación lineal.

Tabla 25 Esfuerzos admisibles de contacto en placas PTFE.

Material	Cargas de Servicio		Cargas Sísmicas
	Esfuerzo Promedio. Mpa	Esfuerzo en el perímetro Mpa	Esfuerzo Promedio Mpa
PTFE virgen	24	34	41
PTFE reforzado	24	34	41
Malla de PTFE	24	69	41

Definición de las propiedades de AD.

Las propiedades de los aisladores deslizantes deben determinarse considerando todas las variables que influyen en su comportamiento inicial y en su durabilidad, tales como la magnitud de la carga axial aplicada, la temperatura ambiente y la velocidad de aplicación de la carga, entre otras. La respuesta fuerza lateral-desplazamiento de un AD puede ser idealizada como se muestra en la figura 25 con una histéresis bilineal.

Tabla 26 Coeficientes de fricción en placas PTFE

Tipo de superficie	Temperatura °C	Esfuerzo Promedio de Compresión Mpa			
		3.5	6.9	13.8	20.7
Placa PTFE lubricada y con agujeros	20	0.04	0.03	0.025	0.02
	-25	0.06	0.045	0.04	0.03
Placa PTFE Virgen	20	0.08	0.07	0.05	0.03
	-25	0.2	0.18	0.13	0.1
Placa PTFE reforzada	20	0.24	0.17	0.09	0.06
	-25	0.44	0.32	0.25	0.2
Malla de PTFE	20	0.08	0.07	0.06	0.045

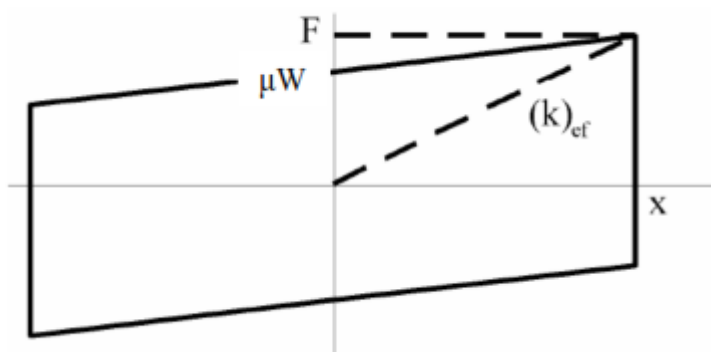


Figura 25 Ciclo histérico de un apoyo deslizante

La fuerza lateral F que se desarrolla en un aislador deslizante se calcula con la ecuación 51.

$$F = \frac{N}{R}x + \mu_f N \quad (51)$$

Donde:

- x es el desplazamiento horizontal del aislador.
- R es el radio de curvatura del aislador
- μ_f es el coeficiente de fricción del aislador
- N es la fuerza normal actuando sobre el aislador.

El primer término de la ecuación 51 corresponde a la fuerza restitutiva proporcionada por el aislador con radio de curvatura R . El segundo término de la ecuación corresponde a la fuerza de fricción en la superficie de deslizamiento.

Al desplazarse lateralmente la estructura, el desplazamiento vertical correspondiente puede calcularse de forma aproximada con la ecuación 52.

$$y = \frac{x^2}{2R} \quad (52)$$

Donde:

y es el desplazamiento vertical de la estructura.

El periodo de vibrar T_d se determina con la ecuación 53, y a partir de ésta se calcula el radio de curvatura con la ecuación 54 dado un periodo objetivo.

$$T_d = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (53)$$

$$R = \frac{T_d^2 g}{4\pi^2} \quad (54)$$

La rigidez elástica se define con la ecuación 55, y la rigidez lateral post fluencia se obtiene con la ecuación 56. El desplazamiento de fluencia x_y se obtiene de los catálogos del fabricante.

$$(k)_{led} = \frac{\mu N}{x_y} \quad (55)$$

$$(k)_{lpd} = \frac{N}{R} \quad (56)$$

En estos sistemas de aislamiento se debe limitar el desplazamiento máximo horizontal de la estructura a 1/5 del radio de la superficie esférica como lo indica la ecuación 57.

$$X_{max} < \frac{1}{5} R \quad (57)$$

Al relacionar la fuerza F de la ecuación 51 con el desplazamiento de diseño, se obtiene la rigidez efectiva expresada en la ecuación 58.

$$(k)_{efd} = N \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu_f}{X_{max}} \right) \quad (58)$$

El desplazamiento máximo X_{max} es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del desplazamiento en ambos ejes.

$$X_{max} = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (59)$$

La ecuación 58 corresponde a la obtención de la rigidez efectiva para un análisis modal espectral en donde el segundo término es el que aporta el amortiguamiento, sin embargo, para un análisis paso a paso la rigidez efectiva se obtiene con la ecuación 60 en donde solo interviene el primer término y el amortiguamiento se da a través de la histéresis.

$$(k)_{efd} = \frac{N}{R} \quad (60)$$

Al igual que los aisladores de goma con núcleo de plomo, el amortiguamiento efectivo para una demanda de desplazamiento X_{max} se puede estimar con el método del área de la curva de histéresis obteniendo la ecuación 61.

$$(\zeta)_{efd} = \frac{2\mu_f R}{\pi(\mu_f R + X_{max})} \quad (61)$$

La rigidez vertical del aislador se determina de acuerdo a la ecuación 62, en ella se detalla la rigidez vertical en función del aislador H , el módulo de elasticidad del acero E , el área del péndulo A_{pf} que se determina de acuerdo a la ecuación 63

y coeficiente α que depende del material del péndulo, que para péndulos de acero revestidos de teflón es 0.5.

$$(k)_{vd} = \frac{\alpha E A_{pf}}{H} \quad (62)$$

$$A_{pf} = \frac{N}{\sigma_{adm}} \quad (63)$$

EL esfuerzo admisible σ_{adm} empleado en la ecuación 63 proviene de la tabla 24.

La frecuencia vertical f_v de los aisladores se determina de igual manera que el aislador de goma, determinado con la ecuación 33 y su condición de diseño se mantiene y debe ser mayor que 10 Hz.

El diámetro del péndulo se determina a partir del área calculada en la ecuación 63 dando origen a la ecuación 64.

$$D_{pf} = \sqrt{\frac{4A_{pf}}{\pi}} \quad (64)$$

Procedimiento de diseño para los apoyos deslizantes (AD).

En esta sección se presenta un procedimiento de diseño para los AD, derivado de la teoría presentada en la sección anterior. Este procedimiento produce el diseño completo del dispositivo, el cual, a diferencia del procedimiento de diseño de los ALNP, este proceso es más sencillo por las pocas variables derivadas de la geometría de este tipo de aislador.

Los datos que se deben conocer son los siguientes:

- a) N Fuerza Normal actuando sobre el aislador

- b) μ Coeficiente de fricción
- c) T_D Periodo objetivo de diseño.

Paso 1.

Dado un periodo de diseño T_D se calcula el radio de curvatura R con la ecuación 54.

Paso 2.

Se procede al cálculo de la rigidez efectiva $(k)_{efd}$ de acuerdo a la ecuación 60.

Paso 3.

Ya una vez calculado el radio de curvatura y la rigidez efectiva se procede a determinar el desplazamiento máximo X_{max} y se verifica que cumpla con la condición de la ecuación 57.

Paso 4.

Con el radio de curvatura, la rigidez efectiva y el desplazamiento máximo, se procede a la determinación de los parámetros faltantes, los cuales son:

- a) Rigidez elástica $(k)_{led}$ con la ecuación 55.
- b) Rigidez post fluencia $(k)_{lpd}$ con la ecuación 56.
- c) Rigidez vertical $(k)_{vd}$ con la expresión 62.
- d) Frecuencia Vertical f_v con la ecuación 33.
- e) Amortiguamiento efectivo $(\zeta)_{efd}$ determinado en la ecuación 61.
- f) Fuerza lateral F de la ecuación 51.
- g) Diámetro del péndulo friccional D_{PF} con la ecuación 64.

8.3.2. Diseño Final de AD en doble interface.

Siguiendo el procedimiento de diseño antes mencionado, se llegó al diseño final. Al igual que en el diseño de los aisladores de goma, se manejarán los mismo 3 grupos de aisladores en la base por su diferencia en su carga axial actuante. Pero se anexarán otros 3 grupos en la capa superior de aislamiento.

Tabla 27 Parámetros de diseño de AD definidos en los pasos del 1 al 3.

Aislador Grupo	R	N	$(k)_{lpd}$	X_{max}	μ	$(k)_{efd}$
1	438	443.7	1.01	16.22	0.04	1.01
2	438	839.45	1.92	16.22	0.04	1.92
3	438	653.05	1.49	16.22	0.04	1.49
4	340	221.85	0.65	10.1	0.04	0.65
5	340	419.725	1.23	10.1	0.04	1.23
6	340	326.525	0.96	10.1	0.04	0.96

Tabla 28 Parámetros de diseño de AD definidos en el paso 4.

Aislador Grupo	$(k)_{led}$	$(k)_{vd}$	F_V	ζ_{efd}	F	D_{PF}
1	354.96	43058.5	49.10	0.33	34.1790822	50.00
2	671.56	84120.2	49.89	0.33	64.6644817	75.00
3	522.44	65322	49.85	0.33	50.3057237	65.00
4	177.48	22810	50.54	0.37	15.46425	35.00
5	335.78	40294.3	48.83	0.37	29.2573015	50.00
6	261.22	35686.6	52.10	0.37	22.7607132	45.00

Para modelar el comportamiento no lineal del AD en el software de análisis estructural es necesario definir tres parámetros adicionales:

Primero es necesario definir el coeficiente de fricción para velocidad rápida μ_{fast} , el cual es igual al ya utilizado para definir los parámetros de diseño. El segundo parámetro a definir es el coeficiente de fricción lenta μ_{slow} , este será dos terceras partes del utilizado para la velocidad rápida; $\mu_{slow} = \frac{3}{4} \mu_{fast} = 0.03$, y el

tercero, el parámetro r conocido como la inversa de la velocidad, en este caso se utilizó $r = 0.2 \text{ seg/cm}$, estos parámetros pueden ser obtenidos de ensayos de carga sobre aisladores reales o a través de catálogos proporcionados por los fabricantes.

En la tabla 29 se presentan los parámetros ingresados al software para la definición de los dispositivos.

