



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN**

**INGENIERÍA CIVIL**

**AISLAMIENTO SÍSMICO EN EDIFICIOS PREFABRICADOS EN LA ZONA DE  
TRANSICIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

**TESIS**

**PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**INGENIERÍA CIVIL-ESTRUCTURAS**

**PRESENTA:**

**DANIELA WAGNER**

**TUTOR:**

**DR. AMADOR TERÁN GILMORE**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA CD. MX., MARZO 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez  
Secretario: M.I. Octavio García Domínguez  
1er. Vocal: Dr. Amador Terán Gilmore  
2do. Vocal: Dr. Darío Rivera Vargas  
3er. Vocal: Dr. Carlos Méndez Galindo

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

---

DR. AMADOR TERAN GILMORE

“La originalidad consiste en volver al origen. De modo que es original aquel que, con sus medios, vuelve a la simplicidad de las primeras soluciones.”

Antonio Gaudí

## **AGRADECIMIENTOS**

Al finalizar este trabajo, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a las siguientes personas e instituciones:

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de formarme en sus aulas.

Agradezco también en forma muy especial Dr. Amador Terán Gilmore, tutor de tesis por su invaluable asesoría y por el valioso tiempo que invirtió durante el desarrollo de este trabajo.

A los sinodales, Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez, Dr. Darío Rivera Vargas, Dr. Carlos Méndez Galindo y M.I. Octavio García Domínguez, por el valioso tiempo dedicado a la revisión de esta tesis y por los comentarios y aportaciones que fueron de gran ayuda para el mejoramiento de la misma.

A mi esposo e hijos y todas las personas familiares, compañeros y amigos que me alentaron a seguir adelante hasta la finalización de este trabajo.

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es documentar para los arquitectos e ingenieros civiles de México la posibilidad de usar de manera eficiente un sistema de aislamiento sísmico para elevar el nivel de seguridad estructural de edificios prefabricados de concreto reforzado, ubicados en la Zona Metropolitana de México. La notable mejoría que exhibe el edificio con respecto a un edificio similar que tenga base rígida no solo se circunscribe al desempeño estructural, sino que se refleja en mucho mejor desempeño de los elementos no estructurales y contenidos del edificio.

Se analiza brevemente el concepto de aislamiento de base y se presenta la problemática asociada al uso de edificaciones prefabricadas en zonas de alta sismicidad. Se discute dentro de este contexto, como es que el uso de aislamiento sísmico puede representar una alternativa viable y atractiva para super-estructuras prefabricadas. Además, se ofrece una descripción del ambiente sísmico representado por la Zona de Transición de la Ciudad de México.

Este trabajo se enfoca en diseñar un sistema de aislamiento sísmico para un edificio de 10 pisos ubicado en la Zona de Transición de la Ciudad de México. Se establece el desempeño del edificio cuando se le sujeta a una serie de movimientos del terreno que representan la acción de diseño, y a partir de ello, se discute la pertinencia de usar sistemas de aislamiento en algunas zonas del Distrito Federal. Se concluye que el edificio aislado exhibe un nivel notable de seguridad estructural, y que su costo monetario es comparable al que tendría si se hubiera estructurado con un sistema estructural tradicional.

## **ABSTRACT**

The objective of this paper is to document the ability to efficiently use a system of seismic isolation for architects and civil engineers of Mexico, to increase the level of structural safety of buildings structured based on walls and precast concrete frames strengthened and located in the Transition Zone of Mexico City. The exhibits marked improvement with respect to a similar building that has rigid base is not only limited to the structural performance, but also showed much better performance of non-structural elements and building contents.

It briefly analyzes the concept of basic isolation and presents the problems associated with the use of prefabricated buildings in areas of high seismicity. It is argued within this context, how the use of seismic isolation may represent a viable and attractive alternative for prefabricated superstructures. In addition, a description of the seismic environment represented by the Transition Zone of Mexico City is provided. This work focuses on designing a seismic isolation system for a building of 10 floors located in the Transition Zone of Mexico City.

The performance of the building is established when it is subject to a number of ground movements representing the action of design, and from it, the relevancy is discussed of using isolation systems in some areas of the Federal District. It is concluded that the isolated building exhibits a remarkable level of structural safety, and that its cost is comparable to that he would have if it had been structured with a traditional structural system.

## Tabla de Contenido

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESUMEN .....</b>   | <b>V</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>  | <b>VI</b> |
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>                                 | <b>8</b>  |
| 1.1 Objetivo.....  | 9         |
| 1.2 Organización del trabajo.....                            | 10        |
| <b>2. ANTECEDENTES PROBLEMÁTICA Y GENERALIDADES .....</b>    | <b>11</b> |
| 2.1 Aislamiento Sísmico .....                                | 11        |
| 2.1.1. <i>Antecedentes</i> .....                             | 11        |
| 2.1.2 <i>¿Qué hace el Aislamiento Sísmico de Base?</i> ..... | 12        |
| 2.1.3 <i>Tipos de aislamiento</i> .....                      | 13        |
| 2.2 Prefabricados .....                                      | 14        |
| 2.3 Ambiente Sísmico de la Zona de Transición .....          | 15        |
| <b>3. CONCEPCION Y DISEÑO ESTRUCTURAL .....</b>              | <b>19</b> |
| 3.1 Descripción Estructura Prefabricada .....                | 19        |
| 3.2 Teoría Lineal para el Aislamiento Sísmico .....          | 23        |
| 3.3 Sistema de Aislamiento.....                              | 26        |
| 3.4 Desempeño sísmico .....                                  | 30        |
| 3.4.1 <i>Modelado</i> .....                                  | 30        |
| 3.4.2 <i>Análisis Modal Espectral</i> .....                  | 34        |
| 3.4.3 <i>Análisis Tiempo-Historia</i> .....                  | 41        |
| <b>4. COMPARATIVO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES .....</b>        | <b>48</b> |
| 4.1 Ventajas y Análisis del Problema .....                   | 48        |
| <b>5. CONCLUSIONES .....</b>                                 | <b>56</b> |
| 5.1 Conclusiones .....                                       | 56        |
| 5.2 Recomendaciones.....                                     | 58        |
| 5.2.1 <i>Reglamentación</i> .....                            | 58        |
| 5.2.2 <i>Producción y Aplicación en México</i> .....         | 59        |
| 5.3.3 <i>Factibilidad</i> .....                              | 59        |
| <b>REFERENCIAS .....</b>                                     | <b>61</b> |



## 1. INTRODUCCIÓN

La República Mexicana es un país de elevada sismicidad, en el que la ocurrencia de sismos intensos es frecuente. Las aceleraciones del terreno de los movimientos del terreno que se generan en sitios ubicados cerca de las costas del Pacífico Mexicano suelen ser notoriamente altas, y en ocasiones llegan a sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad. Aunque la Ciudad de México se encuentra relativamente alejada de la zona epicentral de los sismos que se generan en el Pacífico Mexicano, las condiciones del subsuelo en el Valle (Cuenca) de México resultan en una elevada amplificación de los movimientos del terreno. Debido a lo anterior, la comunidad mexicana de ingeniería estructural ha invertido esfuerzos importantes para dotar al Distrito Federal con un reglamento de construcciones moderno, y que se adecua a las condiciones locales. En particular, las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS-2004) de este reglamento indican que tienen como propósito obtener una seguridad adecuada tal que:

"...; y b) Bajo el sismo en que se basa la revisión de la seguridad contra colapso según estas Normas, no ocurran fallas estructurales mayores ni pérdidas de vidas, *aunque pueden presentarse daños que lleguen a afectar el funcionamiento del edificio y requerir reparaciones importantes o inclusive, su demolición.*"

Mientras las NTCDS-2004 enfocan el diseño de los sistemas estructurales de los edificios para evitar fallas estructurales mayores (colapsos), la comunidad internacional de ingeniería estructural entiende cada vez con mayor claridad la necesidad de trascender este enfoque, y plantear el uso de sistemas de control para reducir los niveles de pérdidas por sismo. Por ejemplo, a nivel internacional se ha discutido en detalle cómo es que el uso de sistemas de aislamiento sísmico puede llegar a generar enormes beneficios en términos de la calidad y seguridad del sistema estructural, así como ahorros sustanciales en tiempos de construcción y en costo total del sistema estructural durante su vida útil.

Los empresarios y propietarios que invierten en el medio construido de la Ciudad de México, empiezan a entender con mayor claridad las implicaciones del daño por sismo, particularmente en lo que se refiere a las pérdidas directas e indirectas asociadas a él. Por lo mismo, han surgido expectativas en cuanto a la necesidad de tener rendimientos monetarios más altos, y estas han llevado a plantear la necesidad de reducir sustancialmente los costos de reparación de los elementos estructurales y de la reposición de elementos no estructurales y equipos, y de los tiempos de interrupción de la

operación. En muchas ocasiones, se ha llegado plantear que el monto de estas pérdidas puede representar varias veces el costo directo del sistema estructural.

Los dispositivos de aislamiento sísmico son un sistema de protección que puede mejorar el desempeño sísmico de edificios ubicados en algunas zonas del Distrito Federal. Sin embargo, de alguna manera se ha propagado en el medio de la ingeniería estructural mexicana la idea de que su uso no debe considerarse para edificios que se construyan en el Distrito Federal, ya que los altos periodos del terreno de los suelos ubicados en la Zona del Lago hacen esta aplicación impráctica y hasta peligrosa. Consideración importante en todo esto es que en el Valle de México existen una gran cantidad de sitios que no se ubican en la Zona del Lago, y que representan una opción atractiva para el uso del aislamiento sísmico.

### **1.1 Objetivo**

El objetivo de esta tesis es investigar qué tan factible resulta, desde puntos de vista técnico y económico, usar un sistema de aislamiento sísmico en un edificio de mediana altura (10 pisos) estructurado con base en muros y marcos prefabricados de concreto reforzado y ubicado en la Zona de Transición de la Ciudad de México.

Para alcanzar este objetivo, se planteó lo siguiente:

1. Documentar el estado-de-la-práctica en cuanto al uso de sistemas aislamiento sísmico a nivel mundial.
2. Estudiar la teoría que sustenta el uso de sistemas de aislamiento, y las metodologías de diseño.
3. Seleccionar un escenario, lo que contempla el sitio de la construcción y el sistema estructural que será considerado. En particular se eligió un edificio de 10 pisos de concreto prefabricado ubicado en un sitio de la Zona de Transición con periodo dominante del terreno de 1 s. Se consideró este caso porque primero, se consideró que, si el edificio se diseñará con un sistema estructural tradicional, terminaría con un periodo fundamental de vibración cercano a 1 s y que, debido a la coincidencia de este periodo con el del terreno, se tendría en este caso dificultad para promover un desempeño sísmico adecuado. En contraste, se planteó que aislar el edificio promovería un mejor desempeño estructural y no estructural, y que esto ayudaría a entender a muchos de los integrantes de la ingeniería estructural mexicana que el sistema de aislamiento puede usarse exitosamente tanto para aislar edificios de mediana altura como para aquellos ubicados en algunas zonas del Distrito Federal.

4. Se procedió a usar una metodología de diseño basado en desempeño para el diseño de la super-estructura y su sistema de aislamiento. Una vez concluido el diseño, se preparó un modelo de análisis estructural.
5. A partir de una serie de análisis dinámicos se estableció la respuesta del edificio bajo consideración cuando se le sujeta a la acción del sismo de diseño. A partir de los resultados obtenidos, se discute la pertinencia de usar un sistema de aislamiento sísmico en edificios de mediana altura ubicados en algunas zonas de la Ciudad de México.

## 1.2 Organización del trabajo

Esta tesis está organizada en cinco capítulos conforme a lo siguiente:

- Primero se resumen los antecedentes y alcance del trabajo.
- En el segundo capítulo se analiza brevemente el concepto de aislamiento de base y se presenta la problemática asociada al uso de edificaciones prefabricadas en zonas de alta sismicidad. Se discute dentro de este contexto, como es que el uso de aislamiento sísmico puede representar una alternativa viable y atractiva para super-estructuras prefabricadas. Además, se ofrece una descripción del ambiente sísmico representado por la Zona de Transición de la Ciudad de México.
- En el tercer capítulo se presenta el diseño del sistema estructural aislado. Se hace énfasis en las consideraciones teóricas que llevan a tomar las decisiones que sustentan el proceso de diseño basado en desempeño.
- En el cuarto capítulo se presentan y discuten los resultados de una serie de análisis dinámicos del sistema aislado. Con base en esto y una serie de consideraciones sobre el costo monetario del sistema, se discute la pertinencia del uso de aislamiento sísmico para edificios de mediana altura construidos en la Ciudad de México.
- Finalmente, el último capítulo presenta las conclusiones de esta tesis.

## 2. ANTECEDENTES PROBLEMÁTICA Y GENERALIDADES

### 2.1 Aislamiento Sísmico

#### 2.1.1. Antecedentes

Desde edades antiguas ha habido ejemplos de que el hombre intenta protegerse de los sismos. Por ejemplo, 2000 años A.C. se hizo en Grecia un intento por usar aislamiento sísmico de base. En el Palacio de Cnosos se colocó entre la cimentación y la base del edificio arena fina como elemento aislante. La tumba de Ciro en Persia, mostrada en la Figura 2.1, está construida de manera tal que en su parte inferior concentra bloques de mayor tamaño y conforme se alcanza mayor altura, el tamaño se reduce progresivamente hasta la cubierta, lo que aligera la estructura y separa el volumen en dos secciones que pueden considerarse aisladas desde el punto de vista del sismo.



**Figura 2.1** Tumba de Ciro

En tiempos modernos Johannes Avetian Calantarients escribió en 1909 una carta al director del Servicio Sismológico de Santiago de Chile sobre un método que había desarrollado, del cual decía: “edificios importantes pueden ponerse a salvo en países con problemas sísmicos mediante la existencia de juntas libres lubricadas”. Las primeras aplicaciones de los aisladores de base modernos se dieron en puentes, ya que estas estructuras normalmente se apoyan sobre capas de neopreno que permiten acomodar libremente los desplazamientos diferenciales producto de los cambios de temperatura. Esto permitió la simple sustitución de las placas de neopreno por aisladores de base.

El primer intento moderno por utilizar un sistema de aislamiento en edificaciones se dio en la escuela Heinrich Pestalozzi, en Scopje, Yugoslavia, en 1969. Para ello se usó el denominado método suizo, que consistía en aislar el sistema estructural en tres

direcciones (dos horizontales y la vertical) a través de vigas de caucho natural sin reforzar. (Naeim y Kelly, 1999) A partir de este proyecto, puede decirse que empezó un esfuerzo concertado de experimentación, implementación y patentado de sistemas de aislamiento a nivel internacional. Países que lideraron este esfuerzo incluye a los Estados Unidos, Japón y Nueva Zelanda. Una vez que maduró el concepto de aislamiento sísmico y se desarrolló su teoría con fines de análisis y diseño, se han hecho varios intentos por aplicarlo en países en desarrollo. Un ejemplo exitoso es Chile, que en años recientes ha aislado varias estructuras importantes, incluyendo hospitales. En contraste, en México, considerado por la comunidad internacional como uno de los países con mayor sismicidad en el mundo, se ha implementado muy poco este tipo de sistemas. Dentro de este contexto, vale la pena mencionar que las primeras aplicaciones del aislamiento de base en México se dieron en los años setentas del siglo XX. Se aislaron con diferentes métodos algunos edificios de concreto reforzado y mampostería ubicados en la Ciudad de México; entre otros, una escuela secundaria de cuatro niveles, una iglesia, la prensa de un periódico, el aislamiento parcial de un hotel, dos estructuras industriales y dos puentes.

### 2.1.2 ¿Qué hace el Aislamiento Sísmico de Base?

Los aisladores de base son dispositivos que se colocan entre la cimentación y la super-estructura de una edificación, y en caso de usarse correctamente, modifican (reducen) sustancialmente la respuesta sísmica de la construcción. Su objetivo es reducir la acción del sismo sobre la super-estructura a través de alargar el periodo fundamental de vibración del sistema estructural y, en ocasiones, el medio de proveerle amortiguamiento extra. En estructuras de baja altura ubicadas en zonas de terreno firme, esto lleva al periodo fundamental de vibrar a una zona espectral de franca de-amplificación dinámica, lo que implica aceleraciones espectrales muy bajas. Puede decirse entonces que hay dos factores que influyen significativamente en la respuesta de un edificio aislado, y que suelen resultar en una reducción importante de demandas sísmicas en la super-estructura:

1. Cambio del periodo fundamental de vibrar de la edificación
2. Cantidad de energía que el sistema de aislamiento absorbe y disipa

### 2.1.3 Tipos de aislamiento

Los sistemas de protección sísmica empleados en la actualidad comprenden desde dispositivos de control pasivo relativamente simples hasta sistemas activos avanzados. Los sistemas pasivos son más conocidos por los ingenieros prácticos, e incluyen el aislamiento sísmico, sistemas de disipación de energía (viscosos e hysteréticos) y sintonizadores de masa. Es posible decir que hoy en día el aislamiento sísmico es el sistema más estudiado y desarrollado de la familia; y que continuamente presenta avances en tipos de dispositivos, aplicaciones y especificaciones de diseño.

Los aisladores sísmicos de base de tipo pasivo se dividen en dos grandes grupos: a) Dispositivos de hule (elastómeros); y b) Dispositivos (péndulos) de Fricción. Esta tesis considera dispositivos elastoméricos (aisladores de hule sintético) de alto amortiguamiento como el mostrado en la Figura 2.2. Un elastómero está formado por varias capas de hule intercaladas entre placas de acero. En ocasiones, se provee al dispositivo con un corazón de plomo para incrementar su capacidad de disipar energía. En la tapa y base del aislador se colocan placas de acero que permiten conectar el aislador al edificio y la cimentación. Debido al efecto confinante de las placas de acero, un aislador de hule exhibe una rigidez vertical mucho mayor que la que exhibe en dirección lateral (González y Aguilar 2005).



**Figura 2.2** Aislador de hule

## 2.2 Prefabricados

Los edificios prefabricados están compuestos por elementos principales como columnas, trabes, losas y fachadas, que se construyen en taller para ser ensamblados en obra. La fabricación y montaje de sistema prefabricado pueden considerarse procesos industrializados cuando se les compara con el proceso de construcción de un sistema estructural tradicional de concreto reforzado. En muchas partes del mundo el uso de sistema prefabricados es común debido a las múltiples ventajas que ofrece, tales como:

1. Rapidez de construcción
2. Reducción de costos
3. Mayor control de calidad
4. Eficiencia y limpieza en obra
5. Reducción en cantidad de columnas
6. Claros y espacios más amplios sin necesidad de soportes intermedios
7. Mayor seguridad (ambientes y procedimientos controlados)
8. Reduce la emisión de polvo, el consumo de energía eléctrica, y los residuos y ruido
9. Estándares de productividad y eficiencia

En zonas de alta sismicidad, el diseño de un sistema estructural conformado por marcos resistentes a momento suele plantearse en términos del uso de detallado dúctil para los elementos estructurales y sus conexiones, lo que conlleva la formación de articulaciones plásticas en los extremos de vigas y algunas columnas cuando el marco queda sujeto a la acción de una excitación sísmica intensa. Mientras que es fácil aterrizar este concepto en estructuras coladas in situ, el caso de sistemas prefabricados se complica, particularmente en lo que se refiere al detallado requerido para promover un comportamiento dúctil. En particular, ha sido casi imposible encontrar maneras prácticas y económicas de conectar entre sí los elementos estructurales, y de proveer conexiones que garanticen niveles adecuados y confiables de rigidez y resistencia a flexión, y que puedan desarrollar comportamiento plástico de manera estable. Esto se ha reflejado en estudios que indican que si no se usan conexiones húmedas (coladas en sitio), el comportamiento de los nudos difícilmente cumple con las condiciones de resistencia, ductilidad y rigidez requeridas por las normas de diseño por sismo.

