



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UN
EDIFICIO DE CONCRETO REFORZADO CON Y SIN AISLAMIENTO SÍSMICO
EN LA BASE**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
GUYELMO GARCÍA SANTIAGO

TUTOR PRINCIPAL
M. I. MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ VEGA, FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, OCTUBRE 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: Dr. Escobar Sánchez José Alberto
Secretario: Dr. López Bátiz Oscar Alberto
Vocal: M. I. Rodríguez Vega Miguel Ángel
1^{er}. Suplente: M. I. Guzmán Olguín Héctor Javier
2^{d o}. Suplente: Dr. Gómez Martínez Roberto

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

TUTOR DE TESIS:

M. I. MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ VEGA

FIRMA

DEDICATORIA

A mis padres Maura y Pablo, quienes día a día lucharon para darme la oportunidad que ellos no tuvieron y que con tanto esfuerzo cuidaron e invirtieron en mí.

A mis hermanos Vladimir y Yitsu que, aunque son más chicos que yo, siempre han sido un gran ejemplo para mí.

A mi esposa Angélica a quien amo y adoro tanto.

A mi hermoso hijo Hasen que, a pesar de ser un bebé me ha apoyado y me ha dado un gran ejemplo de vida.

A mis futuros hijos.

A mis abuelos; Manuela, Sebastiana, Feliciano y Félix que, aunque la distancia nos ha separado yo siempre los llevo en mi mente, en especial a mi abuelo Félix que desgraciadamente ya no pudo ver como logre este reto.

A mis demás familiares que, con sus consejos cambiaron de alguna forma mi manera de ver el futuro.

A la familia de mi esposa Celia, Leticia, y Héctor por apoyarme incondicionalmente.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por siempre apoyarme en mis decisiones y haberme impulsado a seguir con mis estudios y por ser un gran ejemplo en mi vida.

A mis hermanos por entenderme y quererme tal y como soy.

A mi linda esposa por su comprensión, paciencia y también el apoyo incondicional para seguir este camino.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

A todos los docentes por compartir sus conocimientos y experiencia que han contribuido a una formación personal y profesional.

Debo agradecer de manera especial a mi asesor, M. en I. Miguel Ángel Rodríguez Vega, por haberme aceptado para realizar mi tesis bajo su dirección, y sobre todo por compartir su tiempo, su apoyo incondicional, paciencia y confianza durante este trabajo.

A mis sinodales: Dr. Escobar Sánchez José Alberto, Dr. López Bátiz Oscar Alberto, M. I. Guzmán Olguín Héctor Javier y Dr. Gómez Martínez Roberto, por su dedicación en la revisión y comentarios para la mejora de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme otorgado una beca durante el tiempo que dura el posgrado.

RESUMEN

La finalidad de este trabajo fue realizar un análisis analítico comparativo del comportamiento estructural, ante solicitaciones sísmicas de un edificio de concreto reforzado, inicialmente analizado y diseñado de manera convencional, posteriormente colocándole un aislador elastomérico de alto amortiguamiento High Damping Rubber Bearings, debajo de cada columna. El modelado y los análisis correspondientes se desarrollaron empleando el software Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems.

Se expuso brevemente el concepto de aislación sísmica, y se describió de manera concisa la teoría lineal de un sistema aislado de dos grados de libertad, dicha teoría se muestra con el fin de entender de manera sencilla el concepto del sistema de aislamiento sísmico.

En la actualidad se pueden encontrar diversos tipos de dispositivos que aíslan a la superestructura y que han tenido éxito, en este documento se describió las características principales de los sistemas más utilizados y con mayor profundidad el sistema de aislación a emplear.

Se utilizó un edificio de cuatro niveles estructurado a base de marcos de concreto reforzado, muy regular en planta y elevación, dicha estructura se idealizó en un suelo firme de la Ciudad de México, destinado a oficinas.

Con los resultados obtenidos se demostró que, usando el aislador elastomérico de alto amortiguamiento en la base del edificio, reduce la demanda sísmica en la superestructura constatando la importancia de emplear este tipo de dispositivos, ya que al reducir las fuerzas sísmicas en la superestructura disminuimos los daños en ésta, garantizando en gran medida la seguridad de los ocupantes y sus contenidos.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. ALCANCE	4
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	4
2. AISLADORES SÍSMICOS DE BASE	6
2.1. CONCEPTO Y CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL AISLAMIENTO SÍSMICO	6
2.1.1. Teoría lineal del sistema de aislamiento.....	9
2.1.2. Requerimientos normativos para el diseño de estructuras con aisladores de base	11
2.1.2.1. Método de análisis estático.....	13
2.1.2.2. Método de análisis dinámico.....	15
2.1.3. Tipos de aisladores sísmicos	18
2.1.3.1. Aisladores de péndulo de fricción	18
2.1.3.2. Aisladores de caucho natural.....	19
2.1.3.3. Aisladores de caucho natural con núcleo de plomo.....	20
2.1.3.4. Aisladores de alto amortiguamiento.....	21

2.1.3.4.1. Características mecánicas del aislador de alto amortiguamiento.....	21
3. EDIFICIO: CASO DE ESTUDIO	26
3.1. Edificio de oficinas de cuatro niveles	26
3.1.1. Descripción de la estructura	26
3.1.2. Propiedades de los materiales.....	28
3.1.3. Cargas consideradas.....	29
3.2. Análisis y diseño de la estructura empotrada en la base	30
3.2.1. Modelado y Análisis sísmico	30
3.2.2. Diseño de los elementos estructurales.....	32
3.2.3. Resultados del análisis del edificio convencional	34
3.3. Análisis y diseño de la estructura con aislamiento sísmico.....	41
3.3.1. Diseño del aislador de alto amortiguamiento (HDRB).....	41
3.3.2. Modelado y Análisis sísmico de la estructura aislada.....	51
3.3.3. Diseño de elementos estructurales	53
3.3.4. Resultados del análisis.....	57
4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS.....	62
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
6. REFERENCIAS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura convencional vs aislada	7
Figura 2.2 Reducción de la aceleración con el alargamiento del periodo.	8
Figura 2.3 Respuesta de la estructura aislada, dependiendo de las condiciones del suelo.	8
Figura 2.4 Modelo de dos grados de libertad.	9
Figura 2.5 Aislador de péndulo de fricción.	19
Figura 2.6 Aislador de caucho natural.....	20
Figura 2.7 Aislador de caucho natural con núcleo de plomo.....	20
Figura 2.8 Aislador de caucho de alto amortiguamiento.	21
Figura 3.1 Vista en planta del edificio de oficinas.	27
Figura 3.2 Vista en elevación del edificio de oficinas.	28
Figura 3.3 Espectro de diseño de la NTCDS apéndice A, para un $T_s=0.51s$	31
Figura 3.4 Trabes secundarias.....	32
Figura 3.5 Trabes principales.....	33
Figura 3.6 Columnas.....	34
Figura 3.7 Primera forma modal $T=0.974s$. Traslación en X.....	35
Figura 3.8 Segunda forma modal $T=0.827s$. Traslación en Y.	36
Figura 3.9 Tercera forma modal $T=0.764s$. Torsión en Z.....	36
Figura 3.10 Diagrama de cortante en dirección X.....	37
Figura 3.11 Diagrama de cortante en dirección Y.	38
Figura 3.12 Comparación de la distorsión de servicio con la distorsión permitida. 40	
Figura 3.13 Comparación de la distorsión de colapso con la distorsión permitida. 40	
Figura 3.14 Espectro de desplazamiento.	42
Figura 3.15 Dimensiones del aislador HDRB.....	50
Figura 3.16 Vista en planta del aislador HDRB.....	51
Figura 3.17 Fuerza cortante en cada entrepiso en dirección X.....	53
Figura 3.18 Fuerza cortante en cada entrepiso en dirección Y.....	54
Figura 3.19 Trabes principales niveles PB y 1.	55

Figura 3.20 Traveses principales niveles 2 al 3.....	55
Figura 3.21 Traveses principales nivel 3.	56
Figura 3.22 Columna.....	56
Figura 3.23 Primera forma modal $T=3.072s$.Traslación en X.....	58
Figura 3.24 Segunda forma modal $T=2.967s$. Traslación en Y.....	58
Figura 3.25 Tercera forma modal $T=2.635s$. Torsión en Z.....	59
Figura 3.26 Diagrama de cortante en dirección X.....	60
Figura 3.27 Diagrama de cortante en dirección Y.....	60
Figura 3.28 Distorsión en dirección X y Y.	61
Figura 4.1 Comparación de cortantes en X.....	64
Figura 4.2 Comparación de cortantes en Y.....	65
Figura 4.3 Distorsión en dirección X.	66
Figura 4.4 Distorsión en dirección Y.	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Cargas vivas niveles 1 a 3.	29
Tabla 3.2 Sobrecarga muerta niveles 1 a 3.	29
Tabla 3.3 Cargas vivas en azotea.....	30
Tabla 3.4 Sobrecarga muerta azotea.....	30
Tabla 3.5 Periodos	35
Tabla 3.6 Cortante en cada entrepiso.....	37
Tabla 3.7 Distorsión en dirección X estado límite de servicio.	39
Tabla 3.8 Distorsión en dirección Y estado límite de servicio.	39
Tabla 3.9 Distorsión en dirección X estado límite de colapso.	39
Tabla 3.10 Distorsión en dirección Y estado límite de colapso.	39
Tabla 3.11 Cortante en cada entrepiso.....	52
Tabla 3.12 Periodos	57
Tabla 3.13 Cortante en cada entrepiso.....	59
Tabla 3.14 Distorsiones dirección X.....	61
Tabla 3.15 Distorsiones dirección Y.....	61
Tabla 4.1 Periodos	63
Tabla 4.2 Cortantes en dirección X.....	63
Tabla 4.3 Cortantes en dirección Y.....	64
Tabla 4.4 Distorsión en X.....	65
Tabla 4.5 Distorsión en Y.....	66

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la ingeniería sísmica se ha enfocado en desarrollar e implementar métodos con tecnologías que cumplan con el propósito de proteger las estructuras frente a sismos.

Los diferentes sistemas de aisladores sísmicos, son una de las opciones para proteger a las estructuras de fenómenos naturales como los sismos. Los principales países que han tenido experiencia en usar este tipo de dispositivos y corroborar en sus edificios las ventajas que ofrecen en comparación con las edificaciones de diseño tradicionales, son; Japón, Estados Unidos, Nueva Zelanda y recientemente Chile.

En este trabajo de investigación, se analizó la aplicación del aislamiento sísmico en la base para un edificio de oficinas, el cual para el análisis sísmico se ubicó en la Ciudad de México, realizando un análisis analítico comparativo del comportamiento estructural ante sollicitaciones sísmicas del edificio aislado y sin aislar, evaluando los beneficios y las desventajas del uso de estos dispositivos.

1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Las estructuras durante su vida útil, son sometidas a diversas solicitaciones como pueden ser las cargas de servicio y los fenómenos naturales, dentro de estos últimos se encuentra el sismo, siendo este uno de los más importantes, ya que puede ser de modera a alta intensidad. Los sismos han ocasionado alrededor del mundo y a lo largo de la historia, niveles altos de pérdidas humanas y económicas, ocasionados por el mal desempeño que algunas edificaciones han tenido.

Para controlar el desempeño de una edificación ante un evento sísmico, los reglamentos tratan de dar algunas especificaciones, a fin de prevenir el colapso de las estructuras ante sismos de intensidad excepcionalmente severas y salvaguardar la vida de los ocupantes, permitiendo que la estructura pueda disipar energía en el rango inelástico, desarrollando articulaciones plásticas en los extremos de las vigas. Sin embargo, en estructuras de concreto reforzado tales deformaciones inelásticas, pueden causar daños estructurales y no estructurales, que podrían ser o no reparados, lo cual puede representar perdidas parciales o totales de los contenidos o de la edificación, además de que estos métodos exigen una cuidadosa disposición del refuerzo en las conexiones.

El objetivo de desempeño de los reglamentos para prevenir el colapso estructural no es suficiente, ya que muchas edificaciones necesitan estar constantemente en operación, por lo que todo esto ha impulsado en los últimos treinta años a muchos investigadores de diferentes países a innovar e inventar nuevas tecnologías para controlar el desempeño de las edificaciones ante los efectos del sismo y así poder cumplir las diferentes necesidades de la sociedad. Dentro de los dispositivos estudiados analítica y experimentalmente en estos últimos años, se encuentran los diversos sistemas de aislamiento sísmico de base, gracias al excelente desempeño que las estructuras aisladas han tenido durante sismos de gran magnitud, como por ejemplo el sismo Northridge (Los Ángeles, 1994) y Kobe (Kobe, 1995).

Los países que cuentan con la mayor experiencia en el uso de estos dispositivos son; Japón, Nueva Zelanda y Estados Unidos que, gracias a los esfuerzos prácticos y académicos de estos países, se han podido dar recomendaciones de diseño de aisladores de base, incrementando notablemente el uso de estos sistemas en edificaciones de estos países. Recientemente Chile ha empezado a implementar este tipo de dispositivos en sus edificaciones.

En México el uso de aisladores sísmicos es muy bajo, esto puede deberse a que aún no se han incorporado recomendaciones de diseño sísmico con aisladores de base en el reglamento. Sin embargo, en los años 70's fue uno de los países pioneros en desarrollar sistemas de aislamiento sísmico, como por ejemplo el aislamiento sobre balines propuesto por el Ing. Manuel González Flores, con el cual se aisló una escuela secundaria en la Ciudad de México.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Realizar un estudio analítico comparativo del comportamiento estructural ante solicitaciones sísmicas de un edificio de oficinas de cuatro niveles de concreto reforzado, con y sin aisladores sísmicos de base, evaluando los beneficios y las desventajas del uso de estos dispositivos.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos que se cumplieron son:

- a) Modelar la estructura con base fija en el software ETABS.
- b) Analizar y diseñar la estructura de manera convencional respetando lo estipulado en las Normas Técnicas Complementarias.

- c) Definir los principales parámetros que serán tomados en cuenta para el diseño de un aislador.
- d) Modelar el edificio con base aislada sísmicamente en el software ETABS.
- e) Analizar y diseñar la estructura con base aislada sísmicamente.
- f) Identificar las diferencias en el comportamiento estructural del edificio con aislación sísmica y sin ellos.
- g) Comparar los resultados obtenidos del análisis del edificio aislado con el tradicional.
- h) Identificar la ventajas y desventajas del uso de aislamientos sísmicos.
- i) Impulsar el interés en el estudio de estos sistemas de aislación.

1.3. ALCANCE

Se presentan las principales diferencias entre un edificio aislado sísmicamente y un edificio de diseño convencional, resaltando las ventajas y desventajas del uso de estos dispositivos, mostrando de manera detallada el diseño de los aisladores de base y su implementación en estructuras de concreto reforzado, cabe destacar que el trabajo está delimitado a solo estructuras de concreto reforzado y que los efectos de la interacción suelo estructura no se consideran en este trabajo.

1.4. JUSTIFICACIÓN

México es uno de los países frecuentemente expuesto a amenazas sísmicas de media y alta intensidad, por lo que las edificaciones están en constante excitación sísmica, resultando ser conveniente la aplicación de aisladores de base en las estructuras para evitar daños excesivos en estas.

El desconocimiento del diseño de aisladores sísmicos que tienen algunos proyectistas, la falta de recomendaciones para el diseño de aisladores sísmicos en el Reglamento Mexicano, y la poca difusión de estas tecnologías, hace que tanto inversionistas como proyectistas no se arriesguen a realizar construcciones con

aislamiento sísmico, provocando que en nuestro país sean muy pocas las edificaciones construidas con estas tecnologías.

Los aisladores de base podrían ser una solución también para efectos arquitectónicos ya que estos dispositivos se colocan por lo general entre la cimentación y la superestructura, dando mayor estética.

Por lo expuesto anteriormente se tomó la decisión de realizar una investigación sobre el comportamiento de las estructuras aisladas y comparar las diferencias que existen entre las estructuras con y sin aislación sísmica en la base.

2. AISLADORES SÍSMICOS DE BASE

2.1. CONCEPTO Y CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL AISLAMIENTO SÍSMICO

Los sistemas de protección sísmica de las estructuras se pueden clasificar en tres categorías: Sistemas activos, semi-activos y pasivos. En esta última categoría se encuentran los sistemas de aislación sísmica, tomando en cuenta que no se deben de confundir con un disipador de energía, ya que estos se colocan en la superestructura como diagonales, caso muy diferente a los aisladores que estos desacoplan la superestructura del suelo y hace que la aceleración sísmica disminuya. Los aisladores sísmicos pueden ser combinados con sistemas activos y semi-activos los cuales no serán abarcados en esta investigación.

Los aisladores sísmicos, son dispositivos que deben ser muy flexibles en dirección horizontal, y muy rígidos en la dirección vertical, estos dispositivos se colocan generalmente entre la cimentación y la superestructura, sin embargo, hay casos en donde se pueden colocar en niveles superiores de la superestructura, como, por

ejemplo, en la ciudad de México se construyó un Hotel sobre un centro comercial, dicho hotel fue aislado sísmicamente en su base.

Los aisladores sísmicos, al ser muy flexibles en dirección horizontal, alarga considerablemente el periodo fundamental de vibración de la estructura, además de que a estos dispositivos es posible añadir diferentes niveles de amortiguamiento, consecuentemente se obtiene una reducción en las aceleraciones espectrales, por esto es importante mencionar que, al reducir las aceleraciones espectrales tenemos un aumento en las demandas de desplazamiento, lo cual no representa un problema, ya que estos desplazamientos son acomodados por el sistema de aislamiento como se puede observar en la figura 2.1, lo que conlleva a desplazamientos relativos mínimos en la superestructura, de esta manera se logra reducir en gran medida los daños estructurales y no estructurales de las edificaciones, dando mayor seguridad a los ocupantes.