Tabla 29 Propiedades del aislador para ingreso en software ETABS

Aislador Grupo	$(k)_{efd}$	ζ_{efd}	$(k)_{led}$	μ_{slow}	μ_{fast}	r	R
1	1.01	0.33	354.96	0.03	0.04	0.20	438
2	1.92	0.33	671.56	0.03	0.04	0.20	438
3	1.49	0.33	522.44	0.03	0.04	0.20	438
4	0.65	0.37	177.48	0.03	0.04	0.20	340
5	1.23	0.37	335.78	0.03	0.04	0.20	340
6	0.96	0.37	261.22	0.03	0.04	0.20	340

8.3.3. Resultados del análisis sísmico de la estructura con aislamiento en doble interface.

El primer modo corresponde a la dirección en X con periodo $T_1 = 4.871 \text{ seg}$, el segundo modo es en la dirección Y con un periodo de $T_2 = 4.772 \text{ seg}$ y el tercer modo es torsional, con un periodo $T_3 = 3.539 \text{ seg}$.

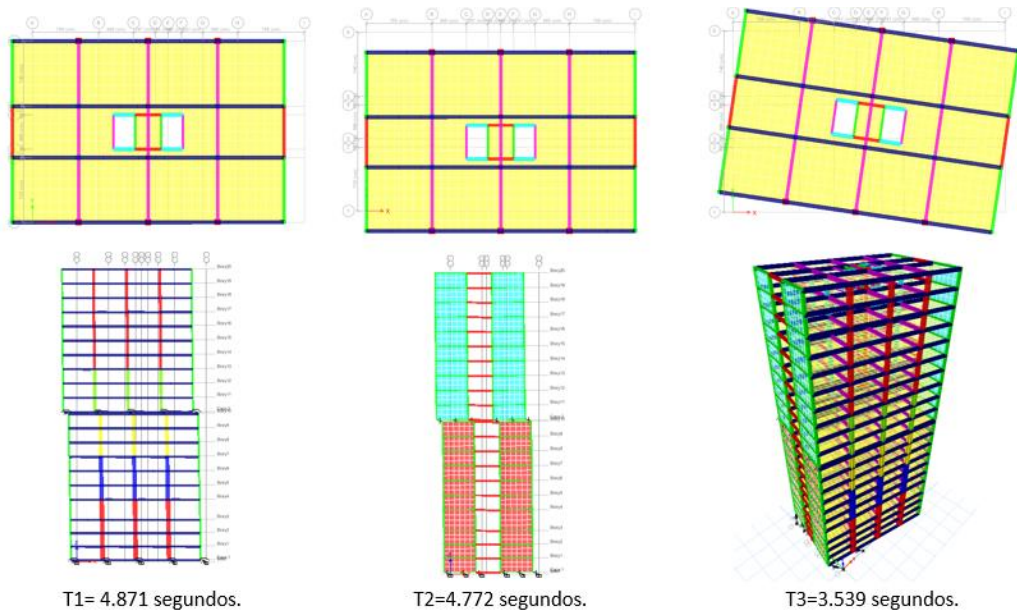


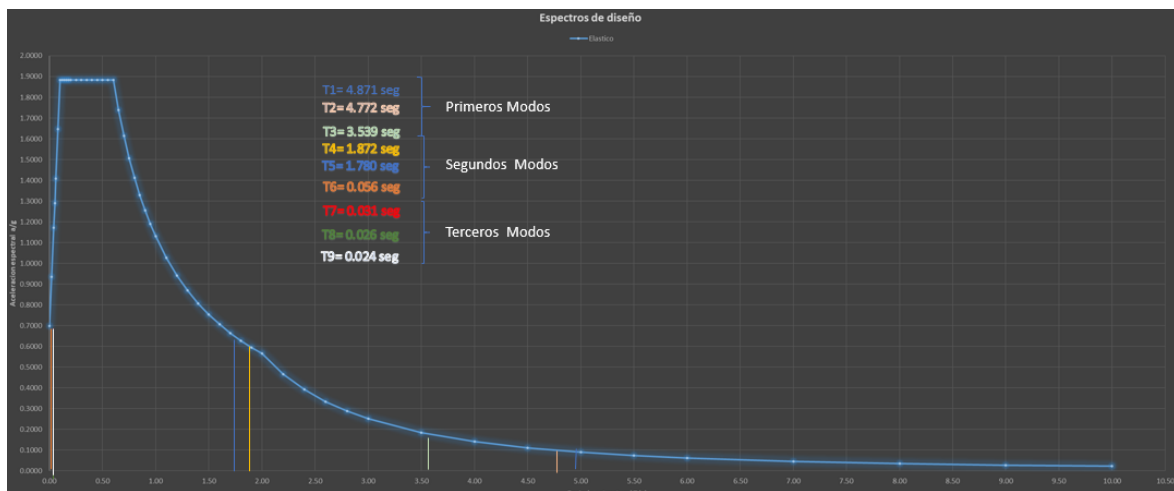
Figura 26 Modos de vibración de modelo en doble interface

Tabla 30 Participación de masas modales en el modelo en doble interface.

Modos	Periodos	SUM UX	SUM UY	RUM RZ
1	4.871	0.8892	0	8.14E-06
2	4.772	0.8892	0.8815	8.21E-06
3	3.539	0.8892	0.8815	1
4	1.872	0.8892	1	1
5	1.78	1	1	1
6	0.056	1	1	1
7	0.031	1	1	1
8	0.026	1	1	1
9	0.024	1	1	1
10	0.022	1	1	1
11	0.018	1	1	1
12	0.016	1	1	1
13	0.015	1	1	1
14	0.014	1	1	1
15	0.013	1	1	1
16	0.013	1	1	1
17	0.012	1	1	1
18	0.011	1	1	1
19	0.01	1	1	1
20	0.01	1	1	1

Como se puede visualizar en la gráfica 6 los primeros, segundos y terceros modos se alejan considerablemente de la meseta del espectro esperando de esta

forma una reducción en las aceleraciones de piso y eliminando el efecto de los modos superiores sobre la estructura.



Gráfica 6 Periodos vs Espectro de diseño. Modelo en doble interface.

Distorsiones de entrepiso.

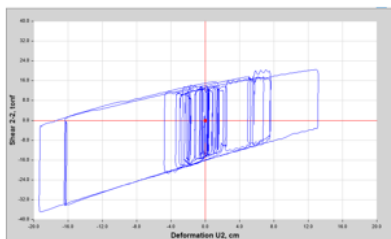
Como se puede apreciar en la tabla 31 las derivas en los pisos de la estructura con doble interface se reducen hasta en un 95% respecto al modelo de base fija y se obtienen valores por debajo de los 0.002 en todos los niveles salvo en las capas de aislación sísmica como es de esperarse. También en la figura 27 se muestra el comportamiento histerético de un aisladore de borde y uno interior notándose un comportamiento adecuado en cada dirección con deformaciones muy similares uno del otro.

Tabla 31 Distorsiones de entrepiso en el modelo en doble interface

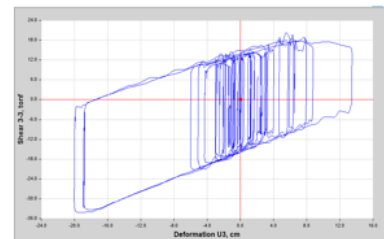
Niveles	Altura de Piso (cm)	Desplazamiento en X (cm)	Distorsión en el eje X	Chequeo
Story20	340	42.7446	0.000452	Cumple
Story19	340	42.6001	0.000528	Cumple
Story18	340	42.4313	0.000612	Cumple
Story17	340	42.2356	0.000705	Cumple
Story16	340	42.0102	0.0008	Cumple
Story15	340	41.7547	0.000892	Cumple
Story14	340	41.4697	0.000978	Cumple
Story13	340	41.1573	0.001027	Cumple
Story12	340	40.829	0.001085	Cumple
Story11	340	40.4825	0.001107	Cumple
Capa 2	50	40.1419	0.323677	No Cumple
Story10	340	25.033	0.001242	Cumple
Story9	340	24.6401	0.001351	Cumple
Story8	340	24.2125	0.001431	Cumple
Story7	340	23.7597	0.001479	Cumple
Story6	340	23.2929	0.001546	Cumple

Story5	340	22.8046	0.001622	Cumple
Story4	480	22.2923	0.001703	Cumple
Story3	320	21.5323	0.00152	Cumple
Story2	320	21.0794	0.00134	Cumple
Story1	320	20.6777	0.001171	Cumple
Capa 1	50	20.3648	0.407297	No Cumple
Base	0	0	0	

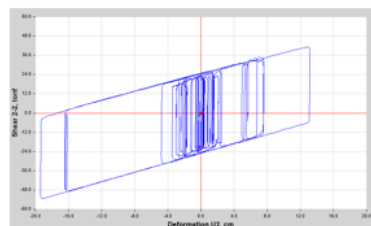
Niveles	Altura de Piso (cm)	Desplazamiento en Y (cm)	Distorsión en el eje Y	Chequeo
Story20	340	40.2785	0.000945	Cumple
Story19	340	40.1329	0.000972	Cumple
Story18	340	39.963	0.001001	Cumple
Story17	340	39.7659	0.001036	Cumple
Story16	340	39.5391	0.001073	Cumple
Story15	340	39.2818	0.00111	Cumple
Story14	340	38.995	0.001146	Cumple
Story13	340	38.6806	0.001172	Cumple
Story12	340	38.3503	0.0012	Cumple
Story11	340	38.0016	0.001251	Cumple
Capa 2	50	37.6545	0.35731	No Cumple
Story10	340	23.2961	0.001215	Cumple
Story9	340	22.9569	0.001218	Cumple
Story8	340	22.5977	0.001205	Cumple
Story7	340	22.2282	0.001172	Cumple
Story6	340	21.8463	0.001131	Cumple
Story5	340	21.4469	0.001069	Cumple
Story4	480	21.0523	0.000965	Cumple
Story3	320	20.4672	0.00081	Cumple
Story2	320	20.1185	0.000666	Cumple
Story1	320	19.8188	0.000597	Cumple
Capa 1	50	19.6018	0.434599	No Cumple
Base	0	0	0	



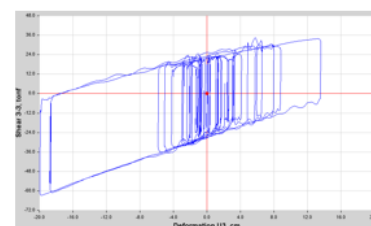
Aislador de Borde desplazado en X (20.36 cm)



Aislador de Borde desplazado en Y (19.60 cm)



Aislador Interno desplazado en X (20.36 cm)



Aislador Interno desplazado en Y (19.57 cm)

Figura 27. Comportamiento histerético de aisladores en doble interface para la capa de base.

