



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ACATLÁN

**CONTROL DE LA RESPUESTA SISMICA DE UN
EDIFICIO DE BAJA ALTURA MEDIANTE
AISLADORES DE PENDULO FRICCIONANTE**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

DANIEL ARTURO DRAGO GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS

M. EN I. PABLO IVÁN ANGELES GUZMÁN



Santa Cruz Acatlán, Naucalpan, Estado de México, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Índice general

Resumen	6
Abstract	7
Introducción	8
1 Control de la respuesta sísmica en edificios	10
1.1 Conceptos básicos del aislamiento sísmico	10
1.1.1 Breve historia	12
1.1.2 Requerimientos técnicos	14
1.1.3 Reducción de la respuesta estructural	15
1.2 Sistemas de aislamiento sísmico	17
1.2.1 Introducción	17
1.2.2 Sistemas elastoméricos	17
1.2.3 Sistemas de deslizamiento	18
1.2.4 Sistemas activos	20
1.3 Efectividad del aislamiento sísmico	20
1.3.1 Modelos computacionales	20
1.3.2 Pruebas físicas	21
1.3.3 Mediciones y observaciones durante sismos	22
1.4 Beneficios y limitaciones del aislamiento sísmico	22
1.4.1 Beneficios antes de un sismo	23
1.4.2 Beneficios durante y después de un sismo	23
1.4.3 Limitaciones del aislamiento sísmico	23
2 Aislamiento sísmico, de la teoría a la práctica	24
2.1 Aspectos de diseño	24
2.1.1 Diseño arquitectónico	24
2.1.2 Ingeniería estructural	25
2.2 Aspectos económicos	26
2.2.1 Costos constructivos	26
2.2.2 Economía pre-sismo	27
2.2.3 Economía post-sismo	27
2.3 Construcción y mantenimiento	28
2.3.1 Construcción	28
2.3.2 Mantenimiento	28
2.4 Características mecánicas y modelado de aisladores	28
2.4.1 Características mecánicas de los sistemas de péndulo friccionante	28
2.4.2 Rigidez secante	30
2.4.3 Amortiguamiento equivalente	30

3 Aplicación práctica de aislamiento de péndulo friccionante	32
3.1 Descripción del edificio	32
3.1.1 Zona geotécnica	33
3.2 Clasificación del sistema	33
3.2.1 Importancia estructural	33
3.2.2 Torsión inherente	33
3.2.3 Torsión accidental	35
3.2.4 Condiciones de regularidad estructural	35
3.3 Estructuración	37
3.3.1 Predimensionamiento de losas	37
3.3.2 Predimensionamiento de trabes	40
3.3.3 Predimensionamiento de columnas	41
3.4 Análisis de cargas	42
3.4.1 Gravitacionales	42
3.4.2 Laterales	43
4 Control de la respuesta estructural	45
4.1 Estructura de base fija	45
4.2 Estructura de base aislada	46
4.3 Características mecánicas del aislamiento	51
5 Resultados	54
5.1 Distorsiones de entrepiso	54
5.2 Fuerzas internas	56
5.3 Cortante Basal	67
Conclusiones y Recomendaciones	69

Índice de figuras

1 Diferentes tipos de aisladores	8
1.1 Hotel Vía Vallejo, Ciudad de México (México)	12
1.2 Aislamiento sísmico en la escuela Pestalozzi en Skopje, Macedonia	13
1.3 Edificio William Clayton en Nueva Zelanda. Makris, Nicos. (2018)	13
1.4 Acelerograma del registro sísmico	15
1.5 Espectros sísmicos	16
1.6 Propiedades inelásticas del modelo de 1 GDL	17
1.7 Corte transversal de un apoyo elastómero con núcleo de plomo. Per F. Peterson. (2022)	18
1.8 Aislador de péndulo simple. Keri L. Ryan y Nhan D. Dao. (2016)	19
1.9 Aislador de péndulo triple. Keri L. Ryan y Nhan D. Dao. (2016)	19
1.10 Modelo Computacional del Hotel Vía Vallejo, Ciudad de México	21
1.11 Instalaciones de pruebas de dispositivos de modificación de la respuesta sísmica de Caltrans y la parte inferior de un péndulo de fricción grande	22
2.1 Detalle típico del perímetro del plano de aislamiento. Charleson, Guisasola. (2017)	25
2.2 Corte transversal al plano de aislamiento donde se ve que el hueco del ascensor cuelga de la estructura aislada. Charleson, Guisasola. (2017)	26
2.3 Condiciones del péndulo friccionante	29
2.4 Curva de histéresis típica del péndulo friccionante	30
3.1 Planta tipo	32
3.2 Zonificación geotécnica, NTC, Cimentaciones (2017)	33
3.3 Centro de masa y Centro de rigidez en planta tipo	34
3.4 Planta y dimensiones del tablero a analizar	38
3.5 Cargas sin factorizar y de diseño	38
3.6 Planta y propiedades de la trabe a analizar	40
3.7 Planta y propiedades de la columna a analizar	41
3.8 Espectro de sitio de acuerdo con el SASID	44
4.1 Modelo de la estructura sin aislar	45
4.2 Coeficiente numérico B_D y B_M	48
4.3 Catalogo de aisladores PENDULUM PM (Mono) y DP (Duplo) de Mageba.	52
4.4 Modelo de la estructura con aislamiento	53
5.1 Distorsiones de entrepiso debido al sismo en X	55
5.2 Distorsiones de entrepiso normalizadas debido al sismo en X	55
5.3 Distorsiones de entrepiso debido al sismo en Y	56
5.4 Distorsiones de entrepiso normalizadas debido al sismo en Y	56
5.5 Sismo en X sobre el eje 1L en estructura sin aislamiento	57

5.6 Sismo en X sobre el eje 1L en estructura aislada	58
5.7 Sismo en Y sobre el eje 1L en estructura sin aislamiento	58
5.8 Sismo en Y sobre el eje 1L en estructura aislada	59
5.9 Momentos debido al sismo en X	60
5.10 Momentos normalizados debido al sismo en X	60
5.11 Momentos debido al sismo en Y	61
5.12 Momentos normalizados debido al sismo en Y	61
5.13 Momentos normalizados debido al sismo en X en el nivel 6	62
5.14 Momentos normalizados debido al sismo en X en el nivel 5	62
5.15 Momentos normalizados debido al sismo en X en el nivel 4	63
5.16 Momentos normalizados debido al sismo en X en el nivel 3	63
5.17 Momentos normalizados debido al sismo en X en el nivel 2	64
5.18 Momentos normalizados debido al sismo en Y en el nivel 6	65
5.19 Momentos normalizados debido al sismo en Y en el nivel 5	65
5.20 Momentos normalizados debido al sismo en Y en el nivel 4	66
5.21 Momentos normalizados debido al sismo en Y en el nivel 3	66
5.22 Momentos normalizados debido al sismo en Y en el nivel 2	67
5.23 Cortante basal	67
5.24 Cortante basal normalizado	68

Índice de tablas

3.1 Propiedades de los materiales de las losas	37
3.2 Espesor mínimo de las losas	39
3.3 Resumen de resultados de losas	39
3.4 Dimensiones de las trabes	40
3.5 Dimensiones de las columnas	41
3.6 Cargas vivas	42
3.7 Carga muerta en losas	42
3.8 Sobrecarga muerta propuesta en losas de azotea	43
3.9 Sobrecarga muerta propuesta en losas de la planta tipo	43
3.10 Cargas vivas en losas	43
4.1 Propiedades propuestas del aislamiento	50
4.2 Propiedades calculadas del aislamiento	50
4.3 Distribución de las fuerzas sísmicas sobre la estructura aislada	50
4.4 Resumen de propiedades mecánicas del aislamiento	52

Resumen

En este estudio se analiza como implementar aisladores de base de péndulo friccionante en un edificio de concreto reforzado, como medio de control de la respuesta sísmica, y los puntos a favor y en contra de su uso. A lo largo de este estudio se hace énfasis en que la implementación de dispositivos para el control de la respuesta sísmica de las edificaciones requiere de la consideración y colaboración de todas las disciplinas involucradas en su construcción, ya que se deben hacer consideraciones importantes en comparación con una edificación convencional de base fija.

Abstract

In this study it is analyzed how to implement frictional pendulum base isolators in a reinforced concrete building, as a means of controlling the seismic response, and the points for and against the use of these. Throughout this study it is emphasized that the implementation of devices for the control of the seismic response of buildings requires the consideration and collaboration of all the disciplines involved in their construction, since important considerations must be made in comparison with a conventional fixed base building.

Introducción

Los sismos son un tema que concierne a personas de todo el mundo, sobre todo en las ciudades donde el colapso de las edificaciones implicaría una pérdida económica y humana grande. Debido a esto, edificar construcciones seguras, es el principal interés del control de la respuesta estructural.

Aunque no se sabe con exactitud cuál fue el primer mecanismo inventado con el objetivo de aislar una edificación del suelo para prevenir o disminuir los daños que los sismos pudieran provocarle. Hay evidencia arqueológica de que por más de un siglo se ha propuesto el uso de rodillos, pelotas y arena. Sin embargo, los primeros dispositivos propuestos presentaban problemas como poca rigidez vertical y/o una respuesta inadecuada al viento (Naeim y Kelly, 1999; Charleson y Guisasola, 2017).

En los últimos 40 años el concepto de aislamiento sísmico se ha vuelto realidad gracias al desarrollo de estos dispositivos que cuentan con una rigidez vertical alta, al mismo tiempo que son flexibles en la dirección horizontal, además de que su costo se ha reducido con el paso de los años.

Al ingeniero estructurista al que se le asigna la tarea de realizar el diseño sísmico de una construcción se enfrenta al dilema de cómo disminuir las aceleraciones y las distorsiones de entrepiso. Ya que, si se opta por el rigidizar la estructura, esto provoca la amplificación de la respuesta estructural; y, por otro lado, si se opta por hacer más flexible la estructura, esto provoca que las distorsiones de entrepiso aumenten. Por lo que en estos casos es muy audaz el uso de aislamiento sísmico, ya que con este se puede rigidizar la estructura y concentrar la flexibilidad necesaria en la base usando dispositivos como los que se pueden apreciar en la figura 1.