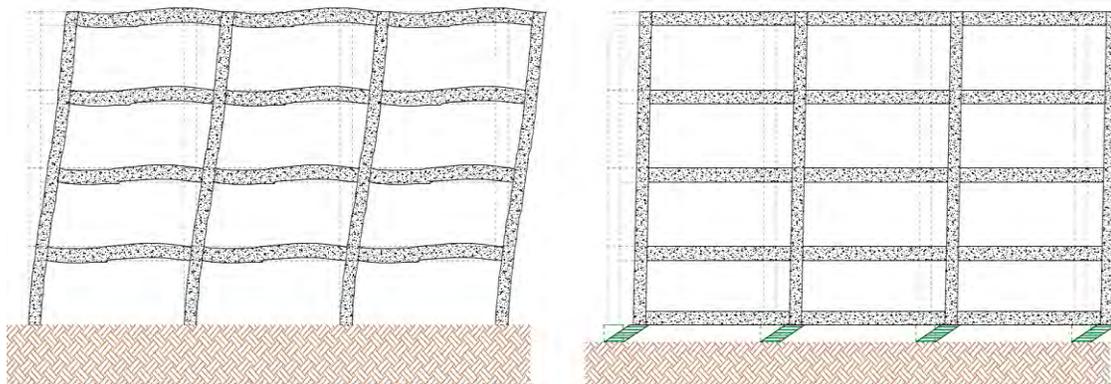


Figura 2.1 Estructura convencional vs aislada

En la Figura 2.2 Se puede observar gráficamente, mediante un espectro de diseño, como la estructura con base fija, en este caso con un periodo de 1s., presenta mayores aceleraciones espectrales que la estructura aislada con un periodo de 2.5s y por lo tanto las fuerzas de diseño en la estructura aislada son menores.

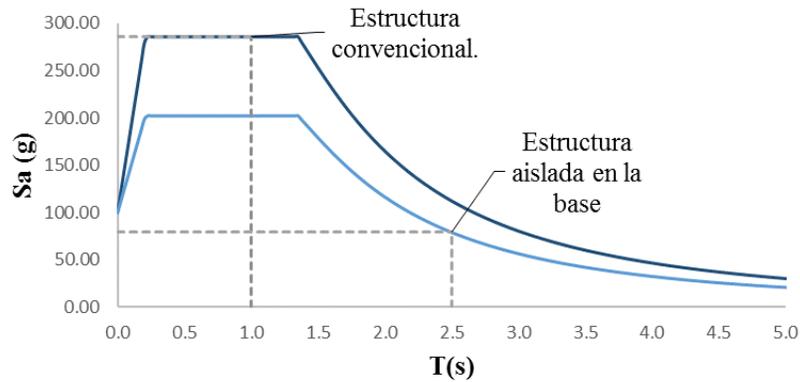


Figura 2.2 Reducción de la aceleración con el alargamiento del periodo.
 (Fuente: Espectro elástico NTCDS, Apéndice A, para un periodo de suelo de $T=0.51s$)

Se debe comentar que estos beneficios se logran en estructuras ubicados en suelo firme y de periodo de vibración alrededor de un segundo o menores a este. Para ejemplificar mejor lo comentado anteriormente haremos uso del espectro elástico para la zona I y la Zona III especificado en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del 2004 (NTCDS-2004), apéndice A para un periodo de suelo de 0.51s y 2s respectivamente mostrados en la Figura 2.3 En este caso se supuso una estructura de periodo fundamental de 1s, para la estructura convencional, y para la estructura aislada de 2.5s, podemos notar claramente que la estructura con aislamiento sísmico en suelo firme logramos reducir las aceleraciones, caso contrario sucede en la estructura aislada en suelo blando.

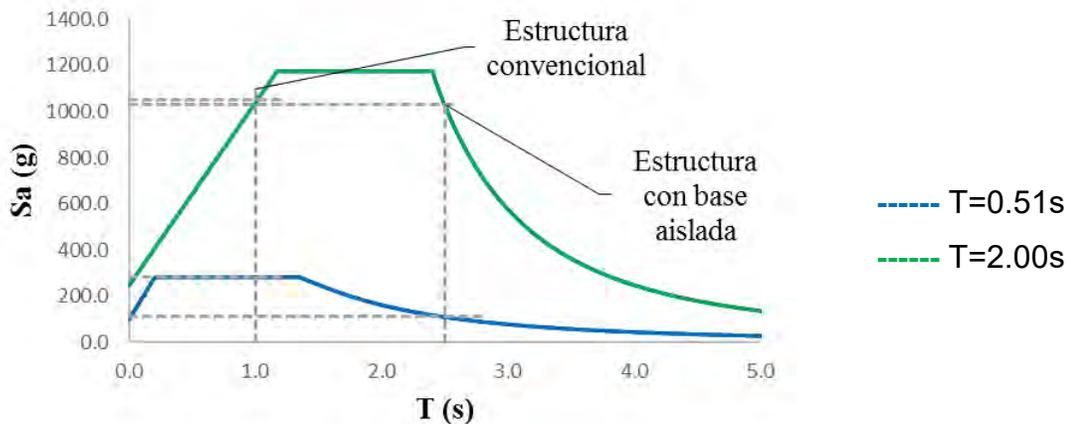


Figura 2.3 Respuesta de la estructura aislada, dependiendo de las condiciones del suelo.
 (Fuente: Espectro elástico NTCDS, Apéndice A)

2.1.1. Teoría lineal del sistema de aislamiento

La teoría lineal del aislamiento sísmico ha sido descrita a detalle en Kelly (1993), en esta sección se presenta esta teoría de manera resumida. Para empezar, a entender el comportamiento del sistema con aislamiento sísmico de base, podemos idealizar una estructura de dos grados de libertad como se muestra en la Figura 2.4.

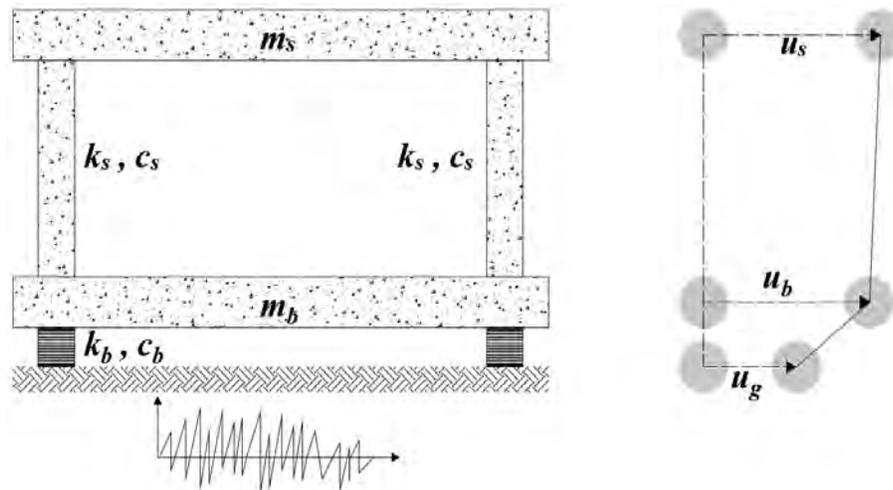


Figura 2.4 Modelo de dos grados de libertad.

(Fuente: Kelly, J. M., (1993), "Earthquake Resistant Design with Rubber" pág. 24.)

Dónde:

- C_s amortiguamiento de la estructura.
- C_b amortiguamiento del aislador.
- m_s masa de la estructura.
- m_b masa del piso sobre el aislamiento sísmico.
- k_s rigidez de la estructura.
- k_b rigidez del sistema de aislación.
- u_g desplazamiento del terreno.
- u_b desplazamiento absoluto de masa sobre el aislamiento sísmico.
- u_s desplazamiento absoluto de la masa de la estructura.

Ecuaciones de movimiento del sistema de dos grados de libertad.

1. Ecuación de movimiento para el último nivel.

$$m_s \ddot{u}_s + c_s(\dot{u}_s - \dot{u}_b) + k_s(u_s - u_b) = 0 \quad (2-1)$$

2. Ecuación de movimiento para el sistema de aislamiento.

$$m_b \ddot{u}_b + c_b(\dot{u}_b - \dot{u}_g) + k_b(u_b - u_g) = 0 \quad (2-2)$$

Por conveniencia los desplazamientos absolutos u_b y u_s se expresarán como desplazamientos relativos como se muestran a continuación:

1. El desplazamiento relativo de la estructura con respecto al sistema de aislamiento.

$$v_s = u_s - u_b \quad (2-3)$$

2. El desplazamiento relativo del sistema de aislamiento con respecto al terreno.

$$v_b = u_b - u_g \quad (2-4)$$

3. Entonces despejando los desplazamientos absolutos u_s y u_b de la ecuación 2-3 y 2-4 respectivamente, podemos expresar al desplazamiento absoluto de la masa de la estructura y el desplazamiento absoluto de la masa sobre aislador de la siguiente manera:

$$u_s = v_s + v_b + u_g \quad (2-5)$$

$$u_b = v_b + u_g \quad (2-6)$$

Es posible describir las ecuaciones básicas del modelo de dos grados de libertad en función de los desplazamientos relativos.

1. Ecuación de movimiento para último nivel.

$$m_s(\ddot{v}_s + \ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + c_s\dot{v}_s + k_s v_s = 0 \quad (2-7)$$

$$m_s\ddot{v}_s + m_s\ddot{v}_b + c_s\dot{v}_s + k_s v_s = -m_s\ddot{u}_g \quad (2-8)$$

2. Ecuación de movimiento para el sistema de aislamiento.

$$m_s(\ddot{v}_s + \ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + m_b(\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = 0 \quad (2-9)$$

$$\dot{v}_b(m_b + m_s) + m_s\dot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -\ddot{u}_g(m_b + m_s) \quad (2-10)$$

3. Expresando de forma matricial, las ecuaciones (2-8) y (2-10).

$$M\ddot{v} + C\dot{v} + Kv = -Mr\ddot{u}_g \quad (2-11)$$

$$\begin{bmatrix} m_b + m_s & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v_b \\ v_s \end{pmatrix} = - \begin{bmatrix} m_b + m_s & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \ddot{u}_g$$

3.1.2. Requerimientos normativos para el diseño de estructuras con aisladores de base

En este apartado se presenta de manera breve algunas recomendaciones sugeridas por diferentes normas y autores de libros consultados.

Las estructuras con aislamiento sísmico se pueden analizar por los métodos estático y dinámico, aunque siempre es recomendable realizar primero un análisis estático para poder compararlo con el análisis dinámico. El análisis estático es conveniente realizarlo ya que podemos obtener un diseño preliminar del sistema de aislación y la estructura. El análisis estático contempla muchas restricciones para su aplicación

en cambio, el análisis dinámico puede ser utilizado para un mayor rango de estructuras.

Los procedimientos y limitaciones para el diseño de estructuras con aislación sísmica se deben determinar considerando las características del lugar, destino, configuración, sistema estructural y altura.

Independientemente del análisis a utilizar es necesario conocer los siguientes parámetros:

1. Periodo efectivo de diseño de la estructura aislada que se puede calcular con la siguiente expresión:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g * K_{HT}}} \quad (2-12)$$

2. Se debe calcular el desplazamiento de diseño, una manera aproximada de calcular este parámetro es la siguiente:

$$D_D = \left(\frac{T_D}{2\pi^2}\right)^2 \frac{S_a}{B} \quad (2-13)$$

Dónde: S_a es la ordenada de aceleración obtenido de un espectro elástico, B coeficiente de amortiguamiento.

2.1.2.1. Método de análisis estático.

Las restricciones que se deben verificar para poder realizar un análisis estático son los siguientes:

- La estructura se encuentra a más de 10 km de alguna falla activa.
- La estructura se encuentra en un suelo firme
- La estructura no debe de contar con más de cinco niveles o debe de tener una altura menor a los 20m.
- El periodo efectivo de la estructura aislada, T_D debe ser menor a 3s.
- La estructura debe de tener una configuración regular en planta y elevación.

Si la estructura cumple con los requisitos necesarios se procede a utilizar este análisis para el diseño de la estructura.

A continuación, se presenta de manera muy simplificada el procedimiento que consta de los siguientes pasos:

1. El desplazamiento total de diseño, D_{TD} , del sistema de aislamiento, incluye el desplazamiento adicional por efectos de torsión y accidental, que se debe calcular para el aislador con la posición más desfavorable, cuando se tiene una distribución uniforme de aisladores, dichos desplazamientos se pueden calcular de manera aproximada como:

$$D_{TD} = D_D \left(1 + x \frac{12e_x}{b^2 + d^2} \right) \geq 1.1D_D \quad (2-14)$$

Donde b y d son las dimensiones en planta menor y mayor respectivamente de la edificación, e la excentricidad real más el 5% de la excentricidad accidental, x la distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento

y el aislador más crítico, medido perpendicularmente a la dirección de análisis.

2. Para obtener la fuerza lateral de diseño que se le aplicara al sistema de aislación y a todos los elementos inferiores al dispositivo, se aplica la siguiente formula:

$$V_b = K_{HT} D_D \quad (2-15)$$

3. Los elementos estructurales que se encuentran por encima del sistema de aislación se deben diseñar para resistir una fuerza cortante de:

$$V_s = \frac{K_{HT} D_D}{R} \quad (2-16)$$

donde R toma un valor de 1 a 2, este es un factor de reducción de resistencia que toma en cuenta la sobrerresistencia de la estructura, en una estructura aislada solo se debe de tomar en cuenta la reducción por sobrerresistencia, para asegurar que la respuesta de la estructura sea elástica.

Es importante tomar en cuenta que en ningún caso el valor de V_s debe ser menor que:

- La fuerza lateral sísmica requerida para una estructura sobre base fija del mismo peso y un periodo igual al de la estructura aislada.
- El cortante basal correspondiente a la carga de viento.
- La fuerza lateral sísmica requerida para activar completamente el sistema de aislación multiplicada por 1.5

4. El cortante basal V_s se debe de distribuir en la altura del edificio de la siguiente manera:

$$F_i = V_s \frac{h_i w_i}{\sum h_i w_i} \quad (2-17)$$

donde F_i es la fuerza sísmica aplicada en el nivel i , w_i es el peso del nivel i de la estructura y h_i es la altura del nivel i .

5. Por último, la distorsión máxima de entrepiso de la estructura permitida es:

$$\gamma < \frac{0.010}{R} \quad (2-18)$$

2.1.2.2. Método de análisis dinámico.

Al no cumplir las especificaciones requeridas para un análisis estático se procede a utilizar el análisis dinámico.

Existen tres tipos de análisis sísmicos dinámicos que son:

- El análisis con espectro de diseño proporcionado por el reglamento
- El análisis paso a paso
- El análisis con espectro de respuesta de sitio.

Dentro de los puntos más importantes de diseño están:

1. El desplazamiento total del sistema de aislación ya sea que se use el análisis dinámico espectral o el análisis dinámico paso a paso, no se debe considerar

menor que el 90% del desplazamiento total calculado para el análisis estático.

$$D_{TD} \geq 0.9D_D \left(1 + x \frac{12e_x}{b^2 + d^2} \right) \quad (2-19)$$

2. La fuerza cortante de diseño para el sistema de aislación y los elementos estructurales que se encuentran por debajo no debe ser menor al 90% del cortante calculado para el análisis estático, ya sea que se use el análisis dinámico espectral o el análisis dinámico paso a paso.

$$V_b \geq 0.9K_{HT}D_D \quad (2-20)$$

3. Cuando la estructura es regular en planta y elevación, además de utilizar el método modal espectral, la fuerza cortante de diseño para los elementos estructurales no debe de ser menor al 80% del cortante calculado para el análisis estático.

$$V_s \geq 0.8 \frac{K_{HT}D_D}{R} \quad (2-21)$$

4. Cuando la estructura es irregular en planta y elevación, además de utilizar el método modal espectral, la fuerza cortante de diseño para los elementos estructurales no debe de ser menor al 100% del cortante calculado para el análisis estático.

$$V_s \geq \frac{K_{HT}D_D}{R} \quad (2-22)$$

5. Cuando la estructura es regular en planta y elevación, además de utilizar el método paso a paso, la fuerza cortante de diseño para los elementos

estructurales no debe de ser menor al 60% del cortante calculado para el análisis estático.

$$V_s \geq 0.6 \frac{K_{HT} D_D}{R} \quad (2-23)$$

6. Cuando la estructura es irregular en planta y elevación además de utilizar el método paso a paso, la fuerza cortante de diseño para los elementos estructurales no debe de ser menor al 80% del cortante calculado para el análisis estático.

$$V_s \geq 0.8 \frac{K_{HT} D_D}{R} \quad (2-24)$$

Por último.

7. La distorsión máxima de entrepiso de la estructura permitida para el análisis modal espectral es:

$$\gamma < \frac{0.015}{R} \quad (2-25)$$

8. La distorsión máxima de entrepiso de la estructura permitida para el análisis paso a paso es:

$$\gamma < \frac{0.020}{R} \quad (2-26)$$

2.1.3. Tipos de aisladores sísmicos

Este trabajo se enfocó principalmente en los sistemas de aislamiento más utilizados, como son los sistemas elastoméricos y el péndulo de fricción, enlistando otros sistemas que también han tenido éxito.

Se dividen en las siguientes categorías:

Aisladores elastoméricos:

- De caucho natural.
- De caucho con núcleo de plomo.
- De caucho de alto amortiguamiento.

Aisladores deslizantes.

- Péndulo de fricción.
- Péndulo de fricción de doble curvatura
- Sistema de fricción resiliente (R-FBI)
- Eléctrica de Francia.
- Sistema combinado EERC
- Sistema TASS

Sistema de Aisladores a base de resortes.

Sistema GT-BIS.

2.1.3.1. Aisladores de péndulo de fricción

El aislador de péndulo de fricción se compone principalmente de tres partes: dos placas de acero con superficies curvas y un elemento de articulación deslizante ubicado entre ellas. Estos dispositivos se basan en las características del péndulo simple y es combinada con la fricción que se genera por el desplazamiento en la

superficie cóncava. Las ventajas de este dispositivo es que el periodo es independiente de la masa de la estructura, para variar el periodo solo es necesario cambiar el radio de la superficie cóncava, eliminan la torsión accidental, es resistente al fuego, de menor costo que los aisladores elastoméricos, tienen una altura pequeña y su fabricación es rápida (ver figura 2.5).



Figura 2.5 Aislador de péndulo de fricción.

(fuente: <http://www.hospitalaria.cl/portada/productos/566-p%C3%A9ndulo-friccional,-producto-de-s%C3%ADsmica.html>)

2.1.3.2. Aisladores de caucho natural

Los aisladores de caucho natural o de bajo amortiguamiento, fueron de los primeros aisladores dentro de los elastoméricos en usarse, estos aisladores se deformaban mucho verticalmente debido al peso propio de la estructura, al observar este mal comportamiento, posteriormente le incorporaron láminas de acero para lograr una resistencia vertical mayor. Este dispositivo es el más simple dentro de los aisladores elastoméricos, las ventajas que podemos encontrar en este dispositivo es que es de fácil manufacturación, es muy simple de modelar y prácticamente no necesita mantenimiento, una de sus desventajas es que por lo regular es necesario emplearse con otro tipo de dispositivos. El porcentaje de amortiguamiento crítico se encuentra entre 2% al 3%, el módulo de corte del hule se encuentra entre 3.0 kg/cm² a 10 kg/cm². Ver figura 2.6.