Aceleraciones por piso.

Como se puede apreciar en la tabla 32, las aceleraciones de piso sufren una reducción de hasta un 89% con respecto a las aceleraciones del modelo en base fija y de un 54% respecto al modelo de base aislada. En el eje X la aceleración de los pisos está por debajo de los 0.2 g establecidos como aceleración objetivo, mientras que en el eje Y en 4 niveles se supera los 0.2 g pero en tres de ellos están por debajo de los 0.3 g que también se considera una aceleración lo suficientemente segura para salvaguardar los equipos y elementos no estructurales.

Tabla 32 Aceleraciones de piso en el modelo en doble interface

Nivel	Aceleración en X (g)	Chequeo	Aceleración en Y (g)	Chequeo
Story20	0.124220183	Cumple	0.288022426	No Cumple
Story19	0.114087666	Cumple	0.239143731	No Cumple
Story18	0.104057085	Cumple	0.190591233	Cumple
Story17	0.094148828	Cumple	0.164719674	Cumple
Story16	0.090326198	Cumple	0.159276249	Cumple
Story15	0.090173293	Cumple	0.154026504	Cumple
Story14	0.090346585	Cumple	0.148318043	Cumple
Story13	0.09382263	Cumple	0.142864424	Cumple
Story12	0.106136595	Cumple	0.138093782	Cumple
Story11	0.119898063	Cumple	0.155249745	Cumple
Capa 2	0.136269113	Cumple	0.19764526	Cumple
Story10	0.162191641	Cumple	0.156004077	Cumple
Story9	0.152691131	Cumple	0.144831804	Cumple
Story8	0.141569827	Cumple	0.136493374	Cumple
Story7	0.142701325	Cumple	0.137869521	Cumple
Story6	0.143537207	Cumple	0.139510703	Cumple
Story5	0.144108053	Cumple	0.143272171	Cumple
Story4	0.145963303	Cumple	0.165800204	Cumple
Story3	0.151355759	Cumple	0.198888889	Cumple
Story2	0.15470948	Cumple	0.230917431	No Cumple
Story1	0.173414883	Cumple	0.337716616	No Cumple
Capa 1	1.123853211	No Cumple	4.475158002	No Cumple
Base	0.820897044	No Cumple	0.820897044	No Cumple

8.4. Aislamiento Sísmico de Pisos Superiores.

Como se logró observar en el capítulo anterior, el aislamiento en doble interface logra hacer que la estructura se comporte como dos bloques rígidos, eliminando de esta forma el efecto de los modos superiores, disminuyendo las distorsiones de entrepiso y las aceleraciones de piso. Sin embargo, el costo económico de colocar dos capas de aislamiento sísmico no debe ser despreciable, por ende, surge la interrogante de cuál sería el comportamiento dejando solamente una capa de aisladores eliminando la capa de aisladores en la base.

En este capítulo se realizará un análisis sísmico colocando los aisladores en el piso 19 y luego se repetirá el proceso colocando los aisladores bajando de nivel en nivel, de tal manera que se puede identificar en qué nivel los aisladores generan un mejor comportamiento sobre la estructura.

Para dicho análisis se hará uso de aisladores de goma con núcleo de plomo de tal manera que se hará uso del procedimiento de diseño del capítulo 8.2, por lo que dicho procedimiento se omitirá en este capítulo.

Resultados del análisis sísmico de la estructura con aislamiento en el piso 19.

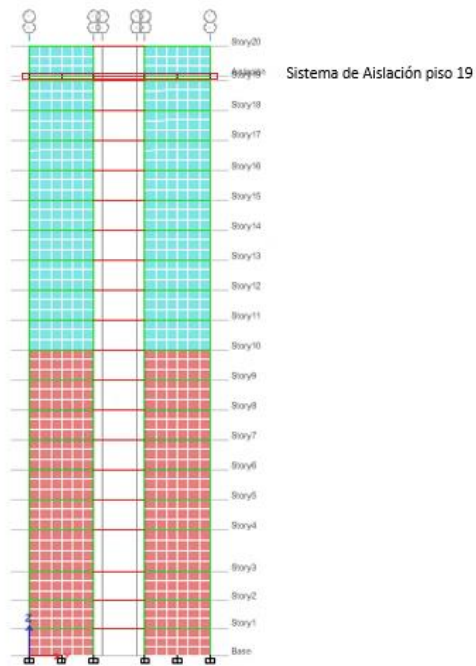


Figura 27 Esquema de aislamiento en el piso 19.

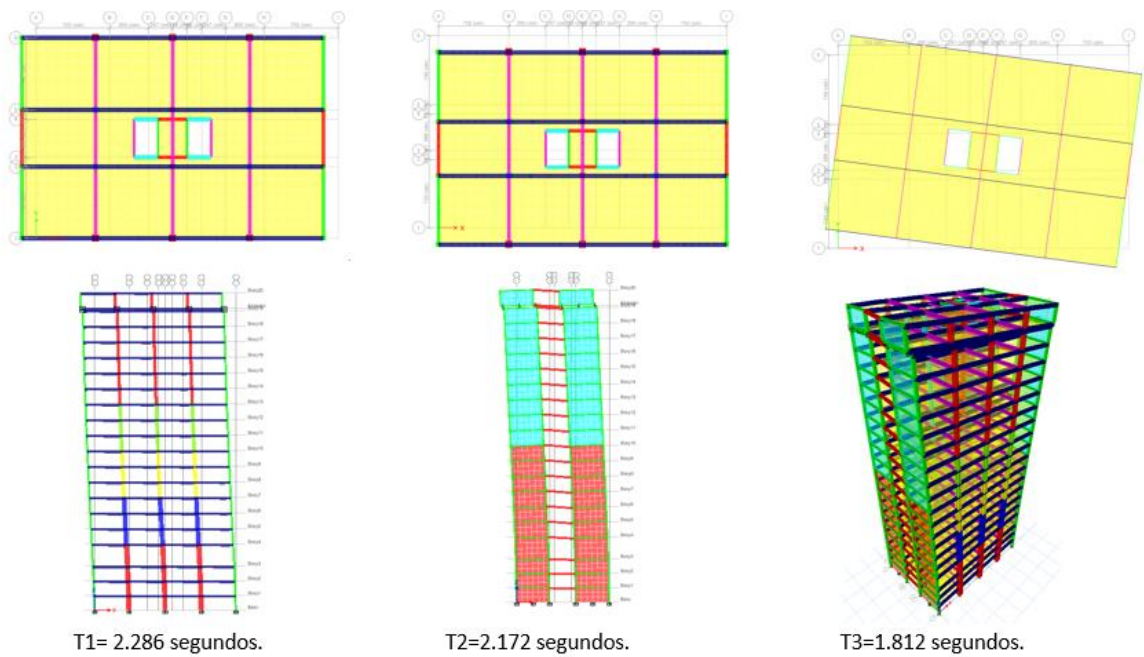
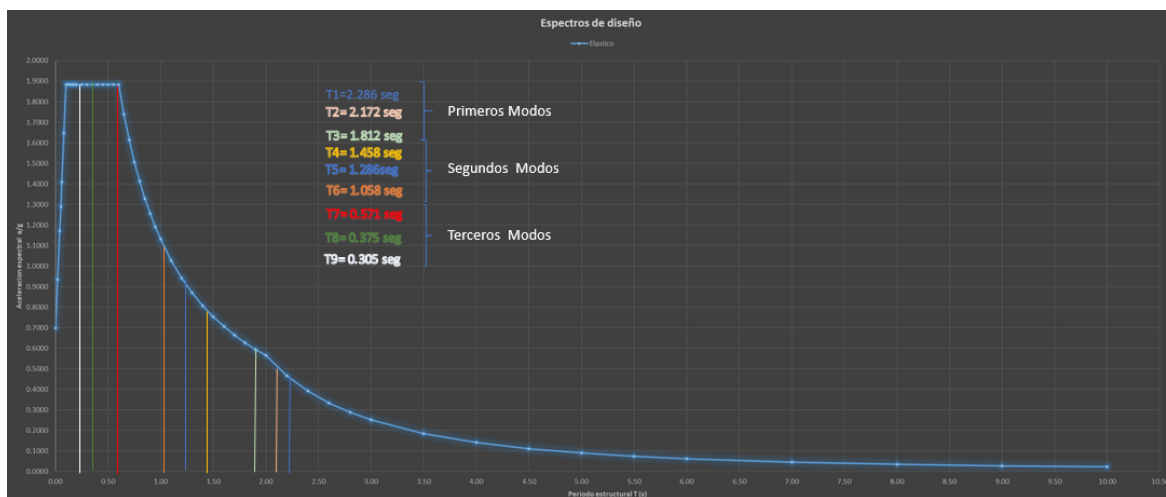


Figura 28. Modos fundamentales de vibración del modelo con aislamiento en el piso 19

Como se logra apreciar en la gráfica 7 y la tabla 33 los periodos de los primeros modos difieren respecto al modelo de la base fija deduciendo que no genera mayor flexibilidad a la estructura sin embargo es interesante observar que los segundos modos sufren una flexibilización saliendo de la zona de la meseta del espectro, caso contrario a los terceros modos que se mantienen dentro de la meseta.

Tabla 33 Participación de masas modales en el modelo con aislamiento en el piso 19.

Modos	Periodos	SUM UX	SUM UY	RUM RZ
1	2.286	0.4771	0	1.12E-06
2	2.172	0.4771	0.3445	1.92E-06
3	1.812	0.4771	0.3445	0.2838
4	1.458	0.7703	0.3445	0.2838
5	1.286	0.7703	0.6979	0.2838
6	1.058	0.7703	0.6979	0.7004
7	0.571	0.8769	0.6979	0.7004
8	0.375	0.8769	0.8442	0.7004
9	0.305	0.9043	0.8442	0.7402
10	0.299	0.9177	0.8442	0.8293
11	0.193	0.9494	0.8442	0.8293
12	0.162	0.9495	0.9145	0.8293
13	0.116	0.9657	0.9152	0.8311
14	0.094	0.9659	0.9157	0.8576
15	0.085	0.9659	0.9432	0.8581
16	0.074	0.9667	0.9432	0.8583
17	0.052	0.9736	0.9443	0.8587
18	0.048	0.9742	0.9451	0.8587
19	0.035	0.9742	0.9451	0.8599
20	0.029	0.9742	0.9451	0.8599



Gráfica 7. Periodos vs espectro de diseño en modelo de aislamiento en nivel 19

Distorsiones de entrepiso.