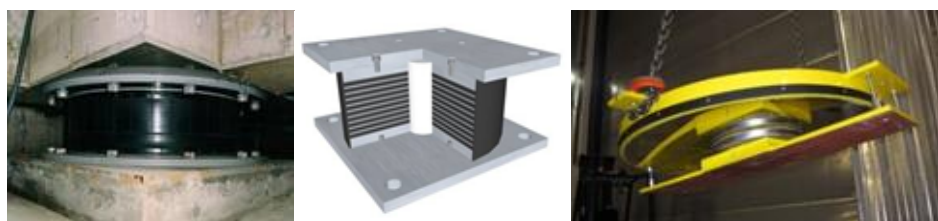


Figura 1: Diferentes tipos de aisladores

El concepto de aislamiento en términos simples es el de desacoplar la estructura de las componentes horizontales del movimiento del suelo mediante la creación de una interfaz entre la estructura y el suelo, con baja rigidez horizontal. Con esto se logra aumentar el

periodo fundamental de la estructura con respecto al periodo con la base fija, provocando que la estructura se mueva como cuerpo rígido, mientras que las deformaciones se concentran en la interfaz de aislamiento.

Por tanto, el aislamiento sísmico ha llamado la atención de muchos ingenieros e investigadores alrededor del mundo, por lo que actualmente se cuenta con una gran cantidad de publicaciones sobre dinámica de estructuras aisladas y de las propiedades mecánicas de los aisladores y gracias a esto se han desarrollado lineamientos para el diseño de estructuras aisladas y reglas de diseño para los dispositivos de aislamiento.

Aunque el concepto de aislamiento sísmico es relativamente sencillo, aun en años recientes su implementación ha sido complicada debido a los requerimientos que se encuentran en varias normativas, que algunos autores han denominado como “sobreconservadores” (Naeim y Kelly, 1999). Sin embargo, se siguen publicando investigaciones en las que se discute cómo el correcto uso de estos dispositivos puede mejorar las condiciones de servicio de las edificaciones y aumentar su seguridad ante eventos sísmicos.

Capítulo 1

Control de la respuesta sísmica en edificios

1.1. Conceptos básicos del aislamiento sísmico

Para hablar de aislamiento sísmico, primero debemos conocer las características y propiedades dinámicas que son de interés para una estructura, estas son el periodo fundamental de vibración y el amortiguamiento.

El periodo fundamental de vibrar se puede describir brevemente como el tiempo que tarda la estructura en completar un ciclo de vibración en su forma de vibrar preferida, es en esta forma de vibrar que la estructura tiene la combinación de menor rigidez y mayor masa que participa en generar fuerzas inerciales.

Por su parte el amortiguamiento es la energía que deja de formar parte del sistema dinámico. Este, por lo general se expresa como un porcentaje con respecto al amortiguamiento crítico, que es el que provocaría que al ser desplazada la estructura y se le permita regresar a su posición de equilibrio, sin oscilaciones, regrese directamente a dicho punto. En estructuras civiles sin aislar como edificios, se tienen porcentajes de amortiguamiento muy por debajo del crítico. Por lo general, se asume un amortiguamiento del 5 % para estructuras de concreto y del 2 % para estructuras de acero.

En una estructura aislada el objetivo principal es el de aumentar el periodo fundamental de ésta; ya que, por lo general, las estructuras de poca y mediana altura construidas por medios y técnicas convencionales son rígidas. Es decir, tienen periodos fundamentales cortos que pueden entrar en resonancia con algunos sismos, debido al contenido de frecuencias de estos, lo que provoca que estas estructuras deban resistir deformaciones laterales importantes durante los eventos sísmicos de gran intensidad y/o duración.

Como estrategia secundaria, se puede dotar a la estructura de amortiguamiento suplementario por medio del uso de dispositivos de aislamiento sísmico y/o amortiguadores que incorporen algún mecanismo de disipación de energía.

Dicho de otro modo, el aislamiento sísmico tiene como objetivo limitar la cantidad de energía que es inducida en una estructura durante un sismo. Para este fin, se usan dispositivos que dotan a la estructura de poca rigidez lateral en su base y al mismo tiempo, tengan una gran capacidad de carga vertical.

Esto es efectivo ya que la mayoría de las estructuras se comportan como un filtro del contenido de frecuencias de vibración de un sismo. Amplificando la respuesta a lo largo de su altura, y la interfaz de aislamiento se diseña específicamente para limitar estas vibraciones; por lo que se dice que estos dispositivos desacoplan las estructuras del suelo.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el sistema de aislamiento debe ser cuidadosamente diseñado para la estructura que va a soportar y las características sísmicas de la zona geográfica. Aun así, no se elimina por completo el efecto del sismo sobre la estructura, por lo que las estructuras aisladas no son considerablemente más económicas que una sin aislar. En estas últimas, los códigos de diseño sísmico permiten reducir considerablemente las acciones sísmicas de diseño a causa de la ductilidad para la que se diseña la estructura.

Las estructuras aisladas son menos vulnerables al sismo, debido a que mientras que una estructura dúctil utiliza el daño estructural como el principal mecanismo para disipar energía, los dispositivos de aislamiento pueden permitir a una estructura soportar el evento sísmico sin sufrir daño alguno.

Un estudio de 3 hospitales con aislamiento de base construidos en 2008 mostró que el costo aproximado de utilizar aislamiento fue del tres por ciento del costo total de construcción (Charleson y Guisasola, 2017), sin embargo, este costo puede ser fácilmente justificable si como se mencionó anteriormente, se previenen daños a la estructura y a su contenido.

Existen dos tipos de aislamiento en una estructura, este puede ser un su base o en piso intermedio. La diferencia recae en donde se ubica el plano en el que se coloca la interfaz del aislamiento. La mayoría de las estructuras se aíslan en su base, colocando dispositivos debajo de cada columna o cerca de la base de estas. Sin embargo, en algunos casos se opta por el aislamiento parcial de la estructura. Tal es el caso del Hotel Vía Vallejo de la Ciudad de México, donde en la parte inferior se encuentra un centro comercial sin aislar, y sobre de este, un hotel aislado mediante el uso de 18 apoyos elastoméricos con núcleo de plomo. Este se puede apreciar en la figura 1.1.



Figura 1.1: Hotel Vía Vallejo, Ciudad de México (México).

1.1.1. Breve historia

Las estructuras que cuentan con algún mecanismo de aislamiento sísmico riguroso son relativamente nuevas, no superando los 60 años. Sin embargo, los esfuerzos por aislar y mejorar la respuesta de las construcciones no es algo nuevo. Se sabe de construcciones antiguas construidas sobre troncos, piedras lisas y capas de arena como intentos primitivos de aislamiento.

La primera aplicación moderna de aislamiento fue en 1969, en la escuela Pestalozzi de Skopje, Macedonia. Esta se puede apreciar en la figura 1.2a y se construyó sobre apoyos de neopreno como los que se muestran en la figura 1.2b. El neopreno es un polímero elástico o elastómero, por lo que este tipo de apoyos se conoce como elastoméricos.

Sin embargo, esta aplicación presentó varios problemas, por lo que se desarrolló otro tipo de apoyo elastomérico, conocido hoy en día como apoyo de goma y plomo, inventado en 1981 por el ingeniero neozelandés Dr. Bill Robinson.



(a) Escuela de Skopje, Macedonia.
Kelly, J.M. (2018).



(b) Apoyo Elastómero sin reforzar.
Kelly, J.M. (2018).

Figura 1.2: Aislamiento sísmico en la escuela Pestalozzi en Skopje, Macedonia.

La primera aplicación a gran escala fue con el uso de aisladores de elastómero con núcleo de plomo para la construcción del edificio William Clayton en 1981 en Nueva Zelanda, el cual se puede apreciar en la figura 1.3. (Higashino y Okamoto, 2006).



Figura 1.3: Edificio William Clayton en Nueva Zelanda. Makris, Nicos. (2018).

Aunque en sus inicios la adopción del aislamiento sísmico fue lenta, actualmente ha crecido considerablemente debido al desempeño observado durante y después de los eventos sísmicos.

Actualmente el uso de aislamiento sísmico ha sido de particular interés en estructuras donde los contenidos puedan ser más valiosos que la estructura y/o donde no interrumpir la operación del inmueble sea crítico. Tal como, en hospitales, plantas nucleares, fábricas de microprocesadores e imprentas, por mencionar algunos.

Y también han sido de interés en zonas donde la población tiene conciencia de los desastres naturales, como es el caso de Japón, donde cada vez hay más casas y condominios con aislamiento sísmico.

Sin embargo, la adopción del aislamiento sísmico ha sido muy lenta en países como los Estados Unidos de América, comparado con países como Japón, China y Taiwán. Esto se debe a diversos motivos, pero destaca que los códigos y manuales de diseño imponen requisitos de diseño que vuelven impráctico el uso de aislamiento

sísmico (Naeim y Kelly, 1999), motivo por el que en algunos casos donde se ha adoptado el aislamiento, se adicionan amortiguadores para cumplir con los requisitos necesarios (Morgan y Mahin, 2011)

1.1.2. Requerimientos técnicos

Un sistema de aislamiento ideal debe contar con las siguientes cinco características:

- 1.** Dotar a la estructura de poca rigidez lateral en su base. Esto es lo principal ya que este es el medio por el que se logra el aislamiento.
- 2.** Soportar la carga vertical sin presentar asentamientos. En el caso de la escuela de Skopje, la rigidez vertical del elastómero solo era un par de veces mayor que la rigidez horizontal, por lo que se comprimieron aproximadamente el 25 % de la altura del bloque (Naeim y Kelly, 1999).
- 3.** Volver a su posición original después de un evento sísmico. Esto debido a que si después de un evento sísmico la estructura no regresa a su posición inicial, eventualmente podrían presentarse daños a los dispositivos, a las estructuras, o estas podrían tener desplazamientos excesivos que superen la capacidad de los dispositivos.
- 4.** Tener rigidez suficiente para no moverse ante excitaciones leves. Esto es debido a que, aunque el aislamiento sería más efectivo durante un sismo si no existiera fricción entre el suelo y la estructura, este debe soportar otro tipo de acciones como es el caso del viento, sismos leves o incluso tráfico interno de personas caminando. En el caso de la escuela de Skopje, se adicionaron bloques de vidrio celular para actuar como fusibles sísmicos y prevenir desplazamientos ante excitaciones leve.