Figura 2.6 Aislador de caucho natural.

(fuente: <http://cauchosvikingo.com/aisladores-sismicos/>)

2.1.3.3. Aisladores de caucho natural con núcleo de plomo

Estos aisladores son prácticamente similares al aislador de caucho natural, sólo con la diferencia de que se le coloca un núcleo de plomo al centro para dar una capacidad adicional de disipar energía. Las principales ventajas que podemos encontrar en este dispositivo es que tiene la posibilidad de modificar el grado de amortiguación solo variando el diámetro del núcleo de plomo, lo que proporciona una mayor rigidez inicial y hace que los desplazamientos sean menores, ante sismos de intensidad pequeña. Las desventajas es que son algo caros y exhibe un comportamiento no lineal, por lo que en su gran mayoría es necesario hacer un análisis paso a paso. Ver figura 2.7.



Figura 2.7 Aislador de caucho natural con núcleo de plomo.

(Fuente: <http://cauchosvikingo.com/aisladores-sismicos/>)

2.1.3.4. Aisladores de alto amortiguamiento

Los aisladores de alto amortiguamiento están compuestos por capas de caucho intercaladas con placas de acero como se muestra en la figura 2.8. El caucho que se usa en estos dispositivos tiene una composición química especial para lograr proporcionar un amortiguamiento suficiente y así poder eliminar el uso de un núcleo de plomo. Este amortiguamiento se logra con la adición de carbono extra fino, aceite o resina. Estos dispositivos presentan un amortiguamiento del 10% al 20%, El módulo de corte de este tipo de dispositivos se encuentra entre 2kg/cm^2 a 15kg/cm^2 . El espesor de las capas de caucho varía, normalmente, entre los 8 y 20 mm, y el espesor de la capa de acero oscila entre los 2 y los 4 mm. Y las ventajas del uso de estos dispositivos es que son fáciles de fabricar.



Figura 2.8 Aislador de caucho de alto amortiguamiento.

(Fuente: <http://cauchosvikingo.com/aisladores-sismicos/>)

2.1.3.4.1. Características mecánicas del aislador de alto amortiguamiento.

Los aisladores han sido estudiados por diversos investigadores de distintos países de manera analítica y experimental, esto con el fin de poder dar algunas especificaciones de diseño, como por ejemplo como calcular la rigidez vertical y horizontal.

En este apartado presentaremos algunas propiedades importantes sobre el aislador de alto amortiguamiento High Damping Rubber Bearings (HDRB), basándonos en

la teoría elástica que es relativamente simple y aparte razonable, ya que usar técnicas de análisis no lineal podría hacer más difícil el diseño.

Lo descrito aquí es un resumen de la compilación de normas y de las diferentes bibliografías consultadas sobre el diseño de este sistema de aislación.

Rigidez horizontal

Se puede calcular dependiendo de los datos proporcionados, por ejemplo, si quisiéramos calcular de manera global la rigidez de todo el sistema es necesario conocer el peso sísmico de la estructura W , el periodo objetivo T_D y el valor de la aceleración de la gravedad g , con estos datos procedemos calcular la rigidez horizontal de la siguiente manera:

$$K_H = \left(\frac{2\pi}{T_D}\right)^2 \frac{W}{g} \quad (2-27)$$

En caso de solo querer conocer la rigidez horizontal de un solo aislador se sustituye la carga W por la carga sísmica máxima que se baja al aislador P_{\max} ó, dividiendo la rigidez total de todo el sistema entre el número de aisladores N .

La otra fórmula para calcular la rigidez horizontal del aislador es conociendo de módulo de corte G , El área de la sección transversal A y por último el espesor total de la goma H_r .

$$K_H = \frac{GA}{H_r} \quad (2-28)$$

Rigidez vertical

Otro aspecto importante que se debe de considerar es la rigidez vertical K_v del dispositivo, ya que se debe verificar que cumpla con una rigidez vertical mínima, esto para prevenir grandes deformaciones verticales y controlar la frecuencia vertical.

Para cumplir con la rigidez vertical mínima la frecuencia debe de ser superior a 10 Hz. La rigidez vertical se puede expresar como:

$$K_v = \frac{E_c A}{H_r} \quad (2-29)$$

donde E_c es el módulo de compresión para el conjunto acero-goma y que para este trabajo optaremos por la ecuación que encontramos en la norma Chilena NCh 2745 y en el libro de Kelly "*Earthquake-Resistant Design with Rubber*" ya que esta fórmula considera la compresibilidad de la goma, para una sección circular la expresión viene dado de la siguiente manera:

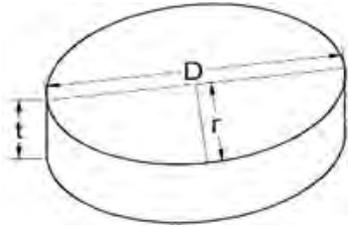
$$E_c = \left(\frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3K} \right)^{-1} \quad (2-30)$$

donde S es el factor de forma y K el módulo de compresibilidad de la goma.

Factor de forma

El factor de forma se define como la relación entre el área cargada y el área libre, para este caso se recomienda que tome un valor entre 10-20, esto para asegurarse de que la rigidez vertical sea adecuada.

Para una sección circular el factor de forma es la siguiente:



$$S = \frac{\text{área cargada}}{\text{área libre}} = \frac{\pi r^2}{2\pi r t} = \frac{r}{2t} = \frac{D}{4t} \quad (2-30)$$

El módulo de compresibilidad de la goma tiene un valor alrededor de $K=20000$ kg/cm^2 para elastómeros convencionales.

Las propiedades antes descritas (Rigidez horizontal y la Rigidez vertical) son importantes en el diseño del aislador, además de esto se debe verificar que el aislador no sufra pandeo por flexión, así como darle una revisión por rodamiento, ya que este tipo de dispositivos son muy vulnerables a sufrir el pandeo por flexión.

Carga crítica de pandeo

La expresión para calcular la carga crítica de pandeo no considera rotación en los extremos ni fuerza horizontal, la expresión es la siguiente:

$$P_{crit} = \sqrt{P_S P_E} \quad (2-32)$$

donde P_E es la carga de pandeo y P_S rigidez de corte efectiva.

$$P_E = \frac{\pi^2}{h^2} \frac{1}{3} E_C I \frac{h}{H_r} \quad (2-33)$$

$$P_S = GA \frac{h}{H_r} \quad (2-34)$$

donde I es la inercia de la sección transversal, h la altura del aislador que contempla las capas de goma y acero.

$$I = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{2} \right)^4 \quad (2-35)$$

Luego se verifica que el factor de seguridad sea adecuado, este factor debe de estar por lo general del orden de 2.

$$FS = \frac{P_{crit}}{P_{max}} \quad (2-36)$$

Revisión por rodamiento

Revisión por rodamiento, este fenómeno se produce por los grandes desplazamientos que el sismo provoca a los aisladores, y se calcula con la siguiente expresión:

$$D_{max} = \frac{PD}{P + K_H h} \quad (2-37)$$

Luego se verifica que el factor de seguridad sea mayor a 2.

3. EDIFICIO: CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se presenta las características del proyecto elegido para el desarrollo de la investigación, para este trabajo se decidió por un edificio de oficinas de cuatro niveles, muy regular en planta y altura, dicha estructura es primero analizada y diseñada de manera convencional, posteriormente analizada y diseñada colocándole un sistema de aislación sísmica en la base, la estructura se supone ubicada en la Ciudad de México en un suelo firme cuyo periodo dominante del suelo es de 0.51 segundos.

3.1. Edificio de oficinas de cuatro niveles

3.1.1. Descripción de la estructura

Se seleccionó un edificio destinado a oficinas, regular en planta y elevación, de cuatro niveles, con alturas de entrepiso de 4m lo que da una altura total de 16m, la configuración geométrica del proyecto tiene una forma rectangular, en dirección X consta de 4 crujías de 9m lo que da una longitud de 36m y en dirección Y de 5 crujías de 6m lo que nos da una longitud de 30m.

El sistema estructural es a base de marcos de concreto reforzado en las dos direcciones principales X y Y, donde las columnas son de sección transversal cuadrada y las trabes de sección transversal rectangular. El sistema de piso seleccionado es de losa maciza y se considera que proporciona bastante rigidez horizontal y es capaz de transmitir las fuerzas horizontales a los elementos verticales, debido a los claros relativamente grandes en los tableros que forman el sistema de piso, se colocaron trabes secundarias en dirección X, con el fin de disminuir el peralte de la losa.

A continuación, se presentan en las figuras 3.1 y 3.2 la vista en planta y elevación respectivamente, en donde se puede apreciar la geometría del edificio.

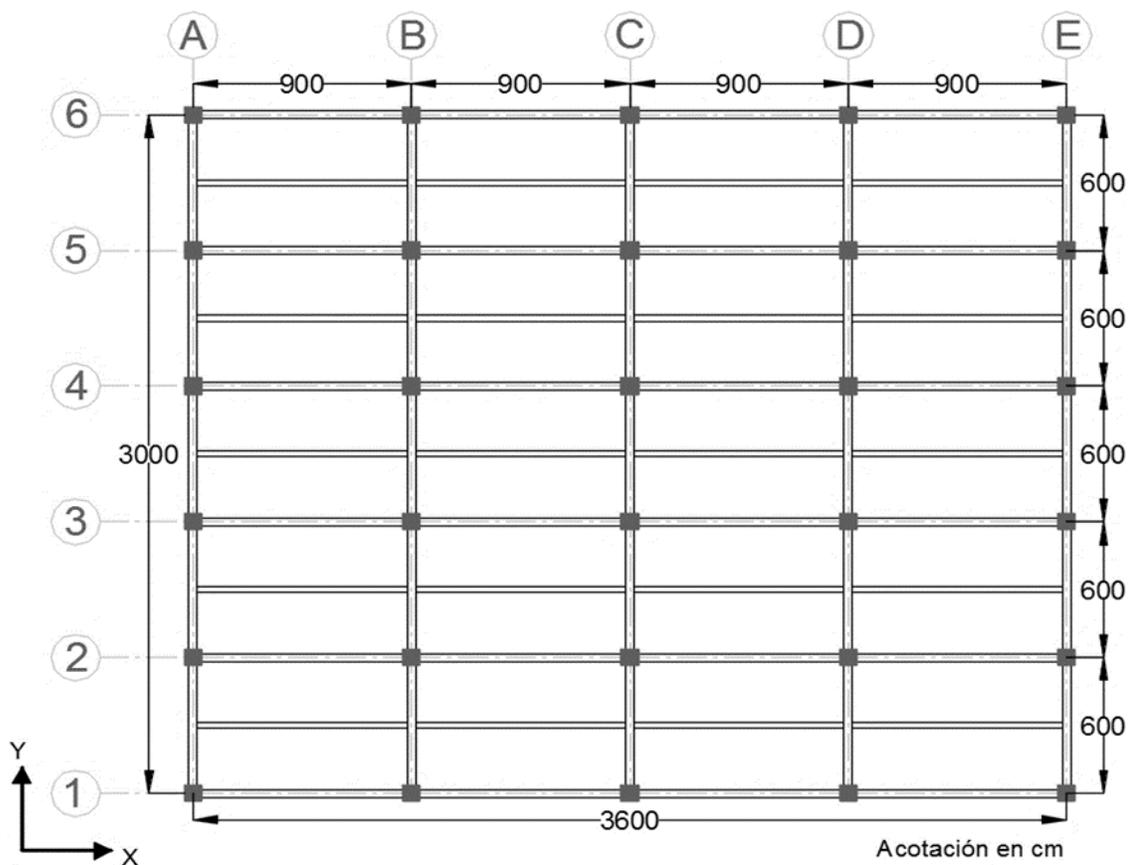


Figura 3.1 Vista en planta del edificio de oficinas.

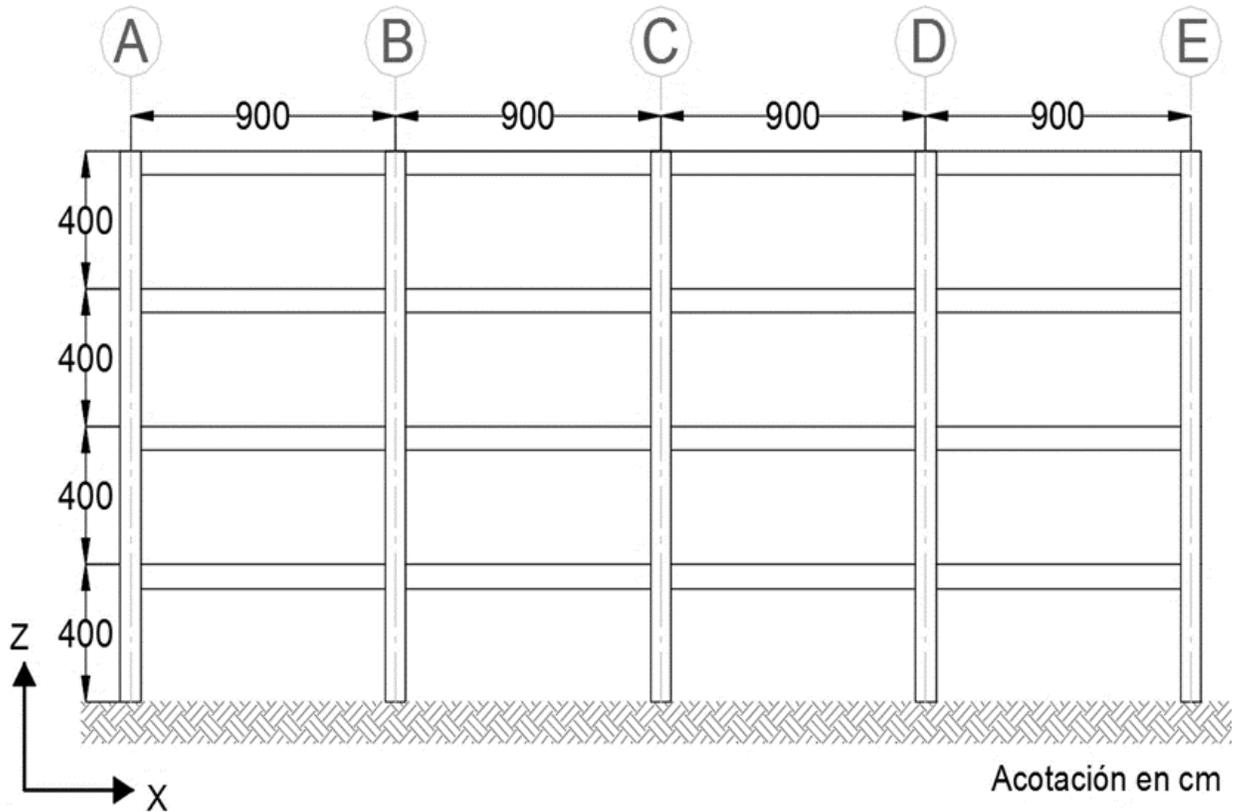


Figura 3.2 Vista en elevación del edificio de oficinas.

3.1.2. Propiedades de los materiales.

Concreto:

Peso volumétrico

$$\gamma = 2,400.00 \frac{kg}{m^3}$$

Resistencia a la compresión

$$f'_c = 280.00 \frac{kg}{cm^2}$$

Módulo de elasticidad

$$E_c = 234,264.80 \frac{kg}{cm^2}$$

Acero de refuerzo:

Esfuerzo de fluencia

$$f_y = 4,200.00 \frac{kg}{cm^2}$$

Módulo de elasticidad

$$E = 2,000,000.00 \frac{kg}{cm^2}$$

3.1.3. Cargas consideradas.

En las siguientes tablas 3.1 a 3.4 se presentan las cargas vivas y muertas consideradas para cada nivel.

Cargas consideradas en los niveles 1 a 3.

Tabla 3.1 Cargas vivas niveles 1 a 3.

Cargas Vivas (kg/m²)			
	W	Ws	Wm
Oficinas	100	180	250

Tabla 3.2 Sobrecarga muerta niveles 1 a 3.

Sobre Carga Muerta		
Firme para piso	70	kg/m ²
Mosaico	50	kg/m ²
Instalaciones	50	kg/m ²
Acabados	40	kg/m ²
Muros divisorios	100	kg/m ²
Incremento por reglamento	40	kg/m ²
SCM=	350	kg/m²

Cargas consideradas en azotea.

Tabla 3.3 Cargas vivas en azotea.

Cargas Vivas (kg/m²)			
	W	Ws	Wm
Azoteas con pendiente no mayor de 5 %	15	70	100

Tabla 3.4 Sobrecarga muerta azotea.

Sobre carga muerta		
Impermeable	100	kg/m ²
Instalaciones	50	kg/m ²
Acabados	40	kg/m ²
Entortado y enladrillado	60	kg/m ²
Incremento por reglamento	40	kg/m ²
SCM=	290	kg/m ²

3.2. Análisis y diseño de la estructura empotrada en la base

3.2.1. Modelado y Análisis sísmico

Con ayuda del programa Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems (ETABS), se realizó un modelado tridimensional que considera las características geométricas antes descritas, el edificio se consideró con la base empotrada y se procedió a realizar un análisis elástico del edificio en estudio, cumpliendo con los requisitos establecidos en las Normas Técnicas Complementarias del 2004 (NTC-2004).

Para el análisis sísmico se decidió utilizar el método dinámico modal espectral por su mayor rango de aplicación y por ser más completo. Para poder realizar este tipo de análisis es necesario definir un espectro de respuesta, el cual lo obtuvimos de las Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo (NTCDS) del apéndice A.

Para poder graficar este espectro es necesario establecer algunos parámetros como el periodo fundamental del suelo que en este caso se supuso un periodo de $T_s=0.51s$, se ignoró la interacción suelo – estructura. Para realizar el análisis sísmico, las ordenadas espectrales de aceleración obtenidas se redujeron por la sobrerresistencia R y por el factor de comportamiento sísmico Q' . En la figura 3.3. se muestra el espectro elástico, así como el reducido por la sobrerresistencia y el factor de comportamiento sísmico, este espectro se utilizó para las dos direcciones principales de la estructura (X, Y).