Como se puede apreciar en la tabla 34 las distorsiones de piso en la estructura con aislamiento en el piso 19 no cumplen, pero si se obtiene una reducción de hasta un 40% con respecto a la estructura con base fija, pese a que los periodos entre ambas estructuras son muy similares, lo que lleva a concluir que el bloque aislado funciona como una especie de freno inercial que limita los desplazamientos de la superestructura.

Tabla 34 Distorsiones de entrepiso en el modelo con aislamiento 19

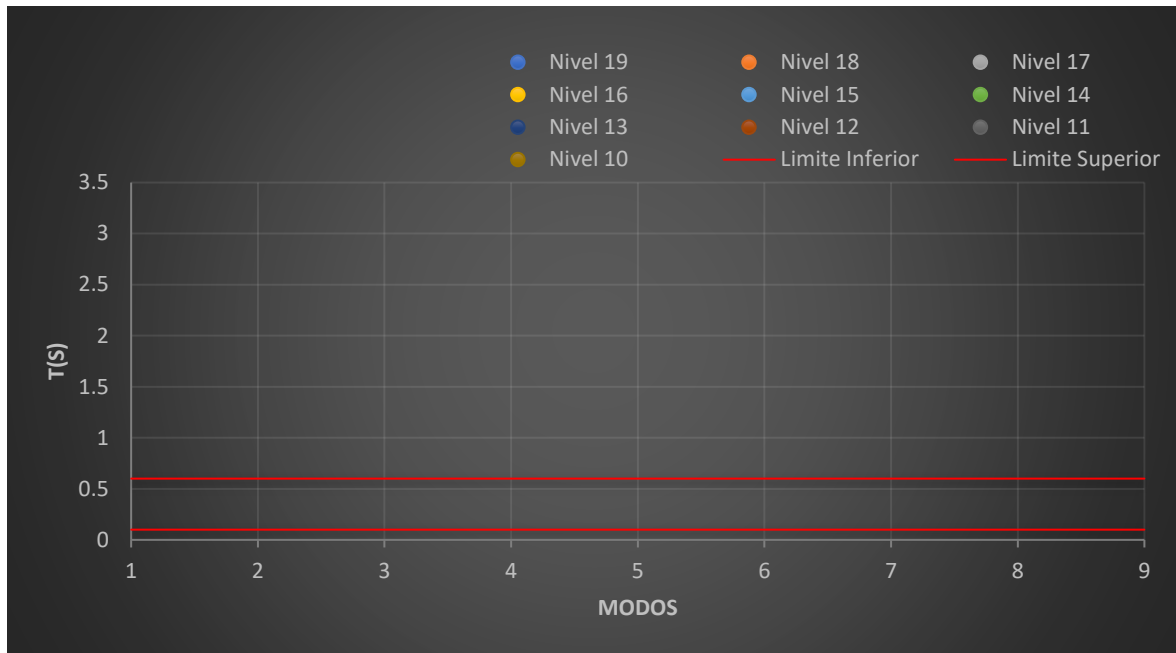
Niveles	Altura de Piso (cm)	Desplazamiento en X (cm)	Distorsión en el eje X	Chequeo
Story20	340	55.5874	0.002998	No Cumple
Aislación	50	55.384	1.416338	No Cumple
Story19	340	53.5991	0.005794	No Cumple
Story18	340	51.6579	0.007251	No Cumple
Story17	340	49.2681	0.008624	No Cumple
Story16	340	47.1438	0.009988	No Cumple
Story15	340	45.1798	0.0111	No Cumple
Story14	340	43.0065	0.011811	No Cumple
Story13	340	40.6074	0.01182	No Cumple
Story12	340	38.0354	0.011869	No Cumple
Story11	340	35.2234	0.011643	No Cumple
Story10	340	32.1812	0.010856	No Cumple
Story9	340	29.0513	0.010298	No Cumple
Story8	340	25.7428	0.010298	No Cumple
Story7	340	22.2823	0.010434	No Cumple
Story6	340	19.2428	0.010665	No Cumple
Story5	340	16.1674	0.01084	No Cumple
Story4	480	12.7069	0.011163	No Cumple

Story3	320	7.3556	0.009898	No Cumple
Story2	320	4.1887	0.008284	No Cumple
Story1	320	1.5386	0.005032	No Cumple
Base	0	0.0758	0	

8.4.1. Análisis de resultados del aislamiento en los pisos superiores.

Dado que el procedimiento es repetitivo en los pisos inferiores, se omitirá dicho procedimiento y solamente se presentarán las gráficas comparativas que permitirán identificar la colocación más acertada de los aisladores en los pisos superiores.

En la gráfica 8 se identifica que la colocación de los aisladores el nivel 14 aporta una mayor flexibilidad a la estructura en los primeros modos, pero no logra neutralizar los segundos y terceros modos. El sistema de aislamiento en el nivel 19 flexibiliza los primeros y segundos modos de tal manera que estos modos queden fuera de la meseta del espectro de diseño, pero no logra este objetivo en los terceros modos.



Gráfica 8 Resumen comparativo de periodos con aislamiento de pisos independientes.

Distorsiones de entrepiso.

Como se puede apreciar en la tabla 35, las distorsiones de entre piso por cada configuración de aislamiento superan el límite por estado de servicio de 0.002 pero en algunos casos como en los pisos 14, 13 y 12 se acercan bastante a este valor límite, comportamiento que quizá se podría mejorar con un análisis más exhaustivo tomando en cuenta el desempeño de los dispositivos de aislación, desempeño que en este estudio no se consideró.

Para fines de comparación con los modelos evaluados en los capítulos 8.1, 8.2 y 8.3 se seleccionó la configuración de aislamiento sísmico en el piso 14.

Tabla 35 Resumen comparativo de distorsiones de entrepiso en modelos de pisos aislado

Nivel	Nivel 19	Nivel 18	Nivel 17	Nivel 16	Nivel 15	Nivel 14	Nivel 13	Nivel 12	Nivel 11	Nivel 10
20	0.002998	0.001873	0.002818	0.00183	0.001555	0.001836	0.002178	0.001417	0.00256	0.003018
19	0.005794	0.001992	0.003322	0.001966	0.001721	0.002139	0.002631	0.001767	0.003122	0.003698
18	0.007251	0.00407	0.003646	0.002022	0.002005	0.002345	0.002978	0.002027	0.00361	0.004311
17	0.008624	0.005317	0.004965	0.002192	0.00227	0.002418	0.003156	0.002151	0.003973	0.004814
16	0.009988	0.006402	0.005391	0.004902	0.002367	0.002354	0.003127	0.002119	0.004174	0.005169
15	0.0111	0.007343	0.005503	0.006501	0.003962	0.002462	0.002904	0.001949	0.004566	0.00535
14	0.011811	0.008219	0.00632	0.007847	0.005277	0.00431	0.002645	0.001773	0.004857	0.005314
13	0.01182	0.00841	0.00699	0.008749	0.006319	0.005177	0.003768	0.001801	0.004827	0.00488
12	0.011869	0.008728	0.007677	0.00969	0.007162	0.005905	0.004645	0.003127	0.004645	0.004427
11	0.011643	0.009108	0.008174	0.01047	0.007986	0.006722	0.005721	0.004483	0.004598	0.004154
10	0.010856	0.009475	0.008195	0.010638	0.008478	0.007082	0.006258	0.00551	0.004846	0.003696
9	0.010298	0.010025	0.008316	0.010888	0.008971	0.007805	0.006675	0.006561	0.005306	0.004183
8	0.010298	0.010456	0.008293	0.010909	0.009296	0.008338	0.006896	0.007644	0.005609	0.004702
7	0.010434	0.010631	0.008046	0.010617	0.009408	0.008548	0.006983	0.00857	0.005723	0.005243
6	0.010665	0.01107	0.008115	0.01053	0.009675	0.008786	0.007331	0.009369	0.006294	0.006042
5	0.01084	0.011496	0.008442	0.010577	0.009972	0.009014	0.008128	0.010031	0.007156	0.006859
4	0.011163	0.011719	0.008885	0.010545	0.010207	0.009327	0.008967	0.010488	0.007867	0.00756
3	0.009898	0.009944	0.007774	0.00885	0.008683	0.008217	0.007908	0.009118	0.006888	0.006666
2	0.008284	0.008209	0.006452	0.007365	0.007153	0.006908	0.006561	0.007729	0.005642	0.005594
1	0.005032	0.004899	0.003878	0.004571	0.004298	0.004262	0.004026	0.004755	0.003581	0.003467
Base	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

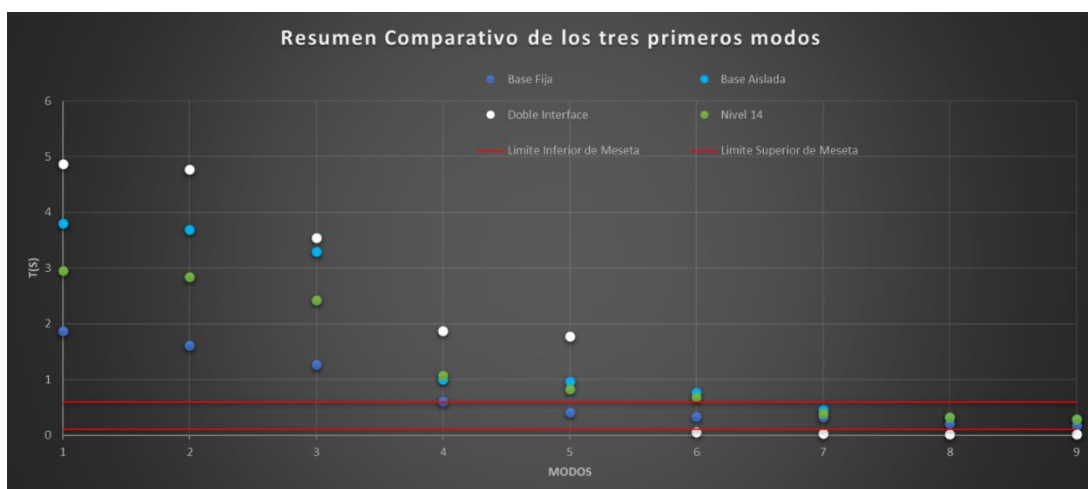
9. Análisis comparativo del comportamiento sísmico en los distintos modelos evaluados.