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF-2004) y sus Normas Técnicas Complementarias tienen limitaciones y lagunas con respecto al diseño y construcción de estructuras prefabricadas de concreto reforzado, y esto ha resultado en prácticas de diseño y construcción deficientes e inseguras. Esto, dentro de un contexto

donde la experiencia ha demostrado que es en las conexiones donde se producen los problemas durante los sismos, particularmente cuando el diseño implementado no es capaz de trabajar de forma adecuada en su rango plástico de comportamiento (Rendel M., 2013).

En una estructura con aislamiento de base, las demandas sísmicas de desplazamiento lateral se concentran en los dispositivos aislantes. En contraste, las demandas de desplazamiento lateral se mantienen relativamente constantes a todo lo alto de la super-estructura, de tal manera, que las distorsiones de entrepiso resultan mucho menores que las que este sistema exhibiría en caso de desplantarse sobre una base rígida. Esto implica que las demandas sísmicas en una super-estructura prefabricada serían lo suficientemente pequeñas como para mantener al sistema estructural en su intervalo elástico de comportamiento, eliminando con esto la necesidad de un detallado refinado e impráctico para las conexiones. Bajo estas circunstancias, el sistema prefabricado pudiera diseñarse bajo la consideración exclusiva de las cargas verticales, de tal forma, que todas las ventajas discutidas para este tipo de sistemas pudieran aprovecharse en zonas de elevada sismicidad.

### **2.3 Ambiente Sísmico de la Zona de Transición**

La cuenca de México se encuentra comprendida entre los paralelos 19°02' y 20°12' y los meridianos 99°40' y 98°15'; y cubre un área aproximada de 9600 km<sup>2</sup>. Es posible entender esta cuenca como un valle cerrado con largo de 110 km (en la dirección norte-sur) y ancho de 80 km (en la dirección) este-oeste. La cuenca se encuentra ubicada entre altitudes de 2236 a 5230 m sobre el nivel del mar, y aloja en su parte central el área metropolitana de la Ciudad de México, que abarca un área aproximada de 755.4 km<sup>2</sup>.

A mediados del siglo XX se llevó a cabo por primera vez un estudio científico del subsuelo de la Ciudad de México bajo la dirección del Dr. Nabor Carrillo Flores, con el objetivo de entender la problemática del hundimiento regional y ofrecer medidas paliativas. Como resultado del estudio, se propuso en 1948 una zonación geotécnica que contemplaba tres zonas: de lomas, de transición y del lago. En el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal de 1966 ya se distinguen en el subsuelo zonas de baja y alta compresibilidad. Hacia 1978, Raúl J. Marsal presentó una zonificación que distingue tres áreas (lacustre, aluvial y pétreo), y que contempla zonas de transición ubicadas en las fronteras de estas. Distinguió además entre transiciones progresivas, inter-estratificada y abruptas. Finalmente, a raíz de los sismos de 1985, se estableció un mapa que delimitaba





## CAPÍTULO 2

A través del tiempo se ha podido observar que diversos tipos de temblores afectan el medio construido ubicado en el Valle de México (Rosenblueth *et al.* 1987). En particular, los temblores locales llegan a afectar las Zonas de Loma y Transición, y los movimientos que generan tienden a amplificarse en superficies convexas como las puntas de los cerros. Temblores como los de Acambay, ocurrido en 1912, alertan sobre la posibilidad de la ocurrencia de eventos sísmicos intensos con epicentros en las cercanías del valle. Los temblores de profundidad están asociados a una falla normal causada por el rompimiento de la placa de Cocos debajo del Valle de México. Finalmente, pueden mencionarse los temblores de subducción. El medio construido en la ciudad de México, aunque relativamente alejado de la zona de subducción ubicada en el Pacífico Mexicano, suele desarrollar demandas sísmicas importantes durante eventos de subducción. Lo anterior se debe a la amplificación dinámica que sufre el movimiento del terreno cuando viaja a través de las arcillas compresibles del valle.

En el transcurso de los siglos México se ha visto afectado por varios eventos sísmicos de elevada intensidad. Sin embargo, puede decirse que fue partir de la ocurrencia del sismo de Guerrero de 1957 que se hizo un esfuerzo concertado por entender el comportamiento sísmico del valle de México, y la respuesta estructural de su medio construido. A partir de entonces, las normas de diseño han ido mejorando, y se tiene un mayor conocimiento sobre el comportamiento de las ondas sísmicas en los diferentes tipos de subsuelo. Hoy en día se espera la ocurrencia de un evento sísmico mayor en intensidad al ocurrido en 1985. En palabras del Dr. Eduardo Reinoso (2007): *"es de esperarse que ante un sismo futuro que ocurra en las costas de Guerrero, debemos esperar una amplificación relativa mayor al terremoto de Michoacán aun en terreno firme en la ciudad de México"*.

Ordaz y Singh (1992) han mostrado que aun en la Zona de Lomas del Distrito Federal, considerada como de terreno firme, los movimientos del terreno exhiben grandes amplificaciones con respecto a las que tendrían sitios de terreno firme localizados a distancias epicentrales similares a las que exhibe el valle de México con respecto a las zonas epicentrales del Pacífico Mexicano. Puede decirse que independientemente del tipo de suelo y a pesar de su lejanía de la zona de subducción, se espera que la Ciudad de México viva en el futuro movimientos intensos y prolongados del terreno que pueden causar daños económicos y sociales de consideración. En términos de sus características dinámicas, los sitios ubicados en la Zona de Transición generan movimientos del terreno de larga duración cuyos espectros elásticos de pseudo-aceleración exhiben un pico notorio en periodos que van de 0.5 hasta 1.0 s. Es importante notar que en aquellos sitios con periodo cercano a 1.0 s, el contenido de frecuencias suele exhibir una banda angosta alrededor del periodo dominante, y que se observan amplificaciones dinámicas

importantes. Esto implicaría que un edificio con un periodo fundamental de vibrar cercano a 1.0 s podría exhibir una respuesta dinámica de consideración debido a un fenómeno de resonancia, y que, bajo estas circunstancias, vale la pena estudiar el uso de sistemas de control como una forma de mejorar, de manera eficiente y segura, su desempeño estructural.

Esta tesis se enfoca a estudiar el desempeño sísmico de un edificio de 10 pisos ubicado en la Zona II o de Transición. Aunque el uso de aislamiento sísmico no resultaría recomendable en algunas partes de la Zona del Lago, su uso, ya sea en la Zona de Lomas o en la de Transición, se podría ver reflejado en enormes beneficios socio-económicos para los 14 millones de ciudadanos que habitan la zona 1 y 2, los cuales son aproximado 75% de la población metropolitana.

### **3. CONCEPCION Y DISEÑO ESTRUCTURAL**

#### **3.1. Descripción Estructura Prefabricada**

El edificio consta de dos cuerpos principales, los cuales están unidos para formar un solo cuerpo estructural a los niveles de la cimentación y de 2 pisos subterráneos usados para estacionamiento. A partir de planta baja (en los 10 niveles destinados a oficinas) los 2 cuerpos quedan unidos por las porciones de las plantas que ubican los elevadores, escaleras y pasillos de comunicación. En la azotea se encuentra un cuarto de máquinas. En planta, el edificio tiene dimensiones de 42.5 m (dirección X) por 27 m (dirección Y), y posee una altura total de 36.5 m.

El edificio está compuesto por varios elementos prefabricados. La sub-estructura se basa en un sistema de zapatas aisladas de 2.50 x 2.50 m colocadas en los ejes de columnas. Las zapatas se conectan mediante trabes de liga. El sistema de losa en los sótanos consiste en una losa plana reticular aligerada. En el perímetro del predio, los pisos subterráneos cuentan con muros de concreto. Columnas y vigas con sección transversal rectangular dan lugar a una super-estructura conformada por marco resistentes a momento de concreto prefabricado. La estructura tiene 28 columnas prefabricadas en planta. Las columnas tienen una sección transversal rectangular de 70x70 cm. Las trabes, portantes y de rigidez, tienen una sección transversal de 50x30 cm. Para el sistema de losa aligerada de la super-estructura se optó por usar placas alveolares. En particular, se usaron placas de 1.20 m de ancho con peralte de 15 cm y longitudes variables (según el claro de la losa).

En términos de regularidad estructural, el edificio puede considerarse regular en lo que se refiere a su masa, y resistencia y rigidez laterales, tanto en planta como elevación. La Figura 3.1 muestra vistas en planta y elevación del edificio bajo consideración.

Se hicieron dos diseños para el sistema estructural del edificio de 10 pisos. Mientras que el primero consideró base rígida y la acción simultánea de cargas gravitacionales y cargas laterales debidas a sismo; el segundo consideró exclusivamente las cargas gravitacionales bajo la suposición de que se le provee un sistema de aislamiento que hace innecesaria la consideración de las cargas laterales en el diseño de la super-estructura.

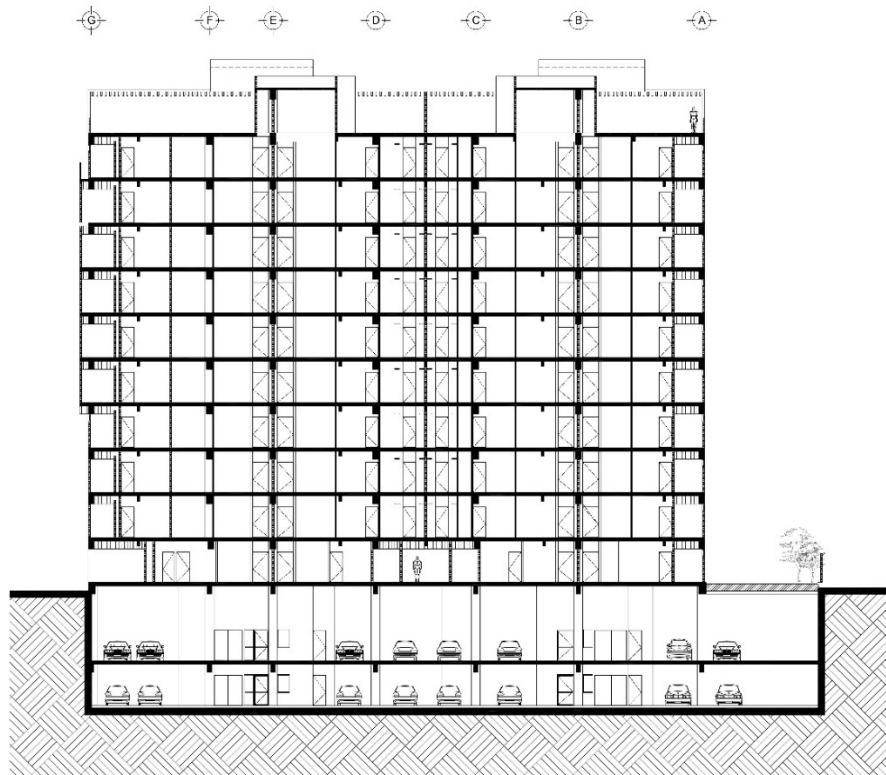
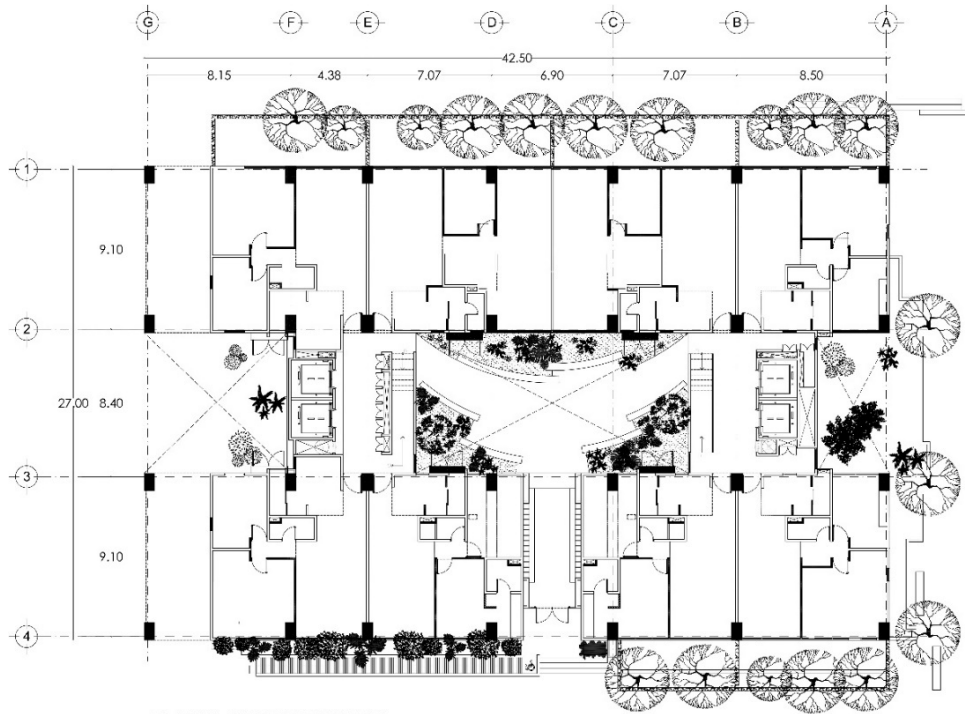


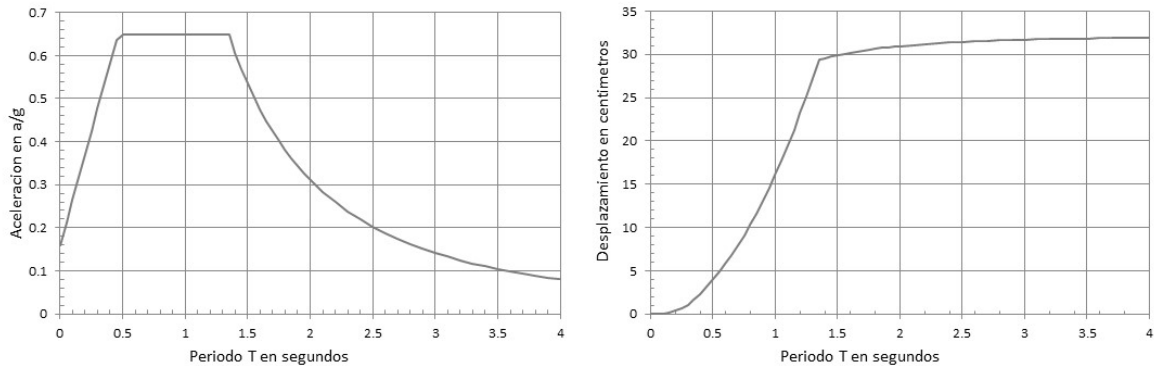
Figura 3.1 Planta y elevación del edificio bajo consideración

## CAPÍTULO 3

La estructura se diseñó conforme los requisitos establecidos en el Reglamento para las Construcciones del Distrito Federal (2004) y sus Normas Técnicas Complementarias. Por su tipo de ocupación, el edificio se considera Tipo B.

En cuanto a los materiales estructurales se consideró un concreto de clase 1 con  $f'c$  de 300  $\text{kg/cm}^2$  y peso volumétrico mayor que 2200  $\text{kg/m}^3$ . Como acero de refuerzo se usaron varillas corrugadas grado 42 con esfuerzo de fluencia  $f_y$  de 4200  $\text{kg/cm}^2$  para varillas de #3 y diámetros mayores. Además, se usó alambrión del #2 con  $f_y$  de 2530  $\text{kg/cm}^2$ .

La Figura 3.2 resume los espectros normativos elásticos de diseño, los cuales se establecieron conforme a lo indicado en el Apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.



**Figura 3.2** Espectros de diseño

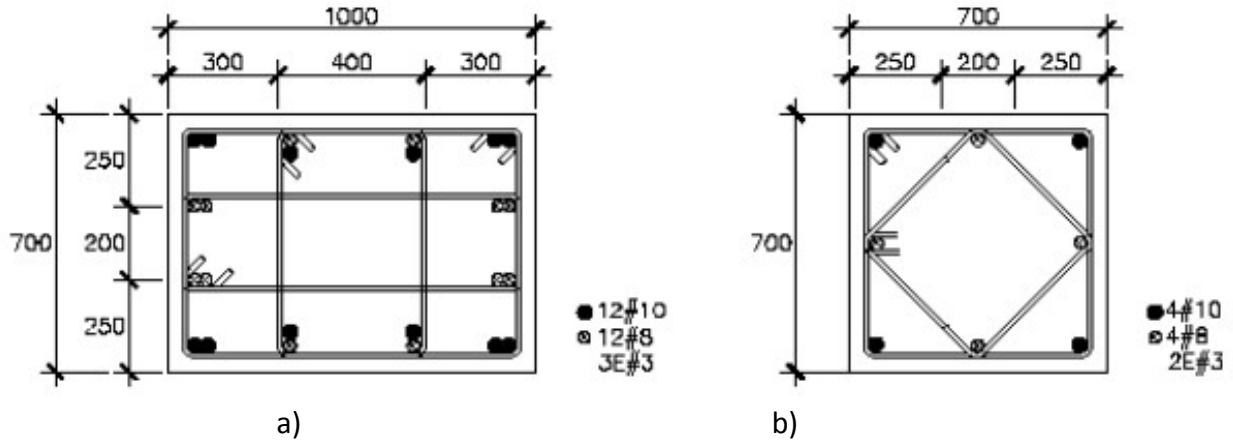
A continuación, se resumen las principales consideraciones de diseño para la versión del edificio que contempla las cargas laterales:

1. Se usa un factor de comportamiento sísmico  $Q$  de 2 debido a que la estructura se estructura con marcos y muros de concreto prefabricado.
2. Se considera la bi-direccionalidad de la acción sísmica. En particular, los análisis consideran de manera simultánea la acción de 100% del sismo en una dirección y del 30% en la dirección perpendicular.
3. En cada piso se consideran torsiones accidentales del 10% de las dimensiones en planta.
4. Se utiliza un análisis dinámico modal espectral. Los elementos mecánicos y desplazamientos laterales debidos a sismo se calculan bajo la consideración del método de la combinación cuadrática completa (CQC).

5. Se revisa que el cortante mínimo de diseño sea 80% del que se obtendría usando el método estático de análisis.
6. Para la revisión de los desplazamientos laterales se usa un límite permisible para la distorsión de 0.015. Esta revisión se hace a partir de la planta baja y hasta la azotea del edificio.