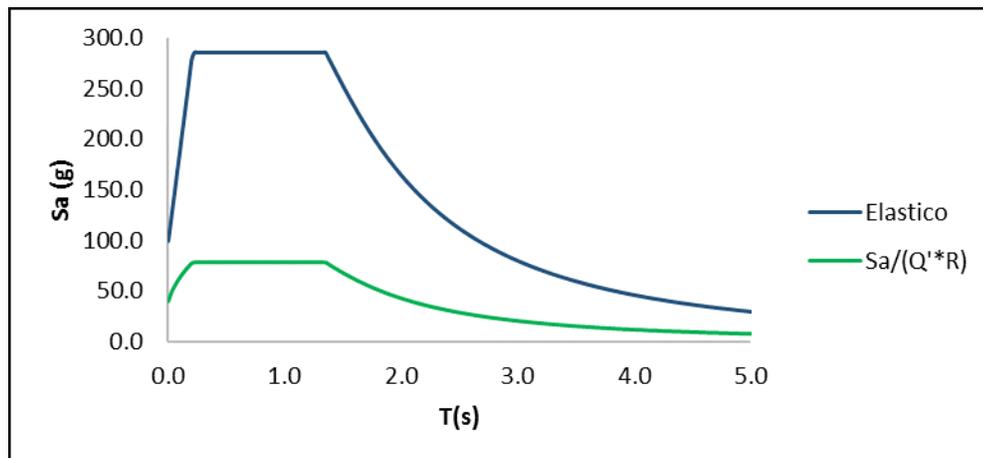


Figura 3.3 Espectro de diseño de la NTCDS apéndice A, para un $T_s=0.51s$

Las combinaciones de carga se tomaron según las Normas Técnicas Complementarias Sobre criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las edificaciones 2004 (NTCCA).

3.2.2. Diseño de los elementos estructurales

Una vez realizado el análisis, se procedió al diseño de las trabes y columnas cumpliendo con lo estipulado en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) y sus NTC-2004.

Para el diseño de los elementos, se revisó que el cortante basal cumpliera con el requisito en que el cortante basal no debe ser menor que $a_{min}W_o$

Las trabes se diseñaron por fuerza cortante y flexión, tomando los elementos mecánicos más desfavorables en cada nivel y dirección. Las trabes secundarias tienen un ancho de 25cm y un peralte de 55cm. Las trabes principales tienen un ancho de 35cm y un peralte de 70 cm. Estas secciones son las mismas en todos los niveles. En las figuras 3.4 y 3.5 se muestran los arreglos del acero de refuerzo y se indica el nivel en el que se ubican las trabes secundarias y las trabes principales respectivamente.

Las columnas se diseñaron por flexo-compresión y cortante, obteniendo dos tipos de columnas para el primer nivel, para los demás niveles solo se tiene un tipo de columna, todas las columnas tienen la misma sección solo varía el acero de refuerzo, las columnas tienen una sección de 70cm x 70cm, el arreglo de cada columna se puede ver en la figura 3.6.

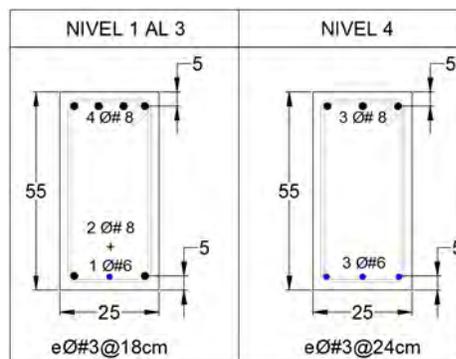


Figura 3.4 Trabes secundarias.

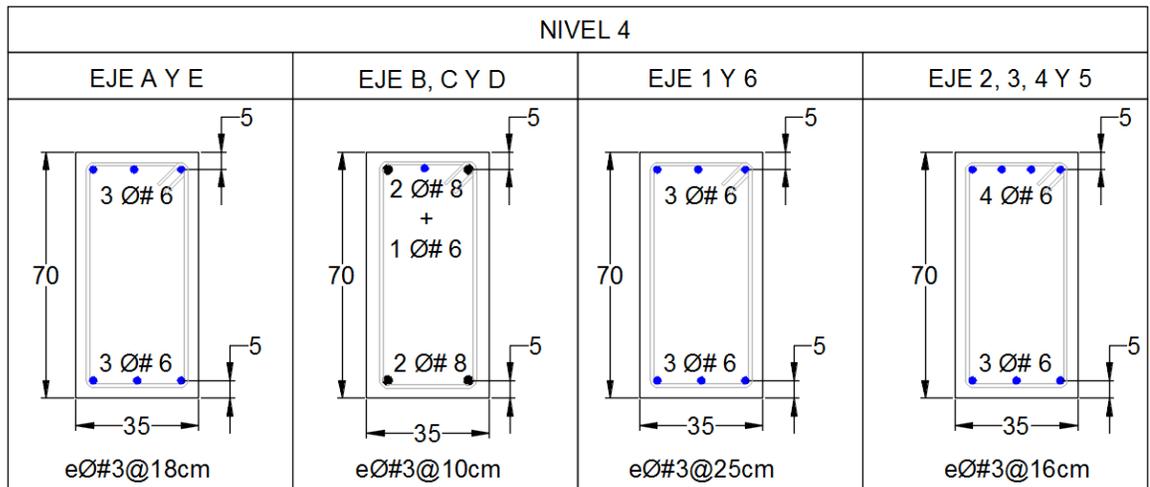
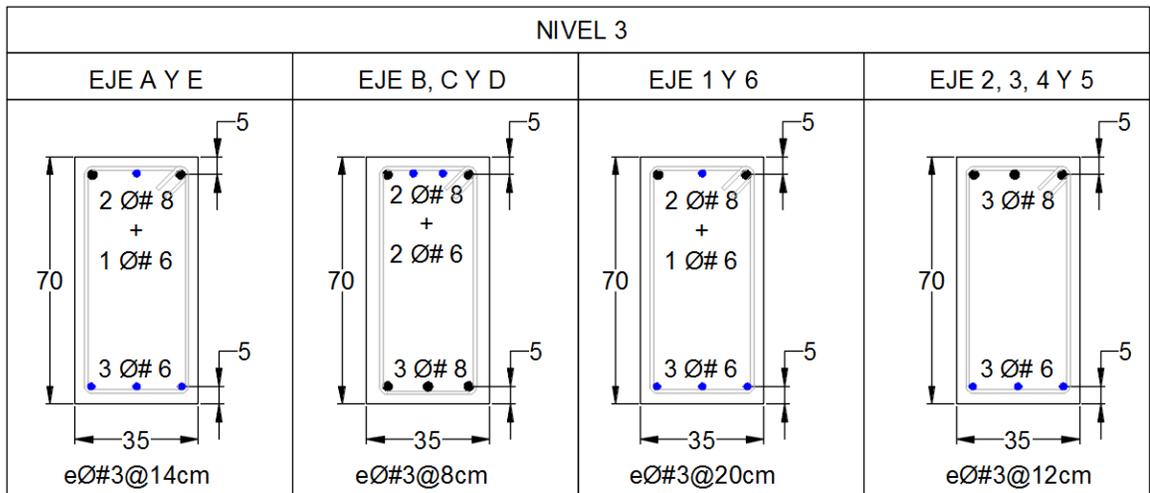
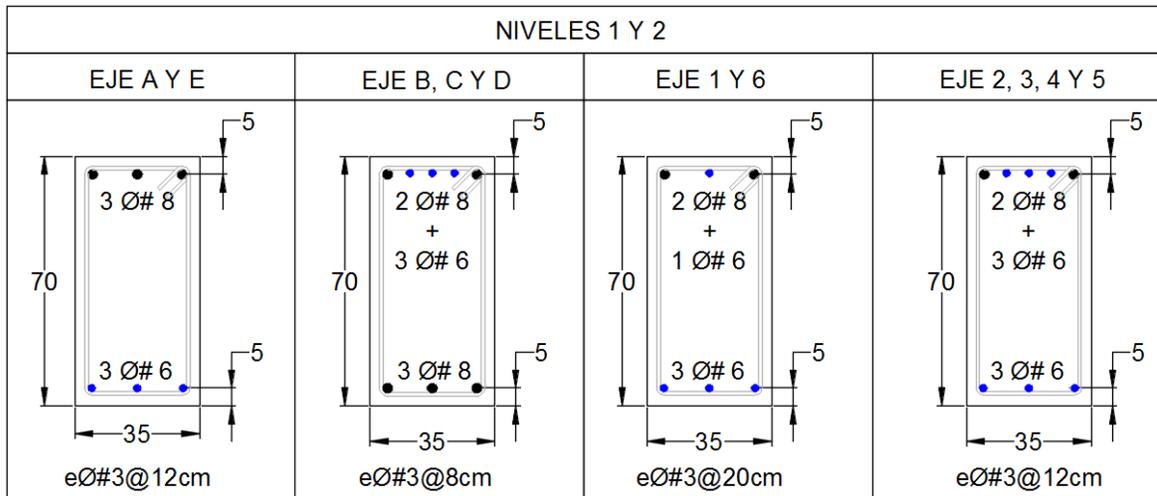


Figura 3.5 Trabes principales.

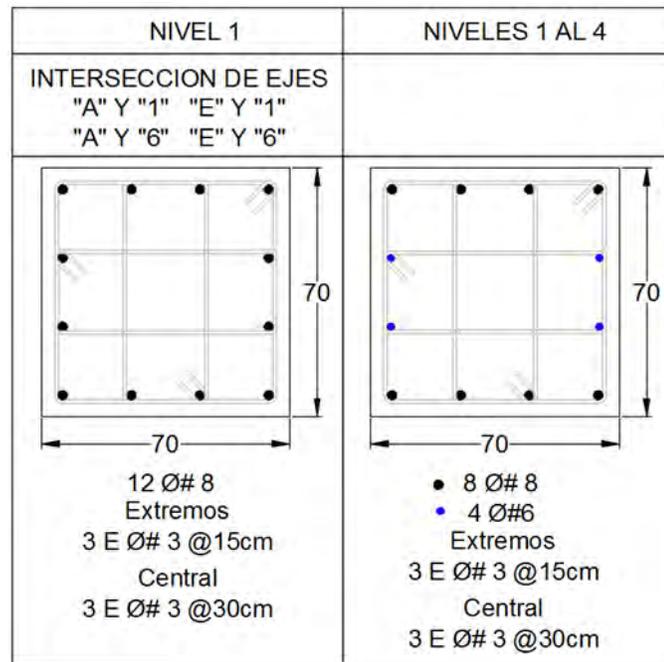


Figura 3.6 Columnas.

3.2.3. Resultados del análisis del edificio convencional

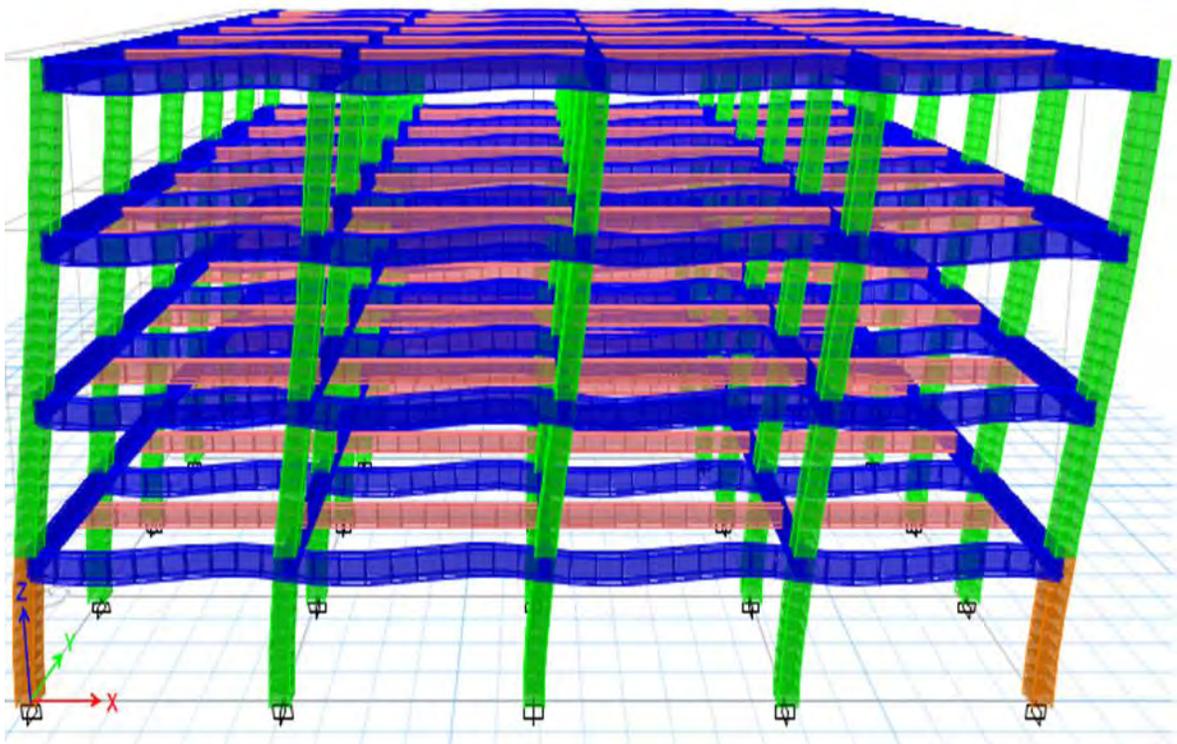
A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos del análisis estructural dinámico modal, obteniendo los modos de vibrar, el cortante en cada entrepiso y las distorsiones, estos resultados se muestran en las tablas 3.5 a 3.10.

En la tabla 3.5 se aprecia que el periodo fundamental de la estructura es de 0.974 segundos correspondiente a la traslación en la dirección X.

En las figuras 3.7, 3.8 y 3.9 se muestran el primer, segundo y tercer modo de vibrar respectivamente.

Tabla 3.5 Periodos

Modo	Periodo (s)	Dirección			
		X	Y	Z	Torsión
1	0.974	x	-	-	-
2	0.827	-	x	-	-
3	0.764	-	-	-	x
4	0.270	x	-	-	-
5	0.240	-	x	-	-
6	0.220	-	-	-	x
7	0.125	x	-	-	-
8	0.119	-	x	-	-
9	0.111	-	-	x	-

Figura 3.7 Primera forma modal $T=0.974s$. Traslación en X.

(Fuente: ETABS)

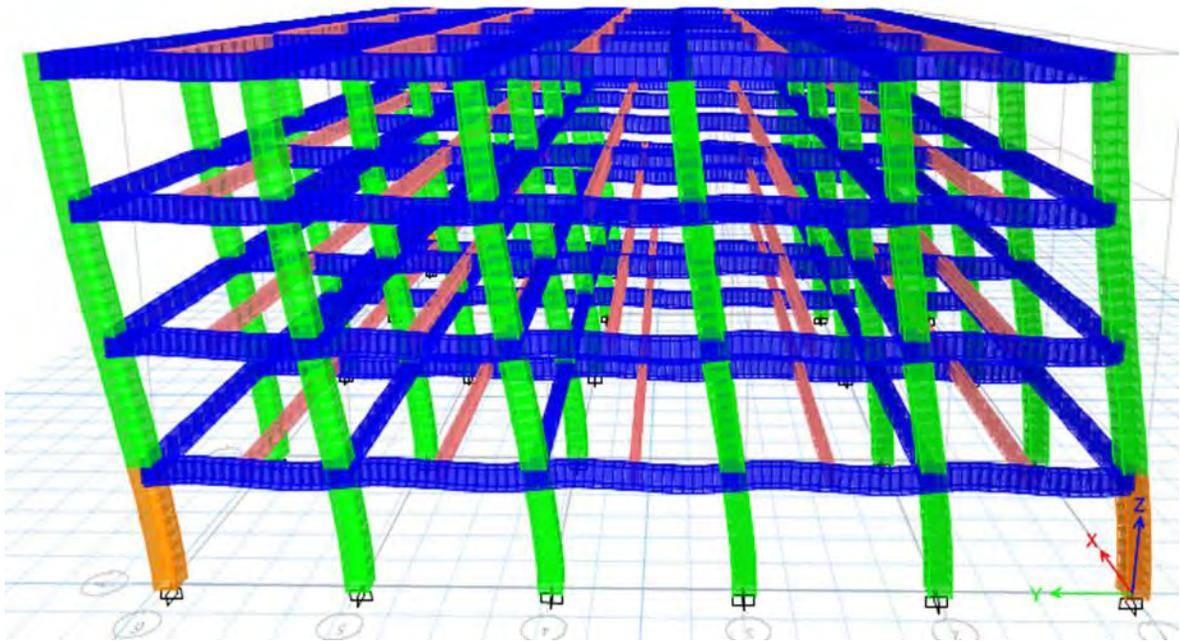


Figura 3.8 Segunda forma modal $T=0.827s$. Traslación en Y.
(Fuente: ETABS)

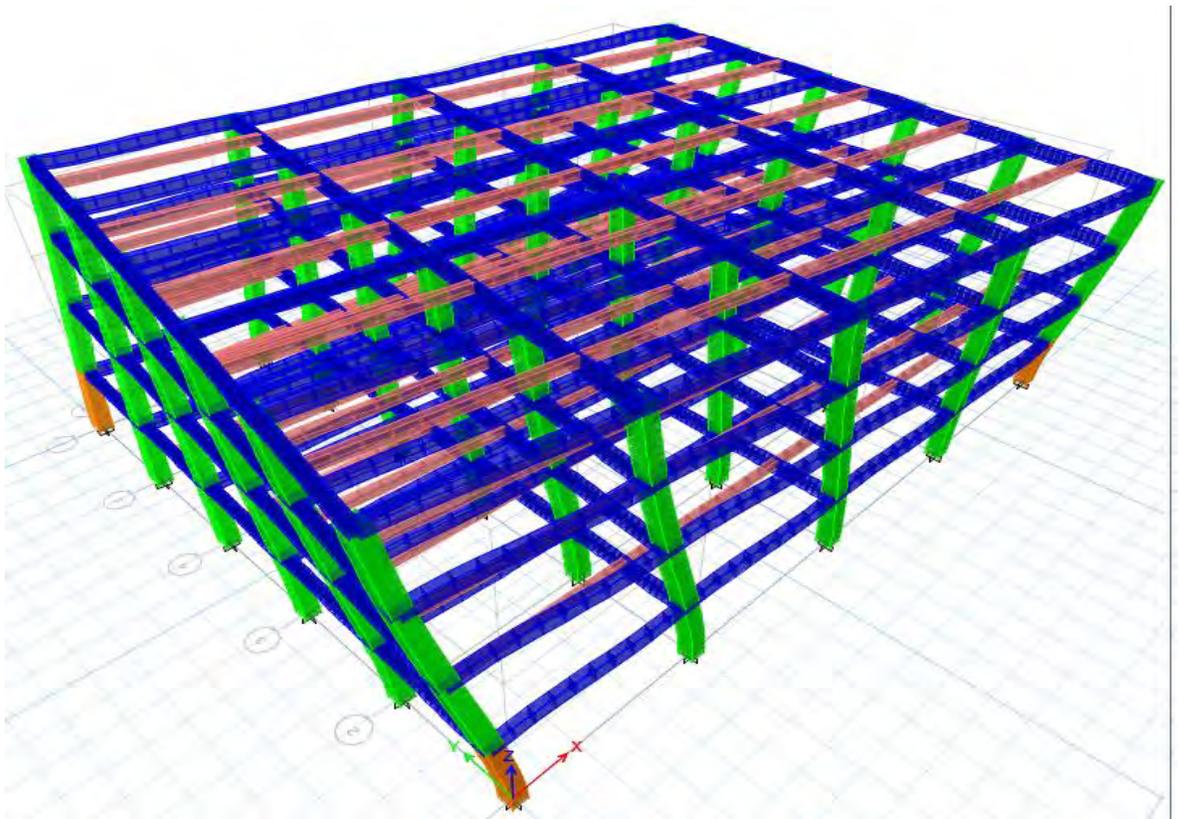


Figura 3.9 Tercera forma modal $T=0.764s$. Torsión en Z.
(Fuente: ETABS)

El cortante basal y su distribución en altura se presenta en la tabla 3.6. En ella se puede apreciar que el valor del cortante en la dirección X es el mayor, tanto para la dirección X y Y, el cortante basal cumple con el valor mínimo especificado en la NTCDS Apéndice A, donde indica que el cortante V_o no será menor a $a_{min}W_o$ para nuestro caso:

$$a_{min} = 0.03$$

$$W_o = 4,942,512.00 \text{ kg}$$

$$V_o = 0.03 * 4,942,512 = 148,275.36 \text{ kg (3-1)}$$

Tabla 3.6 Cortante en cada entrepiso.