En el presente capítulo se hará un breve resumen comparativo de las distintas configuraciones de aislamiento sobre la estructura.

En la gráfica 10 y la tabla 36 se puede apreciar como el modelo con configuración en doble interface es el único modelo donde no se genera un efecto por parte de los modos superiores ya que aleja los periodos de los valores entre 0.1 a 0.6 segundos que son los periodos que delimitan la meseta del espectro de diseño utilizado.

Tabla 36 Resumen comparativo de periodos fundamentales

Modos	Base Fija	Base Aislada	Doble Interface	14vo Piso
1	1.87	3.801	4.871	2.952
2	1.619	3.689	4.772	2.846
3	1.277	3.293	3.539	2.431
4	0.615	1.003	1.872	1.079
5	0.414	0.963	1.78	0.83
6	0.338	0.764	0.056	0.685
7	0.329	0.466	0.031	0.386
8	0.217	0.323	0.026	0.323
9	0.181	0.288	0.024	0.288



Gráfica 10. Resumen comparativo de periodos fundamentales

Distorsiones de entrepiso.

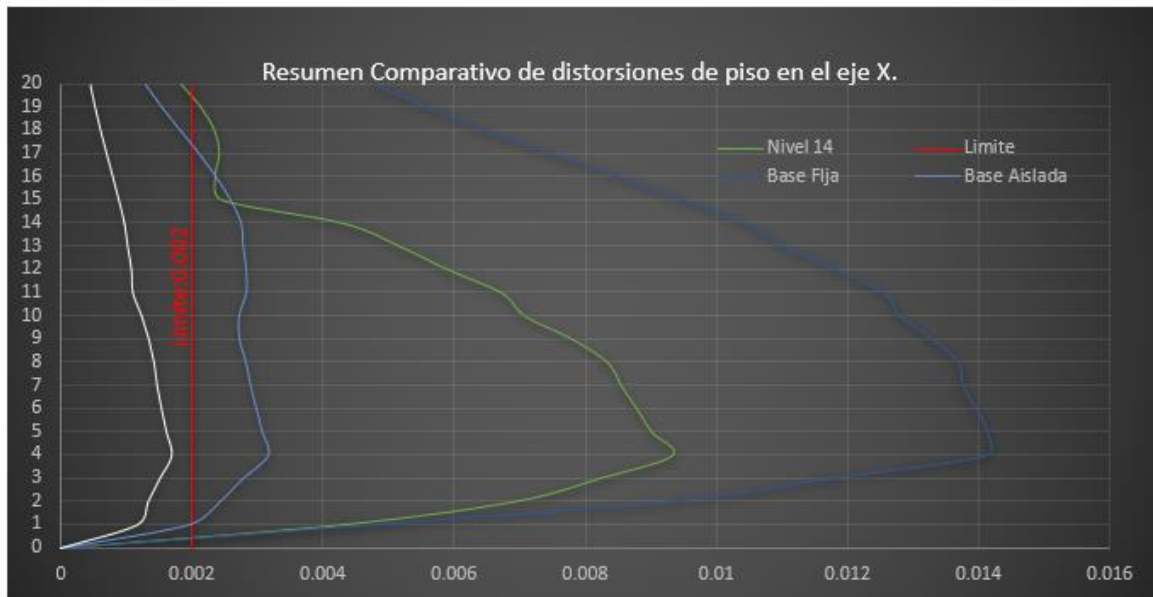
En las tablas 37 y 38 y gráficas 7 y 8 se logra apreciar como las distorsiones de entrepiso mejoran considerablemente en los modelos de base aislada, doble interface y piso superior, respecto al comportamiento de las derivas en el modelo convencional. Sin embargo, solo el modelo en doble interface logra obtener distorsiones menores a 0.002 que son las distorsiones por servicio establecidas en el reglamento nacional de la construcción y al tratarse de una edificación esencial dichas derivas darían una seguridad en la estructura que permitiría la continuidad de su funcionamiento durante un evento sísmico.

Por otro lado, los modelos de base aislada y piso superior aislado se acercan considerablemente a las distorsiones máximas de servicio, lo que podría superarse con un diseño más profundo de los aisladores donde se tome en cuenta el desempeño de los dispositivos.

Si bien es cierto que los modelos de base aislada y piso superior aislado no logran superar las distorsiones límites de servicio, si lograrían superar las distorsiones límites por colapso, lo que indica que son una solución razonable para edificaciones no esenciales.

Tabla 37 Resumen comparativo de distorsiones de entrepiso en el eje X.

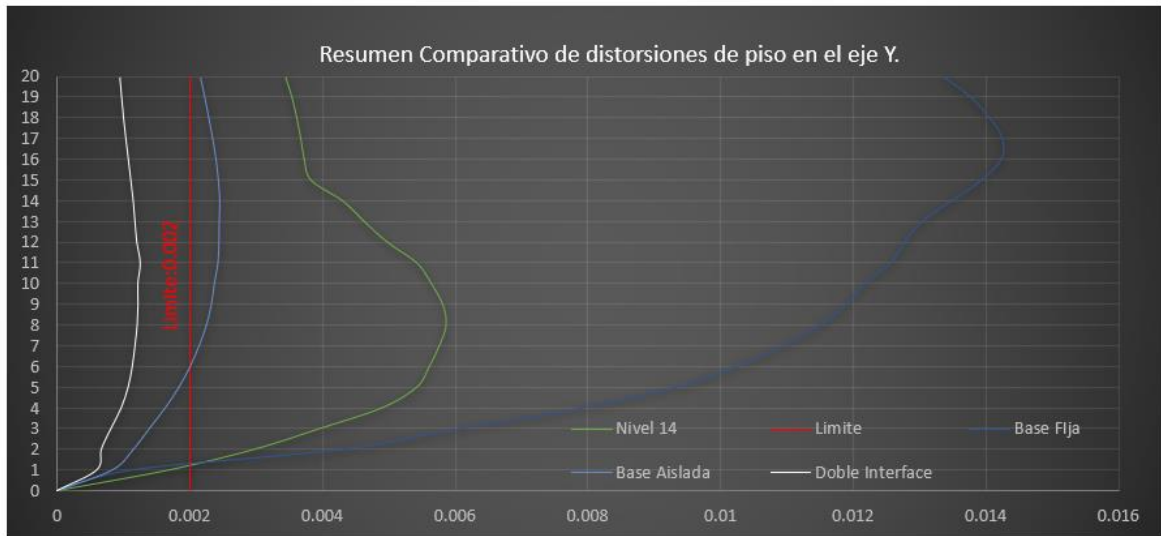
Nivel	Base Fija	Base Aislada	Doble Interface	Nivel 14
20	0.00477765	0.001292	0.000452	0.001836
19	0.00559676	0.001552	0.000528	0.002139
18	0.00650412	0.001834	0.000612	0.002345
17	0.00749588	0.002118	0.000705	0.002418
16	0.00851559	0.002378	0.0008	0.002354
15	0.00951059	0.002598	0.000892	0.002462
14	0.01044824	0.002761	0.000978	0.00431
13	0.01103647	0.00279	0.001027	0.005177
12	0.01182735	0.002838	0.001085	0.005905
11	0.01255647	0.002838	0.001107	0.006722
10	0.01278941	0.002726	0.001242	0.007082
9	0.01328294	0.002736	0.001351	0.007805
8	0.01368265	0.002835	0.001431	0.008338
7	0.01375147	0.002905	0.001479	0.008548
6	0.01395676	0.002995	0.001546	0.008786
5	0.01412235	0.003084	0.001622	0.009014
4	0.01410521	0.003175	0.001703	0.009327
3	0.011715	0.002789	0.00152	0.008217
2	0.00924688	0.002434	0.00134	0.006908
1	0.00465625	0.001948	0.001171	0.004262
Base	0	0	0	0



Gráfica 7. Resumen Comparativo de distorsiones de piso en el eje X.

Tabla 38 Resumen comparativo de distorsiones de entrepiso en el eje Y.

Nivel	Base Fija	Base Aislada	Doble Interface	Nivel 14
20	0.01335794	0.002161	0.000945	0.003444
19	0.01377294	0.002228	0.000972	0.003543
18	0.01405441	0.002288	0.001001	0.003615
17	0.01424588	0.002348	0.001036	0.003676
16	0.01421971	0.002397	0.001073	0.003727
15	0.01392206	0.002432	0.001111	0.00383
14	0.01347176	0.002452	0.001146	0.004309
13	0.01302265	0.002445	0.001172	0.004635
12	0.01276618	0.00244	0.0012	0.004983
11	0.01256088	0.002425	0.001251	0.005426
10	0.01215794	0.00237	0.001215	0.005643
9	0.01189	0.002326	0.001218	0.005813
8	0.01149676	0.002252	0.001205	0.005864
7	0.01092441	0.00214	0.001172	0.005761
6	0.01023441	0.002006	0.001131	0.005611
5	0.00931647	0.001836	0.001069	0.005421
4	0.00792333	0.00163	0.000965	0.004895
3	0.00606875	0.001391	0.00081	0.003958
2	0.00430188	0.00115	0.000666	0.002977
1	0.00112375	0.000834	0.000597	0.001689
Base	0	0	0	0