Es conocido que las cargas gravitacionales provocan poca flexión en los subsistemas verticales que transmiten cargas por gravedad acumulada de un piso a otro hacia los cimientos. A diferencia de carga lateral, los efectos de la carga vertical sobre el edificio son lineales y no aumentan con la altura, lo que permite un diseño más ligero e económico.

Los muros de cortante, la cuales se emplean generalmente para cerrar áreas de servicio como cubos de escalera y elevadores son elementos que proporcionen la estabilidad necesaria al edificio ante los diferentes tipos de solicitaciones. Los muros son estructuras sujetas a fuerzas horizontales, es decir, fuerzas que provocan flexión en su plano, las cuales son las que producen mayores deformaciones en estas estructuras. Los muros aumentan la rigidez de los de los edificios ante cargas laterales. Esto se debe a que los efectos de las fuerzas cortantes con respecto a los de flexión pueden ser comparables. Los empleos de muros permiten controlar los desplazamientos laterales que generan las solicitaciones por sismos y viento. No proveen solamente seguridad estructural, si no que proporcionan una gran medida de protección contra daños a elementos no estructurales durante sismos moderados. Para este fin se requieren aumentar las dimensiones para las columnas, vigas, muros y losas, a fin de hacer el edificio suficientemente resistente a cargas y deformaciones laterales. Los muros y losas diseñadas solamente para cargas verticales significan un ahorro en materiales y mano de obra, pero el mayor beneficio económico a corto plazo se recibe en las vigas y columnas. La Figura 3.3 muestra, para la misma columna de ambas versiones del edificio, el impacto de considerar las cargas laterales durante el diseño de la super-estructura. Es muy notorio que el tamaño de la columna de la versión que considera las cargas laterales es mayor que él de la correspondiente columna en la versión que solo consideró las cargas gravitacionales. Es además notorio que el impacto en la cuantía de acero de ambas columnas es muy importante, ya que aquella que corresponde al diseño de cargas laterales es 3 veces mayor que la correspondiente al diseño por cargas verticales.

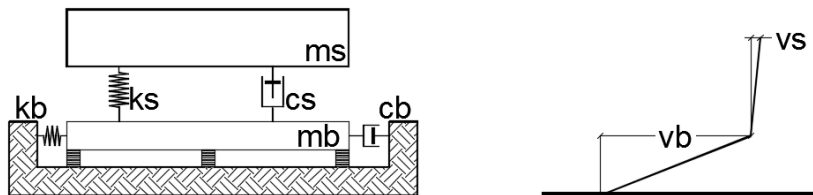


**Figura 3.3** Sección transversal de columna: a) Diseño que contempla cargas laterales; b) Diseño que solo contempla cargas verticales

### 3.2 Teoría Lineal para el Aislamiento Sísmico

La concepción global del sistema de aislamiento usado en esta tesis se basó en el uso de un sistema lineal equivalente conforme a lo planteado por la teoría lineal (Kelly 1991). Aunque relativamente simples, los conceptos derivados de la teoría lineal pueden usarse para establecer las propiedades globales de un sistema de aislamiento y su super-estructura.

Considere, conforme a lo ilustrado en la Figura 3.4, un modelo elástico de dos grados de libertad con amortiguamiento viscoso lineal. En la figura, la masa de la super-estructura y la asociada al sistema de aislamiento se denotan  $m_s$  y  $m_b$ , respectivamente.  $k_s$  y  $k_b$  denotan la rigidez lateral de la super-estructura y del sistema de aislamiento, respectivamente.  $c_s$  y  $c_b$  denotan el coeficiente de amortiguamiento de la super-estructura y del sistema de aislamiento, respectivamente. Finalmente, mientras que  $v_b$  denota el desplazamiento lateral relativo del sistema de aislamiento,  $v_s$  denota el desplazamiento lateral relativo de la super-estructura.



**Figura 3.4** Modelo aislado de 2 grados de libertad



La ecuación de movimiento del sistema aislado de 2 grados de libertad está dada por:

$$M^* \ddot{V} + C^* \dot{V} + K^* V^* = -M^* r^* \ddot{u}_g \quad (3.1a)$$

donde:

$$M^* = \begin{bmatrix} M & ms \\ ms & ms \end{bmatrix} \quad C^* = \begin{bmatrix} cb & 0 \\ 0 & cs \end{bmatrix} \quad K^* = \begin{bmatrix} kb & 0 \\ 0 & ks \end{bmatrix} \quad (3.1b)$$

Además, M denota la suma de las masas ( $m_b+m$ ) y r es un vector que asocia los grados de libertad con el movimiento del suelo.

El planteamiento en terminos de desplazamientos relativos es el siguiente:

$$\begin{aligned} v_s &= u_s - u_b & u_s &= v_s + u_b \\ v_b &= u_b - u_g & u_b &= v_b + u_g \end{aligned}$$

$$V = [v_b/v_s] \quad r^* = [1/0]$$

La ecuacion queda en forma matricial

$$\begin{bmatrix} ms + mb & ms \\ ms & ms \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_b'' \\ v_s'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} cb & 0 \\ 0 & cs \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_b' \\ v_s' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} kb & 0 \\ 0 & ks \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_b \\ v_s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -ms + mb & ms \\ ms & ms \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{u}_g \quad (3.1c)$$

Las frecuencias de la super-estructura sobre base rígida y del sistema de aislamiento bajo la consideración de una super-estructura infinitamente rígida están dadas por:

$$\omega_s = \sqrt{k/ms} \quad (3.2a)$$

$$\omega_b = \sqrt{kb/(ms + mb)} \quad (3.2b)$$

Para la interpretación de la teoría lineal de un sistema de aislamiento, es conveniente definir los siguientes cocientes de masas y frecuencias:

$$\gamma = ms/(mb + ms) \quad (3.3a)$$

$$\varepsilon = (\omega_b/\omega_s)^2 \quad (3.3b)$$

### CAPÍTULO 3

El diseño adecuado de un sistema de aislamiento implica valores muy pequeños para el cociente  $\varepsilon$ , ya que se requiere de un contraste adecuado entre las rigideces laterales de la super-estructura y de su sistema de aislamiento. El valor de  $\gamma$  esta en el orden de la unidad.

En caso de que el valor de  $\varepsilon$  sea pequeño, las frecuencias circulares asociados a los dos modos de vibrar del sistema aislado de 2 grados de libertad están dadas por:

$$\begin{aligned}\omega_1^* &\approx \omega_b \\ \omega_2^* &\approx \frac{\omega_s}{(1-\gamma)^{1/2}}\end{aligned}\tag{3.4}$$

Se debe observar que mientras la respuesta del primer modo queda dominada por las propiedades del sistema de aislamiento, la del segundo modo queda influenciada de manera importante por las propiedades de la super-estructura.

Los modos de vibrar del sistema de 2 grados de libertad quedan dados por:

$$\begin{aligned}\varphi_1^T &= [\varphi_1^b \ \varphi_1^s] \\ \varphi_2^T &= [\varphi_2^b \ \varphi_2^s]\end{aligned}\tag{3.5}$$

Dónde:

$$\begin{aligned}\varphi_1^b &= 1 & \varphi_1^s &= \varepsilon \\ \varphi_2^b &= 1 & \varphi_2^s &= -\frac{1}{\gamma} \times (1 - (1-\gamma) \times \varepsilon)\end{aligned}$$

Se puede ver que para  $\varepsilon$  pequeño, el primer modo corresponde a un desplazamiento mucho mayor del sistema de aislamiento en relación al observado para la super-estructura. Esto implica una deformación lateral grande para el sistema de aislamiento, y una deformación lateral muy pequeña para la super-estructura. En contraste, el segundo modo implica una deformación importante para la super-estructura.

Los factores de participación modal, que indican en qué grado participan los diferentes modos a la respuesta dinámica del sistema aislado están dados por:

$$\begin{aligned}
 L_1 &= \frac{\varphi_1^T M^* r^*}{\varphi_1^T M^* \varphi_1} = 1 - \gamma \times \varepsilon \\
 L_2 &= \frac{\varphi_2^T M^* r^*}{\varphi_2^T M^* \varphi_2} = \gamma \times \varepsilon
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Se muestra que cuando se da un buen contraste de rigideces ( $\varepsilon$  cercano a cero), los factores de participación del primer y segundo modo exhiben, respectivamente, valores cercanos a 1 y cero, lo que implica una respuesta dinámica totalmente dominada por el primer modo de vibrar. Si conforme a lo discutido con anterioridad, el primer modo de vibrar corresponde prácticamente a un desplazamiento de cuerpo rígido de la super-estructura, puede concluirse que un buen contraste entre las rigideces laterales del sistema de aislamiento y la super-estructura conlleva demandas de deformación lateral muy bajas para la super-estructura.

### 3.3 Sistema de Aislamiento

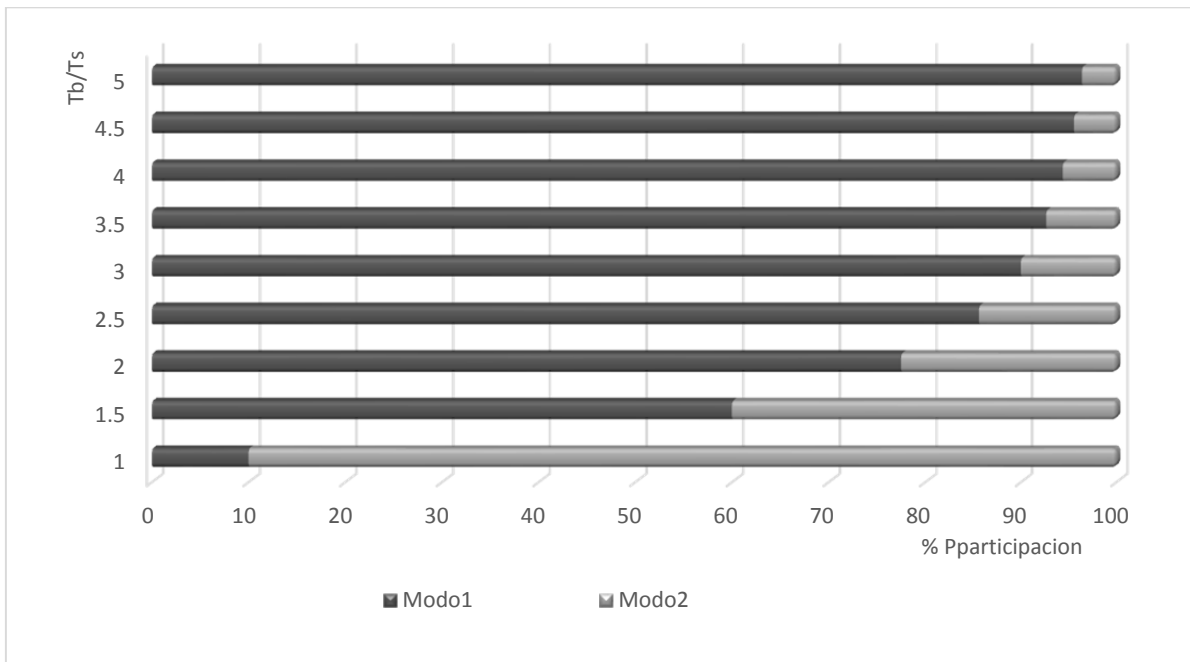
En la Figura 3.5 se puede observar cómo varía el factor de participación de los 2 modos de vibrar del sistema aislado mostrado en la Figura 3.4. Se puede afirmar que cuando el periodo del sistema del aislamiento ( $T_b$ ) es cuatro veces mayor que el periodo de la super-estructura sobre base rígida ( $T_s$ ), el factor de participación para el primer modo es mayor que 90%. Bajo estas circunstancias, podría decirse que la super-estructura estaría prácticamente libre de deformación lateral, y, por tanto, que el diseño llevado a cabo antes del edificio de 10 pisos bajo la consideración exclusiva de las cargas verticales debiera exhibir un desempeño sísmico adecuado una vez que se le provea con aislamiento de base cuyas propiedades sean tales que  $T_b/T_s$  este cercano a 4.

El diseño basado en desempeño de un sistema de aislamiento sísmico debe considerar los siguientes pasos:

1. *Definición de  $T_b$ .* El periodo fundamental de vibrar del edificio ( $T_s$ ) de 10 pisos con base fija se estima en 0.8 s. Para minimizar la participación del segundo modo de vibrar a la respuesta del sistema aislado, es importante dar un contraste adecuado a las rigideces laterales de la super-estructura y sistema de aislamiento. Dado que el diseño de la super-estructura solo considera cargas gravitacionales y, por tanto, su rigidez lateral de diseño no se contempla como un parámetro de diseño, se vuelve necesario manejar la rigidez lateral del sistema de aislamiento para obtener el contraste adecuado. En este trabajo, se considera un valor de  $T_b$  de 3.2 s. La

Figura 3.2 muestra, que esto implica una deformación lateral para el sistema de aislamiento ligeramente mayor a los 30 cm.

2. *Definición del número y ubicación de los aisladores.* Se decidió usar, para el edificio de 10 pisos, 28 aisladores; uno debajo de cada columna del sistema gravitacional. Los aisladores se colocan por debajo de la losa de la planta baja (se aísla la superestructura de 10 pisos inmediatamente por debajo del nivel del suelo).
3. *Diseño de los aisladores.* Una vez definido el número de aisladores, es necesario establecer su rigidez lateral, y diseñar su comportamiento histerético. Para el edificio de 10 pisos, se considera el uso de aisladores de hule sin núcleo de plomo con un porcentaje de amortiguamiento crítico de 10%.



**Figura 3.5** Efecto de la relación de periodos en los factores de participación modales

Para el diseño de los aisladores se consideró un peso total del sistema estructural ( $W$ ) de 9240 t. Este peso corresponde al peso propio de la estructura, más otras cargas muertas y la carga viva instantánea. De manera preliminar se supuso un peso por unidad de área de  $1 \text{ t/m}^2$ . Las 9240 t resultan de considerar 10 pisos, cada uno con un área en planta de  $924 \text{ m}^2$ .

Dado que la demanda de desplazamiento lateral del sistema de aislamiento está cercana a los 30 cm, y bajo la consideración de una deformación unitaria a corte para el hule de

100%, se estableció una altura cercana a 30 cm para la goma de los aisladores. Se usaron dos tipos diferentes de aisladores, 10 piezas tipo A y 18 piezas tipo B, en función de las cargas axiales que bajan las columnas del sistema prefabricado. Esto se hace para permitir que la super-estructura se asiente de manera pareja en dirección vertical sobre el sistema de aislamiento.

Bajo la consideración de que el periodo del sistema de aislamiento debe ser de 3.2 s, se consideró el uso de un hule (compuesto duro) con módulo de corte (G) de  $14 \text{ kg/cm}^2$ . El alto de la capa de goma resultó finalmente de 29.17 cm. Las áreas y diámetros de los aisladores se muestran en la Tabla 3.1. Esta misma tabla resume las presiones axiales sobre los aisladores, los cuales son muy similares, lo que permite que la super-estructura se asiente de manera pareja sobre el sistema de aislamiento. La tabla indica además la rigidez lateral de los aisladores. La rigidez lateral total del sistema de aislamiento es de 39000 kg/cm, lo que resulta en un  $T_b$  de 3.2 s.

Las revisiones por efectos de torsión, pandeo, fuerza lateral, desplazamientos mínimos y máximos realizan los fabricantes. El detallado específico para cada proyecto es muy costoso debido a las pruebas requeridas. Actualmente muchos fabricantes tienen catálogos con productos estándar lo cual disminuye tiempos y costos.

Tabla 3.1 Diseño de los Aisladores

|    | Descripción de pasos              | Formula                                       | Edificio | Unidad             |
|----|-----------------------------------|---|----------|--------------------|
| 1  | Estimar el peso del edificio      | $W=$  | 9240     | ton                |
| 2  | Periodo de la estructura          | $T_s=$  | 0.8      | s                  |
| 3  | Deformación al corte              | $\gamma_{max}$                                | 100      | %                  |
| 4  | Módulo de cortante del elastómero | $G=$  | 14       | kg/cm <sup>2</sup> |
| 5  | Amortiguamiento                   | $\beta=$                                      | 10-15    | %                  |
| 6  | Periodo del aislamiento           | $T_b=$  | 3.2      | s                  |
| 7  | Desplazamiento                    | $D=g*S_d*T_b/(4\pi^2*\beta)/1.25$             | 0.29     | m                  |
| 8  | Espesor del caucho en el aislador | $t_r=D/\gamma$                                | 0.29     | m                  |
| 9  | Agrupar según cargas              | <i>10 Aisladores Tipo A</i>                   | 470      | ton                |
|    |                                   | <i>18 Aisladores Tipo B</i>                   | 290      | ton                |
| 10 | Rigidez horizontal requerida      | $K=m*(2\pi/T_b)^2$                            |          |                    |
|    |                                   | $k_{A_h}=$                                    | 1847.09  | kg/cm              |
|    |                                   | $k_{B_h}=$                                    | 1139.70  | kg/cm              |
| 11 | Área requerido del Aislador       | $A=k_H*t_r/G$                                 |          |                    |
|    |                                   | $AA=$   | 3848.11  | cm <sup>2</sup>    |
|    |                                   | $AB=$   | 2374.37  | cm <sup>2</sup>    |
| 12 | Diámetro del Aislador             | $d_A=$  | \$69.997 | cm                 |
|    |                                   | $d_B=$  | \$54.983 | cm                 |
| 13 | Diámetro redondeado               | $d_{A_2}=$                                    | 70.00    | cm                 |
|    |                                   | $d_{B_2}=$                                    | 55.00    | cm                 |
| 14 | Presión                           | $P=m/A$                                       |          |                    |
|    |                                   | $PA=$   | 122.13   | kg/cm <sup>2</sup> |
|    |                                   | $PB=$   | 122.06   | kg/cm <sup>2</sup> |
| 15 | Área real                         | $AA_2$  | 3848.45  | cm <sup>2</sup>    |
|    |                                   | $AB_2$  | 2374.83  | cm <sup>2</sup>    |
| 16 | Rigidez horizontal aportada       | $k_H=GA/t_r$                                  |          |                    |
|    |                                   | $k_{A_{h_2}}=$                                | 1847.26  | kg/cm              |
|    |                                   | $k_{B_{h_2}}=$                                | 1140.4   | kg/cm              |
| 17 | Rigidez total                     | $k_{h_{total}}=k_{A_{h_2}}*10+k_{B_{h_2}}*18$ | 38999.73 | kg/cm              |
| 18 | Frecuencia                        | $w^2=K*g/W$                                   | 3.86     | 1/s <sup>2</sup>   |
| 19 | Periodo del aislamiento           | $T_b=2\pi/W$                                  | 3.2      | s                  |

### 3.4 Desempeño sísmico

#### 3.4.1 Modelado

El modelo de las diferentes versiones del edificio de 10 pisos se llevó a cabo con el programa ETABS 2013. Este programa permite hacer un modelo tridimensional del sistema estructural, y es capaz de llevar a cabo análisis dinámicos modales espectrales (elásticos), y del tipo paso a paso bajo la consideración explícita del comportamiento no lineal de los elementos estructurales.