Nivel	Dirección X (kg)	Dirección Y (kg)
4	116,866.04	115,054.27
3	218,555.47	219,359.29
2	284,834.97	288,801.46
1	313,183.41	319,097.14

En las figuras 3.10 y 3.11 se graficaron los cortantes de cada entrepiso en dirección X y Y respectivamente.

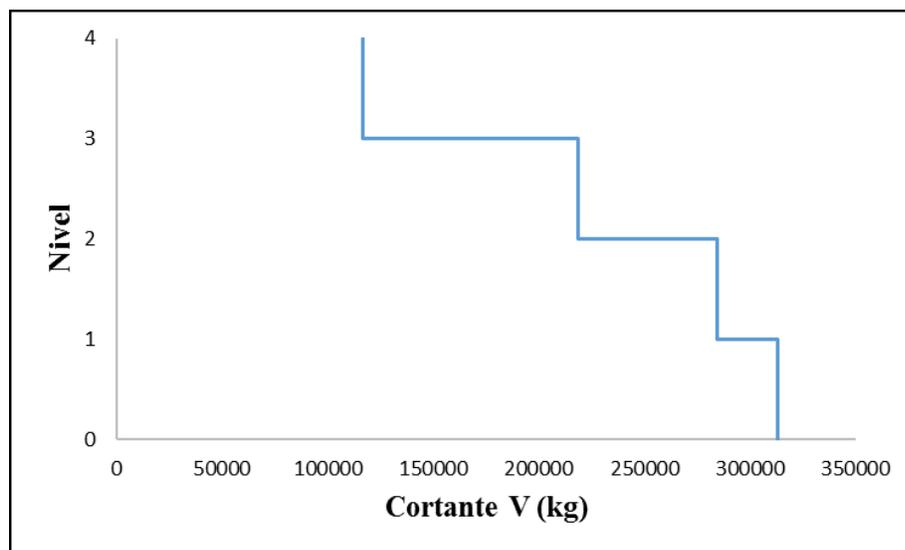


Figura 3.10 Diagrama de cortante en dirección X

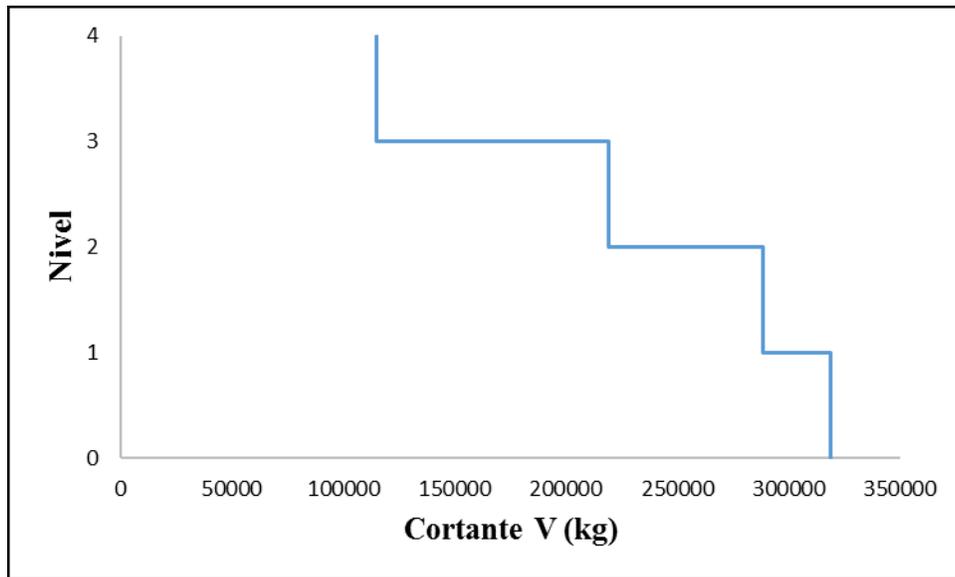


Figura 3.11 Diagrama de cortante en dirección Y.

Para la revisión de los desplazamientos laterales se consideró que los elementos no estructurales están desligados a la estructura, por lo que no sufrirán daños, por esta razón se tomó la distorsión de entrepiso asociadas a estado límite de servicio como 0.004, al tratarse de una estructura de ductilidad reducida las distorsiones de entrepiso asociadas a estado límite de colapso se limitaron a 0.015 conforme a las NTCDS-2004.

Las distorsiones obtenidas en los entrepisos se multiplicaron por $Q'R/7$ para el estado límite de servicio y por QR para el estado límite de colapso, esto se puede ver en las tablas 3.7 a 3.10.

$$Q' = 1.82$$

$$R = 2.00$$

$$\frac{Q'R}{7} = \frac{1.82(2.00)}{7} = 0.52$$

$$Q = 2$$

$$QR = 4$$

Tabla 3.7 Distorsión en dirección X estado límite de servicio.

Nivel	Distorsión X	$\gamma(Q'R/7)$	Distorsión limite	
4	0.001734	0.000902	0.004	Cumple
3	0.002392	0.001244	0.004	Cumple
2	0.002575	0.001339	0.004	Cumple
1	0.001479	0.000769	0.004	Cumple

Tabla 3.8 Distorsión en dirección Y estado límite de servicio.

Nivel	Distorsión Y	$\gamma(Q'R/7)$	Distorsión limite	
4	0.001261	0.000656	0.004	Cumple
3	0.001883	0.000979	0.004	Cumple
2	0.002139	0.001112	0.004	Cumple
1	0.001304	0.000678	0.004	Cumple

Tabla 3.9 Distorsión en dirección X estado límite de colapso.

Nivel	Distorsión X	$\gamma(QR)$	Distorsión limite	
4	0.001734	0.006936	0.015	Cumple
3	0.002392	0.009568	0.015	Cumple
2	0.002575	0.010300	0.015	Cumple
1	0.001479	0.005916	0.015	Cumple

Tabla 3.10 Distorsión en dirección Y estado límite de colapso.

Nivel	Distorsión Y	$\gamma(QR)$	Distorsión limite	
4	0.001261	0.005044	0.015	Cumple
3	0.001883	0.007532	0.015	Cumple
2	0.002139	0.008556	0.015	Cumple
1	0.001304	0.005216	0.015	Cumple

CAPÍTULO 3

Las distorsiones que se presentan en los entrepisos de la estructura son comparadas con la distorsión máxima permitida para el estado límite de servicio y de colapso, esto se muestran en las figuras 3.12 y 3.13.

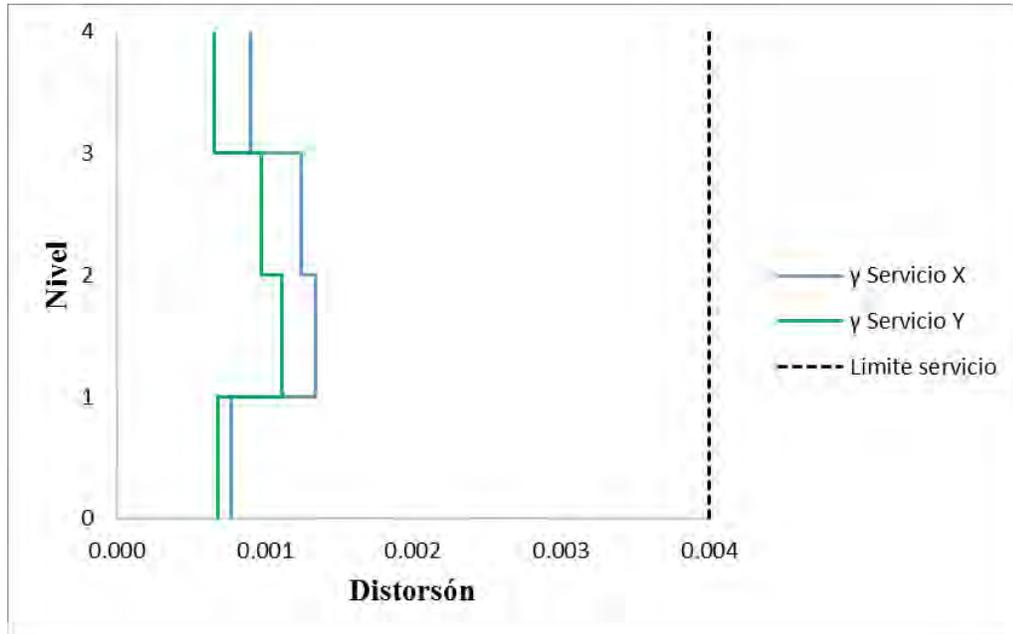


Figura 3.12 Comparación de la distorsión de servicio con la distorsión permitida.

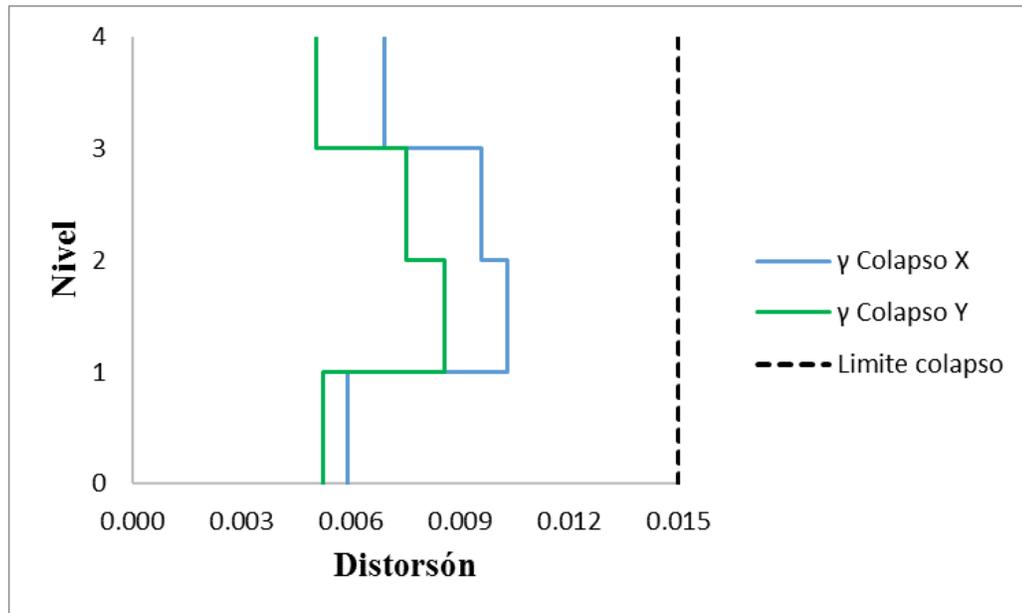


Figura 3.13 Comparación de la distorsión de colapso con la distorsión permitida.

En la comparación podemos observar que las distorsiones no rebasan la distorsión límite de servicio, ni de colapso. También se puede observar que la distorsión máxima se presenta en la dirección X, ya que es la dirección con menor rigidez lateral.

3.3. Análisis y diseño de la estructura con aislamiento sísmico

3.3.1. Diseño del aislador de alto amortiguamiento (HDRB).

Para el diseño del aislador es necesario determinar algunos datos importantes de la estructura, que se pueden obtener fácilmente de la geometría y del análisis estructural del edificio con base fija, como se muestra a continuación:

Un dato muy importante es determinar el número de aisladores a utilizar, en nuestro caso se colocará un aislador debajo de cada columna.

1. Número de aisladores

$$N = 30$$

2. Peso total de la superestructura

$$W = 6,462,720.00 \text{ kg}$$

3. Periodo objetivo

$$T_D = 3T$$

$$T_D = 3(0.974)$$

$$T_D = 2.92s \approx 2.90 \text{ s}$$

4. Carga axial máxima.

$$P_{max} = 424,110.74 \text{ kg}$$

Teniendo establecido los números de aisladores a utilizar, el peso sísmico de la estructura sobre el sistema de aislación, el periodo objetivo y la carga axial máxima

CAPÍTULO 3

en los aisladores, se deben establecer algunos datos adicionales necesarios para el diseño del sistema de aislación sísmica que son los siguientes:

- Deformación de corte directa máxima

$$\gamma_s = 150 \%$$

- Deformación de cortante máxima admisible.

$$\gamma_{max} = 250 \%$$

- Tensión admisible de compresión

$$\sigma_{AC} = 90 \frac{kg}{cm^2}$$

- Amortiguamiento efectivo

$$\beta = 10 \%$$

- Módulo de rigidez a cortante

$$G = 6.00 \frac{kg}{cm^2}$$

- Cálculo del desplazamiento de diseño

De un espectro elástico de aceleraciones definido para la estructura con base fija se puede obtener el espectro de desplazamiento y reducirlo por el amortiguamiento efectivo, dicho espectro fue graficado y se muestra en la figura 3.14, en este espectro nos ubicamos en el periodo objetivo y obtenemos el desplazamiento de diseño.

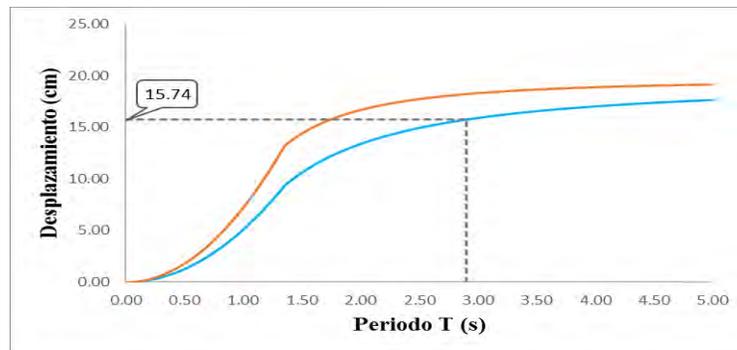


Figura 3.14 Espectro de desplazamiento.

$$D_D = 15.74 \text{ cm}$$

Teniendo todos estos datos, ahora procedemos a realizar el diseño del aislador.

1. Rigidez horizontal total:

$$K_{HT} = \left(\frac{2\pi}{T_D}\right)^2 \frac{W}{g}$$

$$K_{HT} = \left(\frac{2\pi}{2.90s}\right)^2 \frac{6,462,720.00 \text{ kg}}{981.00 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}}$$

$$K_{HT} = 30,925.03 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}$$

2. Rigidez horizontal de cada aislador:

$$K_H = \frac{K_{HT}}{N}$$

$$K_H = \frac{30,925.03 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}}{30}$$

$$K_H = 1,030.83 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}$$

3. Se establece el área del aislador:

$$A = \frac{P_{max}}{\sigma_{AC}}$$

$$A = \frac{424,110.74 \text{ kg}}{90 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}$$

$$A = 4,712.34 \text{ cm}^2$$

4. Con el área procedemos a calcular del diámetro del aislador.

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 4,712.34 \text{ cm}^2}{\pi}}$$

$$D = 77.46 \text{ cm} \approx 80 \text{ cm}$$

Se redondea a 80 cm

5. Por lo que el área queda en:

$$A = 5,026.55 \text{ cm}^2$$

6. Cálculo del valor del espesor total de la goma.

$$H_r = \frac{A * G}{K_H}$$

$$H_r = \frac{5,026.55 \text{ cm}^2 * 6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{1,030.83 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}}$$

$$H_r = 29.26 \text{ cm} \approx 29 \text{ cm}$$

7. Se propone un factor de forma

$$S = 16$$

8. A partir del factor de forma podemos calcular el espesor de capa de caucho.

$$t = \frac{D}{4S}$$

$$t = \frac{80}{4(16)}$$

$$t = 1.25 \text{ cm}$$

9. Se determina el número de capas de caucho

$$n = \frac{H_r}{t}$$

$$n = \frac{29}{1.25}$$

$$n = 23.20 \approx 24$$

10. Entonces se actualiza el espesor total de la goma.

$$H_r = n * t$$

$$H_r = 24 * 1.25$$

$$H_r = 30 \text{ cm}$$

11. Altura total del aislador

$$h = H_r + (n - 1)(t_s)$$

$$h = 30 + (24 - 1)(0.2)$$

$$h = 34.60 \text{ cm}$$

$$H = h + 2t_{ext}$$

$$H = 34.60 + 2(3.2)$$

$$H = 41.00 \text{ cm}$$

12. Precedemos a calcular el nuevo valor de la rigidez horizontal de cada aislador con el valor de Hr.

$$K_H = \frac{A * G}{H_r}$$

$$K_H = \frac{5,026.55 \text{ cm}^2 * 6.00 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{30.00 \text{ cm}}$$

$$K_H = 1,005.31 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

13. Entonces la rigidez horizontal total nos queda:

$$K_{HT} = N * K_H$$

$$K_{HT} = 30 * 1,005.31 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$K_{HT} = 30,159.29 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

14. Por lo que se puede apreciar la rigidez horizontal calculada es muy semejante a la rigidez necesaria $K_{HT}=30,925.03 \text{ kg/cm}$, para obtener un periodo de 2.90s.

$$K_{HT} = 30,159.29 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \approx K_{HT} = 30,925.03 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}$$