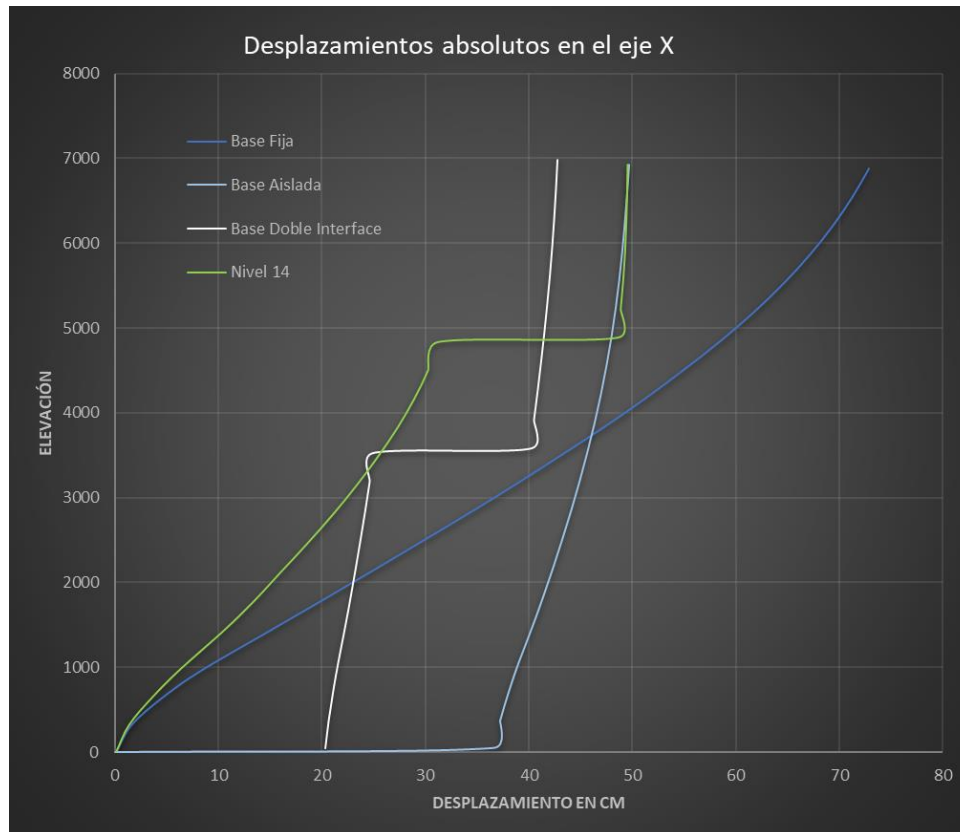


Gráfica 8. Resumen Comparativo de distorsiones de piso en el eje Y.

Desplazamientos Absolutos.

Una de las principales problemáticas desde el punto de vista práctico que presentan los edificios de base aislada son excesivos desplazamientos que suelen ser un problema en cuanto a aprovechamiento de terreno, generan peligro de golpeteo entre edificios colindantes. En la gráfica 9 se aprecia como el modelo de base aislada reduce el desplazamiento absoluto en la azotea en un 31% mientras que el modelo en doble interface reduce dicho desplazamiento en un 41% respecto al modelo de base fija. También es importante destacar que el desplazamiento en la base en el modelo de base aislada es de 37 cm mientras que el desplazamiento en la base del modelo en doble interface es de tan solo 20 cm, lo que implica una reducción del desplazamiento de la capa de aislamiento basal de un 44%.

En cuanto al desplazamiento de azotea en la configuración de aislamiento el nivel 14 también se reduce en un 31% respecto al modelo de base fija lo que representa que el comportamiento del bloque superior se comporta como un freno inercial que ayuda a la estructura a limitar los desplazamientos.



Gráfica 9. Resumen de desplazamientos absolutos.

Aceleraciones de Piso.

Las aceleraciones son un parámetro muy importante y que no debe ser tomado a la ligera, sobre todo en edificaciones hospitalarias donde los equipos y elementos no estructurales ascienden a un 80% del costo total de la edificación. Los equipos médicos son susceptibles a las vibraciones por lo que la norma Hazus recomienda que las aceleraciones no deben exceder al 30% de la aceleración de la gravedad. Como se menciona al inicio de este documento, para este estudio se estableció una aceleración de piso objetivo del 20% de la gravedad. Como se muestra en las tablas 39 y 40, el modelo de base aislada reduce sus aceleraciones de piso en un promedio 77% respecto de las aceleraciones de base fija, mientras que el modelo en doble interface reduce sus aceleraciones de piso en 87% respecto al modelo de base fija. El modelo con aislamiento en el nivel 14 resulta efectivo para el control de aceleraciones únicamente en los niveles por encima de la capa de aislamiento.

Tabla 39 Resumen comparativo de aceleraciones de piso en el eje X.

Nivel	Base Fija	Base Aislada	Doble Interface	Nivel 14
Story20	1.46247706	0.32827727	0.124220183	0.49621814
Story19	1.22828746	0.30530071	0.114087666	0.40058104
Story18	1.1038634	0.29291539	0.104057085	0.30851172
Story17	0.97147808	0.27530071	0.094148828	0.20977574
Story16	0.97486239	0.24633028	0.090326198	0.3046789
Story15	1.05222222	0.21060143	0.090173293	0.37174312
Story14	1.06933741	0.20786952	0.090346585	1.4504791
Story13	0.93958206	0.2038634	0.09382263	1.20751274
Story12	0.76911315	0.17648318	0.106136595	1.05296636
Story11	0.69320082	0.17832824	0.119898063	0.95536188
Story10	0.81369011	0.17917431	0.162191641	0.78882773
Story9	0.94496432	0.18058104	0.152691131	0.67788991
Story8	0.85156983	0.16971458	0.141569827	0.74041794
Story7	0.94192661	0.16114169	0.142701325	0.71332314
Story6	0.97916412	0.1514577	0.143537207	0.73456677
Story5	0.79802243	0.15853211	0.144108053	0.78131498
Story4	0.74132518	0.18058104	0.145963303	0.9130683
Story3	0.89992864	0.21196738	0.151355759	1.06224261
Story2	0.93902141	0.22672783	0.15470948	1.00575943
Story1	0.81861366	0.23568807	0.173414883	0.85512742
Base	0.84087666	0.82089704	0.82089704	0.82606524

Tabla 40 Resumen comparativo de aceleraciones de piso en el eje Y.

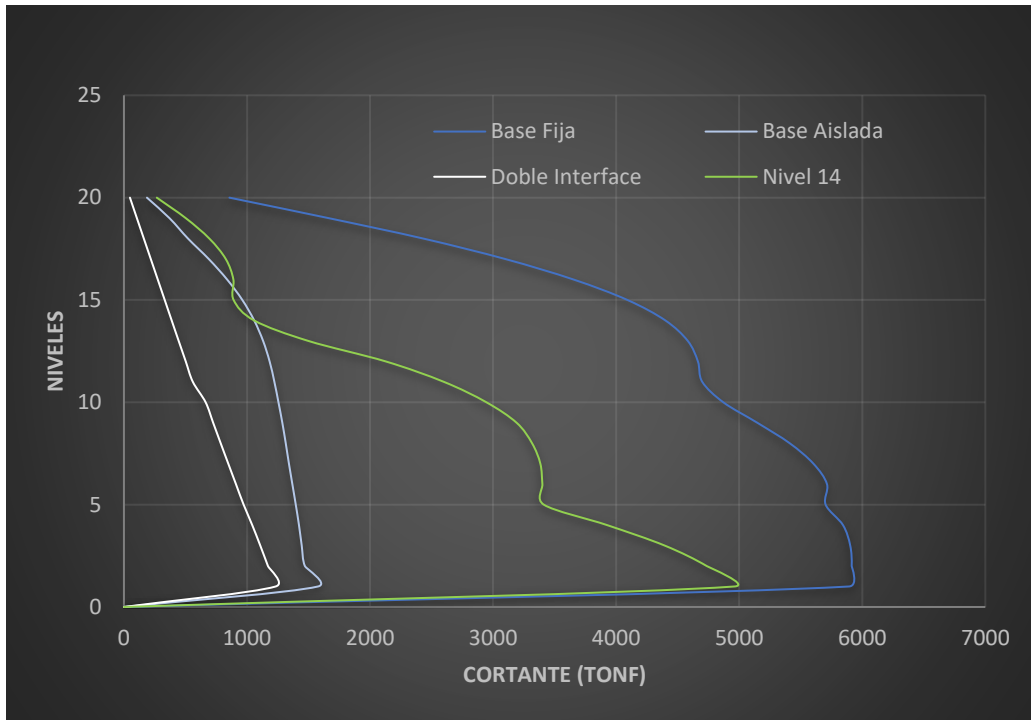
Nivel	Base Fija	Base Aislada	Doble Interface	Nivel 14
Story20	1.88191641	0.30910296	0.28802243	1.20735984
Story19	1.51930683	0.28398573	0.23914373	0.80094801
Story18	1.25826707	0.25964322	0.19059123	0.37593272
Story17	0.9643527	0.24304791	0.16471967	0.23599388
Story16	0.95565749	0.2277472	0.15927625	0.42437309
Story15	0.87637105	0.20966361	0.1540265	0.64468909
Story14	0.9232314	0.18899083	0.14831804	1.98714577
Story13	0.9772579	0.16657492	0.14286442	1.5420897
Story12	0.99997961	0.14912334	0.13809378	1.37005097
Story11	0.99763507	0.12931702	0.15524975	1.24992864
Story10	1.00783894	0.12626911	0.15600408	1.12576962
Story9	0.96333333	0.12918451	0.1448318	1.10508665
Story8	0.91845056	0.13053007	0.13649337	0.98895005
Story7	0.97146789	0.13183486	0.13786952	0.91547401
Story6	1.03624873	0.14044852	0.1395107	0.92077472
Story5	1.04296636	0.14727829	0.14327217	0.95991845
Story4	0.96057085	0.15246687	0.1658002	0.95344546
Story3	0.91278287	0.16965341	0.19888889	0.9779103
Story2	0.83801223	0.17720693	0.23091743	0.94907238
Story1	0.83576962	0.19262997	0.33771662	0.87250765
Base	1.34023445	0.82089704	0.82089704	0.87152905

Cortante en cada Nivel.

Otro parámetro importante a tomar en cuenta es la fuerza cortante en cada uno de los niveles, la reducción del cortante implica que la estructura a pesar de estar sometida a las mismas demandas sísmicas se reducen las demandas a nivel de los elementos estructurales. En la tabla 41 y la gráfica 12 se puede apreciar la diferencia de cortantes en cada uno de los modelos evaluados. En el caso del modelo de base aislada reduce en un 76% los cortantes del modelo de base aislada, mientras que el modelo en doble interface reduce los cortantes de piso en un 88%. El modelo con aislamiento en el nivel 14 quizá no es tan eficiente como los demás modelos aislados, pero logra reducir en un 50% los cortantes del modelo de base fija.