El modelo de la estructura contempla 4 ejes en la dirección larga, y 7 en la dirección corta. Cada uno de estos ejes corresponde a un marco resistente a momentos de concreto prefabricado. Del primer al décimo pisos, los marcos se interconectan entre sí a través de losas.

Para el sistema sobre base rígida, se tiene una sección transversal de 100x70 cm para todas las columnas del sistema estructural. La sección transversal de todas las trabes (tanto portantes como de rigidez) es de 90x40 cm.

La cimentación del edificio corresponde a un sistema de zapatas aisladas unidas por contratraves. Las zapatas son cuadradas, y tienen una altura de 180 cm, dimensiones en planta de 250x250 cm.

En términos de modelado, se consideraron diafragmas rígidos en todos los entrepisos bajo la consideración de 3 grados de libertad por piso (dos traslacionales, y uno rotacional). Esto implica que las masas e inercias rotacionales de entrepiso se concentran en el centro de masa de cada entrepiso. Debido a la poca deformación se consideraron para vigas y columnas propiedades geométricas para la sección transversal no agrietada.

Las características de los materiales consideraron un concreto con resistencia a la compresión de  $300 \text{ kg/cm}^2$ , un peso volumétrico de  $2.4 \text{ t/m}^3$ , y un módulo de elasticidad igual a  $14000 \cdot \sqrt{f'_c}$ . El acero de refuerzo tiene un esfuerzo de fluencia de  $4200 \text{ kg/cm}^2$  y un módulo de elasticidad de  $2,039,000 \text{ kg/cm}^2$ . El programa de análisis considera de manera automática el peso propio de los marcos, muros y losas. El valor para otras cargas muertas fueron iguales  $210$  y  $300 \text{ kg/m}^2$  para las losas de entrepiso y azotea, respectivamente. Conforme al reglamento, las cargas vivas instantáneas se estimaron como  $250$  y  $100 \text{ kg/m}^2$ , respectivamente. Las masas de los diferentes entrepisos se resumen en la Tabla

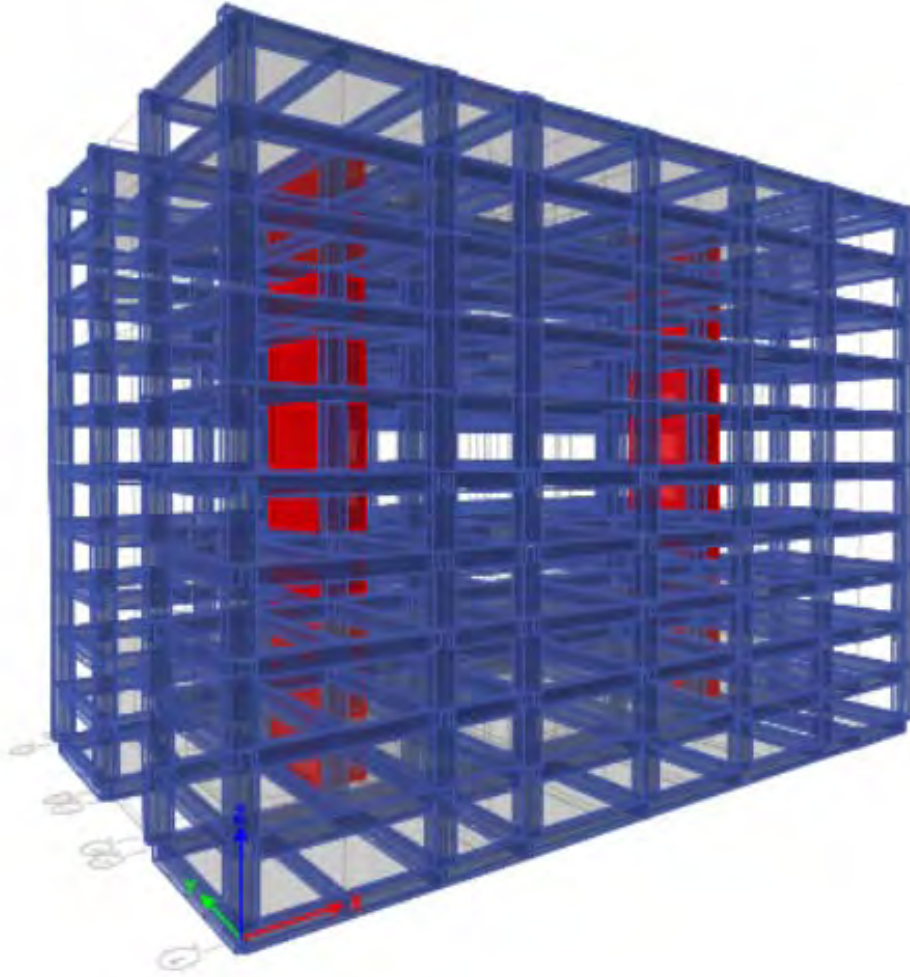
### CAPÍTULO 3

3.2. El modelo mostrado en la Figura 3.6 considera que la super-estructura tiene empotrada su base al nivel del suelo.

**Tabla 3.2** Masas de entrepiso

| <b>Piso</b> | <b>Peso (t/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Masa (t/g)</b> | <b>Peso (t)</b>    | <b>Área (m<sup>2</sup>)</b> |
|-------------|-------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------------|
| N10         | 0.921                         | 88.22385          | 865.475969         | 939.651                     |
| N9          | 0.921                         | 88.22385          | 865.475969         | 939.651                     |
| N8          | 0.921                         | 88.22385          | 865.475969         | 939.651                     |
| N7          | 0.921                         | 88.22385          | 865.475969         | 939.651                     |
| N6          | 0.921                         | 88.22385          | 865.475969         | 939.651                     |
| N5          | 0.921                         | 88.22385          | 865.475969         | 939.651                     |
| N4          | 0.921                         | 88.22385          | 865.475969         | 939.651                     |
| N3          | 0.921                         | 88.22385          | 865.475969         | 939.651                     |
| N2          | 0.921                         | 88.22385          | 865.475969         | 939.651                     |
| N1          | 0.921                         | 88.22385          | 865.475969         | 939.651                     |
| Base        | 1.146                         | 109.7802          | 1076.943762        | 939.651                     |
|             |                               |                   | <b>9731.703452</b> | <b>10305.762</b>            |

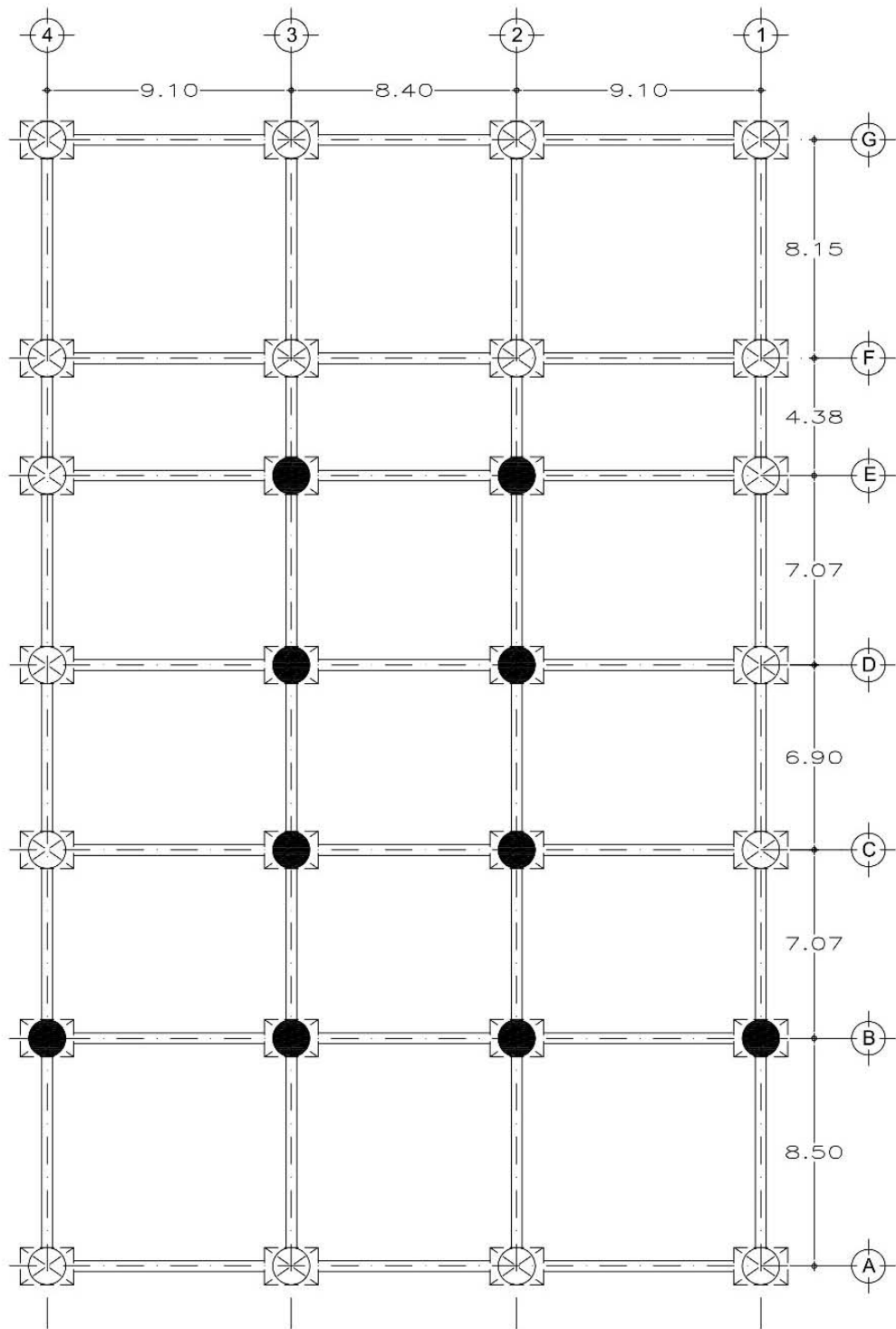




**Figura 3.6** Modelo tridimensional de la estructura sobre base rígida

El modelado de la super-estructura de la versión aislada del sistema estructural sigue las mismas consideraciones usadas para modelar la super-estructura sobre base rígida. En lo que se refiere al sistema de aislamiento, se añaden al modelo 28 aisladores. De estos aisladores, 10 son del Tipo A y 18 del Tipo B (ver Tabla 3.1). Dado que los aisladores no se diseñaron con núcleo de plomo, se consideró un comportamiento lineal para ellos en el modelo de análisis. La Figura 3.7 resume la ubicación de los aisladores en planta. Mientras que los círculos negros corresponden a los aisladores Tipo A, los círculos blancos muestran los aisladores de Tipo B.

Los aisladores se modelan cada uno con un elemento tipo link. Esto requiere definir para cada aislador su rigidez lateral y coeficiente de amortiguamiento. Los aisladores se ubican por debajo del nodo inferior de las columnas de la planta baja. La altura del aislador es incluida explícitamente en el modelo.



**Figura 3.7** Sistema de aislamiento sísmico para edificio de 10 pisos

Vale la pena mencionar que el centro de masa de los diafragmas rígidos coincide con el centro de masa del sistema de aislamiento, y que las propiedades de los aisladores se han definido de tal manera de hacer coincidir el centro de rigidez del sistema de aislamiento con su respectivo centro de masa, lo que reduce considerablemente los efectos de torsión en planta.

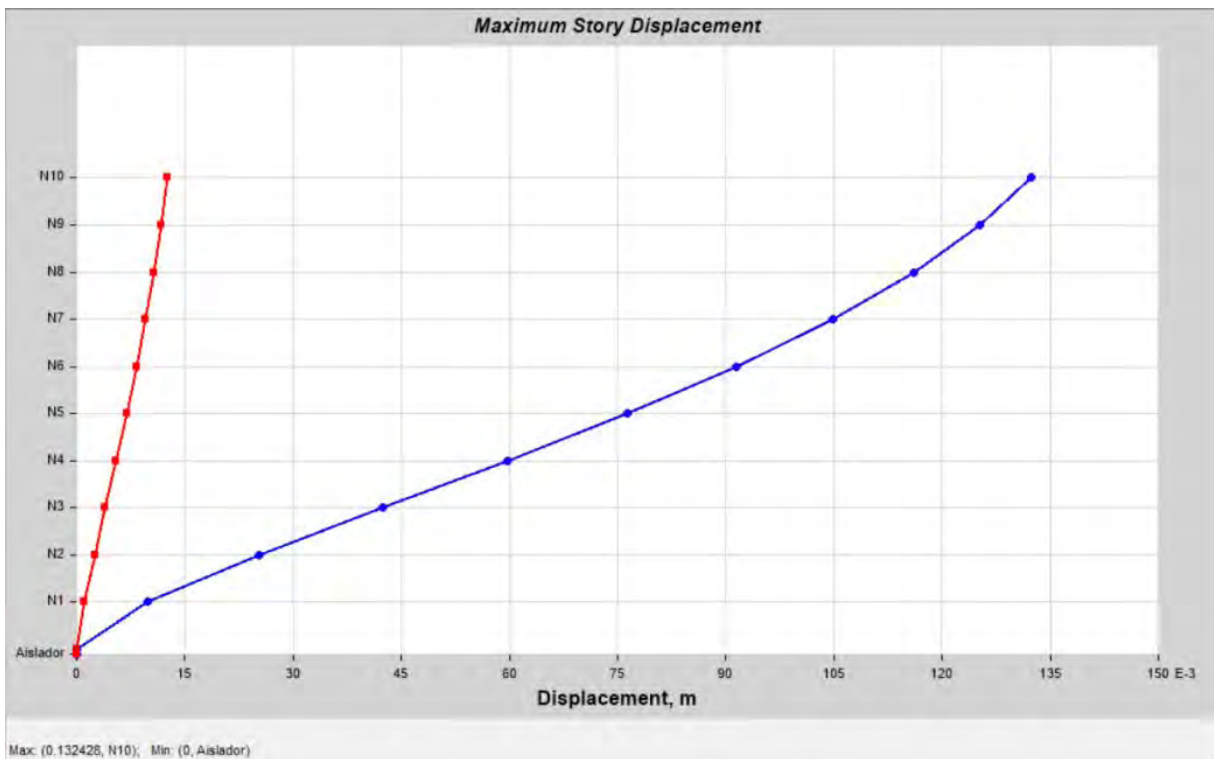
### 3.4.2 Análisis Modal Espectral

La Tabla 3.3 resume las propiedades dinámicas del edificio de 10 pisos sobre base rígida. Se puede ver que se obtienen periodos fundamentales de vibrar en traslación cercanos a 0.75 s en las 2 direcciones de análisis. Las Figuras 3.8 y 3.9 resumen las demandas de deformación lateral en las 2 direcciones de análisis. Las distorsiones alcanzan valores máximos cercanos a 0.006, que son mucho menores que el límite de 0.015 considerados durante el diseño.

**Tabla 3.3** Propiedades dinámicas de edificio sobre base rígida

| Case  | Mode | Period<br>sec | Frequency<br>cyc/sec | Circular<br>Frequency | Eigenvalue<br>rad <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> |
|-------|------|---------------|----------------------|-----------------------|--|
| Modal | 1    | 0.752         | 1.329                | 8.3514                | 69.7456  |
| Modal | 2    | 0.727         | 1.375                | 8.6412                | 74.6703  |
| Modal | 3    | 0.597         | 1.674                | 10.52                 | 110.6711   |
| Modal | 4    | 0.225         | 4.449                | 27.9529               | 781.364  |
| Modal | 5    | 0.186         | 5.381                | 33.8089               | 1143.0393  |
| Modal | 6    | 0.168         | 5.935                | 37.2934               | 1390.7957  |
| Modal | 7    | 0.113         | 8.85                 | 55.6091               | 3092.3709  |
| Modal | 8    | 0.089         | 11.245               | 70.6546               | 4992.075   |
| Modal | 9    | 0.084         | 11.907               | 74.8149               | 5597.2679  |
| Modal | 10   | 0.068         | 14.638               | 91.9758               | 8459.5483  |
| Modal | 11   | 0.058         | 17.338               | 108.9401              | 11867.9369                                       |
| Modal | 12   | 0.054         | 18.439               | 115.8544              | 13422.2494                                       |