15. Se calcula nuevamente el periodo para corroborar que se aproxime al valor propuesto inicialmente.

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g * K_{HT}}}$$

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{6,462,720.00 \text{ kg}}{981 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} * 30,159.29 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}}$$

$$T_D = 2.94 \text{ s}$$

Rigidez y frecuencia vertical

1. Módulo de elasticidad volumétrico:

$$K = 20,000.00 \frac{kg}{cm^2}$$

2. Módulo de compresión:

$$E_c = \left(\frac{1}{6GS^2} + \frac{4}{3K} \right)^{-1}$$

$$E_c = \left(\frac{1}{6(6)(16^2)} + \frac{4}{3(20,000)} \right)^{-1}$$

$$E_c = 5,708.62 \frac{kg}{cm^2}$$

3. Rigidez vertical de cada aislador.

$$K_V = \frac{E_c A}{H_r}$$

$$K_V = \frac{5,708.62(5,026.55)}{30}$$

$$K_V = 956,488.86 \frac{kg}{cm}$$

4. Rigidez vertical total.

$$K_{VT} = \sum_{i=1}^N k_{Vi}$$

$$K_{VT} = 30(956,488.86)$$

$$K_{VT} = 28,694,665.90 \frac{kg}{cm}$$

5. Periodo vertical de la estructura.

$$T_V = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g * K_{VT}}}$$

$$T_V = 2\pi \sqrt{\frac{6,462,720.00 \text{ kg}}{981 * 28,694,665.90}}$$

$$T_V = 0.095 \text{ s}$$

6. Frecuencia vertical.

$$f_V = \frac{1}{T_V}$$

$$f_V = \frac{1}{0.095}$$

$$f_V = 10.50$$

Revisión por pandeo

1. Inercia de la sección transversal del aislador.

$$I = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{2} \right)^4$$

$$I = \frac{\pi}{4} \left(\frac{80}{2} \right)^4$$

$$I = 2,010,619.30 \text{ cm}^4$$

2. Rigidez de corte efectiva.

$$P_S = GA \frac{h}{H_r}$$

$$P_S = (6)(5,026.55) \frac{34.60}{30.00}$$

$$P_S = 34,783.71 \text{ kg}$$

3. Carga de pandeo.

$$P_E = \frac{\pi^2}{h^2} \frac{1}{3} E_C I \frac{h}{H_r}$$

$$P_E = \frac{\pi^2}{34.60^2} \frac{1}{3} (5,708.62)(201,619.30) \frac{34.60}{30.00}$$

$$P_E = 36,378,291.70 \text{ kg}$$

4. Carga critica.

$$P_{crit} = \sqrt{P_S P_E}$$

$$P_{crit} = \sqrt{(34,783.71)(36,378,291.70)}$$

$$P_{crit} = 1,124,887.59 \text{ kg}$$

5. Cálculo del factor de seguridad.

$$FS = \frac{P_{crit}}{P_{max}}$$

$$FS = \frac{1,124,887.59}{424,110.74}$$

$$FS = 2.65$$

Revisión por rodamiento.

Para evitar el despliegue del soporte, el desplazamiento del soporte bajo la carga sísmica deberá cumplir con la siguiente ecuación:

$$D_{max} = \frac{PD}{P + K_H h}$$

$$D_{max} = \frac{(424,110.74)(80)}{424,110.74 + (1,005.31)(34.60)}$$

$$D_{max} = 73.94cm$$

Desplazamiento total de diseño, el cual incluye la torsión

Para calcular el desplazamiento total se puede realizar de dos formas, la primera utilizando la fórmula del desplazamiento total de diseño, que nos da una estimación de manera simplificada y la otra de manera más exacta.

- **Desplazamiento total de diseño utilizando la formula simplificada.**

Datos necesarios para calcular el desplazamiento total de diseño, utilizando la fórmula que se mencionó en los requerimientos normativos de diseño de estructuras con aisladores de base:

Dimensión menor en planta

$$b = 3,000cm$$

Dimensión mayor en planta

$$d = 3,600\text{cm}$$

Distancia entre el centro de rigidez al aislador de esquina.

$$x = 1,800\text{cm}$$

$$y = 1,500\text{cm}$$

Excentricidad accidental en dirección Y

$$e_x = 0.05d$$

$$e_x = 0.05(3600)$$

$$e_x = 180\text{cm}$$

Desplazamiento total de diseño en dirección Y

$$D_{TD} = D_D \left(1 + x \frac{12e_x}{b^2 + d^2} \right) \geq 1.1D_D$$

$$D_{TD} = 15.74 \left(1 + 1,800 \frac{12(180)}{(3,600)^2 + (3,000)^2} \right) \geq 1.1(15.74)$$

$$D_{TD} = 18.53\text{cm} \geq 17.31\text{cm}$$

- **Desplazamiento total de diseño calculada de manera exacta.**

1. Rigidez torsional.

$$K_\theta = \sum_{i=1}^N K_H^i (x_i^2 + y_i^2)$$

$$K_\theta = 1,005.31 (12(1,800^2) + 10(1,500^2) + 22(900^2) + 10(300^2))$$

$$K_\theta = 80,525,302,897.00\text{ kg} - \text{cm}$$

2. Momento torsional en dirección Y

$$M_{Ty} = K_{HT} D_D e_x$$

$$M_{Ty} = 30,159.29(15.74)(180)$$

$$M_{Ty} = 85,447,298.94\text{ kg} - \text{cm}$$

3. Giro

$$\theta_y = \frac{M_T}{K_\theta}$$

$$\theta_y = \frac{85,447,298.94}{80,525,032,897}$$

$$\theta_y = 0.0010611$$

4. Por lo tanto, el desplazamiento total en dirección Y nos resulta:

$$D_{TDmax} = D_D + \theta y$$

$$D_{TDmax} = 15.74 + (0.0010611)(1800)$$

$$D_{TDmax} = 17.65 \text{ cm}$$

$$D_{TDmin} = D_D - \theta y$$

$$D_{TDmin} = 15.74 - (0.0010611)(1800)$$

$$D_{TDmin} = 13.83 \text{ cm}$$

Con esto se termina el diseño del aislador de alto amortiguamiento. En la figura 3.15 se muestran las dimensiones del aislador y en la figura 3.16 se muestra una vista en planta.

Cabe mencionar que un factor importante son las dimensiones del aislador, ya que se debe consultar con el fabricante, que las dimensiones sean comerciales o posibles de fabricar.

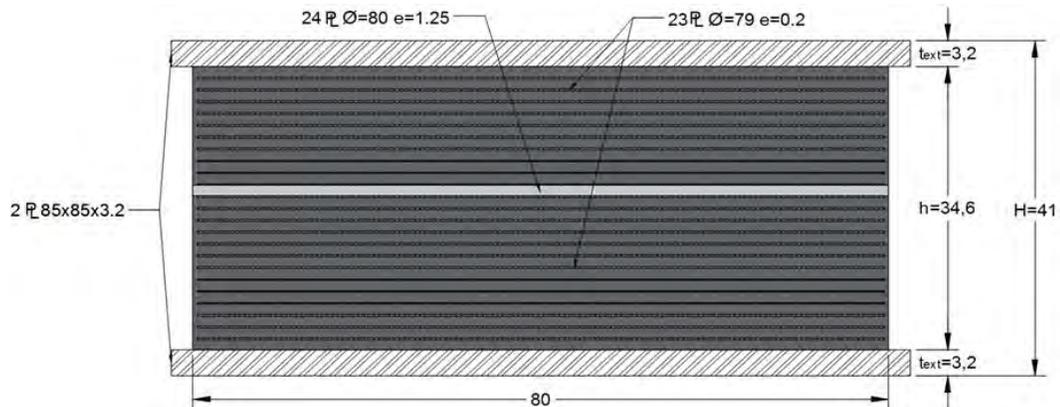


Figura 3.15 Dimensiones del aislador HDRB.

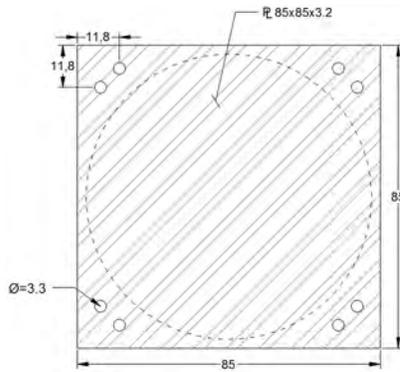


Figura 3.16 Vista en planta del aislador HDRB.

3.3.2. Modelado y Análisis sísmico de la estructura aislada.

Se realizó un modelo tridimensional de la estructura incorporándole un aislador debajo de cada columna.

El aislador fue modelado como Link/Support Properties, es una opción que nos proporciona el programa ETABS para modelar aisladores. Los aisladores en su base se modelaron como empotrados.

Para el análisis estructural y sísmico, se consideraron las mismas cargas verticales aplicadas a la estructura con base fija.

Análisis estático.

Para el análisis estático se obtuvo la fuerza cortante, que se aplicara a los aisladores y la fuerza cortante basal aplicado a la superestructura, así como su distribución en altura que se puede ver en la tabla 3.11.

- **Cortante basal estático en los aisladores.**

$$V_b = K_{HT} D_D$$

$$V_b = 30,159.29 (15.74)$$

$$V_b = 474,707.22 \text{ kg}$$

- **Cortante basal de diseño (superestructura)**

$$V_s = \frac{K_{HT} D_D}{R}$$

$$V_s = \frac{30,159.29 (15.74)}{2}$$

$$V_s = 237,353.61 \text{ kg}$$

- **Coeficiente sísmico.**

$$C_s = \frac{237,353.61}{6,462,720.00}$$

$$C_s = 0.0367 = 3.67 \%$$

- **Distribución de cortante**

$$F_i = V_s \frac{h_i w_i}{\sum h_i w_i}$$

Tabla 3.11 Cortante en cada entrespiso.

Nivel i	Wi (Kg)	hi (m)	Wi*hi (kg- m)	Fi (kg)	Vi (kg)
4	1,045,008.00	16	16,720,128	82,851.14	82,851.14
3	1,299,168.00	12	15,590,016	77,251.24	160,102.37
2	1,299,168.00	8	10,393,344	51,500.82	211,603.19
1	1,299,168.00	4	5,196,672	25,750.41	237,353.61
	4,942,512.00		47,900,160	237,353.61	

Análisis dinámico

Además, se realizó un análisis sísmico utilizando el método dinámico modal espectral, para esto se utilizó el espectro elástico considerado para el edificio con base fija. Este espectro se redujo por B que es el amortiguamiento proporcionado

por los aisladores sísmicos para la revisión de los aisladores y por R , el cual tomamos un valor de 2 para el diseño de la superestructura.

Para poder utilizar el método dinámico modal espectral, es necesario obtener las fuerzas que se le aplicaran a los aisladores y a la superestructura el cual se debe revisar que el cortante aplicado a los aisladores no sea menor al 90% del cortante estático y para la superestructura no sea menor que el 80% de cortante estático.

3.3.3. Diseño de elementos estructurales

Para el diseño de la superestructura es necesario obtener las fuerzas que se le aplicaran, dichas fuerzas pueden ser obtenidas del análisis estático o del análisis dinámico. Para poder utilizar las fuerzas obtenidas del análisis dinámico es necesario revisar que el cortante basal no sea menor que el 80% del cortante basal estático.

En las figuras 3.17 y 3.18 se compara las fuerzas obtenidas del análisis estático y dinámico para las direcciones X y Y respectivamente.

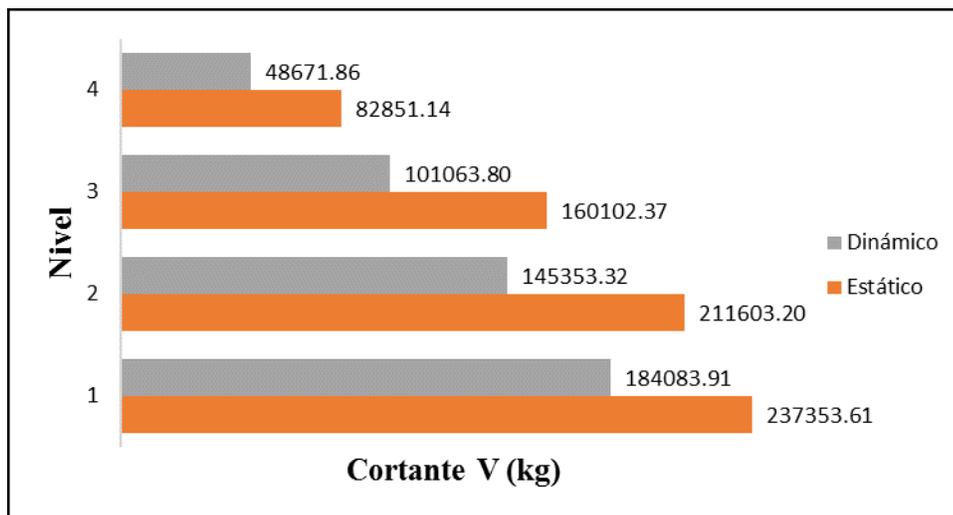


Figura 3.17 Fuerza cortante en cada entrepiso en dirección X.

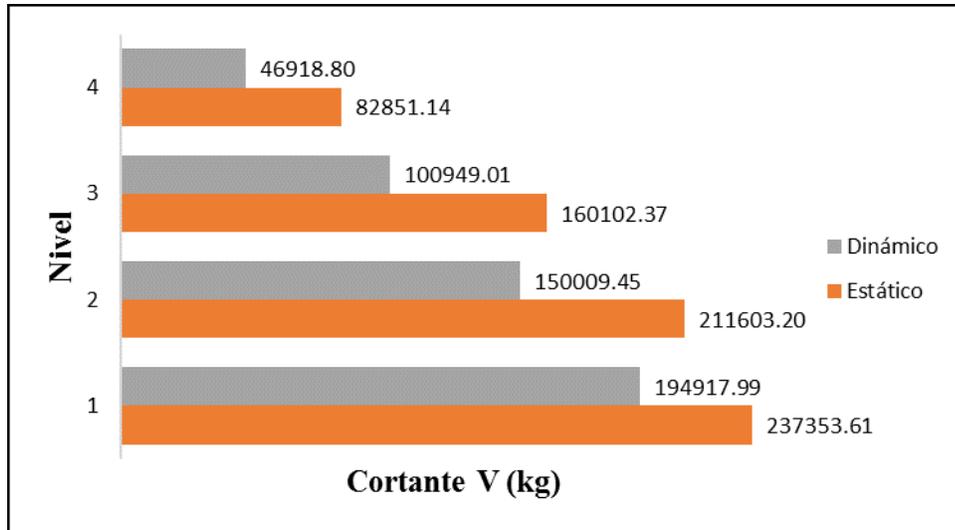


Figura 3.18 Fuerza cortante en cada entrepiso en dirección Y.

Se puede observar que el cortante en dirección X es menor al 80% del cortante basal estático, por lo que se tuvo que escalar las fuerzas aplicadas a la superestructura en esa dirección.

Una vez obtenidas las fuerzas que se le aplicaran a la superestructura se procedió al diseño de las trabes y columnas cumpliendo con el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias del 2004 (NTC-2004).

Las trabes se diseñaron por fuerza cortante y flexión, tomando los elementos mecánicos más desfavorables en cada nivel y dirección. Las trabes principales tienen un ancho de 30cm y un peralte de 60cm. Las trabes secundarias tienen un ancho de 25cm y un peralte de 55cm. Estas secciones son las mismas en todos los niveles. En las figuras 3.19 a 3.21, se muestran los arreglos del acero de refuerzo y se indica el nivel en el que se ubican las trabes principales.

Las columnas se diseñaron por flexo-compresión y cortante, las columnas tienen una sección de 60cm x 60cm. Esta sección es la misma para todos los niveles, el arreglo de cada columna se puede ver en la figura 3.22.

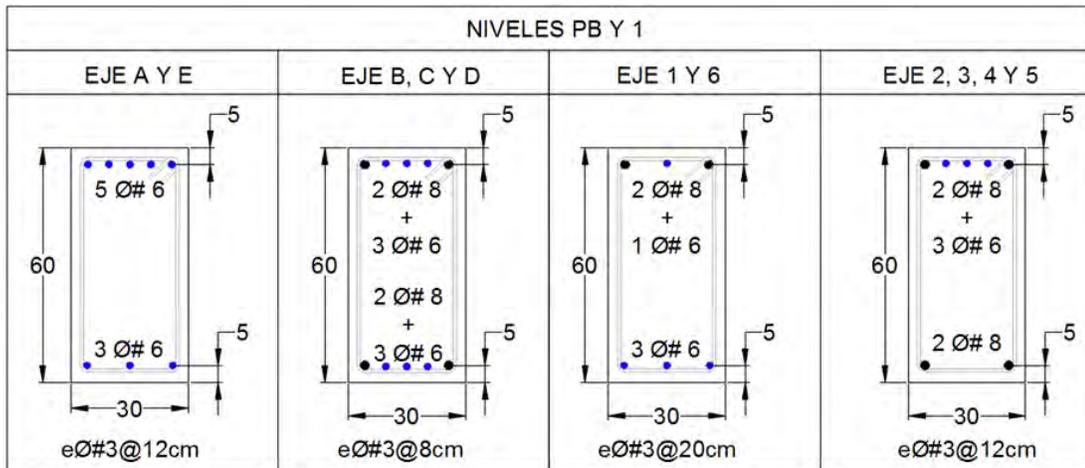


Figura 3.19 Trabes principales niveles PB y 1.