Tabla 41. Cortante de pisos en el eje X

Cortante por niveles (tonf)				
Nivel	Base Fija	Base Aislada	Doble Interface	Nivel 14
20	857.1453	187.0673	48.7841	267.0638
19	1662.4304	369.734	105.1851	502.0988
18	2434.0389	520.8827	161.7349	694.3904
17	3099.8015	689.6791	218.2847	827.8444
16	3653.7103	838.4414	274.8345	889.3622
15	4091.8208	962.2246	331.3843	891.3233
14	4400.0096	1058.6496	387.9341	1057.8115
13	4581.9798	1130.8676	444.8961	1497.9363
12	4664.2539	1183.8903	502.3709	2126.4846
11	4699.7247	1222.5777	559.8456	2599.8432
10	4871.0303	1255.8539	663.9432	2946.025
9	5147.4896	1287.1139	725.1044	3191.2527
8	5410.3964	1314.9527	786.2656	3316.5567
7	5603.2355	1340.8869	847.9767	3384.0713
6	5713.4002	1368.7432	910.3379	3400.5347
5	5702.2214	1396.3833	972.6992	3411.838
4	5843.3739	1422.5301	1042.7778	3926.5677
3	5902.1028	1444.6983	1107.9075	4394.5254
2	5913.7887	1470.4089	1170.2729	4735.7384
1	5891.3246	1576.7583	1232.4567	4960.7468
Base	0	0	0	0

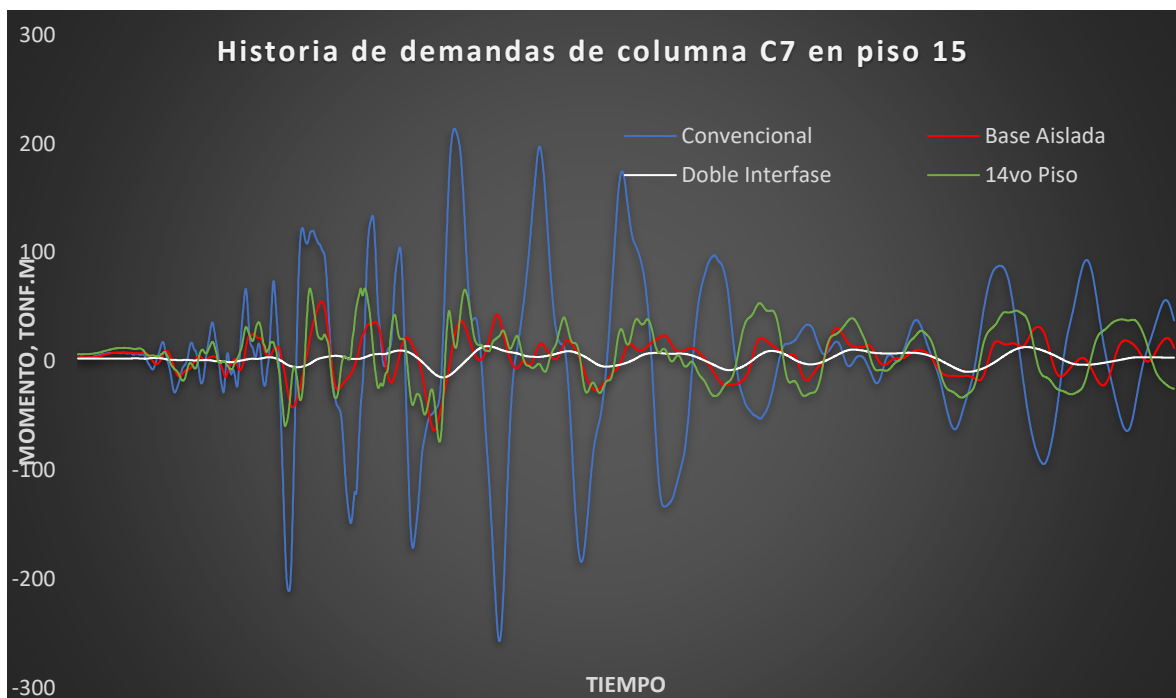


Gráfica 12 Cortante de pisos en el eje X

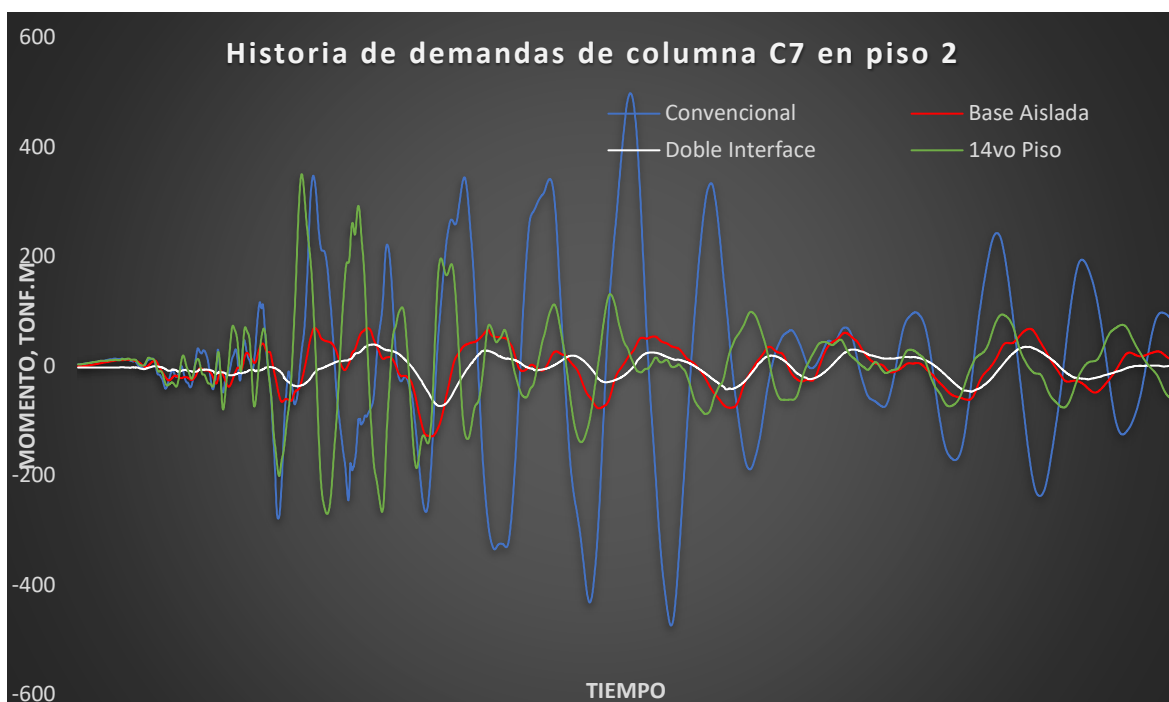
Historia de momentos en Columnas.

Debido al costo económico que implicaría la colocación de los sistemas de aislamiento sísmico, es importante verificar que tan eficientes son respecto a las demandas en los elementos estructurales, ya que una reducción significativa en las demandas de los elementos estructurales podría generar una reducción considerable en las dimensiones y el refuerzo de acero de dichos elementos que contrarrestarían el gasto en los dispositivos aisladores. Para dicha comparación se tomaron las columnas críticas en 2 niveles por encima de las capas de aislamiento como lo son el nivel 2 y 15.

Como se puede apreciar en las gráficas 13 y 14 en los tres modelos con aislamiento hay una reducción importante en las demandas de la columna respecto al modelo de base fija, siendo el modelo en doble interface el que más reducción de demandas presenta, el que puede generar en una reducción de hasta un 93% en la columna crítica del nivel 2 y en un 94% en la columna del nivel 15. Comparando el modelo de doble interface versus el modelo de base aislada se aprecia como el modelo de doble interface logra reducir en un 43% las demandas de columna del nivel 2 y en un 75% las demandas de la columna del nivel 15. En el caso del modelo de aislamiento en el nivel 14 se logra reducir las demandas respecto al modelo de base fija, pero no se logra el mismo objetivo respecto a los otros modelos aislados. También es importante notar que en el modelo en doble interfase las oscilaciones de las demandas son menores lo que demuestra una reducción en el efecto de los modos superiores.



Gráfica 13. Resumen comparativo de variación de momentos en el tiempo de la columna C7 piso 15



Gráfica 14. Resumen comparativo de variación de momentos en el tiempo de la columna C7 piso 2

Balance Energético.

Otro parámetro que vale la pena verificar es el balance energético de los distintos modelos, dichos balances permiten observar que porcentaje de la energía ingresada por los sismos es disipada a través del amortiguamiento del sistema y que porcentaje de esa energía es disipada por el ciclo histerético de los aisladores.

La tabla 42 muestra como el modelo de doble interface es capaz de disipar hasta un 73% de la energía de entrada a través del comportamiento histerético de los aisladores, mostrando de esta forma su eficiencia.

Tabla 42. Resumen comparativo del balance energético

Modelo	Energía de entrada(tonf-m)	Energía disipada por amortiguamiento(tonf-m)	Energía disipada por histéresis(tonf-m)	%disipado por amortiguamiento	%disipado por histéresis
Base Fija	8290.7243	7840.082	0	95%	0%
Base Aislada	2573.2485	1183.6943	1312.3567	46%	51%
Doble Interface	3063.3111	796.4608	2236.2171	26%	73%
Nivel 14	5794.9688	2897.4844	32839.5347	50%	49%