5. Dotar a la estructura de amortiguamiento suplementario. El elastómero ocupado en la escuela de Skopje no provee amortiguamiento considerable, por lo que sin los bloques de vidrio celular el movimiento constante sería molesto para quien se encuentre en el interior de la estructura.

1.1.3. Reducción de la respuesta estructural

El aislamiento sísmico consiste en aumentar el periodo fundamental de vibración de una estructura, debido a que por lo general este es el que produce mayores distorsiones de entrepiso, y dotar a la estructura de amortiguamiento suplementario.

El por qué hacer esto es efectivo, se puede apreciar haciendo uso del espectro sísmico. El cuál es el resultado de simular la respuesta sísmica de estructuras de un grado de libertad (GDL), cada una con diferente periodo fundamental.

En la figura 1.4 se muestra la historia de aceleraciones o acelerograma correspondiente a un sismo ocurrido en el municipio de Acapulco de Juárez, Estado de Guerrero, País de México, el 25 de abril de 1989.

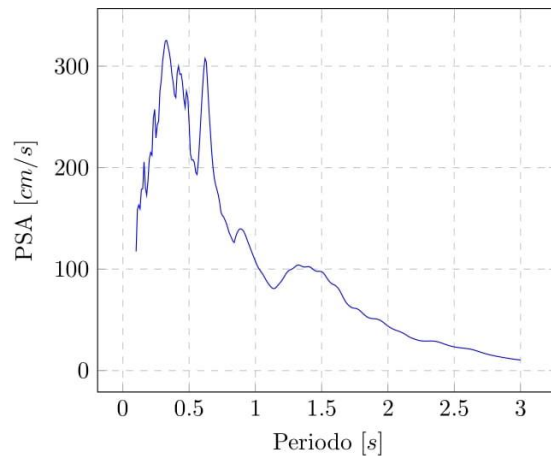


Figura 1.4: Acelerograma del registro sísmico

Si se simula la respuesta de varias estructuras de un GDL usando este acelerograma, y después de cada simulación dibujamos un punto en una gráfica, en la que en el eje de las ordenadas se encuentren los valores obtenidos de respuesta máxima y en el eje de las abscisas el correspondiente periodo de la estructura de un GDL para la que se obtuvo la respuesta máxima, obtenemos una gráfica como la que se muestra en la figura 1.5a.

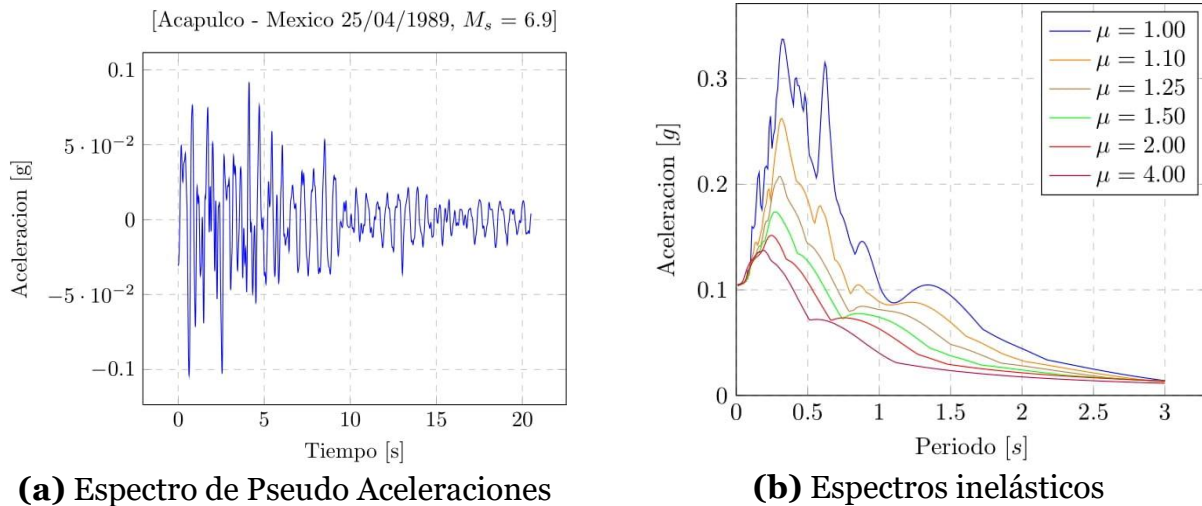


Figura 1.5: Espectros sísmicos

Este espectro de pseudo aceleraciones se obtuvo asumiendo un amortiguamiento del 5 %. En diseño sísmico se conoce como espectro sísmico elástico, debido a que se realiza suponiendo que no hay daño estructural.

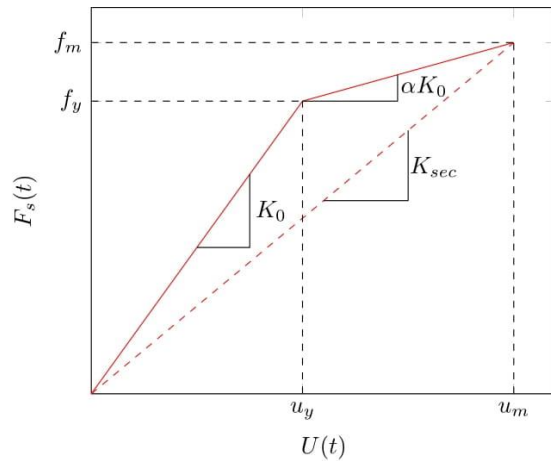
En este espectro se puede notar que los valores más altos de respuesta se dan para estructuras de periodo corto, de aquí surge el interés en controlar el periodo de las estructuras ya que modificando su periodo de vibración podemos modificar su respuesta sísmica.

Adicionalmente, si se consideran los efectos del daño estructural a la respuesta sísmica, se obtiene un espectro como el de la figura 1.5b. En este se muestran distintas curvas correspondientes a diferentes valores de ductilidad μ .

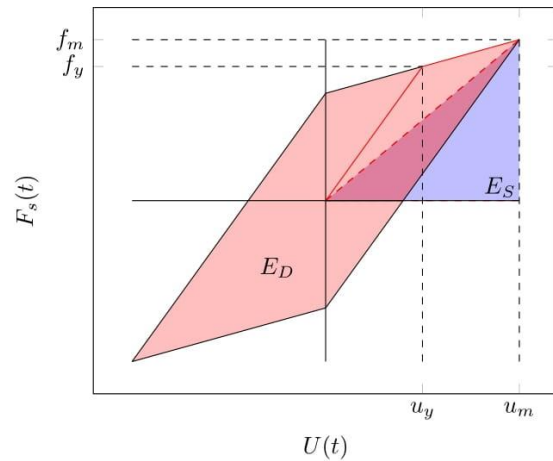
Este tipo de espectro se conoce como inelástico debido a que consideran una relación de esfuerzo deformación no lineal como la que se muestra en la figura 1.6.

Se puede apreciar en este tipo de espectros que entre más ductilidad se le permita desarrollar a la estructura, más disminuye la respuesta máxima.

Sin embargo, esta reducción depende del daño estructural, en la forma de la fluencia y/o agrietamiento de los materiales para generar amortiguamiento. Todas las implementaciones modernas de aislamiento sísmico cuentan con mecanismos para generar amortiguamiento y eliminar la necesidad de depender en el daño estructural como medio de control de la respuesta sísmica.



(a) Relación bilineal esfuerzo-deformación



(b) Amortiguamiento por histéresis y viscoso

Figura 1.6: Propiedades inelásticas del modelo de 1 GDL

1.2. Sistemas de aislamiento sísmico

1.2.1. Introducción

Todos los sistemas de aislamiento moderno cuentan las cinco características fundamentales para controlar la respuesta estructural de un sistema antes, durante y después de sismo. Por ejemplo, los sistemas de deslizamiento cuentan con dos superficies cóncavas; la inferior transmite la carga al suelo, y la superior se encuentra simplemente apoyada sobre la inferior. Debido a la fricción entre ambas superficies y la gran descarga que soportan, el dispositivo es prácticamente fijo ante excitaciones leves, y antes excitaciones fuertes deslizan libremente, dotando al sistema de poca rigidez lateral, disipando energía durante su movimiento debido a la fricción ente las superficies, y teniendo una fuerza de restauración debido a la curvatura de la superficie.

A continuación, se describen brevemente las características y propiedades más relevantes de los sistemas más populares de aislamiento sísmico.

1.2.2. Sistemas elastoméricos

El más simple de estos sistemas, es el apoyo de elastómero de neopreno. Este es usado ampliamente en vigas simplemente apoyadas de puentes desde hace más de 100 años. Los dispositivos se colocan en los soportes de las vigas. Así, permiten al puente deslizarse cuando este sufre expansión o contracción térmica.

Una versión más refinada de este tipo de dispositivos se construye intercalando placas delgadas de acero en la matriz de neopreno. El resultado es un apoyo con poca rigidez lateral debido al neopreno y mucha rigidez vertical gracias a las placas de acero que limitan la deformación del neopreno debido a la carga vertical. Sin embargo, este tipo de apoyo no provee amortiguamiento considerable, por lo que por lo general se introducen en el dispositivo barras de plomo, como se muestra en la figura 1.7. Esto tiene la ventaja de que además de dotar al dispositivo de un mecanismo para disipar energía por medio de la fluencia del plomo, aporta rigidez suficiente para resistir ráfagas de viento. Por lo que actualmente es también ampliamente usado en edificios.



Figura 1.7: Corte transversal de un apoyo elastómero con núcleo de plomo. (Per F., 2022).