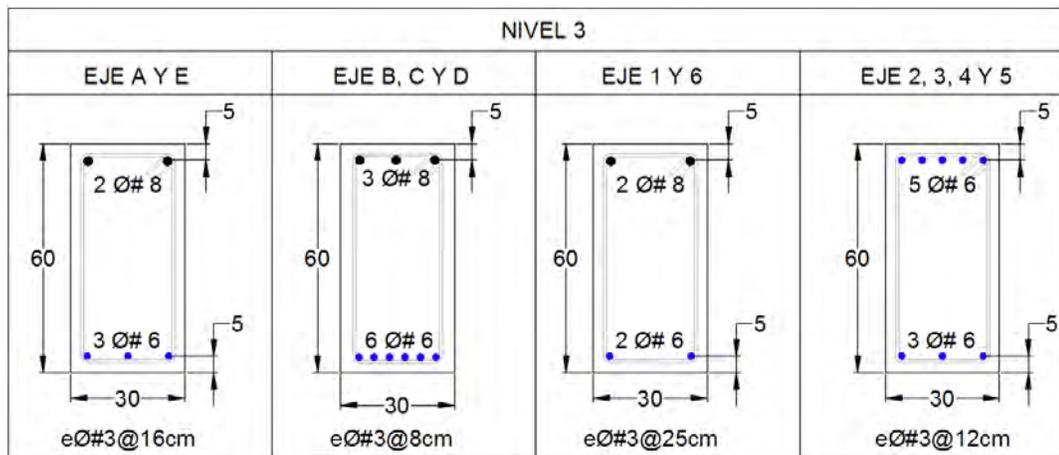
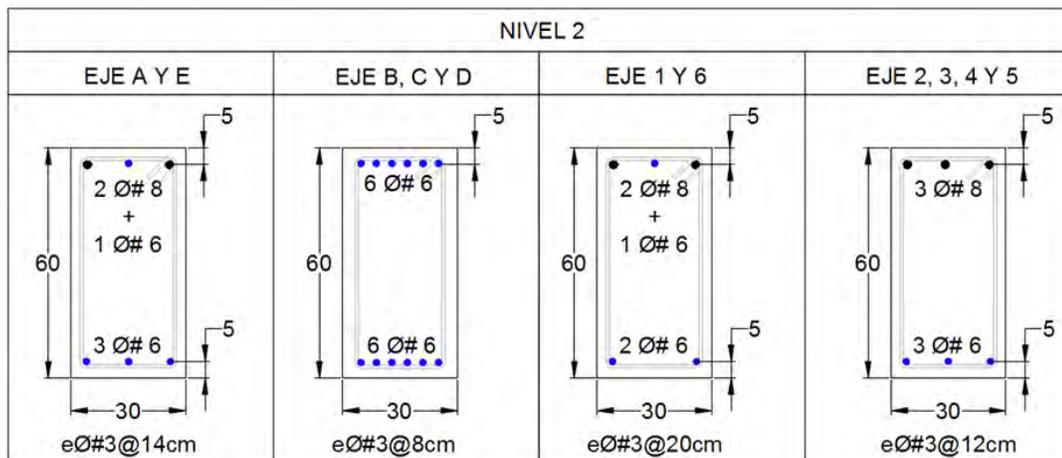


Figura 3.20 Trabes principales niveles 2 al 3.

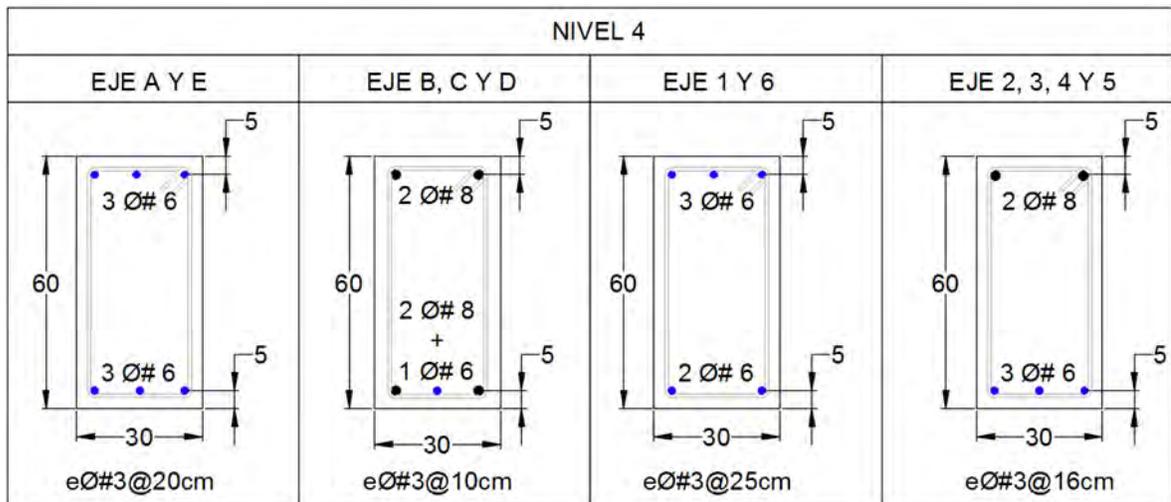


Figura 3.21 Trabes principales nivel 3.

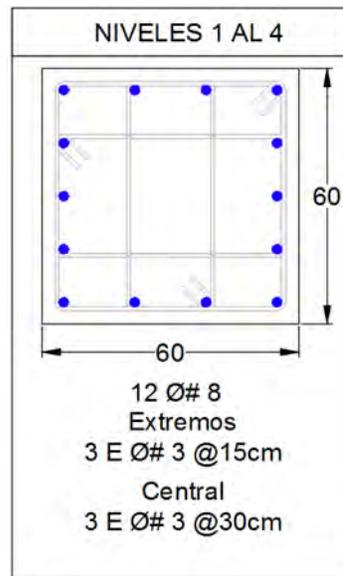


Figura 3.22 Columna.

3.3.4. Resultados del análisis.

Del análisis estructural dinámico modal se obtuvieron los modos de vibrar mostrados en la tabla 3.12, posteriormente se verifica que obtengamos el periodo deseado.

Tabla 3.12 Periodos

Modo	Periodo (s)	Dirección			
		X	Y	Z	Torsión
1	3.072	x	-	-	-
2	2.967	-	x	-	-
3	2.635	-	-	-	x
4	0.794	x	-	-	-
5	0.67	-	x	-	-
6	0.614	-	-	-	x
7	0.344	x	-	-	-
8	0.3	-	x		-
9	0.274	-	-	x	-

El periodo fundamental de la estructura aislada corresponde a 3.07 segundos en dirección X, lo cual es muy cercano al periodo que se propuso de 2.90 segundos, es importante observar que los dos primeros modos son cercanos en su periodo.

En las figuras 3.23, 3.24 y 3.25 se muestra el primer, segundo y tercer modo respectivamente.

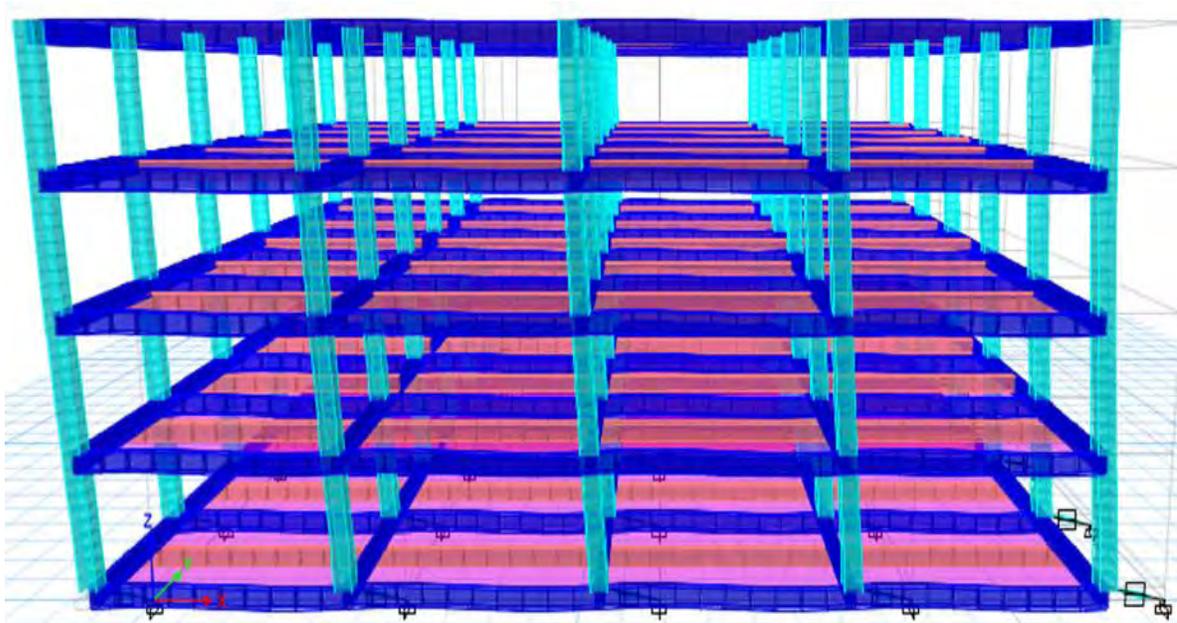


Figura 3.23 Primera forma modal $T=3.072s$. Traslación en X.

(Fuente: ETABS)

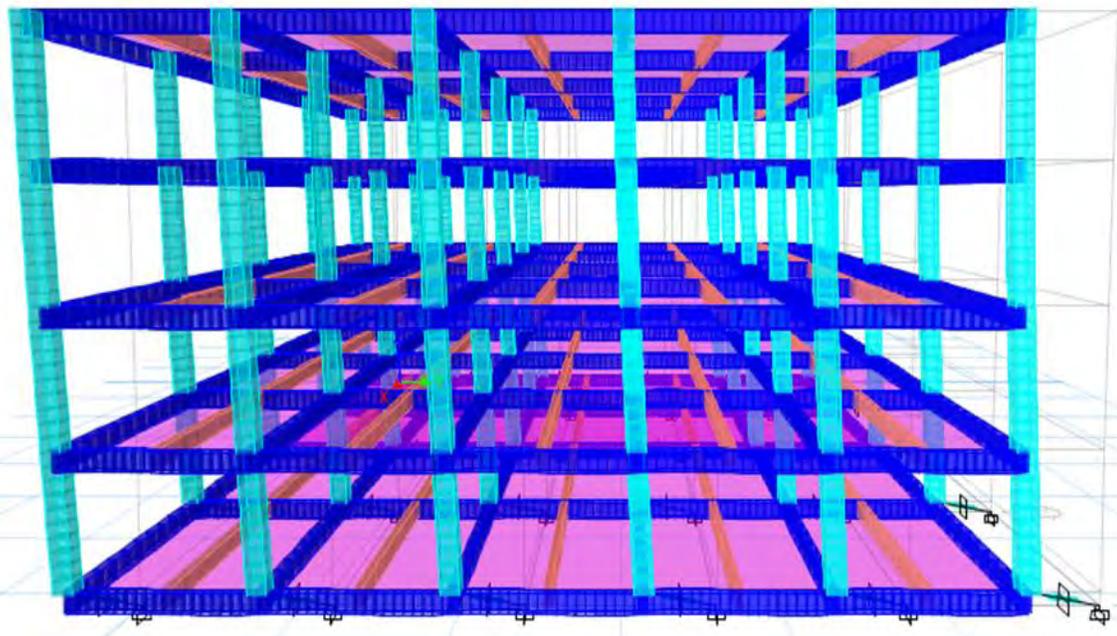


Figura 3.24 Segunda forma modal $T=2.967s$. Traslación en Y.

(Fuente: ETABS)

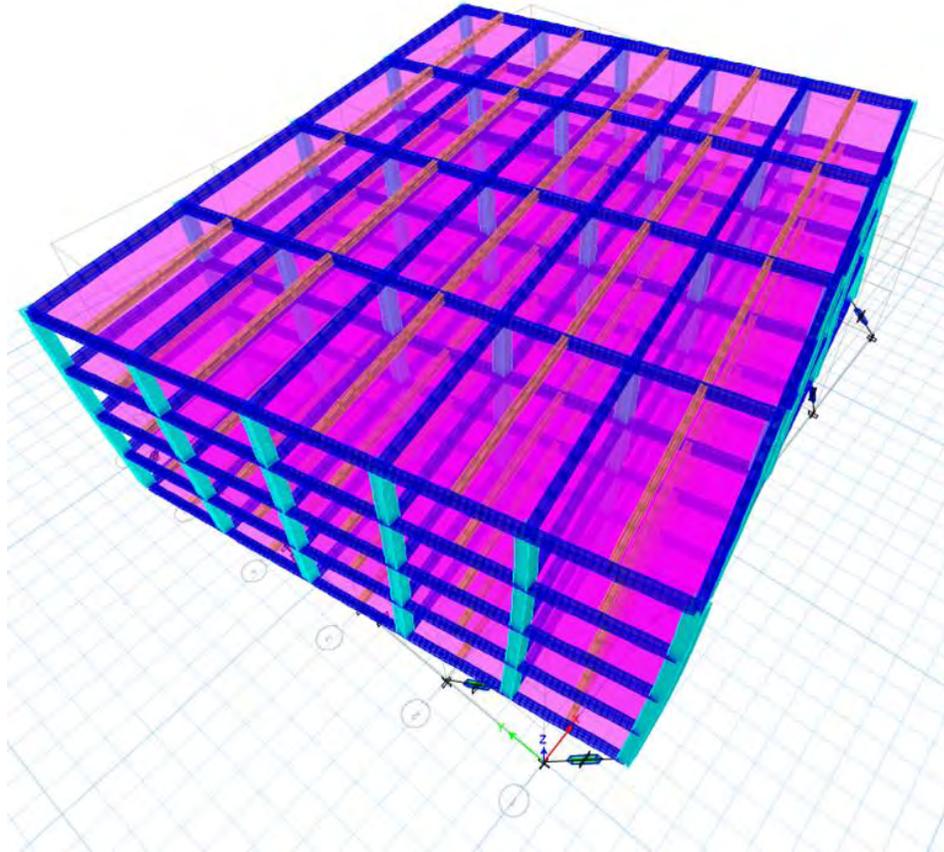


Figura 3.25 Tercera forma modal $T=2.635s$. Torsión en Z.

(Fuente: ETABS)

El cortante basal y su distribución en altura se presenta en la tabla 3.13, en ella se puede apreciar que el valor del cortante en la dirección Y es el mayor. Tanto para la dirección X y Y, el cortante basal cumple con el valor mínimo que no debe ser menor al 80% del cortante basal estático.

Tabla 3.13 Cortante en cada entrepiso.

Nivel	Dirección X (kg)	Dirección Y (kg)
4	50,205.02	46,918.8
3	104,247.31	100,949.01
2	149,931.95	150,009.45
1	189,882.56	194,917.99

CAPÍTULO 3

En las figuras 3.26 y 3.27 se graficaron los cortantes de cada entrepiso en dirección X y Y respectivamente.

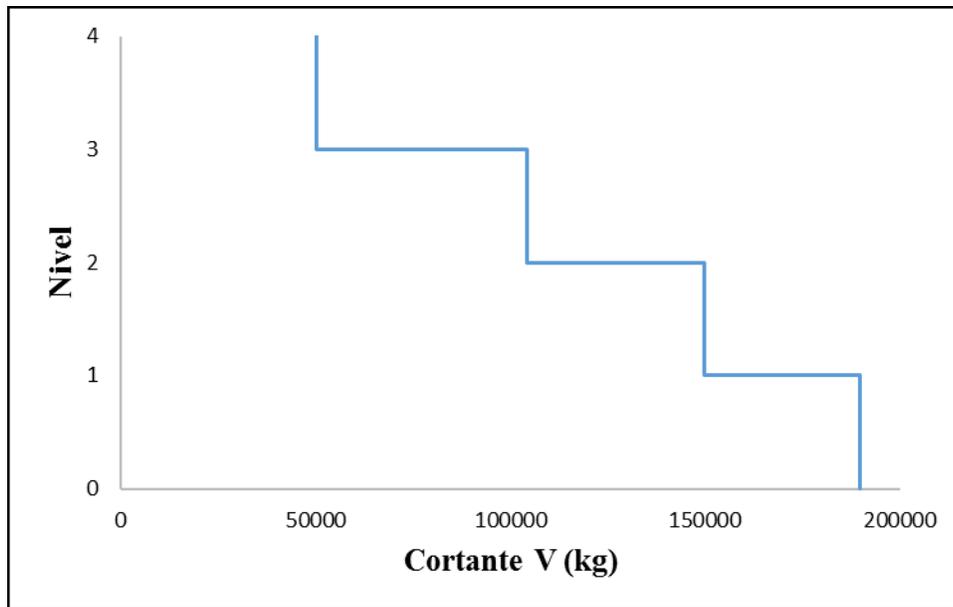


Figura 3.26 Diagrama de cortante en dirección X.

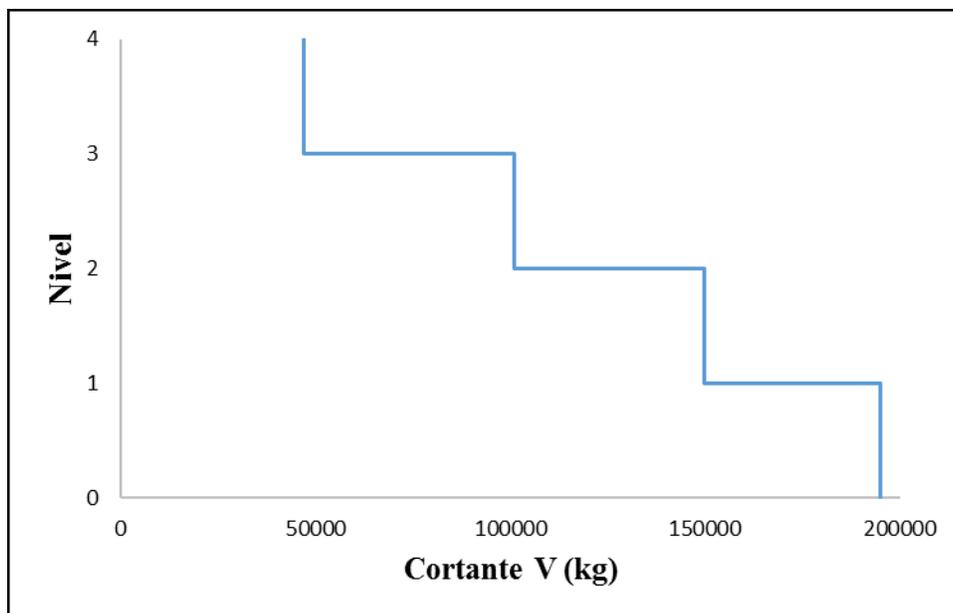


Figura 3.27 Diagrama de cortante en dirección Y.

Las distorsiones obtenidas del análisis dinámico se pueden apreciar en las tablas 3.14 y 3.15 para el eje X y Y, respectivamente.

Tabla 3.14 Distorsiones dirección X

Nivel	Distorsión X	$\gamma(R)$	Distorsión límite	
4	0.001655	0.003310	0.015	Cumple
3	0.002494	0.004988	0.015	Cumple
2	0.003245	0.006490	0.015	Cumple
1	0.003452	0.006904	0.015	Cumple

Tabla 3.15 Distorsiones dirección Y

Nivel	Distorsión Y	$\gamma(R)$	Distorsión límite	
4	0.001129	0.002258	0.015	Cumple
3	0.001848	0.003696	0.015	Cumple
2	0.002517	0.005034	0.015	Cumple
1	0.002732	0.005464	0.015	Cumple

Las distorsiones obtenidas son comparadas con la distorsión máxima permitida, esta comparación la podemos observar en la figura 3.28.