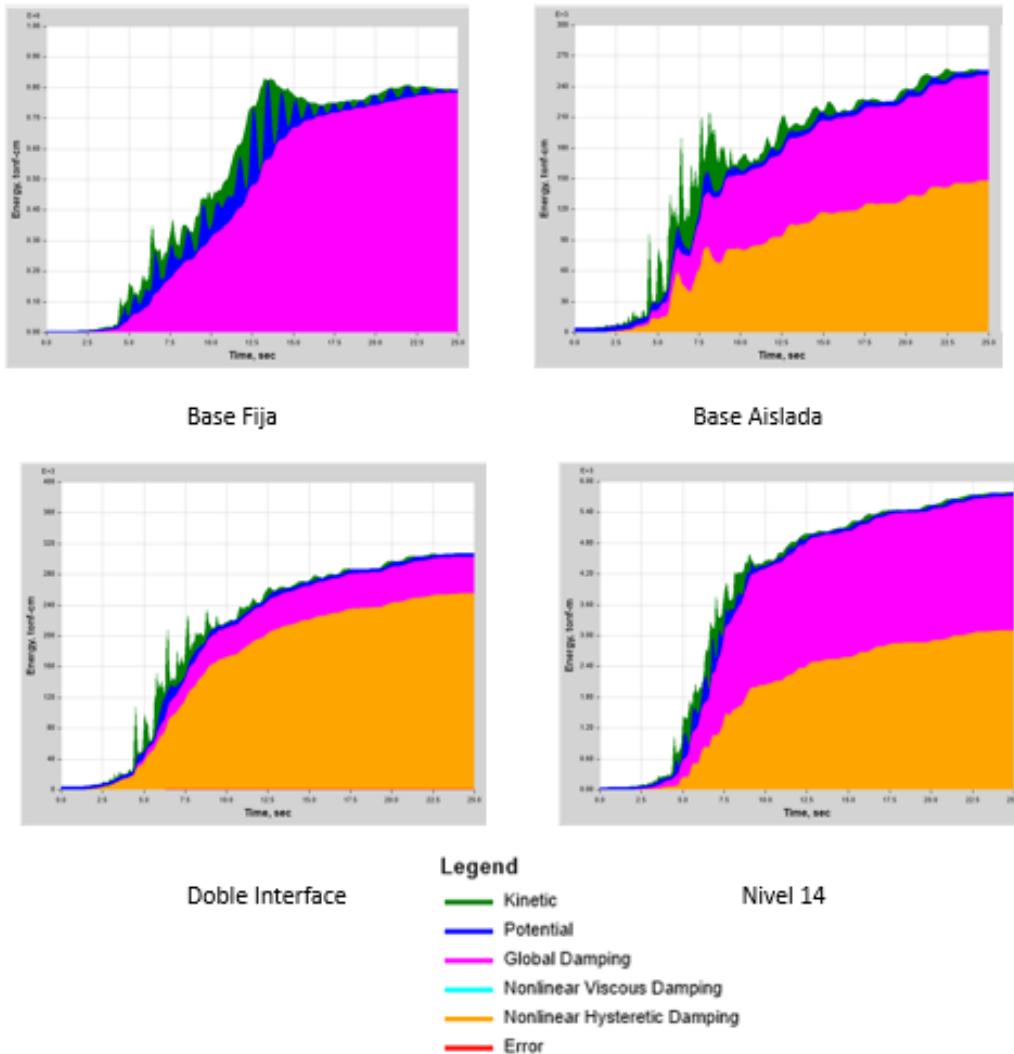


Figura 28 Diagramas de balance energético. ETABS V 17

10. Conclusiones.

En este estudio se analizó la respuesta sísmica de un edificio de concreto de 20 niveles. Se consideró la estructura con base fija y la estructura equipada con aislamiento sísmico, con aisladores de goma con núcleo de plomo ALNP, y con aislamiento en doble interface utilizando aisladores AD, también se estudió la respuesta del edificio con aislamiento de pisos superiores. Los resultados obtenidos permiten deducir las siguientes conclusiones:

El periodo de vibración de la estructura aislada se incrementa debido a la flexibilidad proporcionada por el sistema de aislación, esto reduce las demandas en los elementos estructurales. El modelo de doble interface es el único modelo donde no se genera un efecto por parte de los modos superiores ya que aleja los periodos de los valores entre 0.1 a 0.6 segundos que son los periodos que delimitan la meseta del espectro de diseño utilizado.

En el estudio se aprecia como el modelo de base aislada reduce el desplazamiento absoluto en la azotea en un 31% mientras que el modelo en doble interface reduce dicho desplazamiento en un 41% respecto al modelo de base fija. También es importante destacar que el desplazamiento en la base en el modelo de base aislada es de 37 cm mientras que el desplazamiento en la base del modelo en doble interface es de tan solo 20 cm, lo que implica una reducción del desplazamiento de la capa de aislamiento basal de un 44%. Esta reducción reduce la posibilidad de que los aisladores presenten esfuerzos de tracción indeseados.

Se logró apreciar como las distorsiones de entrepiso mejoran considerablemente en los modelos de base aislada, doble interface y piso superior, respecto al comportamiento de las derivas en el modelo convencional. Sin embargo, solo el modelo en doble interface logra obtener distorsiones menores a 0.002 que son las distorsiones por servicio establecidas en el reglamento nacional de la construcción y al tratarse de una edificación esencial dichas derivas darían una seguridad en la estructura que permitiría la continuidad de su funcionamiento durante un evento sísmico.

En el modelo con aislamiento en doble interface los desplazamientos máximos ocurren en las capas de aislamiento sísmico, por lo que los dos bloques aislados se comportan como bloques rígidos y sus derivas se reducen a valores menores a los máximos permisibles. Esto se demostró no solo en el comportamiento de las distorsiones sino también en el balance energético donde el modelo en doble interface disipa hasta un 73% de la energía de entrada.

En la estructura aislada en el nivel 14 hay una reducción importante de la deriva con respecto a la estructura de base empotrada, pero este cambio solo se logra por encima de la capa superior de aislamiento, dado que la base permanece empotrada la estructura por debajo de la capa de aislamiento sigue disipando energía a través de las distorsiones de entrepiso. Caso contrario a la estructura por encima de la capa de aislamiento donde la disipación de energía se da por la deformación de los aisladores.

Las aceleraciones de entrepiso en las estructuras con configuraciones de aislamiento sísmico sufren una importante reducción en las aceleraciones de piso. Sin embargo, solamente la configuración de aislamiento en doble interfase experimenta aceleraciones por debajo de los 0.2 g que se planteó como aceleración objetivo al inicio de esta investigación. A pesar de que las configuraciones de base aislada y piso superior aislado no logran alcanzar la aceleración objetivo, estas se acercan considerablemente a este valor, por lo que haciendo uso de un diseño más profundo y detallado de los aisladores y en donde se tome en cuenta el desempeño de estos, se podría alcanzar perfectamente esos valores de aceleración de objetivo.

Con respecto a la fuerza cortante basal obtenida en las estructuras aisladas también hay una reducción importante con respecto a la estructura de base rígida, eso significa que las estructuras aisladas estarán sometidas a menor demanda sísmica.

De los modelos analizados, solamente el modelo de aislamiento múltiple o doble interface alcanza el objetivo de condición de servicio en ocupación inmediata, ya que es el único que cumple en su totalidad con los valores objetivos tanto de aceleración de piso como de distorsiones de entrepiso.

11.Recomendaciones

Dado que en esta investigación no se toma en cuenta el desempeño de los aisladores, se recomiendan estudios más profundos que tomen en cuenta el desempeño de los aisladores ya que al reducirse los desplazamientos máximos de los dispositivos se reduce también la posibilidad de generarse esfuerzos de tracción, así como efectos de segundo orden que serían perjudiciales sobre todo en los elementos de borde.

Se recomienda generar estudios más profundos tomando en cuenta las variantes en la altura en distintos modelos y que ayuden a determinar cómo estas variantes en altura y las características sísmicas de sitio amplifican el efecto de los modos superiores y como la aislación múltiple podría ser una alternativa de solución.

Se recomienda generar estudios más profundos sobre la aplicabilidad de la configuración de aislamiento en pisos superiores que considere el porcentaje de masa a aislar y la rigidez del sistema de aislamiento tal que el periodo del bloque aislado interactúe con el periodo del bloque inferior para mejorar su comportamiento.

Dado que la aplicación de dos capas de aislamiento sísmico implica una inversión económica alta, se recomienda realizar un estudio de factibilidad económica que tome en cuenta la posible reducción de secciones de elementos estructurales debido a la reducción de demandas en estos.

12. Referencias

1. Aguiar Falconí, Roberto / Almazán, José Luis / Dechent / Vinicio Suárez, Peter. **“Aisladores de base elastoméricos y FPS”**. Escuela Politecnica del Ejercito. Ecuador. 2016.
2. Kohei Fujita, **“Experimental Study on Influence of Hardening of Isolator in Multiple Isolation Building”**, Kyoto University, Japan 2016
3. Masaki Taniguchi, Kohei Fujita, **“Hybrid Control System for Greater Resilience Using Multiple Isolation and Building Connection”**, Kyoto University, Japan 2016
4. Becker TC, Ezazi A, **“Enhanced performance through a dual isolation seismic protection system”**, Berkeley University, USA 2016
5. Ahumada Villafañe, José Luis. **“Sistemas de control en estructuras”**. Obtenido de: Revista Inge-CUC / Vol. 6 - No. 6 / Octubre 2010 / Barranquilla - Colombia / ISSN 0122-6517. Colombia. 2010.
6. American Society of Civil Engineers (ASCE). **“Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures ASCE/SEI 7-16”**. American Society of Civil Engineers. Estados Unidos. 2017.
7. Instituto Nacional de Normalización (INN). **“Análisis y Diseño de edificios con aislación sísmica NCh2745 2013”**. Instituto Nacional de Normalización (INN) Chile 2013.
8. Carmona P., Rosas A. **“Análisis Comparativo del Comportamiento Sísmico Dinámico del diseño normativo sísmo-resistente de un sistema dual frente al modelo con aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDR)”**

de un sistema aporticado, del Edificio de Oficinas Schell de seis pisos ubicado en la Provincia de Lima – Perú". Perú. 2015.

9. Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT) / Cámara chilena de la construcción. **"Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía"**. Chile. 2011.
10. Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT) / Cámara chilena de la construcción. **"Protección sísmica de estructuras"**. Chile. 2012.
11. Kawashima, kazuhiko. **"Seismic Isolation of Bridges in Japan"**. Instituto Tecnológico de Tokio. Centro de Investigación de Obras Públicas (P.W.R.I. por sus siglas en inglés) Japón. 1993.
12. Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI). **"Reglamento Nacional de la Construcción (RNC – 07)"**. Nicaragua. 2007.
13. Norwin Reyes, Aiser Sarria / Maltez, Julio. **"Metodología para la determinación de la vulnerabilidad sísmica en edificaciones"**. Nicaragua.
14. Rodríguez, Dionisio. Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER). **"Actualización del Mapa de Fallas Geológicas de Managua – Informe Técnico"**. Nicaragua. 2002.
15. Rodríguez, Dionisio. **"Managua tiene todas sus fallas sísmicas activas"**. Nicaragua; 2012. Obtenido de:
<https://www.elnuevodiario.com.ni/nacionales/455517-fallas-sismicas-managua>).
16. Rodríguez, Dionisio. **"Fallas geológicas de Managua"**. Instituto de Geología y Geofísica (IGG – CIGEO) / Instituto de Estudios Territoriales (INETER). Nicaragua. 2002.

17. Segura, Fabio Francisco. **“Reseña de la sismicidad en Nicaragua con énfasis en la depresión nicaragüense”**. Instituto de Estudios Territoriales (INETER).
18. Villarreal Castro, Genner / Oviedo Sarmiento, Ricardo. **“Edificaciones con disipadores de energía”**. Perú. 2009.