Actualmente existen dispositivos de este tipo que por medio de modificar las propiedades de la goma logran disipar incluso más energía.

1.2.3. Sistemas de deslizamiento

Este tipo de dispositivos conocidos como péndulos de fricción cuentan con mucha rigidez vertical debido a que los apoyos están contruidos con materiales rígidos como el acero, y tienen poca rigidez horizontal debido a que las superficies de contacto están finamente pulidas y recubiertas de materiales como el teflón. Estos dispositivos tienen la ventaja de que la fricción estática los hace rígidos ante movimientos de poca intensidad, pero cuentan con poca rigidez dinámica una vez que se presenta un sismo de gran intensidad, que los mueve de su posición original. Una vez desplazados de su posición original cuentan con una fuerza restauradora debido a la curvatura de las superficies y el peso que soportan, y disipan energía debido a la fricción entre sus superficies. Un ejemplo de este tipo de dispositivos se muestra en la figura 1.8

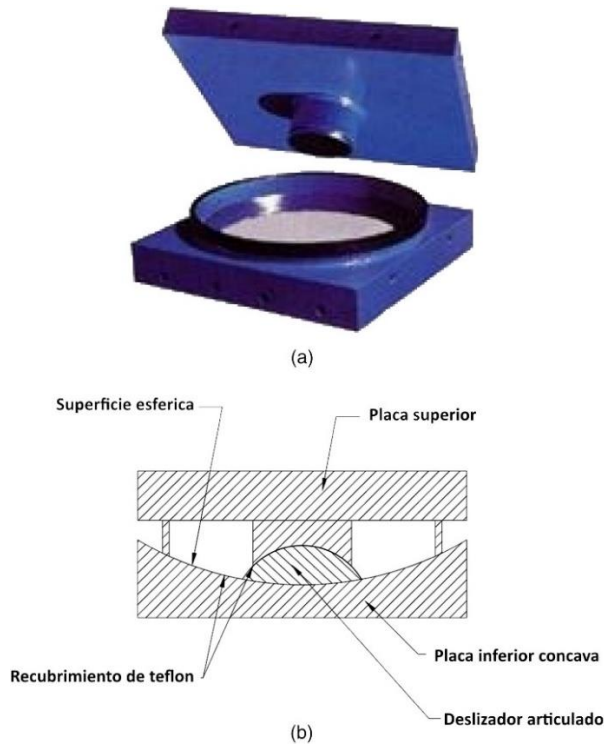


Figura 1.8: Aislador de péndulo simple. (Keri L. y Nhan D., 2016).

Actualmente existe una variante más avanzada de este tipo de dispositivos, conocido como péndulo triple de fricción, que cuenta con 4 superficies de deslizamiento en lugar de una como en el péndulo simple. Este dispositivo es considerablemente más avanzado y permite un mayor control de la respuesta estructural variando las propiedades de cada una de las superficies. Un ejemplo de este tipo de dispositivos se muestra en la figura 1.9

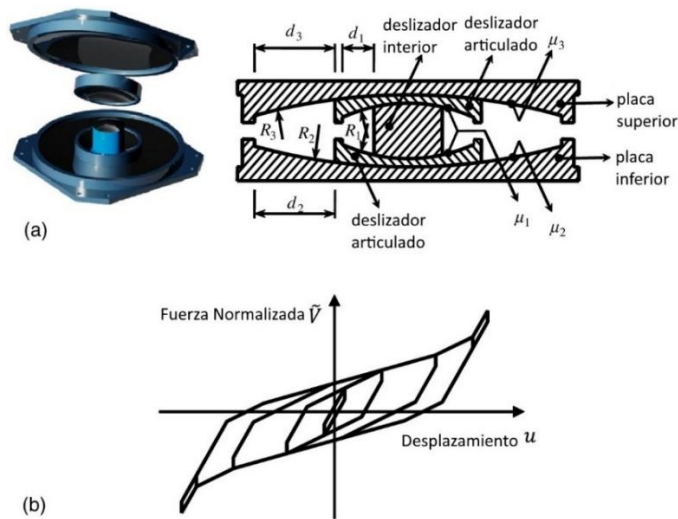


Figura 1.9: Aislador de péndulo triple. (Keri L. y Nhan D., 2016).

1.2.4. Sistemas activos

Los sistemas discutidos hasta este momento son conocidos como sistemas pasivos, esto debido a que una vez instalados deben realizar su función sin intervención exterior. Actualmente existen sistemas activos, estos son sistemas controlados por computadora que al detectar movimiento compensan con diversos mecanismos para mantener a las estructuras inmóviles. Sin embargo, estos siguen en desarrollo y no tienen amplia aceptación por parte de los inversores debido a su alto precio y por parte de los ingenieros debido a que su implementación todavía no es muy amplia y que se necesita un 100% de confiabilidad, ya que no deben presentar fallas mecánicas y no debe de faltar energía para su operación.

1.3. Efectividad del aislamiento sísmico

Hoy en día, la efectividad del aislamiento sísmico ha sido probada de forma rigurosa. Primero teóricamente mediante modelos simples que poco a poco se fueron haciendo más robustos. Posteriormente, mediante el uso de modelos computacionales, los cuales son capaces de reproducir el comportamiento no lineal que presentan este tipo de dispositivos debido a la introducción de mecanismos como la fricción y/o la fluencia de algún material. Luego por medio de pruebas físicas en laboratorio, para comprobar que el desempeño va de acuerdo con las especificaciones de diseño.

Y finalmente por medio del testimonio del desempeño de estructuras construidas haciendo uso de estos dispositivos. Por lo que actualmente se tiene confianza en la implementación de estos medios de control de la respuesta estructural.

1.3.1. Modelos computacionales

Actualmente para el diseño de los sistemas estructurales con aislamiento de base se puede hacer uso de modelos computacionales. Mediante un análisis sísmico modal espectral y posteriormente para su revisión la simulación del sistema ante diversos acelerogramas mediante análisis no lineal tiempo historia. Esto con el fin de confirmar que se obtiene el desempeño deseado ante diversas condiciones de demanda.

Actualmente estos modelos se hacen muy detallados, como el que se puede apreciar en la figura 1.10, y aunque son complejos, predicen el comportamiento dinámico de manera precisa, por lo que se tiene confianza en sus resultados.

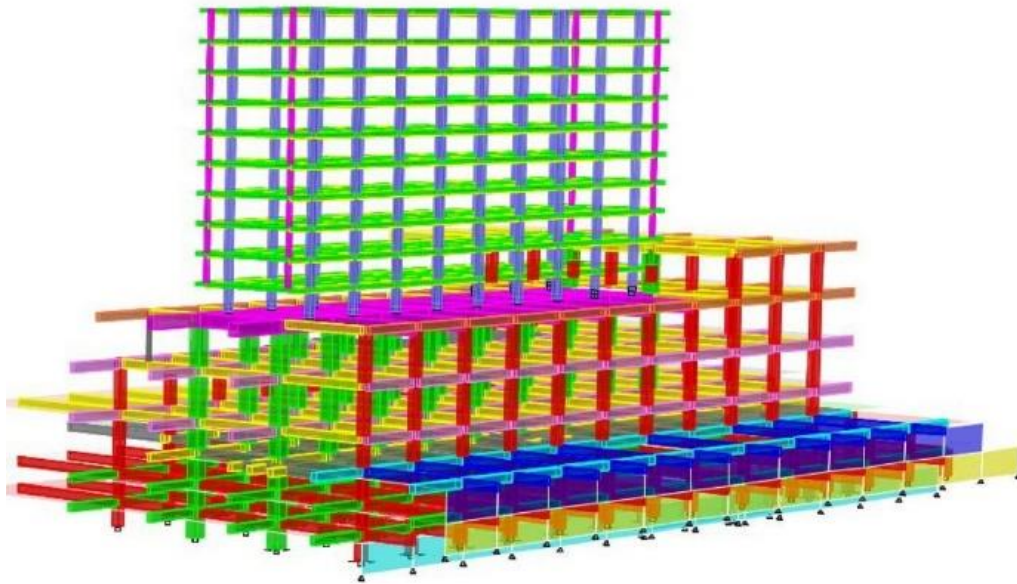


Figura 1.10: Modelo Computacional del Hotel Vía Vallejo, Ciudad de México.

1.3.2. Pruebas físicas

Otro motivo por el que actualmente se tiene confianza en los dispositivos de aislamiento, son las pruebas de laboratorio que soportan el desempeño de los dispositivos.

Estas pruebas en sus inicios fueron difíciles de llevar a cabo debido a que había que replicar las altas cargas verticales que son típicas sobre los dispositivos de aislamiento y las solicitaciones horizontales de manera simultánea. Actualmente existen instalaciones para realizar pruebas muy avanzadas como las que se pueden apreciar en la figura 1.11. Incluso se han podido crear pruebas de laboratorio en las que se hace vibrar una estructura completa con su contenido, por lo que se ha podido medir en un ambiente controlado, cómo el aislamiento sísmico favorece a las estructuras y lo que se encuentre en su interior.

De estos ensayos en laboratorio, también se ha comprobado que el desempeño del sistema de aislamiento es altamente dependiente del contenido de frecuencias de los sismos. Por lo que en el caso de los análisis de historia-tiempo de los modelos computacionales, se recomienda usar una amplia gama de acelerogramas con diferente contenido de frecuencias. Con ello tener información sobre el desempeño del sistema de aislamiento ante una gama más amplia de solicitaciones sísmicas. (Charleson y Guisasola, 2017)



Figura 1.11: Instalaciones de pruebas de dispositivos de modificación de la respuesta sísmica de Caltrans (izquierda) y la superficie cóncava de un péndulo de fricción grande (derecha).

1.3.3. Mediciones y observaciones durante sismos

Aunque la teoría, los modelos computacionales y las pruebas en laboratorios demuestran la efectividad de los sistemas de aislamiento, es necesario tener evidencia documental de estos actuando durante eventos sísmicos de gran intensidad. Entre las pruebas realizadas para medir la efectividad del aislamiento, se ha comparado el desempeño de edificaciones cercanas de características similares a las edificaciones aisladas, o comparado estas con edificaciones con otras características distintas para ver como estas variaciones contrastan con las estructuras aisladas. También se han instrumentado las estructuras aisladas para medir las aceleraciones de entrepiso y sus distorsiones.