### CAPÍTULO 3

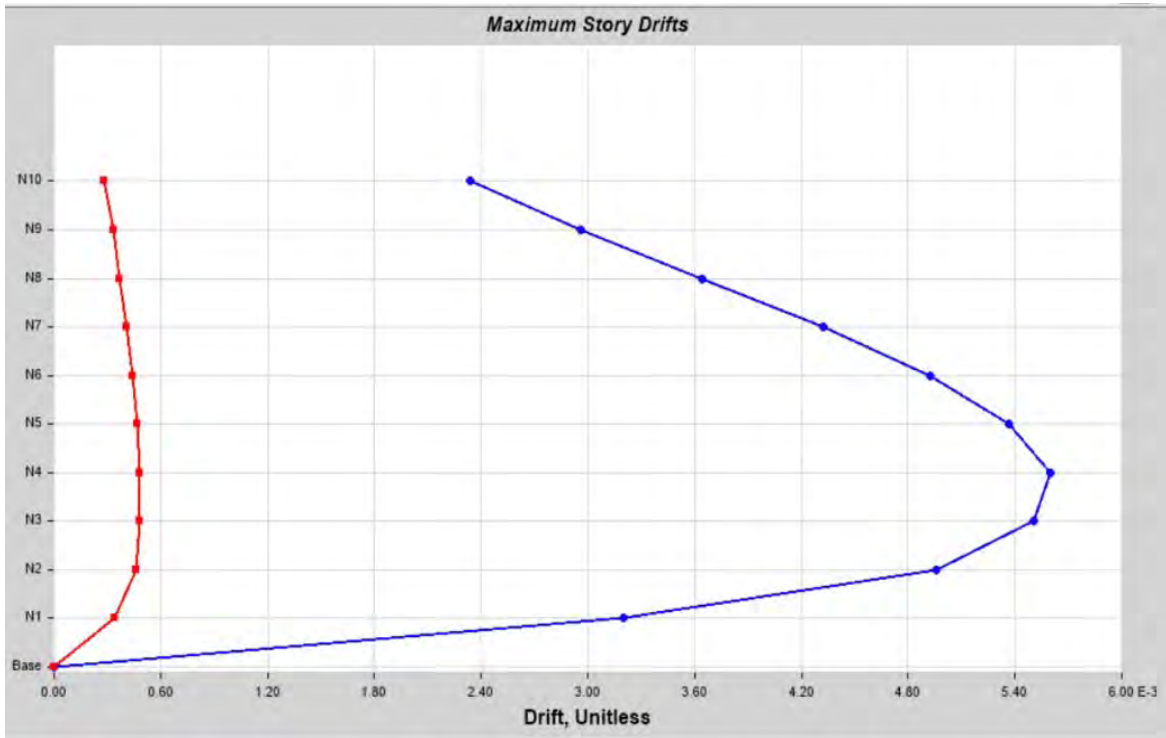


a) 100% Sismo en Dirección X

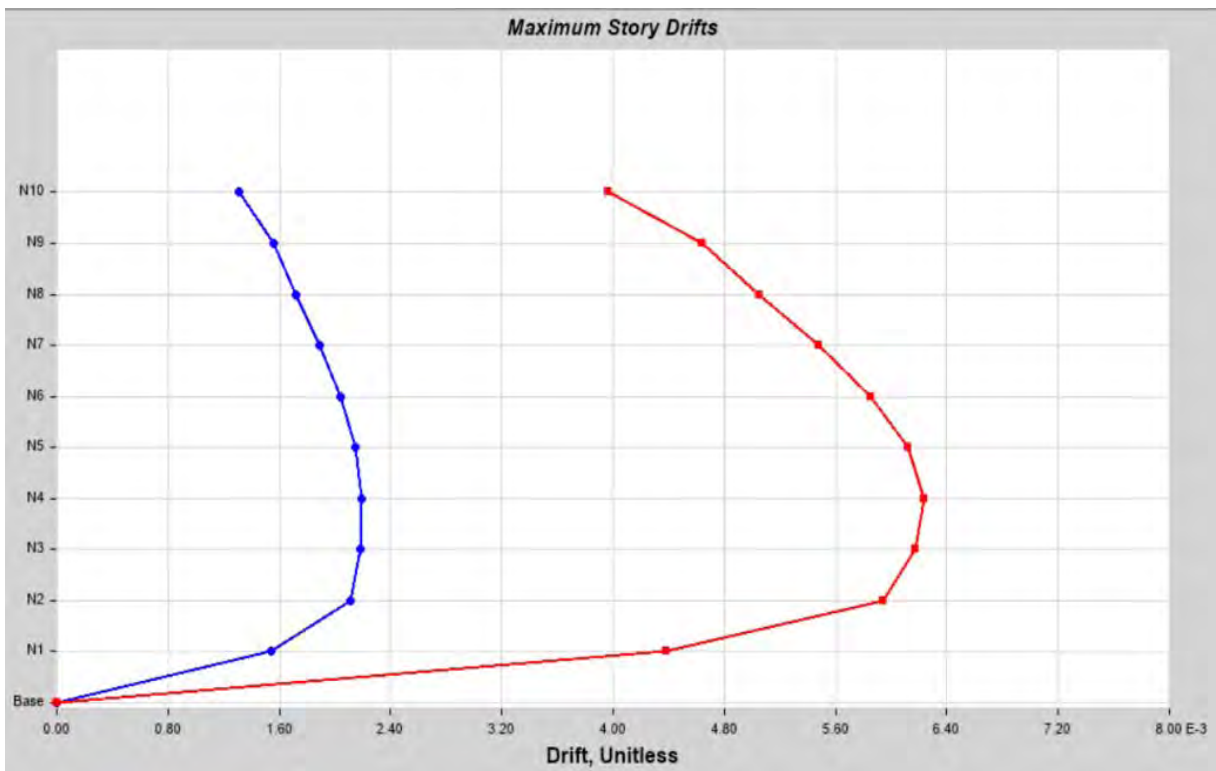


b) 100% Sismo en Dirección Y

**Figura 3.8** Desplazamientos laterales, edificio sobre base rígida



a) 100% Sismo en Dirección X



b) 100% Sismo en Dirección Y

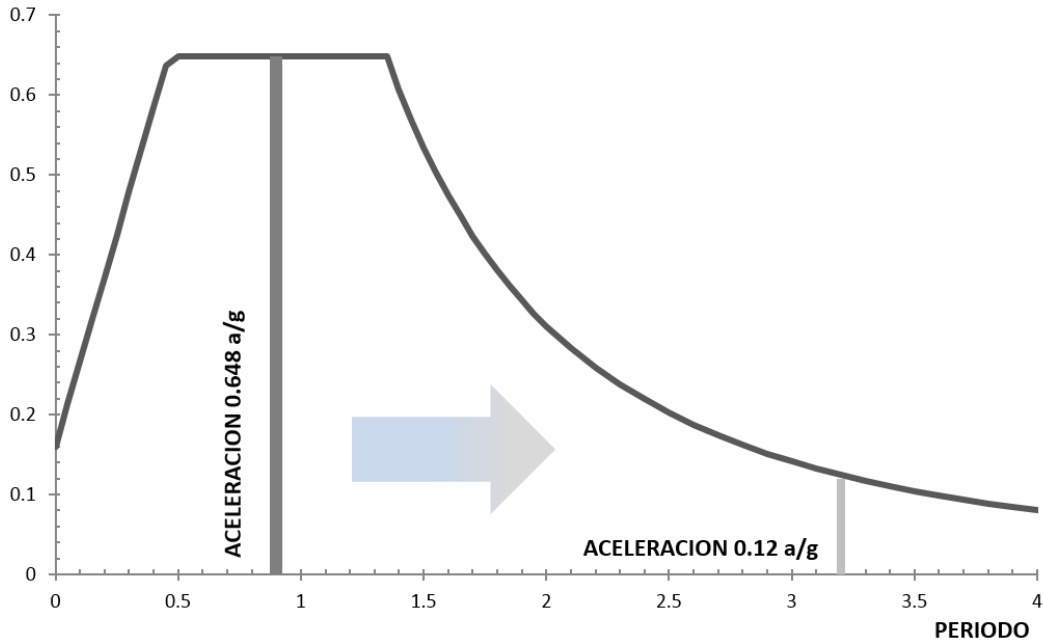
**Figura 3.9** Distorsiones, edificio sobre base rígida

Para la versión del sistema estructural del edificio de 10 pisos diseñado solo por carga gravitacional, se estimaron periodos fundamentales de vibrar cercanos a los 0.8 s. Una vez aislado, el edificio exhibe las propiedades dinámicas resumidas en la Tabla 3.4. Los resultados muestran que los periodos fundamentales de vibrar asociados al comportamiento traslacional se alargan a valores cercanos a 3.2 s.

**Tabla 3.4** Propiedades dinámicas de edificio con aislamiento sísmico

| Case  | Mode | Period<br>sec | Frequency<br>cyc/sec | Circular<br>Frequency | Eigenvalue<br>rad <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> |
|-------|------|---------------|----------------------|-----------------------|--|
| Modal | 1    | 3.225         | 0.31                 | 1.9484                | 3.7961   |
| Modal | 2    | 3.21          | 0.312                | 1.9576                | 3.8321   |
| Modal | 3    | 3.064         | 0.326                | 2.0505                | 4.2045   |
| Modal | 4    | 0.432         | 2.315                | 14.5481               | 211.6466   |
| Modal | 5    | 0.421         | 2.375                | 14.9219               | 222.6628   |
| Modal | 6    | 0.357         | 2.801                | 17.5977               | 309.6798   |
| Modal | 7    | 0.189         | 5.295                | 33.2695               | 1106.8568  |
| Modal | 8    | 0.148         | 6.768                | 42.5256               | 1808.4277  |
| Modal | 9    | 0.134         | 7.48                 | 46.9988               | 2208.8889  |
| Modal | 10   | 0.106         | 9.475                | 59.5344               | 3544.3453  |
| Modal | 11   | 0.08          | 12.533               | 78.7447               | 6200.7276  |
| Modal | 12   | 0.076         | 13.163               | 82.704                | 6839.9552  |

La Figura 3.10 ilustra, con ayuda del espectro de pseudo-aceleración de diseño, el cambio esperado en las demandas de resistencia en el sistema estructural una vez que se aísla. Note que el coeficiente sísmico pasa de un valor cercano a 0.65 a otro cercano a 0.12, lo que implica una reducción de casi 5 veces de las fuerzas laterales de diseño.



**Figura 3.10** Cambio en ordenadas espectrales de diseño

Las Figuras 3.11 y 3.12 resumen las demandas de deformación lateral en las 2 direcciones de análisis para la versión aislada del edificio de 10 pisos. Las distorsiones alcanzan valores máximos cercanos a 0.001. Para estos niveles de deformación lateral, el nivel esperado de daño en el sistema prefabricado es nulo y esto sucede a pesar de que este fue diseñado bajo la consideración exclusiva de cargas verticales.



CAPÍTULO 3



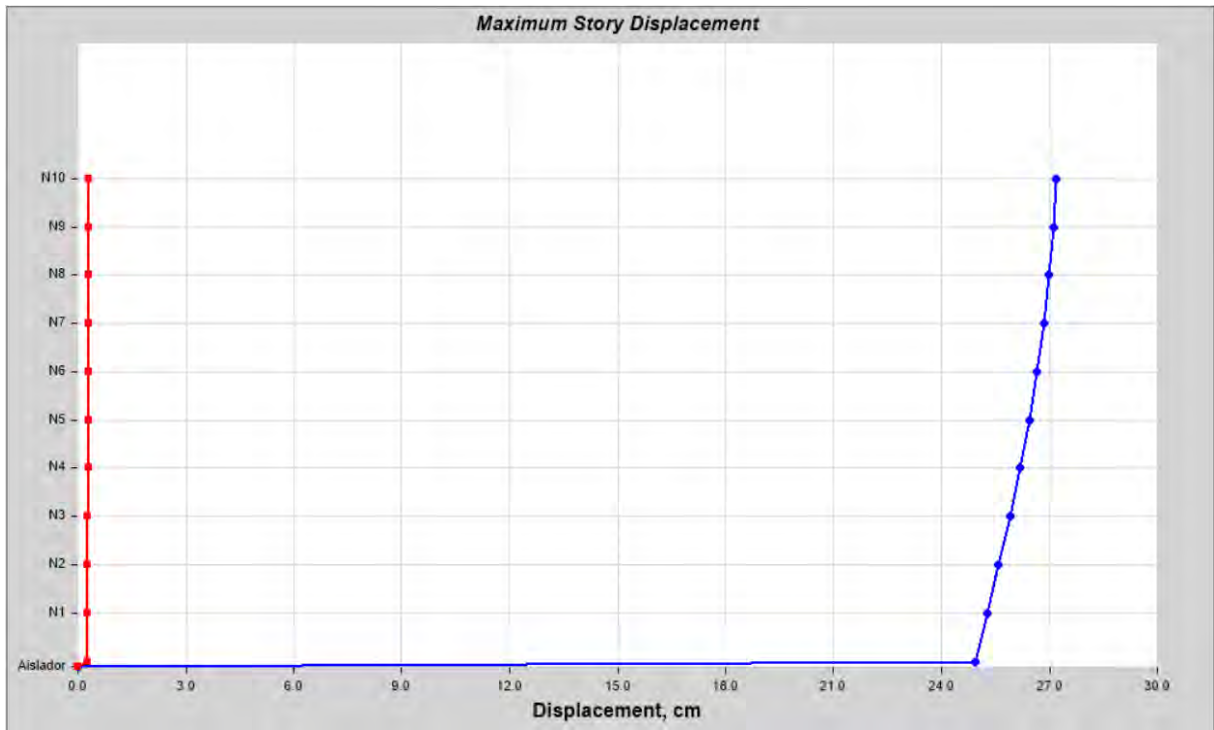
a) 100% Sismo en Dirección X



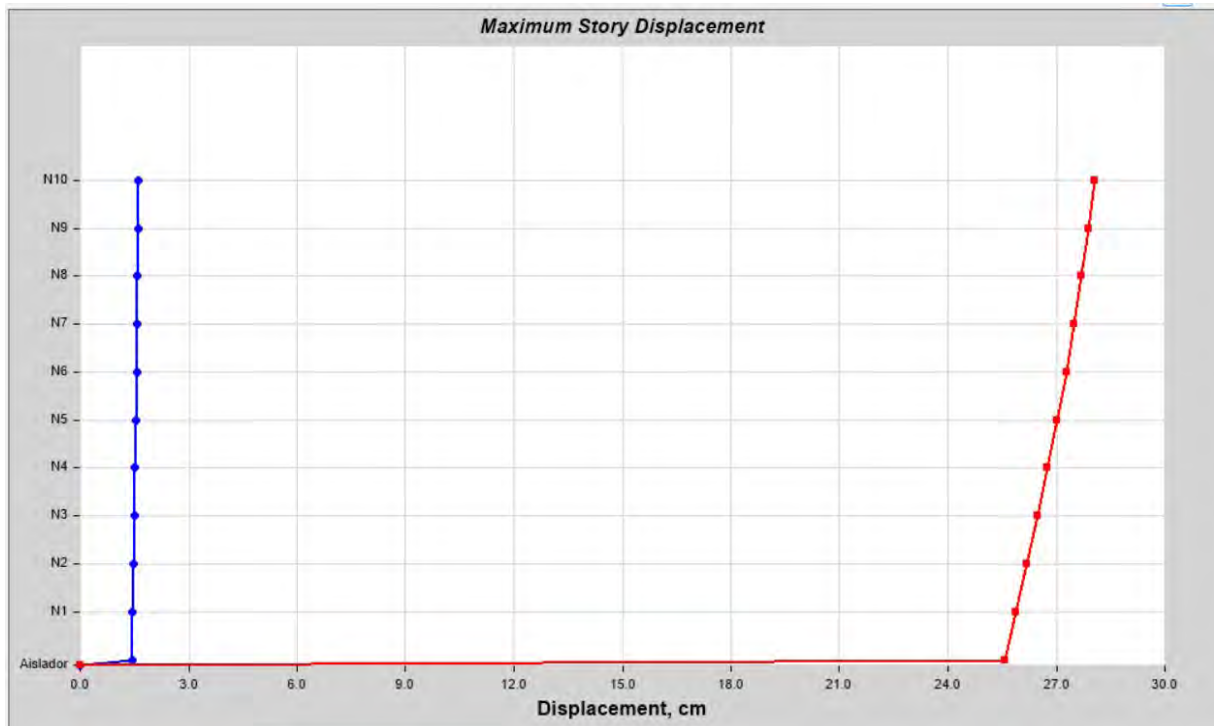
b) 100% Sismo en Dirección Y

Figura 3.11 Distorsiones, edificio aislado





a) 100% Sismo en Dirección X



b) 100% Sismo en Dirección Y

**Figura 3.12** Desplazamientos laterales, edificio aislado

La Tabla 3.5 resume los cambios que sufren las propiedades dinámicas y demandas laterales en el edificio de 10 pisos una vez que se le aísla. De los resultados obtenidos se puede afirmar que los periodos fundamentales de vibrar en traslación pasan de 0.75 y 0.73 s, a 3.22 y 3.21 s, respectivamente. Las distorsiones se reducen en 6 veces, y las aceleraciones absolutas pasan de valores cercanos al de la aceleración de la gravedad a valores que son 10 veces más pequeños.

**Tabla 3.5** Demandas laterales en las 2 versiones del edificio de 10 pisos

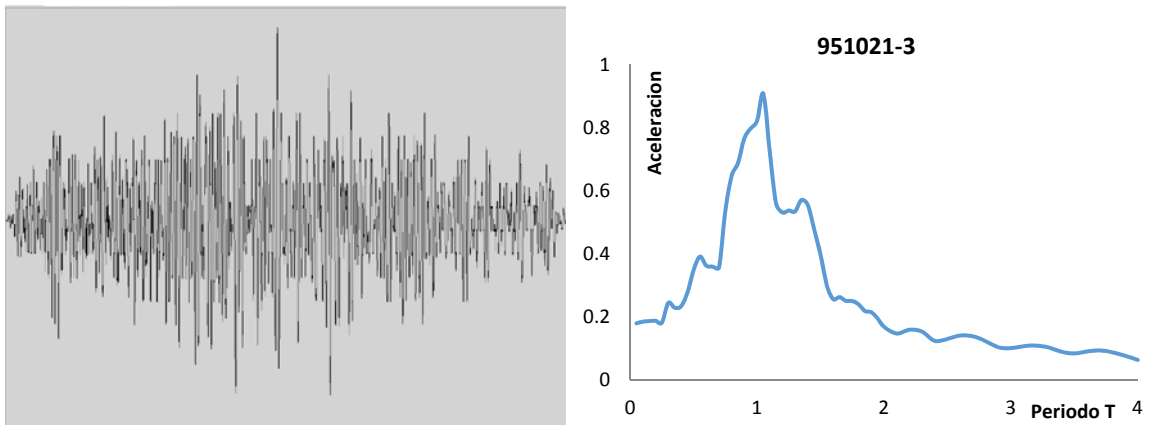
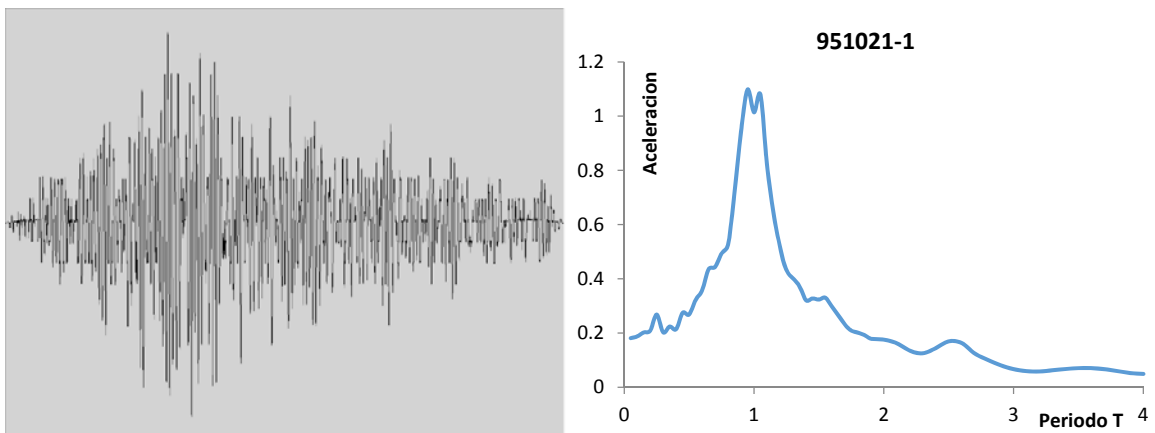
| Versión     | Periodo (s) | Distorsión máxima | Aceleración Máxima ( $m/s^2$ ) |
|-------------|-------------|-------------------|--------------------------------|
| Base rígida | 0.752       | 0.005             | 8.7                            |
|             | 0.727       | 0.006             | 12.3                           |
| Aislado     | 3.225       | 0.001             | 1.1                            |
|             | 3.21        | 0.001             | 1.1                            |