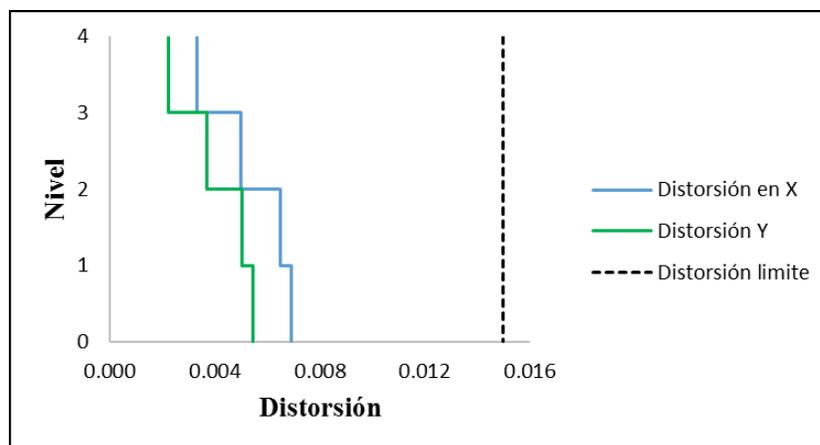


Figura 3.28 Distorsión en dirección X y Y.

4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS.

En este capítulo se realizó un análisis comparativo del comportamiento estructural del edificio diseñado sin aislador y el edificio diseñado con aislamiento sísmico en la base, es interesante también equiparar el edificio aislado manteniendo las mismas secciones de los elementos que se obtuvieron para el edificio con base fija. Al edificio diseñado con aislamiento sísmico lo nombraremos como; base aislada rediseñada y al edificio aislado con los mismos elementos obtenidos para el edificio con base fija lo llamaremos base aislada.

Comparación de los periodos.

En primer lugar, comparamos los periodos obtenidos del análisis, los resultados se muestran en la tabla 4.1. En esta comparación podemos notar que los periodos fundamentales de los edificios aislados son muy similares, también vemos que nos acercamos al periodo objetivo que fue de 2.90 segundos.

Tabla 4.1 Periodos

Modo	Base fija	Base aislada	Base aislada rediseñada
1	0.974	3.028	3.072
2	0.827	2.970	2.967
3	0.764	2.644	2.635
4	0.27	0.627	0.794
5	0.24	0.521	0.670
6	0.22	0.482	0.614
7	0.125	0.262	0.344
8	0.119	0.227	0.300
9	0.111	0.209	0.274

Comparación de cortante.

En las tablas 4.2 y 4.3 se muestran los cortantes en cada entrepiso de los diferentes edificios. En esta tabla podemos observar que el cortante basal en los edificios aislados se reducen en un 40% aproximadamente. El menor cortante basal se presenta en el edificio aislado rediseñado ya que las dimensiones de los elementos estructuras son menores.

Tabla 4.2 Cortantes en dirección X.

Cortante V (kg) en X			
Nivel	Base fija	Base aislada	Base aislada rediseñada
4	116,866.04	47,123.60	50,205.02
3	218,555.47	102,134.40	104,247.31
2	284,834.97	153,094.20	149,931.95
1	313,183.41	200,590.04	189,882.56

Tabla 4.3 Cortantes en dirección Y.

Cortante V (kg) en Y			
Nivel	Base fija	Base aislada	Base aislada rediseñada
4	115,054.27	46,313.55	46,918.8
3	219,359.29	102,115.97	100,949.01
2	288,801.46	155,474.51	150,009.45
1	319,097.14	206,408.42	194,917.99

Los resultados obtenidos se graficaron y se pueden observar en las figuras 4.1 y 4.2, esto para poder apreciar de manera rápida las bondades que el sistema de aislación proporciona.

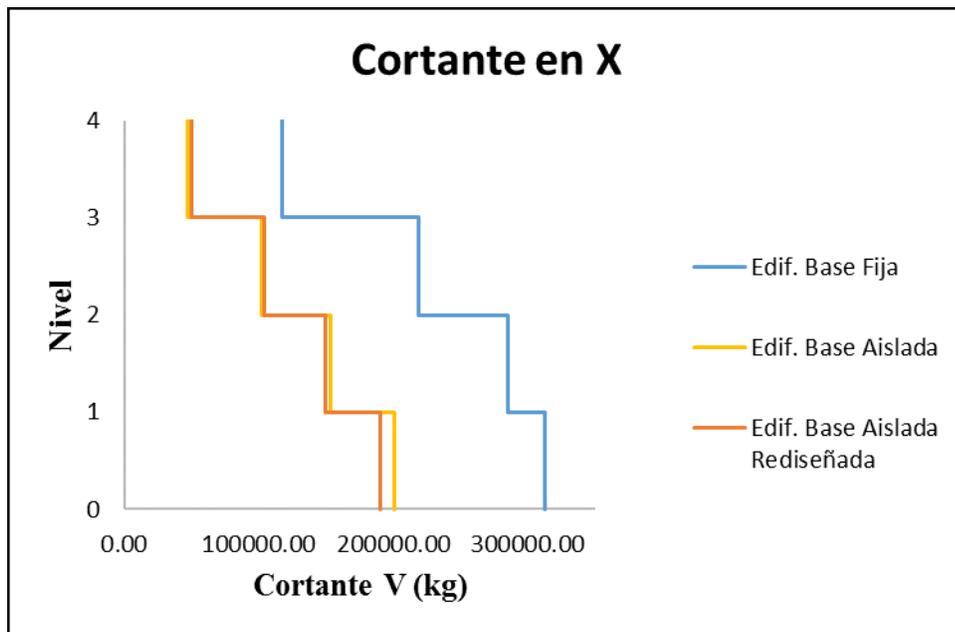


Figura 4.1 Comparación de cortantes en X

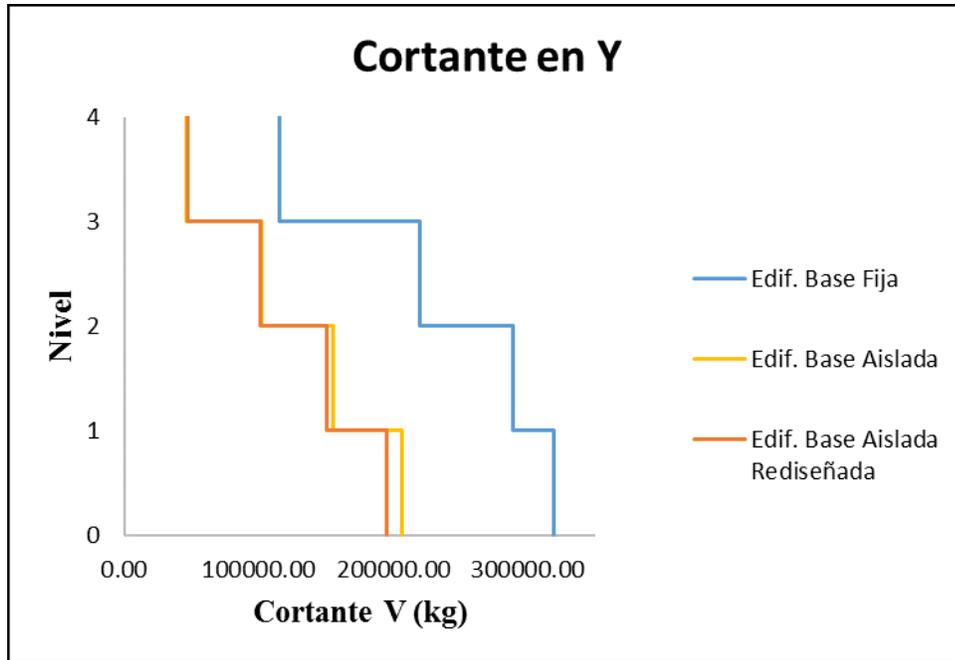


Figura 4.2 Comparación de cortantes en Y.

Comparación de la distorsión de entrepiso

Por último, comparamos las distorsiones que se muestran en las tablas 4.4 y 4.5. En estas tablas podemos observar que las distorsiones menores se presentan en el edificio solamente aislado, la distorsión del edificio aislado rediseñado presenta una distorsión un poco mayor en el primer nivel que el edificio con base fija, sin embargo en los demás niveles las distorsiones disminuyen significativamente.

Tabla 4.4 Distorsión en X.

Nivel	Base fija	Base aislada	Base aislada rediseñada
4	0.006936	0.001752	0.003310
3	0.009568	0.002686	0.004988
2	0.010300	0.003576	0.006490
1	0.005916	0.003892	0.006904

Tabla 4.5 Distorsión en Y.

Nivel	Base fija	Base aislada	Base aislada rediseñada
4	0.005044	0.001224	0.002258
3	0.007532	0.002024	0.003696
2	0.008556	0.002800	0.005034
1	0.005216	0.003102	0.005464

Los resultados obtenidos se graficaron y se pueden observar en las figuras 4.3 y 4.4

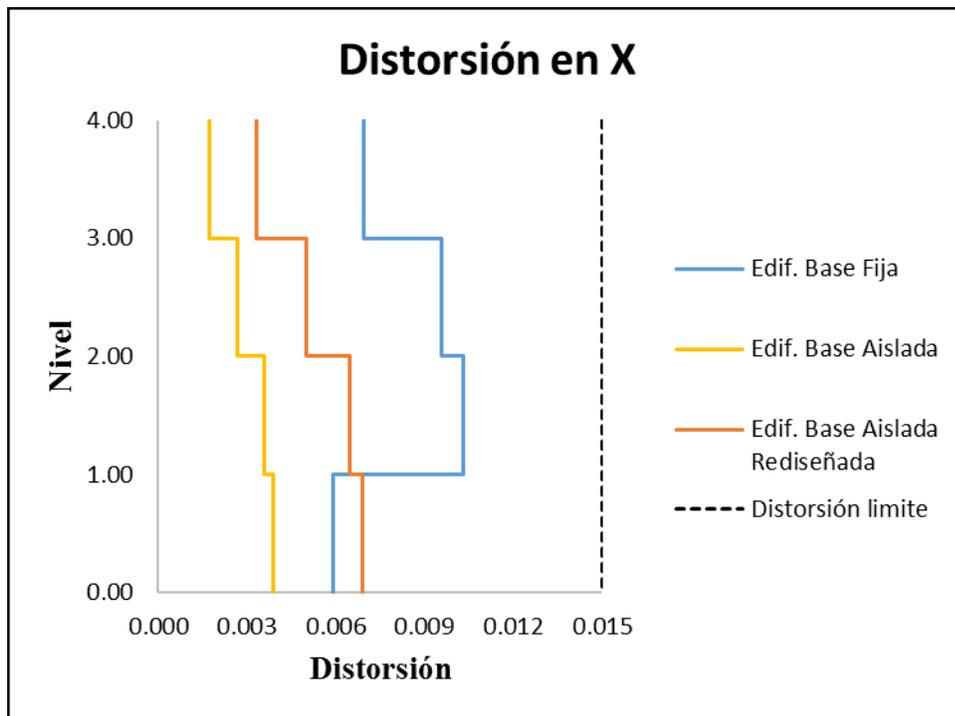


Figura 4.3 Distorsión en dirección X.

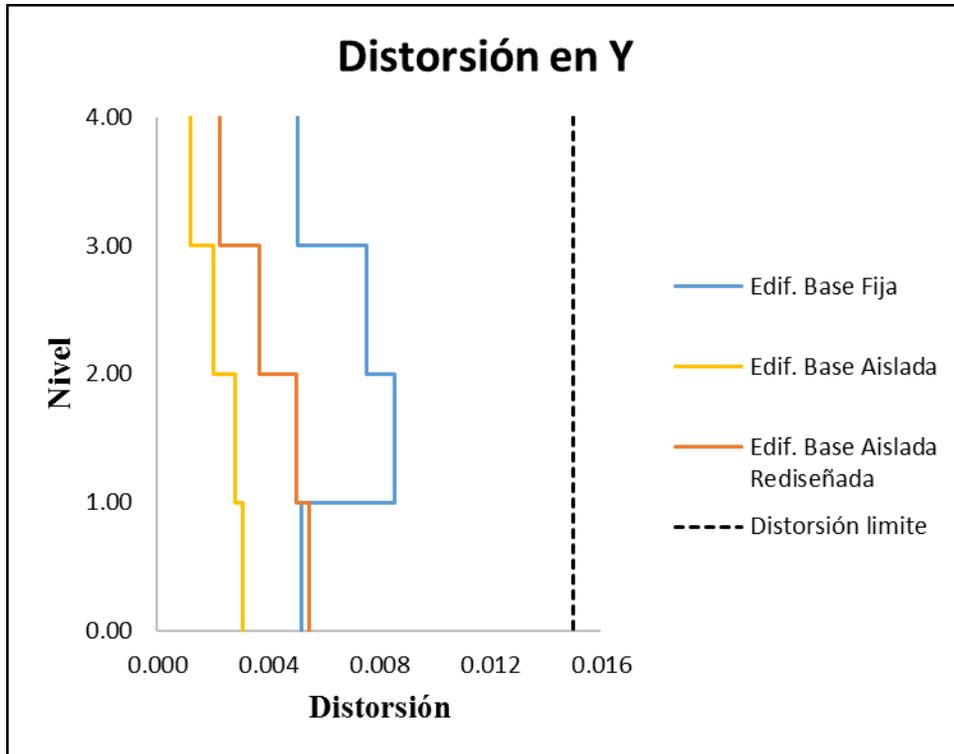


Figura 4.4 Distorsión en dirección Y.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se ha expuesto, en México se han realizado muy pocos estudios de edificios aislados sísmicamente, en la gran mayoría de estos trabajos por lo regular ubican a la estructura en la zona del pacifico mexicano, debido a esto se decidió en esta tesis ubicar a la estructura en la Ciudad de México, el uso de este sistema de control de la respuesta sísmica se ha empezado a implementar cada vez más y México no se puede quedar atrás.

La incorporación de aislamiento sísmico beneficia en gran medida a la estructura y a los contenidos ya que disminuye notablemente la fuerza cortante, las aceleraciones y las distorsiones en cada nivel, al disminuir las fuerzas cortantes en los entresijos, nos lleva a que el diseño de los elementos mecánicos sea regido por la combinación de cargas gravitacionales, lo que reduce las secciones de los elementos estructurales, al reducir aceleraciones nos ayuda a proteger a los contenidos y por ultimo reduciendo las distorsiones minimizamos el daño a los elementos estructurales.

Aunque la dimensión de las secciones disminuye no quiere decir que la estructura tenga un menor costo inicial, ya que el costo de los aisladores y de la losa ubicada

en la interfase de la estructura originan que este se incremente, pero si consideramos el costo total a largo plazo, esta disminuye ya que podemos tomar en cuenta que los sistemas de aislación reducen los daños en la estructura y en los contenidos, además el costo por reparación es muy bajo y también evita pérdidas por interrupción.

El aislamiento sísmico no siempre puede ser la mejor solución para proteger a las estructuras ya que como se mencionó, este tipo de sistema no es recomendable utilizarlo en zonas donde el terreno es suave.

Es recomendable considerar el aislamiento desde el inicio del proyecto, ya que estos dispositivos producen un gran desplazamiento horizontal, por lo que hay que dejar un espacio libre en las colindancias para que la estructura pueda desplazarse libremente en caso de la ocurrencia de un sismo.

Es importante que, los aisladores sean ubicados en lugares donde puedan ser monitoreados, para poder darle algún tipo de mantenimiento o ser reemplazados.

Las instalaciones son de suma importancia en la operación del edificio, por lo que es un aspecto importante a considerar en el diseño, ya que se deben utilizar tuberías flexibles.

Propongo que se deben realizar más estudios analíticos similares, para las demás zonas de la Ciudad de México, o inclusive en la misma zona donde se ubicó el edificio de este trabajo, pero utilizando un sistema de aislación diferente.

Es necesario realizar estudios experimentales para poder comparar con lo obtenido analíticamente, además sería muy conveniente incluir requerimientos en las normas, para el diseño de sistemas de aislamiento.

6. REFERENCIAS

1. Chopra, Anil K.(1995), "Dynamics of Structures", primera edición, Prentice Hall, N.J.
2. Naeim, F. y J. M., Kelly, (1999). "Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice", First edition. John Wiley & Sons, New York.
3. Kelly, J. M., (1993), "Earthquake Resistant Design with Rubber", Springer-Verlag, London, United Kingdom.
4. Kelly J. M., (1982), "The influence of base isolation on the seismic response of light secondary equipment", University of California, Berkeley.
5. Trevor E. Kelly, (2001), "Design Guidelines", Holmes consulting Group Ltd.
6. Bozzo, Luis M. y Barbat, Alex H. (2000), "Diseño Sismorresistente de Edificios Técnicas Convencionales y Avanzadas", Editorial Reverté, Barcelona.
7. Barbat, A.H., Molinares, N. (1994), "Edificaciones con aislamiento de base no lineal", Monografías de Ingeniería Sísmica, Centro Internacional de Métodos Numéricos de Ingeniería, Barcelona, España.
8. Aguiar, R., Almazán, J.L., Dechent, P., y Suarez V. (2008). "Aisladores de Base Elastómericos y FPS". Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador, Quito.

9. Villegas Jiménez O y A Tena Colunga (1999), "Criterios de diseño dinámico para estructuras aisladas sísmicamente en las zonas costeras del Pacífico mexicano", Tesis de Maestría, UNAM.
10. Bazán, E., Meli R. (2002), "Diseño sísmico de edificios", Ed. LIMUSA, DF. México.
11. Uniform Building Code (1997), Volume 2, Structural Engineering Provisions.
12. FEMA 4551. (2006). NEHRP Recommended Provisions: Design Examples. Washington D.: Federal Emergency Management Agency.
13. Norma Chilena, Instituto Nacional de Normalización, Santiago-Chile, 2003, NCH-2745, Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica requisitos.
14. Meza B. Roger I., Sánchez G. Edgard E. (2010) "Guía de diseño sísmico de aisladores elastoméricos y de fricción para la República de Nicaragua". Recinto universitario Pedro Arauz Palacios, Facultad de tecnología de la construcción.
15. (2004), "Reglamento De Construcciones Del D.F.", RCDF, Gaceta Oficial del Gobierno del D.F.,
16. NTCD-2004, "Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto", Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, México.
17. NTCD-2004, "Normas técnicas complementarias para diseño por sismo", Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, México.

MESOGRAFÍA.

1. <http://www.dis-inc.com/>
2. <https://cauchosvikingo.com/aisladores-sismicos/>
3. http://www.bridgestone.com/products/diversified/antiseismic_rubber/product.html
4. <http://antisismos.blogspot.mx/2015/06/aislacion-de-energia-sismica.html>
5. <http://cdvperu.com/>