Actualmente existe amplia evidencia de pruebas de este tipo a estructuras aisladas, y aunque en algunas los resultados obtenidos hasta el momento no son tan impresionantes obteniendo factores de reducción de 1/2, en algunos casos se han obtenido factores de reducción de la respuesta de 1/10, como en el caso de una estructura de 6 niveles de concreto reforzado durante el sismo de Kobe de 1995, el cual tuvo una magnitud de momento M_w de 7.1. (Charleson y Guisasola, 2017)

1.4. Beneficios y limitaciones del aislamiento sísmico

Aunque actualmente gracias a la teoría, los modelos computacionales, las pruebas de laboratorio, y la evidencia documental, no se tiene duda sobre la efectividad del aislamiento sísmico. Sigue habiendo importantes complicaciones por lo que su adopción no ha podido ser más extensa.

A continuación, se mencionarán brevemente los potenciales beneficios de usar un sistema de aislamiento y las limitaciones que presentan estos, por lo que podrían no ser una opción viable en ciertos proyectos estructurales.

1.4.1. Beneficios antes de un sismo

Los beneficios previos a un sismo en las estructuras aisladas son en su mayoría de carácter arquitectónico, ya que, al eliminar la necesidad de diseñar estructuras dúctiles, se pueden relajar algunos criterios de diseño como el de la columna fuerte - viga débil, o se pueden tener estructuras con planta baja débil, sin que esto represente un riesgo de desarrollar articulaciones plásticas en las columnas. En general se pueden tener estructuras menos robustas comparadas con una estructura de base fija.

Otro beneficio que no es de carácter arquitectónico es que las personas que se encuentren en su interior suelen sentir más seguridad ante la ocurrencia de un sismo al saber que la estructura en la que se encuentran está aislada en su base.

1.4.2. Beneficios durante y después de un sismo

Los beneficios durante un sismo son que, al reducirse las distorsiones laterales, los ocupantes de la estructura se encuentran más calmados durante el evento sísmico, se presenta menor daño o daño nulo a los bienes en su interior. Por este motivo los usuarios informados, prefieren las estructuras con aislamiento en su base.

Posterior al sismo, las personas pueden continuar sus actividades en el interior de las estructuras aisladas, y al tener poco o no haber daño estructural, la operación de la edificación puede mantenerse casi ininterrumpida.

1.4.3. Limitaciones del aislamiento sísmico

Aun con todas las bondades que presentan los sistemas de aislamiento, estos tienen importantes limitaciones; a continuación, se comentan algunas de ellas.

Prácticamente ningún sistema de aislamiento resiste tensiones, por lo que es importante revisar que estas no se presenten ya que pueden dañar los dispositivos, perder eficacia y poner en peligro a la estructura que soportan.

Algunas empresas especializadas en la fabricación de estos dispositivos de aislamiento sísmico, fabrican un dispositivo representativo y a este le realizan pruebas. Ya que el costo de probar todos los dispositivos sería muy elevado.

Actualmente todavía existe discusión sobre qué elementos del aislamiento sísmico son beneficiosos y cuáles no. Por ejemplo, algunos autores advierten que valores altos de amortiguamiento disminuyen el desplazamiento en la base, pero aumentan las aceleraciones y las distorsiones de entrepiso (Naeim F. y Kelly J., 1999). Mientras que otros no están de acuerdo y recomiendan usar valores altos de amortiguamiento.

Capítulo 2

Aislamiento sísmico, de la teoría a la práctica

2.1. Aspectos de diseño

Para hacer del aislamiento sísmico una realidad, es necesario considerar muchos aspectos de diseño arquitectónico y estructural, que no se contemplan en una estructura tradicional.

A continuación, se mencionarán algunos de estos aspectos; sin embargo, hay que tener en cuenta que estos pueden o no aplicar a ciertas estructuras y sus correspondientes dispositivos de aislamiento debido a la complejidad de su implementación

2.1.1. Diseño arquitectónico

Aunque el uso de aislamiento sísmico puede darle más libertad al diseño arquitectónico permitiendo tener estructuras más irregulares, esbeltas, etc. También conlleva ciertas limitaciones debido a que para empezar se necesita tener una estrecha comunicación entre el equipo de diseño arquitectónico, estructural y el cliente. Por lo que se deben llevar a cabo numerosas reuniones y en estas discutir varias cuestiones entre las que podríamos destacar las siguientes:

1. Dónde se encontrará el plano de aislamiento. Esto es importante de decidir al inicio ya que en el plano donde se ubique el sistema de aislamiento se deben de hacer las adecuaciones necesarias para permitir que la estructura aislada pueda moverse libremente, incluyendo todas las instalaciones que también están aisladas.
2. Cómo se implementará el aislamiento en dicho plano. A la fecha existen varias estructuras con implementaciones variadas del aislamiento. En algunos casos se ha optado por sólo aislar una parte de la planta, dejando el resto de la estructura sin aislar y colocando instalaciones que permiten el tránsito interno y que están pensadas para fallar

durante un evento sísmico para posteriormente ser reemplazadas y continuar con el funcionamiento normal de las instalaciones.

3. Cuál será el desplazamiento de diseño. Conocer este desplazamiento es muy importante ya que tener grandes desplazamientos de diseño puede implicar perder una cantidad importante de área útil en el plano de aislamiento. En lugares con altos costos por metro cuadrado, como en las grandes ciudades, perder esta área puede representar una pérdida económica inaceptable.

4. Cómo se solucionarán necesidades arquitectónicas y de seguridad. Como lo son el método con el que se impide que entre y acumule agua o basura en la interfaz de aislamiento, el espacio para permitir que un técnico pueda pasar a hacer inspecciones y labores de mantenimiento, y la colocación de señalizaciones que indiquen que la estructura aislada puede representar un riesgo para alguien que se encuentre próximo al plano de aislamiento. En la figura 2.1 se puede apreciar un detalle típico del plano de aislamiento.

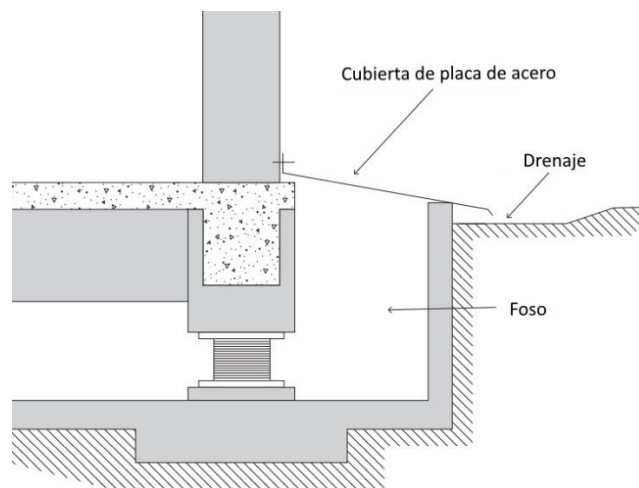


Figura 2.1: Detalle típico del perímetro del plano de aislamiento. (Charleson y Guisasola, 2017).

2.1.2. Ingeniería estructural

Uno de los mayores retos para el ingeniero estructurista con respecto al aislamiento sísmico, son las normas y reglamentos de diseño que algunos casos son considerados demasiado conservadores (Charleson y Guisasola, 2017). También la falta de lineamientos que contemplen las estructuras aisladas. En países donde no se tiene una normativa adecuada, se ha optado por hacer uso de normas extranjeras; sin embargo, el uso de estas conlleva complicaciones debido a que en muchos casos la norma extranjera cuenta con hipótesis locales implícitas. Por lo que el ingeniero estructurista a cargo debe de tener

amplio conocimiento tanto de normas locales como de las extranjeras, de los fenómenos y su concepción como sistemas de carga.

Adicionalmente; el diseño, análisis y verificación por medio de modelos computacionales, requiere el uso de análisis tiempo-historia no lineales, que además de requerir considerablemente más tiempo para recopilar la información para definir el modelo, estos también requieren de una computadora con más potencia de procesamiento para reducir los tiempos de estudio.

También hay que realizar el diseño de más componentes estructurales, como es el caso de los dispositivos de aislamiento, sus soportes, el sistema de piso de la estructura aislada, la cimentación adecuada para los soportes, detalles de separación y movimiento, muros de contención, etc. Por lo que, el proyecto estructural es más caro que el de una estructura de base fija.

Todo esto conlleva a que también sean necesarias múltiples juntas con el fabricante de los dispositivos, consultores externos, el equipo arquitectónico, el cliente, etc.

2.2. Aspectos económicos

2.2.1. Costos constructivos

Los costos a causa del uso de aislamiento sísmicos son diversos. Entre estos se encuentran el poder usar una menor área del predio en que se va a construir, el detalle y realización de las obras complementarias necesarias, como muros de contención de las estructuras con sótanos, las cubiertas que ocultan la separación entre la estructura y el suelo, la solución al uso de elevadores como la que se muestra en la figura 2.2, las estructuras flexibles necesarias para desligar instalaciones eléctricas, hidráulicas, etc.

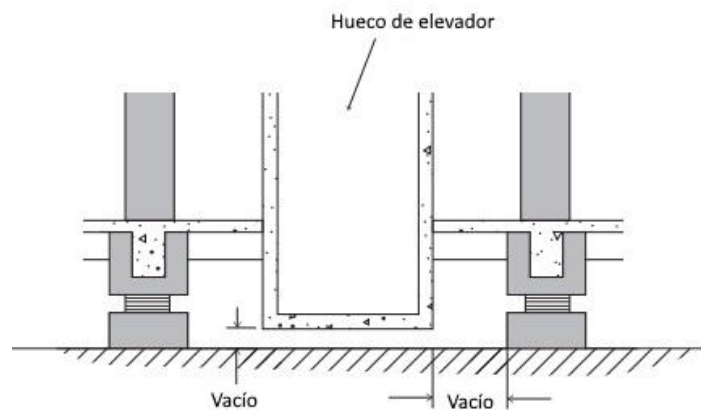


Figura 2.2: Corte transversal al plano de aislamiento donde se ve que el hueco del ascensor cuelga de la estructura aislada. (Charleson y Guisasola, 2017).