### 3.4.3 Análisis Tiempo-Historia

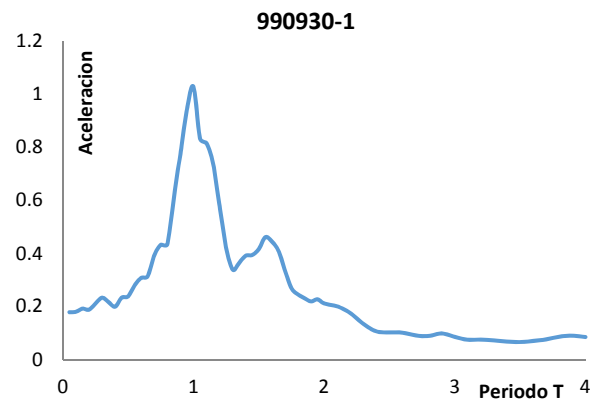
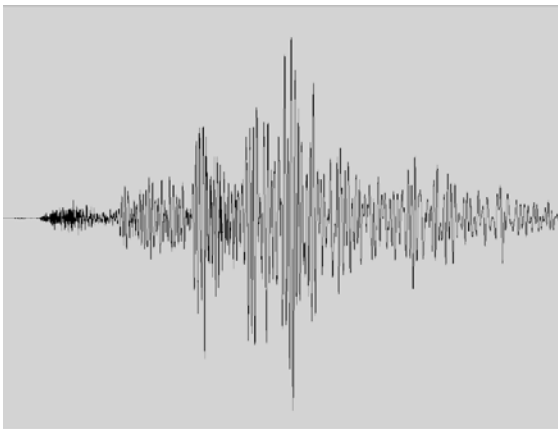
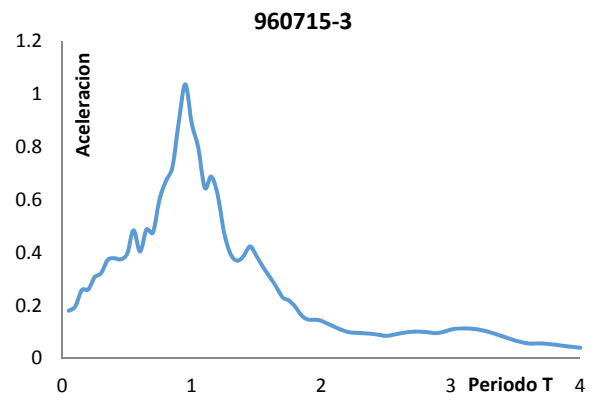
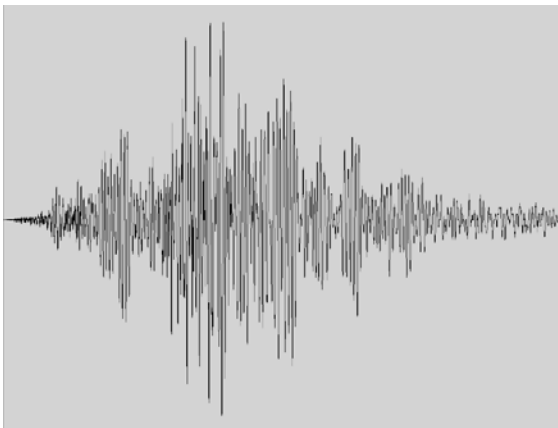
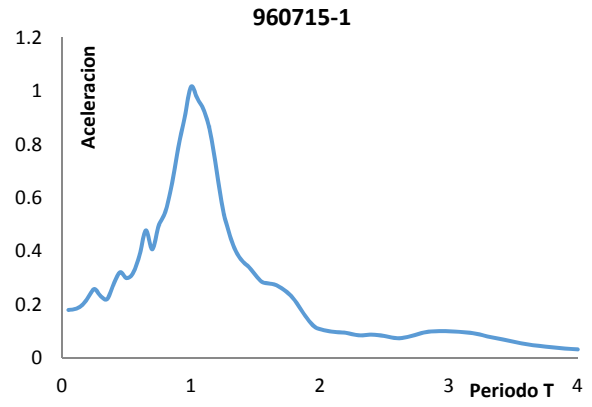
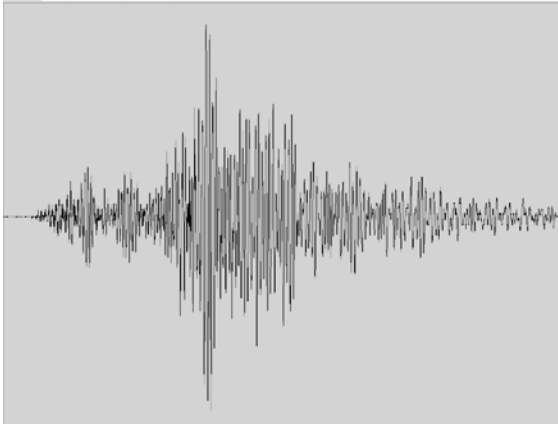
Finalmente se llevaron a cabo una serie de análisis paso a paso de la versión aislada del edificio. Debido al tipo del aislador se usaron modelos tridimensionales elásticos y 3 pares de señales registrados en la estación Xotepingo, Zona del Lago del Distrito Federal. Los tres pares de acelerogramas considerados tienen su pico de aceleración cerca de un periodo de uno (mostradas en la Figura 3.13), mismo que en la zona de transición, y fueron escaladas con factores idénticos para cada par cuidando que los valores no fueran menores que del espectro de respuesta. La tabla 3.6 señala sus características como magnitud, aceleración máxima y localización y Para definir el amortiguamiento en el sistema estructural, se usó una matriz de Rayleigh. Para el caso de los aisladores, se les asignó directamente un coeficiente de amortiguamiento. Para el caso de la superestructura se consideró 2% de amortiguamiento crítico. Para el caso de los aisladores, este porcentaje es de 10%.

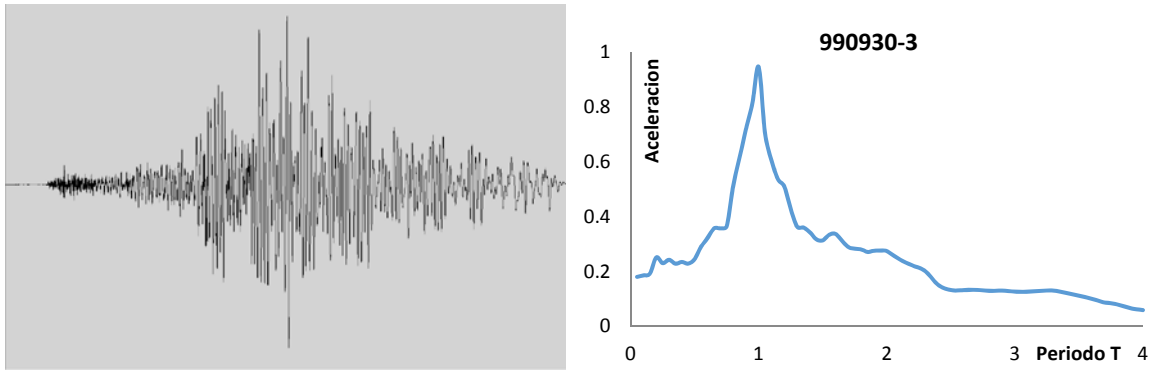
**Tabla 3.6** Acelerogramas considerados para el análisis tiempo-historia

| Fecha    | Magnitud | A máxima NS<br>(cm/seg <sup>2</sup> ) | A máxima EO<br>(cm/seg <sup>2</sup> ) | Estado   |
|----------|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|
| 95.10.21 | 6.2      | 2.26                                  | 2.00                                  | Chiapas  |
| 96.07.15 | 6.5      | 8.79                                  | 7.43                                  | Guerrero |
| 99.09.30 | 7.5      | 26.7                                  | 23.5                                  | Oaxaca   |



CAPÍTULO 3





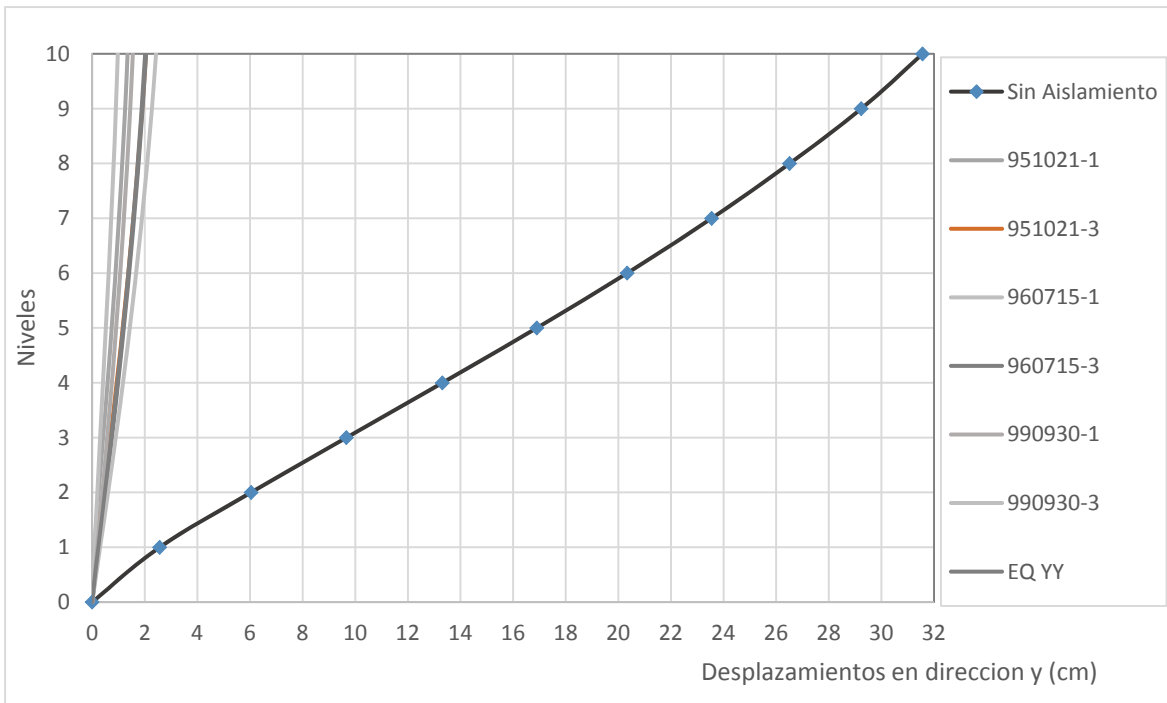
**Figura 3.13** Acelerogramas escogidas para los análisis paso a paso

La Tabla 3.7 resume las demandas sísmicas obtenidas para la versión aislada del edificio a partir de los análisis paso a paso. Se observa, una vez más, que la distorsión máxima en la super-estructura aislada no rebasa el valor de 0.001, lo que implica que la estructura prefabricada permanece elástica y libre de todo daño. Además, la demanda máxima de aceleración absoluta está muy cercana a un décimo de la que corresponde a la gravedad, lo que implica un nivel de daño insignificante para los contenidos del edificio.

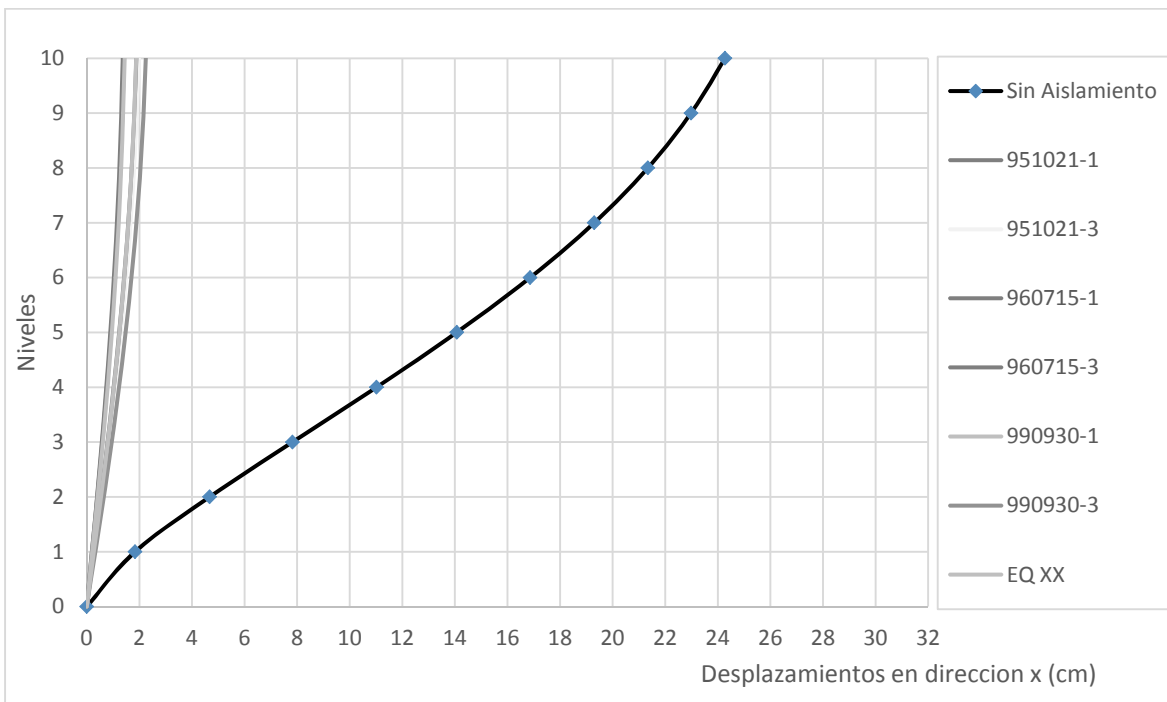
**Tabla 3.7** Demandas sísmicas estimadas a partir de los análisis paso a paso

| Acelero gramas | Distorsión Máxima en X ( $10^{-4}$ ) | Distorsión Máxima en Y ( $10^{-4}$ ) | Aceleración Máxima en x ( $m/sec^2$ ) | Aceleración Máxima en y ( $m/sec^2$ ) |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 95.10.21-NS    | 8.92                                 | 8.48                                 | 0.688                                 | 0.688                                 |
| 95.10.21-OE    | 6.15                                 | 5.81                                 | 0.974                                 | 0.992                                 |
| 96.07.15-NS    | 6.26                                 | 6.02                                 | 0.725                                 | 0.763                                 |
| 96.07.15-OE    | 8.46                                 | 8.09                                 | 0.906                                 | 0.929                                 |
| 99.09.30-NS    | 6.59                                 | 6.22                                 | 0.679                                 | 0.685                                 |
| 99.09.30-OE    | 10.25                                | 9.73                                 | 1.038                                 | 1.048                                 |

Las Figuras 3.14 a 3.16 muestran las demandas sísmicas en altura obtenidas a partir de los análisis paso a paso del edificio aislado. Además, se comparan estas demandas con las obtenidas a partir del análisis modal espectral para ambas versiones del edificio. Se observa claramente una disminución significativa en las demandas sísmicas una vez que se aísla el edificio. Puede concluirse que la versión aislada del edificio es muy poco afectada por los movimientos del terreno, y que el daño en los sistemas estructural y no estructural, y los contenidos, sería nulo.