El costo de los dispositivos para aislamiento de base por sí mismos ya son elevados. Se encuentran diversos reportes en los que se menciona que el costo de los dispositivos representó desde el 2 % hasta el 27 % del costo total de construcción.

La losa adicional necesaria sobre el nivel del aislamiento en algunos se reporta que incrementa el costo de construcción un 36 % (Charleson y Guisasola, 2017)

2.2.2. Economía pre-sismo

Aunque los costos del aislamiento sísmico pueden ser considerablemente mayores, también se presentan ventajas económicas antes de que se presente un evento sísmico.

Algunas de estas ventajas son que, en el caso de las estructuras con uso habitacional en zonas sísmicas, los clientes están dispuestos a pagar un más de lo que pagarían si la estructura no contara con aislamiento sísmico. Esto como ya se mencionó es debido a que les ayuda a reducir el temor de que ocurrirá un evento sísmico que los ponga en peligro y a que sus pertenencias se encontrarán más seguras durante dicho evento. También se reducen las pólizas de seguro de una estructura aislada.

Adicionalmente se presentan diversas desventajas constructivas que afectan los tiempos y el uso de materiales, lo que puede hacer menos rentables las estructuras aisladas. Sin embargo, es complicado hacer una comparativa costo-beneficio de una estructura aislada, debido a que esta puede terminar siendo muy distinta al mismo proyecto, pero sin aislamiento sísmico.

2.2.3. Economía post-sismo

Los beneficios económicos más significativos de una estructura aislada se hacen evidentes durante y después del evento sísmico. Esto debido a que al encontrarse en buen estado los bienes en su interior, se puede continuar la operación del inmueble de forma casi ininterrumpida. Aunque hay aseguradoras que ofrecen seguros por interrupción de la operación del inmueble, el evitar esta es muy atractivo tanto para el dueño como para sus ocupantes, ya que, en muchos casos, si la estructura presenta daños, las autoridades restringen el uso hasta que las instalaciones sean analizadas y se emita un dictamen elaborado por un perito estructurista, lo cual puede tomar varios días o hasta semanas.

Entre las estructuras más beneficiadas del aislamiento de base se encuentran edificios antiguos y/o históricos, fábricas de microprocesadores, hospitales y plantas nucleares, ya que la interrupción de operación de estos inmuebles puede llegar a ser costosa o inaceptable.

En el caso de las fábricas de procesadores, estas operan las 24 horas del día, los 7 días de la semana, esto con el fin de maximizar las utilidades debido a que el costo de producción

es muy alto. Por lo que, los costos adicionales debido al aislamiento sísmico en este tipo de estructuras, puede resultar ser insignificante comparado con las pérdidas económicas de detener su operación.

2.3. Construcción y mantenimiento

Aunque las estructuras sin aislar y las aisladas son similares en su manera de ser construidas y ambas requieren de mantenimiento periódicamente, hay algunos aspectos a tener en especial consideración.

2.3.1. Construcción

El primer aspecto es el de realizar las reuniones que sean necesarias para explicarle a todo el personal involucrado cómo funciona el sistema de aislamiento, el desempeño estructural buscado y todas las adecuaciones necesarias para implementar el sistema de aislamiento.

Otro aspecto es el de contemplar el tiempo de manufactura de los dispositivos el cual se recomienda estimar de 3 a 6 meses. Esto con el fin de evitar atrasos y/o la necesidad de colocar apoyos provisionales.

Por último, para poder darle mantenimiento al sistema de aislamiento, el ingeniero estructurista debe de proveer un manual del sistema de aislamiento con detalles de cómo se construyó para ser usado como referencia en futuras revisiones.

2.3.2. Mantenimiento

En el aspecto del mantenimiento se debe de contemplar contar con una rutina que atienda peligros al sistema de aislamiento provocados por la naturaleza, esto debido a que la exposición del sistema de aislamiento al aire y el agua lo van deteriorando. En el caso de los aisladores de fricción, la superficie se puede hacer pegajosa, en los elastómeros la goma se hace rígida con el tiempo o el núcleo de plomo puede fracturarse y requerir ser reemplazado. También se deben prever los peligros provocados por el humano, como sería el de impedir el movimiento libre de la estructura debido a un mal proceso constructivo o dejar acumular basura y por tanto impedir que funcione adecuadamente el aislamiento.

2.4. Características mecánicas y modelado de aislador

2.4.1. Características mecánicas de los sistemas de péndulo friccionante

Este es un dispositivo simple, compuesto por un apoyo articulado sobre el que se coloca una superficie deslizante curva con bajos coeficientes de fricción estática (μ_s) y dinámica (μ_d). Lo que dota al dispositivo de poca rigidez lateral y de alto amortiguamiento debido a

la fricción. La geometría controla el comportamiento del aislador, ya que gracias a esta el dispositivo es capaz de regresar a su posición inicial como en la figura 2.3a, después de estar en la condición sísmica que se muestra en la figura 2.3b.

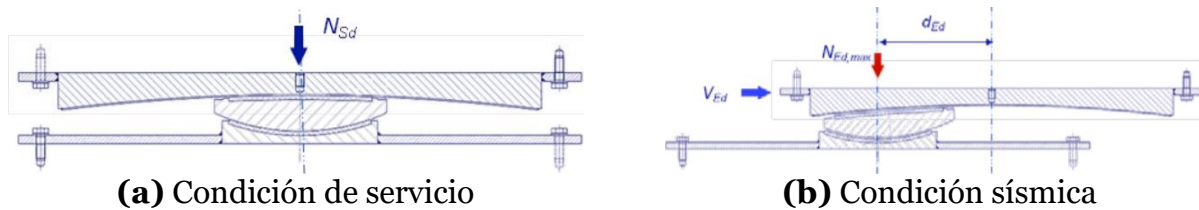


Figura 2.3: Condiciones del péndulo friccionante. (Mageba, 2023)

Para iniciar el movimiento se debe vencer la fuerza de fricción entre las superficies, conocida como fuerza de fluencia f_y , por lo que el aislador se puede considerar infinitamente rígido para fuerzas menores. Debido a esto, la rigidez posterior a la fluencia y la rigidez horizontal son iguales y se obtienen como

$$K_H = \frac{W}{R} \quad (2.1)$$

donde W es la carga axial sobre el aislador y R es el radio de curvatura de la superficie deslizante, con lo que el péndulo tendrá un periodo de vibración

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (2.2)$$

en la figura 2.4 se muestra una curva de histéresis típica de estos dispositivos, en esta podemos notar que, aunque el dispositivo tiene un comportamiento muy lineal una vez que se vence la fuerza de fricción estática, este es no lineal debido a la rigidez y fricción variable del sistema.

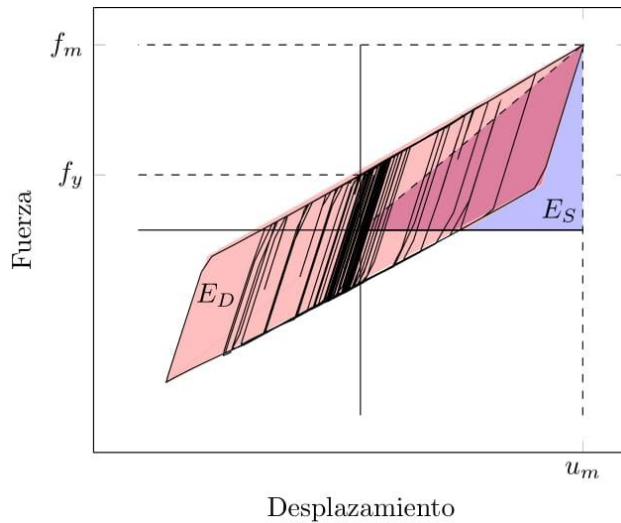


Figura 2.4: Curva de histéresis típica del péndulo friccionante

Por lo que, con el fin de simplificar el análisis, se calculan las propiedades elásticas equivalentes del sistema, que son la rigidez secante K_{sec} y el amortiguamiento equivalente ζ_{eq} .

2.4.2. Rigidez secante

Para obtener la rigidez secante o equivalente necesitamos f_m , que podemos obtener de la figura 2.4 como

$$f_m = \frac{W}{R} u_m + \mu_s W \quad (2.3)$$

y dividiendo 2.3 entre u_m obtenemos que

$$K_{sec} = \frac{W}{R} + \frac{\mu_s W}{u_m} \quad (2.4)$$

2.4.3. Amortiguamiento equivalente

Sustituyendo 2.4 en

$$E_S = \frac{K_{sec}}{2} u_m^2 \quad (2.5)$$

y simplificando obtenemos que

$$E_S = \frac{1}{2}((u_m/R) + \mu_s)Wu_m \quad (2.6)$$

y a su vez

$$E_D = 4\mu_s Wu_m \quad (2.7)$$

por lo que sustituyendo 2.6 y 2.7 en

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} \quad (2.8)$$

y simplificando obtenemos que

$$\zeta_{eq} = \frac{2}{\pi} \frac{\mu_s}{(\mu_m/R) + \mu_s} \quad (2.9)$$

donde la rigidez secante, K_{sec} (2.4) y el amortiguamiento equivalente, ζ_{eq} (2.9) son los únicos datos que necesitamos para analizar una estructura con este tipo de aisladores¹

¹Para más detalles sobre el péndulo friccionante referirse al trabajo de Naeim F, y Kelly J. M. (1999)

Capítulo 3

Aplicación práctica de aislamiento de péndulo friccionante

Para evaluar las ventajas del aislamiento de manera cuantitativa, se realizó una comparativa de la respuesta estructural de un sistema con base fija, y de otro con aislamiento de base. Para ello, se dimensionó la estructura de base fija, como se muestra a continuación.

3.1. Descripción del edificio

La planta del inmueble en estudio se puede apreciar en la figura 3.1. Es un edificio de seis pisos, integrados por la cimentación, planta baja y cuatro entrepisos. Las alturas tipo de los entrepisos son de 3.6 m. El área de cada nivel es de aproximadamente 744 m², resultando en un área total construida de 4,464 m². Las dimensiones en planta son 41 m de largo y 15 m de ancho. Su planta es irregular conformado por ejes no ortogonales. Sus tableros principales son cuadrados de 6 x 6 m.

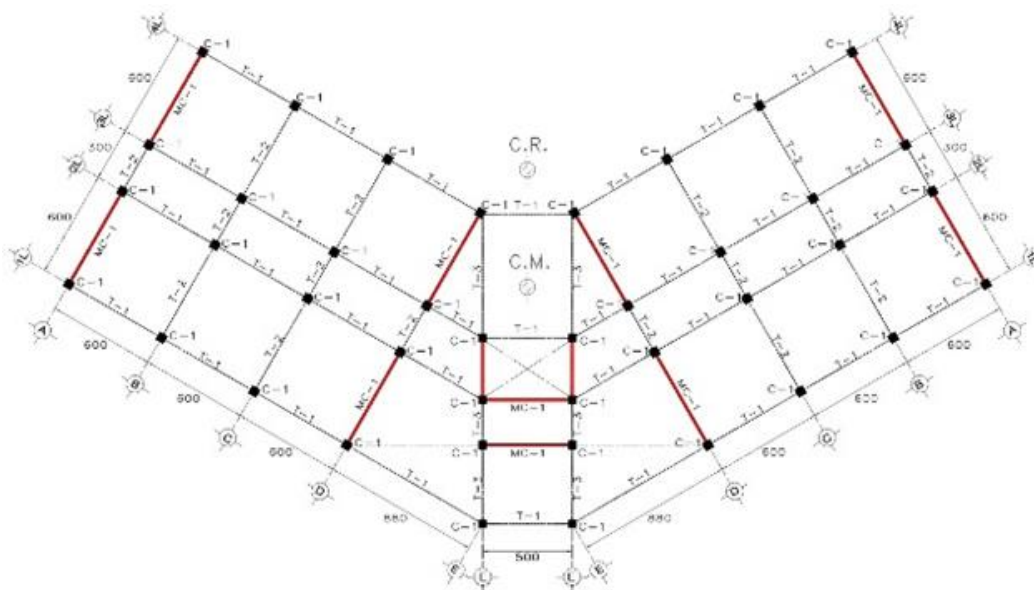


Figura 3.1: Planta tipo

de su centro de rigideces. Para ilustrar cómo dichas distribuciones originan este fenómeno, se utilizan los siguientes puntos geométricos.

1. El centro de masas (CM), definido como el punto donde, la resultante de las fuerzas gravitatorias ejercidas por todos los cuerpos del sistema se anula. O, dicho de otra forma, si quisiéramos balancear el nivel sobre una columna, esta debería ir en el centro de masas.

2. El centro de rigideces (CR), definido como el punto alrededor del cual las rigideces del sistema están uniformemente distribuidas, por lo que si se aplicara una fuerza cortante en este punto el nivel se trasladaría sin rotar.

Las estructuras se comportan de manera análoga a sistemas masa-rigidez de uno o más grados de libertad (GDL's). En dichos sistemas las fuerzas sísmicas actúan en el CM, por lo que, si este no coincide con el CR, la estructura rotará a consecuencia de la excentricidad o distancia entre el CR y el CM. Esta es la llamada torsión inherente o estática.

En la figura 3.3 se señalan dichos centros, y podemos notar que convergen en el sentido horizontal, y divergen en el sentido vertical, por lo que la estructura presentará torsión estática en este sentido.

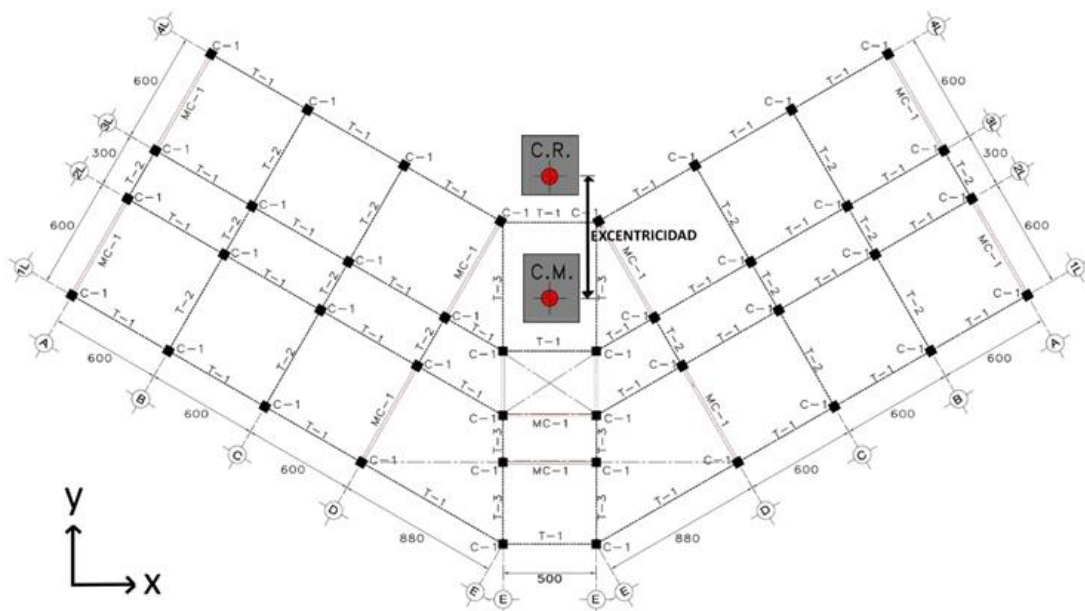


Figura 3.3: Centro de masa y Centro de rigidez en planta tipo

3.2.3. Torsión accidental

Aún en estructuras en las que el CM y el CR coinciden, se puede presentar torsión sísmica por varios fenómenos, siendo algunos de ellos los siguientes:

1. Que la propagación de las ondas sísmicas no sea uniforme, lo cual puede darse como resultado de que el suelo no sea un medio homogéneo e isótropo.
2. Que haya una componente rotacional en el movimiento del suelo.
3. La incertidumbre en la rigidez final de los elementos estructurales, debido a desviaciones durante su proceso constructivo.
4. Concentración de fuerzas sísmicas, ya que con los métodos de análisis lineales se desprecia el cambio de la rigidez y/o masa de los elementos estructurales al dañarse. Por lo que el CR puede cambiar de posición durante un evento sísmico.
5. Distribución no uniforme de carga viva, ya que, al desconocer la distribución de ésta, el CM solo se puede aproximar. Incluso puede ocurrir que el mismo evento sísmico mueva los objetos dentro de la estructura.

3.2.4. Condiciones de regularidad estructural

Debido a lo mencionado en las secciones 3.2.2 y 3.2.3, los códigos y normas de diseño sísmico prevén los efectos de la torsión estática y accidental, al requerir diseñar las estructuras para condiciones sísmicas más severas, por lo que las NTC-Sismo, 2017, requieren la revisión de las siguientes condiciones.

1. Los diferentes muros, marcos y demás sistemas sismo-resistentes verticales son sensiblemente paralelos a los ejes ortogonales principales del edificio. Se considera que un plano o elemento sismo-resistente es sensiblemente paralelo a uno de los ejes ortogonales cuando el ángulo que forma en planta con respecto a dicho eje no excede 15 grados.

En la estructura estudiada el ángulo que forman los marcos con respecto a los ejes ortogonales es de 30 grados, por lo tanto, no cumple.

2. La relación de su altura a la dimensión menor de su base no es mayor que cuatro.

$$\frac{h}{b} = \frac{18.00m}{17.32m} = 1.04 < 4.00, \text{ por lo tanto, sí cumple}$$

3. La relación de largo a ancho de la base no es mayor que cuatro.

$$\frac{l}{b} = \frac{51.45m}{17.32m} = 2.97 < 4.00, \text{ por lo tanto, sí cumple}$$

4. En planta no tiene entrantes ni salientes de dimensiones mayores que 20 por ciento de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección en que se considera el entrante o saliente.

Debido a la forma altamente arqueada de la planta, no cumple.

5. Cada nivel tiene un sistema de piso cuya rigidez y resistencia en su plano satisfacen lo especificado en la sección 2.7 de las NTC-Sismo, 2017, para un diafragma rígido.

Se propondrá un sistema de piso adecuado, por lo tanto, sí cumple.

6. El sistema de piso no tiene aberturas que en algún nivel excedan 20 por ciento de su área en planta en dicho nivel, y las áreas huecas no difieren en posición de un piso a otro. Se exime de este requisito la azotea de la construcción.

$$\frac{A_{abertura}}{A_{total}} = \frac{18.25m^2}{761.16m^2} = 0.024 < 0.20, \text{ por lo tanto, sí cumple}$$

7. El peso de cada nivel, incluyendo la carga viva que debe considerarse para diseño sísmico, no es mayor que 120 por ciento del correspondiente al piso inmediato inferior.

Todos los pisos tendrán las mismas cargas con excepción de la azotea, donde se espera tener menos carga que en pisos inferiores, por lo tanto, sí cumple.

8. En cada dirección, ningún piso tiene una dimensión en planta mayor que 110 por ciento de la del piso inmediato inferior. Además, ningún piso tiene una dimensión en planta mayor que 125 por ciento de la menor de las dimensiones de los pisos inferiores en la misma dirección.

Todos los pisos tienen las mismas dimensiones en planta, por lo tanto, sí cumple.

9. Todas las columnas están restringidas en todos los pisos en las dos direcciones de análisis por diafragmas horizontales o por vigas. Por consiguiente, ninguna columna pasa a través de un piso sin estar ligada con él.

Sí cumple.