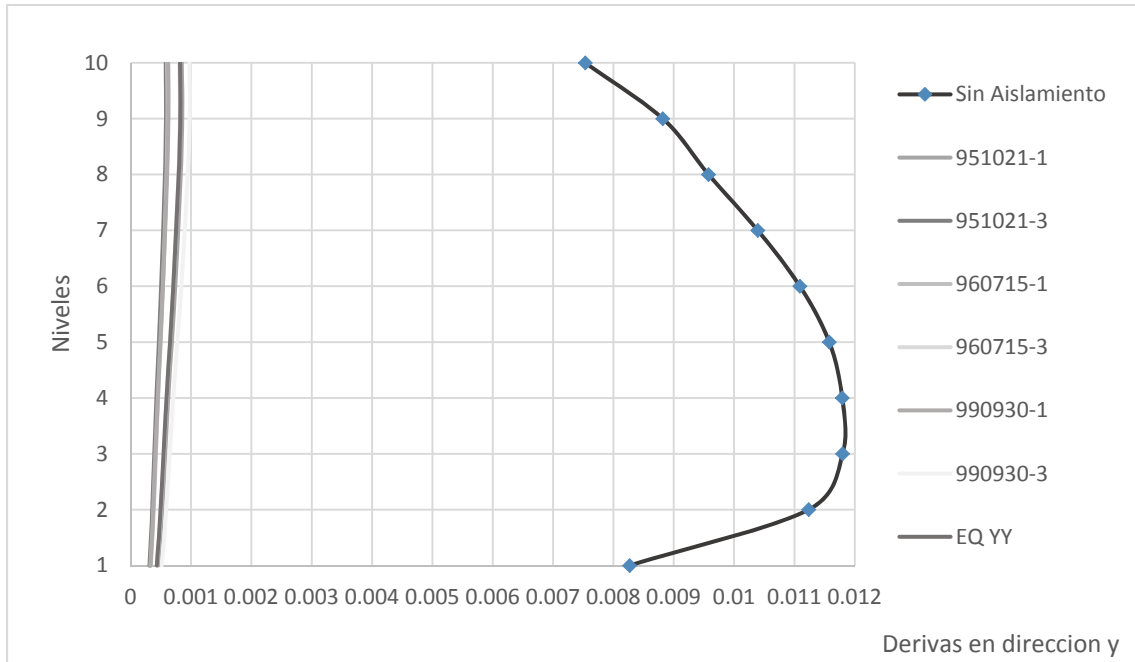


a) Acelerogramas actuando en dirección Y

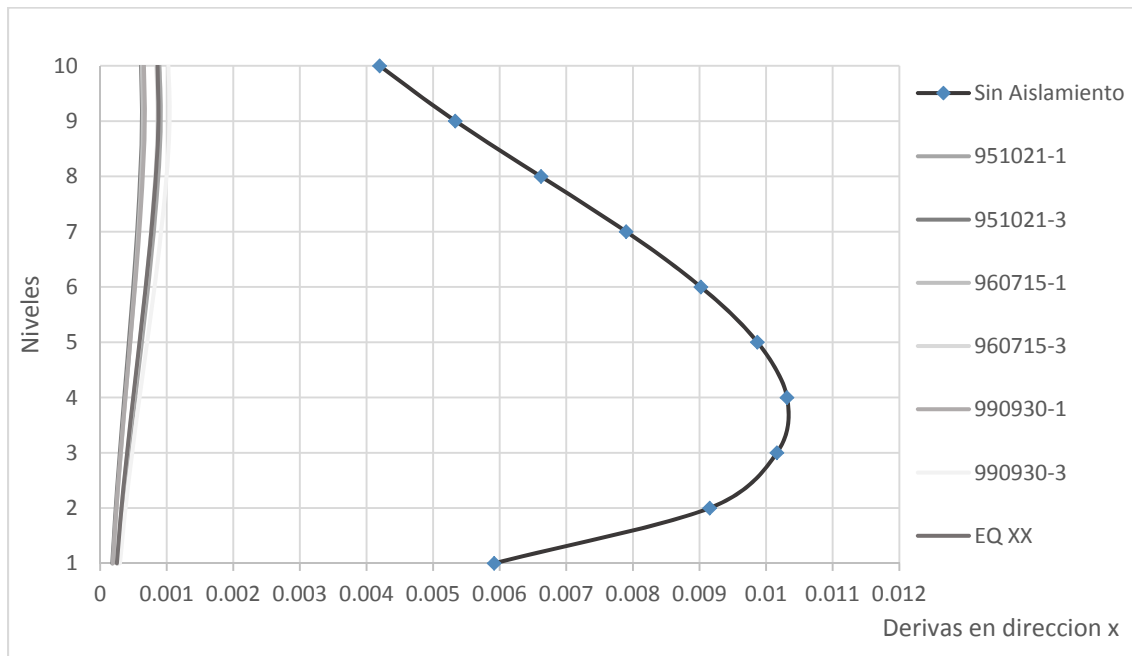


b) Acelerogramas actuando en dirección X

**Figura 3.14** Desplazamientos laterales, análisis modal y análisis paso a paso del edificio aislado

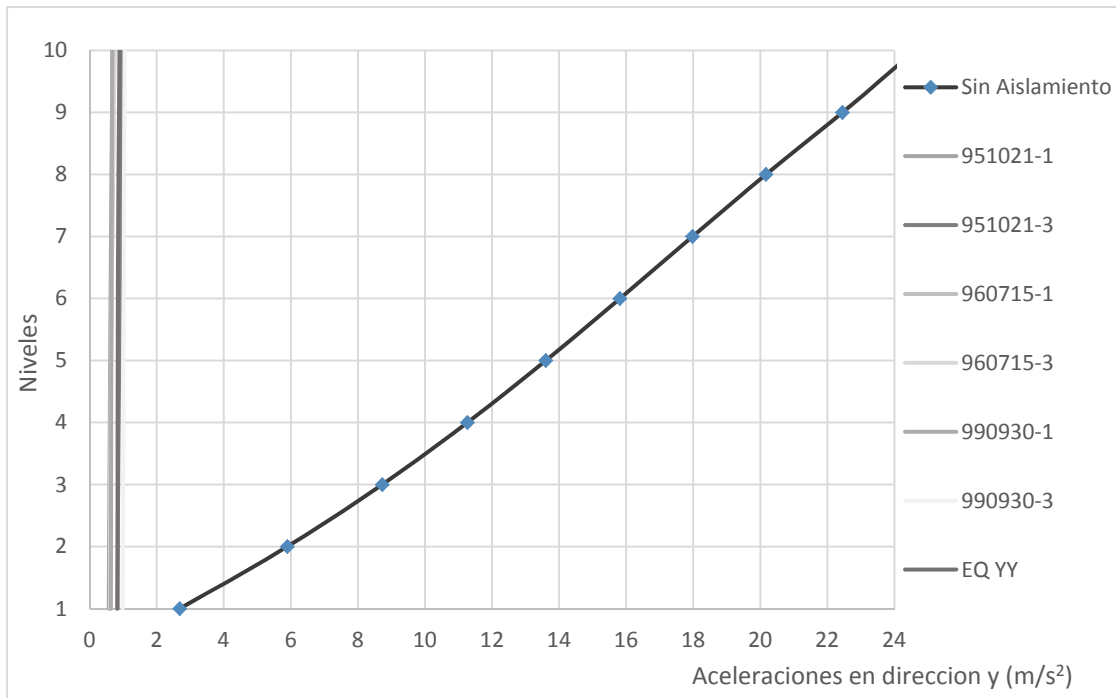


a) Acelerogramas actuando en dirección y

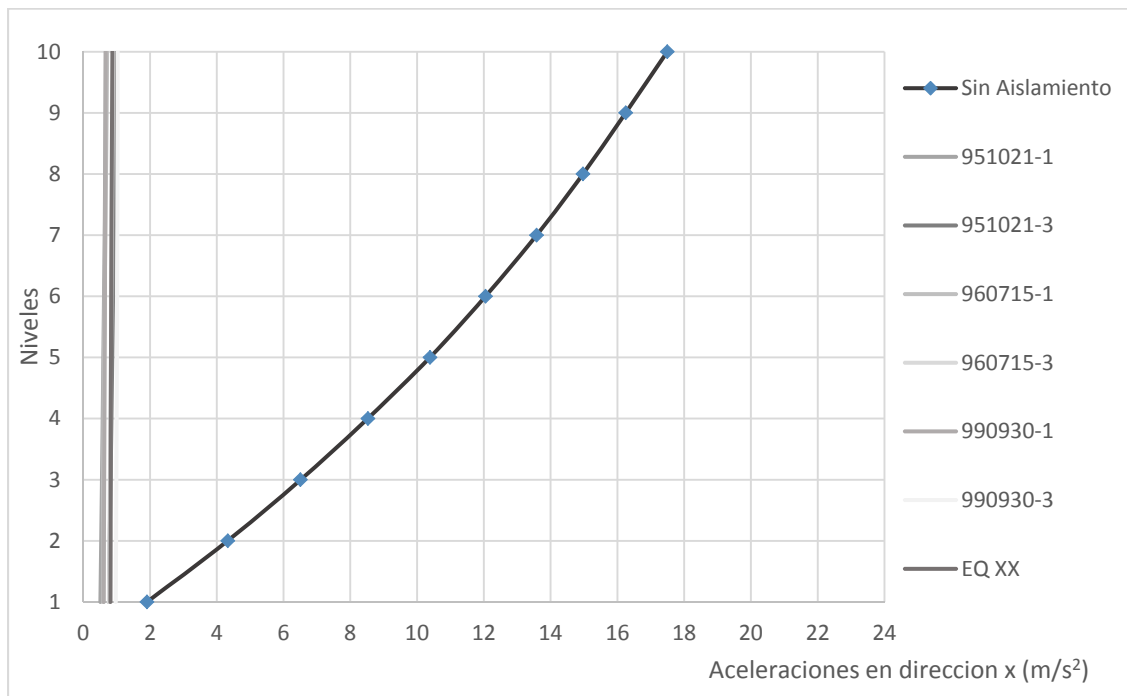


b) Acelerogramas actuando en dirección X

**Figura 3.15** Distorsiones máximas de entrepiso, análisis modal y análisis paso a paso de edificio aislado



a) Acelerogramas actuando en dirección Y



b) Acelerogramas actuando en dirección X

**Figura 3.16** Aceleraciones absolutas, análisis modal y análisis paso a paso de edificio aislado



## 4. COMPARATIVO DE SISTEMAS ESTRUCTURALES

### 4.1 Ventajas y Análisis del Problema

Uno de los requisitos básicos que debe cumplir cualquier construcción es una seguridad estructural adecuada. En muchas regiones, como lo es el caso de la Ciudad de México, el aspecto más crítico a cuidar dentro de este contexto es la alta demanda de fuerza lateral que la acción sísmica puede llegar a demandar del sistema estructural. Existen varios aspectos del diseño estructural que pueden llegar a diferir de manera importante en función de donde se ubica el sistema estructural. En particular, Esteva (1999) resalta los siguientes:

1. *“La resistencia lateral de la construcción; es decir, la máxima fuerza lateral a la que puede someterse una construcción antes de alcanzar la condición de falla. Esta resistencia está altamente relacionada con la capacidad de una estructura para mantenerse en pie ante la acción de un temblor de una intensidad dada.*
2. *El amortiguamiento; cuando una estructura empieza a vibrar libremente no lo hace por tiempo ilimitado, pues las vibraciones con el tiempo van disminuyendo y eso indica que hay un cierto amortiguamiento que va reduciendo la respuesta dinámica. A mayor amortiguamiento, menor es la resistencia lateral necesaria para sobrevivir ante un movimiento sísmico de una intensidad dada.*
3. *Otra característica que influye mucho es la propiedad de ductilidad - capacidad de deformación ante una carga lateral igual a la resistencia máxima - que tiene un edificio. Esto significa que si una construcción se empuja - hasta alcanzar un máximo - esta se sigue deformando y luego se desploma; cuando la deformación es varias veces superior a la que tenía cuando la carga lateral alcanzó su máximo valor posible, entonces se dice que la estructura tiene ductilidad. También existen construcciones que se desploman inmediatamente en cuanto la carga lateral alcanza el valor máximo que es capaz de resistir el sistema; si es así se dice que la estructura es frágil. Entre dos construcciones con la misma resistencia ante un empuje lateral, la que tenga comportamiento más dúctil podrá resistir temblores de intensidades más elevadas, sin desplomarse.*

4. *Por último, están los espectros de diseño, los que contienen información sobre la excitación dinámica máxima a la que pueda estar sujeta una construcción, teniendo en cuenta la actividad sísmica de la región, las condiciones locales de la respuesta del suelo, y las características de la estructura, incluyendo su resistencia lateral y su periodo natural de vibración. Este último depende de la masa que tenga la estructura y de lo flexible que sea. Si la masa es grande o la flexibilidad es alta el periodo de vibración es largo y variable, es una determinante de la respuesta sísmica esperada de la construcción.”*

Asimismo, toda propiedad estructural que ayuda a un sistema estructural a resistir el efecto devastador de un sismo tiene un costo monetario. Por ejemplo, un incremento en la resistencia lateral del sistema implica un incremento en dicho costo. Otro ejemplo es el incremento en el costo asociado al uso de un diseño dúctil, cuyo detallado requiere en general de mayor cantidad de acero y de más tiempo para el habilitado de este acero. Este tipo de costos extras y las dificultades involucradas en su detallado, han impedido el crecimiento en el mercado nacional de las estructuras prefabricadas. Mientras que en muchas partes del mundo los sistemas constructivos con base en elementos prefabricados son comunes, en México predomina la construcción tradicional y los avances tecnológicos se dan a un paso desproporcionalmente lento en relación a lo observado en otros países (aún de niveles de desarrollo socio-económico y tecnológico similares a los mexicanos).

El uso de sistemas tradicionales de concreto implica la fabricación de los diferentes miembros de la edificación en condiciones variables. Los procesos no se optimizan dentro de un marco de control calidad, de tal manera que la calidad de la construcción es muy variable, lo que en muchos casos resulta en sistemas estructurales deficientes. En contraste, un sistema de fabricación industrializado como el involucrado en los sistemas prefabricados garantiza un estándar de calidad y ahorro de tiempo. Los elementos prefabricados se fabrican en condiciones similares con procesos industrializados que permiten un mayor control de calidad, eficiencia del uso de los materiales, y ahorro de tiempo. Estas ventajas suelen reflejarse en un menor costo monetario, reducción de tiempo durante la etapa de la construcción, y mayor seguridad y limpieza en obra.

En el mercado competitivo de hoy en día, cada posible ventaja que se pueda aportar durante la concepción, diseño y construcción del sistema estructural cuenta. Esto conlleva la necesidad de usar los avances tecnológicos para plantear soluciones eficientes que

ahorren tiempo y dinero. Dentro de un contexto así, la productividad de la mano de obra mexicana podría potenciarse de tal manera de revolucionar la industria de la construcción mexicana, no solo en cuanto a la eficiencia en obra sino por la calidad del sistema estructural.

Para el edificio que se estudia en esta tesis, se diseñaron varios elementos estructurales prefabricados como zapatas, columnas, travesaños portantes, travesaños secundarios y losas alveolares. Además, se consideró el diseño de los elementos prefabricados no estructurales usados en la fachada del edificio. Todos estos elementos, tanto estructurales como no estructurales se fabrican de manera eficiente en el taller, y se ensamblan muy rápido en obra.

Las zapatas aisladas son elementos estructurales cuyo trabajo integrado dan lugar a un sistema de cimentación superficial. Las zapatas proveen apoyo a los elementos verticales (como columnas y muros), y transmiten los esfuerzos que reciben de estos al terreno. El uso de zapatas prefabricadas requiere una base bien nivelada.

Las columnas prefabricadas se conectan a su respectiva zapata conforme a lo mostrado en la Figura 4.1, y la conexión se rigidiza con concreto. Las columnas cuentan con ménsulas que sirven para apoyar las travesaños prefabricados y se fabrican por tramos (se requiere de varias columnas prefabricadas en altura para cubrir la altura total del edificio).



**Figura 4.1** Columnas y zapatas prefabricadas

El edificio bajo consideración cuenta con 264 travesaños portantes, agrupados en 132 laterales y 132 intermedias, que fueron diseñadas para recibir las placas alveolares que constituyen

el sistema de piso. Asimismo, el sistema estructural requiere de 278 traves de rigidez. La Figura 4.2 ilustra el tipo de traves usadas para el edificio.



**Figura 4.2** Traves prefabricadas

Para estructurar el sistema de piso se optó por un sistema de piso aligerado. Las placas de concreto pretensadas cuentan con una serie de alveolos que sirven para aligerar la losa y dan paso a las instalaciones. Sobre las placas se cuele un firme de 6cm. Para la fachada se optó por usar un material ligero que se coloca entre las columnas y forma un cerramiento perimetral de fácil mantenimiento. La Figura 4.3 ilustra el tipo de sistema de piso y fachada prefabricada usados por el edificio.



**Figura 4.3** Sistemas prefabricados de piso y de fachada

Cuando uno observa y analiza las Figuras 4.1 a 4.3, y considera simultáneamente todas las ventajas que conlleva el uso de un sistema prefabricado, no deja de preguntarse porque no ha sido posible un uso amplio en zonas sísmicas. Una buena respuesta para esta pregunta la ofrece Rendel (2013): *“Si bien hemos dicho que los elementos prefabricados suelen resultar de mejor calidad que los elementos fabricados en situ, el talón de Aquiles de las estructuras prefabricadas corresponde a las uniones entre los distintos elementos*

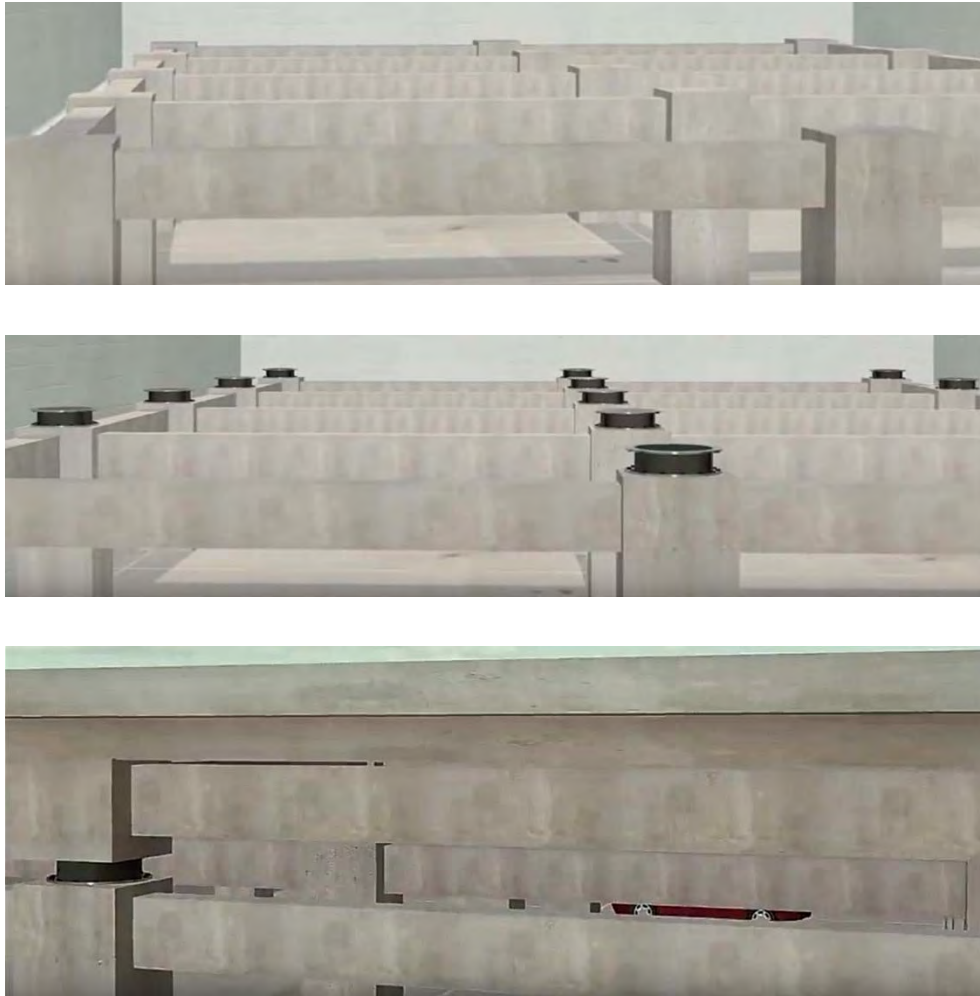
*prefabricados, que son resueltas en obra. Finalmente, estas uniones son las responsables de hacer trabajar las estructuras en forma conjunta y sobrellevar adecuadamente las exigencias que los sismos imponen sobre las estructuras. La experiencia ha demostrado que es en estas uniones donde se producen los problemas durante los sismos, cuando el diseño implementado no es capaz de trabajar inelásticamente de forma adecuada.”*

Para evitar el mal comportamiento de las conexiones en sistemas prefabricados, se ha optado por usar conexiones húmedas; esto es, conexiones coladas *in situ* que se asemejan a aquellas usadas en las construcciones tradicionales de concreto reforzadas. Aunque esto tenga ventajas innegables en términos del desempeño estructural, existen muchas inconveniencias y limitaciones en términos del costo, rapidez de montaje y limpieza en obra. Esta situación que no tiene una posible solución dentro de un marco tradicional de pensamiento, y solo encuentra salida cuando se consideran los avances tecnológicos que se han dado en el ámbito del diseño sismorresistente. En particular, podría diseñarse un sistema gravitacional prefabricado con conexiones secas, cuyas demandas de deformación lateral se vean eficiente y cuidadosamente controladas por medio de un sistema de aislamiento sísmico. El uso de dispositivos de control fabricados en taller con altos estándares de calidad puede incorporarse perfectamente al proceso de concepción, diseño y fabricación de un sistema estructural prefabricado. Esto es, igualmente se fabrican en un lugar distinto, pero se ensamblan e incorporan al sistema estructural en obra bajo la consideración de los principios de eficiencia, limpieza y ahorro. Este esquema es solo cuestión de un buen planteamiento de los tiempos y procesos constructivos.

Para el edificio bajo consideración, se plantea la siguiente secuencia constructiva:

1. Primero se colocan las zapatas prefabricadas sobre una base plana y nivelada. Estas zapatas reciben 28 columnas con altura de 2.50 m, los cuales se interconectan, conforme a lo mostrado en la Figura 4.4, con traveses de rigidez.
2. Encima de cada columna se coloca una placa de acero de conexión, la cual recibe al aislador. El aislador se coloca sobre pernos, se atornilla y nivela.
3. Se finaliza el nivel de sótano con dados, traveses de rigidez y una losa. En el caso de tener un nivel subterráneo se evita la construcción de una losa adicional.
4. Finalmente se colocan los elementos de la superestructura: columnas, traveses y losas.

La Figura 4.4 ilustra de manera secuencial, los pasos 1 a 3 de la secuencia constructiva.



**Figura 4.4** Ensamblado de sistemas de cimentación y aislamiento, y de losa tapa

El dimensionado y diseño de los elementos estructurales del sistema prefabricado que se aísla se llevó a cabo a partir de los elementos mecánicos obtenidos con el programa ETABS 2013. Vale la pena recordar que el diseño de estos elementos se hizo bajo la consideración exclusiva de las cargas gravitacionales del sistema estructural, ya que como se comentó antes, un adecuado contraste de rigideces entre la super-estructura y el sistema de aislamiento reduce la contribución de modos superiores a la respuesta dinámica del sistema aislado y, por tanto, las demandas sísmicas en los elementos estructurales de la super-estructura. Además, vale la pena mencionar que, para dar el contraste de rigideces requerido, se usaron muros prefabricados de concreto reforzado. La concepción que se hace del sistema prefabricado bajo la consideración del uso del sistema de aislamiento permite no considerar el uso de conexiones húmedas y detallado dúctil, y reducir

sustancialmente las dimensiones de las secciones transversales y el armado de vigas y columnas. En particular, y en relación al sistema prefabricado no aislado, la reducción en las dimensiones de los columnas y trabes resultó en un ahorro de volumen de concreto de 12% y una reducción de volumen de acero de refuerzo de 36%. El sistema de piso requiere para diseño por sismo una capa de compresión de concreto que varía entre 5-7cm. Esta capa se puede reducir o eliminar. Para los 13,770 m2 de piso son más de 500 m3 de concreto adicionales.

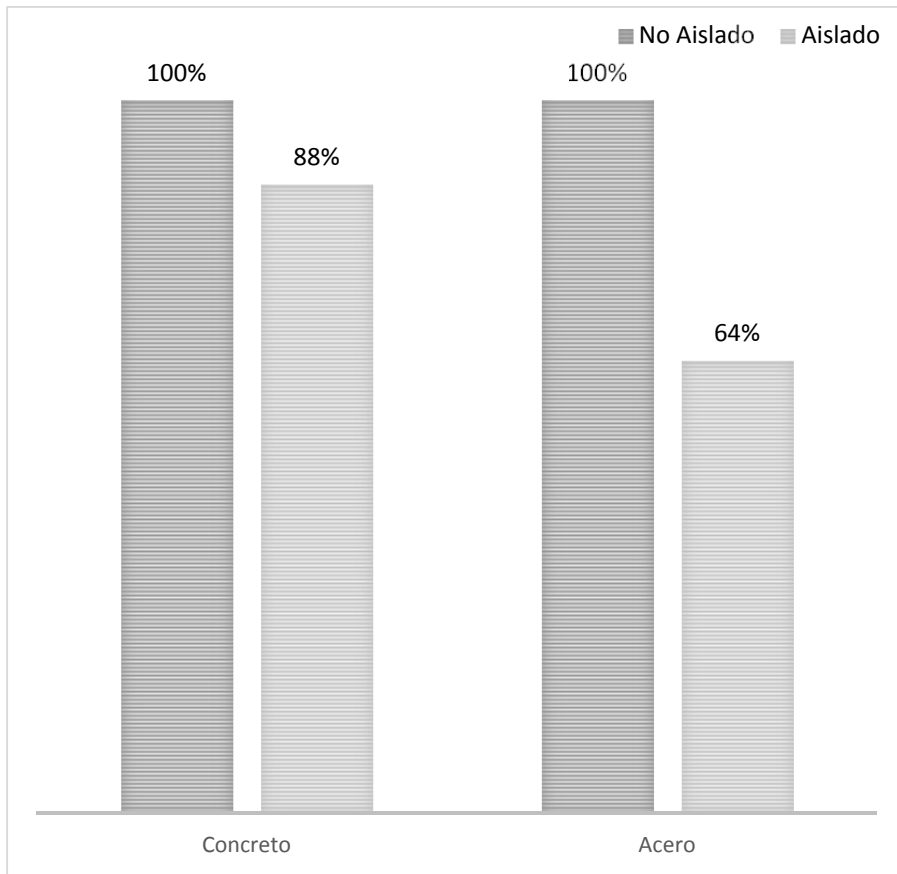
La Tabla 4.1 resume la comparativa de cantidades de acero y concreto que se requieren para las 2 versiones del edificio. La Tabla 4.2 y la Figura 4.5 compara el costo aproximado de las 2 versiones del edificio. Se observa que la diferencia en costo es insignificante, y si se toman en cuenta los beneficios a largo plazo, como son la ocupación inmediata después de un sismo y la reducción del nivel de pérdidas, resulta muchas más atractiva la versión aislada del edificio.

**Tabla 4.1** Comparativo de cantidades de concreto y acero de columnas y trabes

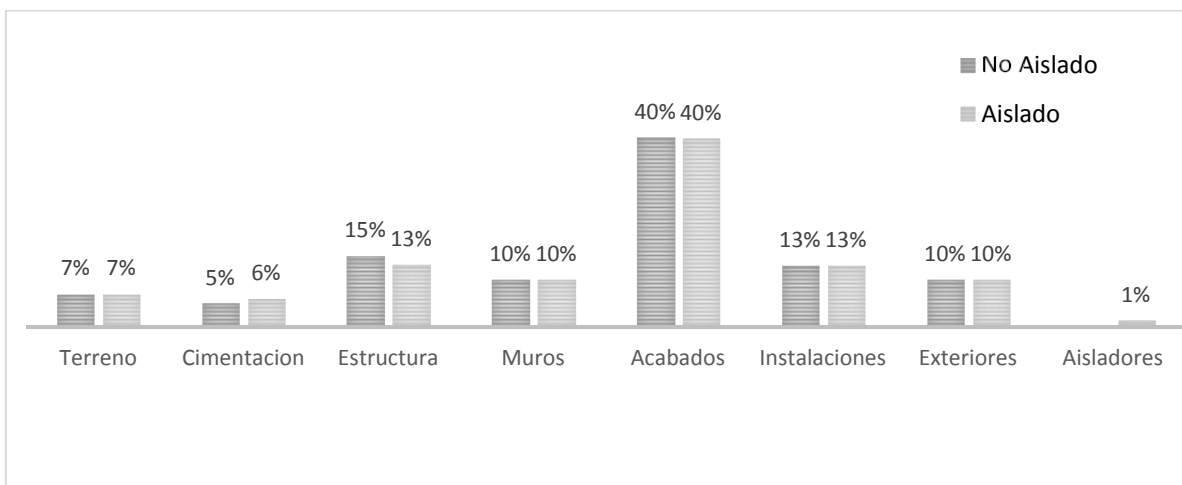
|                 |            | <b>Edificio con base fija</b> | <b>Edificio con aislamiento de base</b> |
|-----------------|------------|-------------------------------|---|
| <b>Concreto</b> |            |                               |   |
| Columnas        | M3         | 568.40                        | 502.74                                  |
| Trabes          | M3         | 875.58                        | 755.67                                  |
| <b>Total</b>    | <b>M3</b>  | <b>1571.66</b>                | <b>1386.09</b>                          |
|                 | %          | <b>100</b>                    | <b>88.19</b>                            |
| <b>Acero</b>    |            |                               |   |
| Columnas        | Ton        | 178.16                        | 97.74                                   |
| Trabes          | Ton        | 29.32                         | 34.26                                   |
| <b>Total</b>    | <b>Ton</b> | <b>207.48</b>                 | <b>132.00</b>                           |
|                 | %          | <b>100</b>                    | <b>63.62</b>                            |

**Tabla 4.2** Comparativo de costos en dólares

|               | <b>Edificación con base fija</b> | <b>Edificio con aislamiento sísmico de base</b> |
|---------------|----------------------------------|---|
| Terreno       | \$963,900.00                     | \$963,900.00                                    |
| Cimentación   | \$688,500.00                     | \$826,200.00                                    |
| Estructura    | \$2,065,500.00                   | \$1,833,870.00                                  |
| Muros y Losas | \$1,377,000.00                   | \$1,337,710.00                                  |
| Acabados      | \$5,508,000.00                   | \$5,508,000.00                                  |
| Instalaciones | \$1,790,100.00                   | \$1,790,100.00                                  |
| Exteriores    | \$1,377,000.00                   | \$1,377,000.00                                  |
| Aisladores    |                                  | \$196,000.00                                    |
|               | <b>\$13,770,000.00</b>           | <b>\$13,832,780.00</b>                          |



**Figura 4.5** Ahorro de concreto y acero en porcentaje



**Figura 4.6** Comparativo de costos en porcentaje



## 5. CONCLUSIONES

Por lo general, en el diseño de un edificio en zona sísmica se consideran una serie de recomendaciones para lograr un buen comportamiento. Se procura que el edificio es simétrico, de plantas y alturas regulares, uniforme en la distribución de resistencia y rigidez y que no está muy pesado. También se cuida que las articulaciones plásticas se forman en los elementos pórticos horizontales en vez de las verticales como las columnas y que el edificio no entrará en resonancia evitando que el periodo del suelo y el periodo de la estructura sean semejantes. Bajo todas estas restricciones se limita mucho la libertad para diseñar y crear.

Algo similar está pasando con la elección del sistema constructivo. Se vuelve un problema cuando se requieren combinar elementos de acero con elementos de concreto reforzado. Existen limitaciones que impiden escoger la mejor solución para el proyecto, ya sea por cuestiones estéticas, económicas o preferencias personales.

Los aisladores sísmicos de base ofrecen una solución de vanguardia que nos permite trabajar con mayor creatividad, eliminando estas restricciones los cuales se crearon como una posible solución a un problema dado.

### 5.1 Conclusiones

- ✓ Es una alternativa atractiva para mejorar la respuesta sísmica de estructuras nuevas y en proyectos de rehabilitación de estructuras
- ✓ Aumento del periodo lejos del periodo del suelo
- ✓ Las velocidades no aumentan con la altura, el edificio se mueve como un cuerpo rígido
- ✓ Las derivas se reducen en este caso hasta 86%
- ✓ Diseño permite reducción de elementos estructurales, requiere menos detalle dúctil
- ✓ Las aceleraciones han disminuido en este caso al 7-10%

## CAPITULO 5

- ✓ Se protegen estructuras internas como escaleras y muros
- ✓ Seguridad para habitantes y contenidos protegidos
- ✓ Costo de reparaciones muy bajos o no existente, ofrece una reducción significativa en los costos de operaciones de la estructura, debido que evita las perdidas por interrupción
- ✓ En lugares que piden diseño sísmico en el proyecto estructural se puede evaluar el uso del aislamiento sísmico de base
- ✓ Para periodos hasta aproximado de 1 s, probablemente más
- ✓ El diseño del aislamiento sísmico se puede ver como cualquier otro elemento prefabricado, se analiza la estructura, se desarrollan las características y finalmente se diseñan las conexiones superiores e inferiores
- ✓ Un sistema de aislamiento flexible con poco amortiguamiento combinado con una superestructura rígida controla bien los modos superiores
- ✓ Una mayor rigidez en la superestructura debería que llevar a una menor demanda de resistencia y desplazamientos, se logra mediante elementos rigidizantes
- ✓ El costo del aislamiento sísmico se reduce con mayor cantidad de niveles construidos, si a ese se suman los costos totales, aquellos asociados a la vida útil de la edificación, como reparación e interrupción, el edificio aislado será más eficiente en costo
- ✓ Es recomendable para edificaciones relativamente rígidos y limitados para superestructuras altamente flexibles
- ✓ Puede haber desplazamientos grandes (en el rango hasta 500mm) en la base del edificio. Este movimiento requiere suficiente espacio que rodea al edificio
- ✓ Se deben que tomar precauciones en las instalaciones mecánicas y eléctricas

## CONCLUSIONES

- ✓ Se requieren pruebas de los dispositivos que pueden tardar hasta 2 meses, lo cual requiere una buena planeación
- ✓ Se requiere un programa para mantenimiento, servicio e inspección posterior al sismo
- ✓ Se deben cuidar muchos detalles en los aspectos constructivos como la conexión entre el edificio, el aislador y la cimentación, ya que debe existir un claro deslinde entre la cimentación y la superestructura a fin de que funcione el método, debe de considerarse que cada uno de éstos elementos tendrá desplazamientos propios.

### 5.2 Recomendaciones

#### 5.2.1 Reglamentación

- Los edificios aislados deberían tener reducciones en seguros (en Japón es 30% menos)
- En los reglamentos se deberá incluir requerimientos para diseño, análisis y pruebas de dispositivos de aislamiento sísmico. Eso podría simplificar su implementación y reducir costos.
- Desprenderse de actitudes conservadoras, pero sin dejar de ser realistas, desarrollar investigación tendiente a actualizar los códigos y determinar hasta donde podremos reducir las exigencias normativas en el diseño de las estructuras aisladas en la base; éste paso debe de ser el inmediato para el desarrollo de ésta tecnología.

## CAPITULO 5

### 5.2.2 Producción y Aplicación en México

- Realizar investigaciones de las propiedades mecánicas, proceso de manufactura de materiales y tecnologías que puedan utilizarse a nivel nacional para que sirvan de materia prima en la producción de dispositivos de aislamiento sísmico tanto elastoméricos como de fricción.
- El sistema de aislamiento es muy eficiente para ciertos casos, los países latinoamericanos deben aumentar la investigación e intentar desarrollar sus propios aisladores, y de este modo permitir el desarrollo del sistema en los países
- Desarrollar prototipos a escala de sistemas de aisladores para el estudio de su posible aplicación en estructuras a nivel nacional.
- Contar con un laboratorio en territorio mexicano para realizar las pruebas de los dispositivos
- El aislamiento sísmico no representa la solución única para disminuir los efectos de los sismos en las edificaciones, no es un sistema que pueda considerarse de uso universal, también se puede combinar con otros sistemas de protección sísmica como disipadores

### 5.3.3 Factibilidad

- Para poder considerar la factibilidad económica que pueda presentar un edificio aislado se debe partir de un análisis interdisciplinario que considere: la geología local (fallas locales, estratos, condiciones de suelo, etc.), amenaza sísmica (sismos presentados, período, frecuencia, severidad, nivel de aceleraciones, etc.), tipo de daño que se considera (menor o reparable), propios de la estructura (forma estructural, regularidad vertical y horizontal, materiales, uso de la estructura, características, etc.)
- Los sitios de implementación de los aisladores de base se consideran apropiados cuando los suelos que sean rígidos, pudiéndose utilizar los que entran en los tipos I y II, se evitan suelo tipo III para evitar que los grandes desplazamientos que se dan en la base se pueden amplificar debido a grandes movimientos del terreno, esto es un efecto totalmente indeseable ya que puede inducir grandes desplazamientos en la superestructura, anulando cualquier beneficio del aislamiento sísmico. Para un posible uso en otros suelos se deber

## CONCLUSIONES

- El análisis económico muestra que la diferencia entre el ahorro en elementos estructurales y el costo de la estructura del sistema de aislamiento es mínima. En comparación a largo plazo el sistema de aislamiento presenta un riesgo mucho menor, ya que después de la ocurrencia de un sismo los daños serán nulos o mínimos.
- Los diseños convencionales proveen al edificio con la suficiente resistencia, deformabilidad y capacidad de disipación para contrarrestar las fuerzas generadas por un sismo, la respuesta de la aceleración pico de la estructura es generalmente tan grande como la aceleración pico inducida por el suelo; en contraparte el aislamiento sísmico limita los efectos del sismo mediante el desacoplamiento de la estructura horizontalmente en la base, las aceleraciones disminuyen considerablemente al igual que las fuerzas inducidas a la estructura.

## Referencias

1. American Concrete Institute, Reglamento para las Construcciones de Concreto Estructural ACI-318-02, 2004
2. Arroyo D. and Terán-Gilmore A., "Strength Reduction Factors for Ductile Structures with Passive Energy Dissipating Devices." 2003; 7-2: 297-325.
3. Comisión Federal de Electricidad, "Manual de obras Civiles: Diseño por Sismo", 2008, México, pp. 175
4. Computers and Structures, Inc „ETABS 2013, Extended 3D Analysis of Building Systems, Nonlinear version, Berkeley, California
5. Esteva L., "Diseño sísmico basado en desempeño: tendencias y retos 1999", México
6. Esteva L., "Criterios para el diseño estructural de edificios en zonas sísmicas" - <http://www.oem.com.mx>, 9/14)
7. FIP Industriale, "FIP Industriale, Leading Technology" seismic devices, <http://www.fipindustriale.it>, 2013
8. Gaceta Oficial del Distrito Federal, Reglamento de Construcción del Distrito Federal, 2004
9. Gaceta Oficial del Distrito Federal, "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto". Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, 2004 México
10. Gaceta Oficial del Distrito Federal, "Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones". Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, 2004 México
11. Gaceta Oficial del Distrito Federal, "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo". Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, 2004 México
12. Gómez Soberón L.A., Tena Colunga A., "Aislamiento Sísmico de escuelas existentes utilizando criterios de diseño sismo-resistente estáticos", México, 1999
13. González R., Aguilar J., "Dificultades para la implementación de dispositivos de aislamiento sísmico en la base en Latinoamérica", 2005
14. IBC International Building Code. International Code Council. Illinois, USA; 2006
15. Kelly T.E., "Base Isolation of Structures Design Guidelines", Holmes Consulting Group Ltd, 2001, Nueva Zelanda
16. Marsal R.J., Mazari, M., "El subsuelo de la ciudad de Mexico", 1959
17. [www.mageba.ch](http://www.mageba.ch)
18. Meli R., "Diseño estructural", LIMUSA, 2da edición

19. Naeim F., Kelly J.M., "Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice", John Wiley & Sons, Inc. 1999
20. Newmark N.M., Hall, W.J., "Earthquake Spectra and Design", EERI. 1982.
21. Park Y.J., Ang A., Wen Y.K., "Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings" Journal of Structural Engineering. 1985; 111:4, 740-757.
22. Park R., Paulay T., "Reinforced concrete structures." 1975. John Wiley & Sons. Hoboken, NJ, USA
23. Rendel M., "Soluciones técnicas prefabricadas" Proyecta. 2013 ed. 21, 70-73
24. Rodríguez M., Restrepo J., "Práctica y diseño sísmico de edificios en México. Cambios necesarios"
25. Reinoso E., "Riesgo Sísmico de la ciudad de México", México, 2007
26. Rosenblueth E., Sánchez-Sesma F.J., Ordaz M. y Singh S.K., "Espectros de diseño en el reglamento para las construcciones del Distrito Federal", VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Querétaro, México, A1-A17, 1987.
27. Ordaz M., Singh S. K., "Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City", Bull. Seism. Soc. Am., Vol 82, 24-43, 1992.
28. Skinner R.I., Robinson W.H., McVerry G.H., "An introducción to Seismic Isolation", John Willey & Sons, 1993
29. Sosa Garcia A., Ruiz Gomez S.E., "Análisis estructural y costos de edificios con aisladores sísmicos", México, 1992
30. UBC 1997 Uniform Building Code
31. Wang Yen-Po, "Fundamentals of Seismic Base Isolation", International Training Program for Seismic Design of Building Structures
32. Zuniga-Cuevas, O., Terán-Gilmore A., "Parametric study on acceleration-based design of low-rise base isolated systems", México, 2013
33. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. Base mexicana de datos de sismos fuertes; 1997, <http://www.unam.mx/db/spanish/bmsf.html>
34. Artículo de Internet "Aislación Sísmica", [http://www.sirve.cl/información\\_técnica/aislación\\_sísmica/contenido IT aislación.htm](http://www.sirve.cl/información_técnica/aislación_sísmica/contenido_IT_aislación.htm), Chile, 2013
35. "Dynamic Isolation Systems- the Word Leader in earthquake protection", <http://www.dis-inc.com/index.html>