10. Todas las columnas de cada entrepiso tienen la misma altura, aunque esta pueda variar de un piso a otro. Se exime de este requisito al último entrepiso de la construcción.

Sí cumple.

11. La rigidez lateral de ningún entrepiso difiere en más de 20 por ciento de la del entrepiso inmediatamente inferior. El último entrepiso queda excluido de este requisito.

Las dimensiones de las columnas y muros serán constantes a toda la altura, por lo tanto, sí cumple.

12. En ningún entrepiso el desplazamiento lateral de algún punto de la planta excede en más de 20 por ciento el desplazamiento lateral promedio de los extremos de esta.

Sí cumple.

Las NTC-Sismo, 2017, consideran irregulares a todas las estructuras que no cumplen la condición 5, 6, 9, 10, 11 o 12. O si no cumplen dos o más de las condiciones 1, 2, 3, 4, 7 y 8. Debido a que no se cumplen las condiciones 1 y 4, se clasifica a la estructura en cuestión como irregular.

3.3. Estructuración

El sistema de cimentación consiste en una losa de cimentación, rigidizada con contratrabes de concreto reforzado.

Los entrepisos y la azotea se conforman por columnas y trabes de concreto reforzado que soporta el sistema de piso que consiste en losas macizas perimetralmente apoyadas, coladas monolíticamente con sus apoyos.

En los ejes cabeceros de la edificación se cuenta con muros de cortante de concreto, como se puede apreciar en la figura 3.1, con objeto de restringir los desplazamientos laterales.

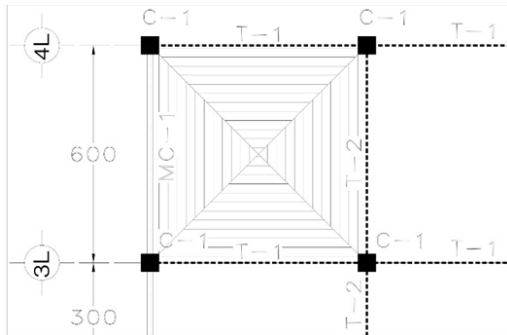
3.3.1. Predimensionamiento de losas

Para dimensionar las losas se usaron las recomendaciones de las secciones 3.3 y 7.5 de las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (2017). Se propuso la resistencia del concreto a compresión (f'_c), esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo (f_y), y esfuerzo en el acero de refuerzo en condiciones de servicio (f_s), que se muestran en la tabla 3.1.

Propiedad	Valor	Unidad
f'_c	250	kg/cm ²
f_y	4,200	kg/cm ²
f_s	2,520	kg/cm ²
f_s se tomó igual a $0.6f_y$		

Tabla 3.1: Propiedades de los materiales de las losas

De acuerdo con la sección 7.5.1 f_s puede suponerse igual a $0.6f_y$. Para calcular el refuerzo y la resistencia de la losa se necesita conocer las dimensiones de ésta, por lo que para fines del predimensionamiento se eligió el tablero que se muestra en la figura 3.4a, ya que se consideró uno de los más críticos debido a que cubre una gran área, y porque al encontrarse en la esquina de la edificación tiene dos lados discontinuos, lo que provoca que haya mayores momentos, de los que tendría si el tablero fuese continuo en los cuatro lados.



(a) Tablero elegido

Propiedad	Valor	Unidad
r	3	cm
h	17	cm
a_1	6	m
a_2	6	m
m	1	-

(b) Dimensiones del tablero

Figura 3.4: Planta y dimensiones del tablero a analizar

Debido a que el peso de la losa depende de las dimensiones de esta, el siguiente proceso de análisis es uno iterativo, por lo que se proponen valores de recubrimiento (r) y espesor (h), y si alguna condición no se cumple es necesario proponer otras dimensiones.

Las dimensiones propuestas, junto con el claro corto (a_1), el claro largo (a_2), y la relación de lados corto a largo a_1/a_2 (m), se muestran en la tabla 3.4b.

El inciso 'a' de la sección 2.3 de las NTC sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (2017), indica que para la combinación de carga muerta más carga viva, se debe emplear la intensidad máxima de la carga viva, considerándola uniformemente repartida sobre toda el área. El inciso 'a' de la sección 3.4 indica los factores de carga (F_c) a utilizar, en edificaciones del grupo 'A' de importancia estructural, para esta combinación de carga. Estos se muestran en la figura 3.5b.

Concepto	Cantidad	Unidad
CM	448	kg/m ²
SCM	116	kg/m ²
CVM	190	kg/m ²

(a) Cargas sobre las losas

Concepto	Cantidad	Unidad
F_c para CM y SCM	1.5	kg/m ²
F_c para CVM	1.7	kg/m ²
Carga de diseño (W_d)	1169	kg/m ²

(b) Factores de carga y carga de diseño

Figura 3.5: Cargas sin factorizar y de diseño

La sección 5.1.2 indica que, para losas de concreto coladas en sitio, la carga muerta debe incrementarse 40 kg/m². Adicionalmente, se consideró una sobrecarga producto de un firme para nivelar, instalaciones, plafones, y acabado de piso.

En la tabla 3.5a se muestran las cargas obtenidas, estas se multiplicaron por su correspondiente F_c , y la suma de estas se muestra en la tabla 3.5b bajo el nombre de carga de diseño, esta es la que se usó para el análisis.

La sección 7.5.1 de las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (2017), indica que podrá omitirse el cálculo de deflexiones, si el peralte efectivo (d) no es menor que el perímetro del tablero entre 250. En este cálculo, la longitud de lados discontinuos se debe incrementar un 50 por ciento.

Para utilizar este peralte, se debe cumplir con dos condiciones, que el esfuerzo en el acero sea menor o igual a 2,520 kg/cm², y que la carga de diseño sea menor o igual que 380 kg/m², si no se cumple algunas de estas condiciones, el peralte efectivo mínimo se obtendrá multiplicando por

$$0.032^4 \sqrt{f_s W_d}$$

el valor del peralte efectivo que se obtendría, en el caso de cumplir las condiciones. En esta ecuación, los valores de f_s y W_d , deben estar en kg/cm² y kg/m² respectivamente.

De esta manera se obtuvo el peralte mínimo de las losas, a este valor se le sumó el recubrimiento para obtener el espesor de la losa, este se muestra en la tabla 3.2.

Cantidad	Cantidad	Unidad	Condición
h_{min}	14	cm	$W_d < 380 \text{ kg/m}^2$
h_{min}	17	cm	$W_d > 380 \text{ kg/m}^2$

Tabla 3.2: Espesor mínimo de las losas

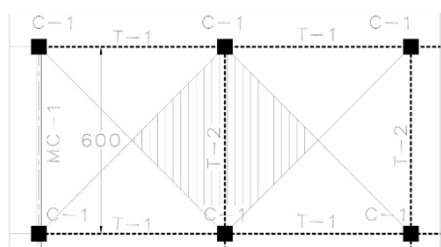
En la tabla 3.3 se muestran las dimensiones y propiedades obtenidas de la losa.

Propiedad	Cantidad	Unidad
f'_c	250	kg/cm ²
f_y	4200	kg/cm ²
h	17	cm

Tabla 3.3: Resumen de resultados de losas

3.3.2. Predimensionamiento de traveses

Para dimensionar las traveses, se usaron las provisiones de las secciones 5.1 y 7.2, de las NTC para diseño y construcción de estructuras de concreto, y se analizará la trabe que se muestra en la figura 3.6a, ya que se consideró una de las más críticas, debido a que los tableros de la losa que se apoyan sobre esta cubren una gran área.



(a) Planta de la trabe elegida

Propiedad	Valor	Unidad
L_v	600	cm
W_d	1.169	ton/m ²
A_{trib}	18	m ²
q_d	3.51	ton/m
M_u	10.52	Ton*m

(b) Cargas de las traveses

Figura 3.6: Planta y propiedades de la trabe a analizar

Se propuso la misma resistencia del concreto a compresión, y esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo, que se usó para las losas. Estos datos se muestran en la tabla 3.1. Se usaron las mismas cargas y sus respectivos factores de carga, que se usaron para las losas.

Se supuso que la condición de carga de la viga puede ser representada como una carga uniformemente distribuida (q_d), por lo que se puede obtener el momento máximo actuante (M_u) como

$$M_u = \frac{q_d L^2}{12}$$

donde q_d se obtiene multiplicando la carga de diseño para losas (W_d), por el área tributaria de la losa (A_{trib}), y dividiendo entre la longitud de la viga (L_v).

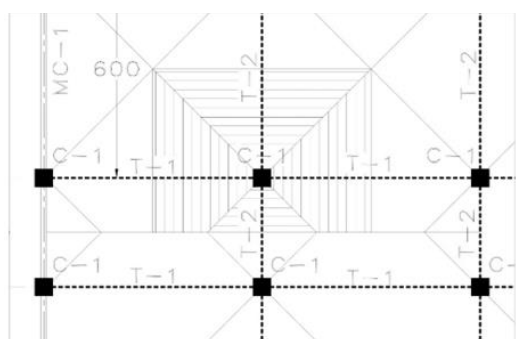
En la tabla 3.6b se muestra los resultados obtenidos. Se propusieron las dimensiones que se muestran en la tabla 3.4.

Propiedad	Valor	Unidad
b	30	cm
h	50	cm

Tabla 3.4: Dimensiones de las traveses

3.3.3. Predimensionamiento de columnas

Para dimensionar las columnas, se usaron las provisiones de las secciones 7.3, de las NTC para diseño y construcción de estructuras de concreto, y se analizó la columna que se muestra en la figura 3.7a, ya que se consideró una de las más críticas, debido a que la losa que se apoya en esta y tiene la mayor área tributaria.



(a) Planta de la columna elegida

Propiedad	Valor	Unidad
Carga de diseño	1.169	t/m ²
Área tributaria	27	m ²
Carga de diseño	32.56	t
Número de losas	6	-
Carga última axial	189.38	t

(b) Cargas de las columnas

Figura 3.7: Planta y propiedades de la columna a analizar

Se propuso la misma resistencia del concreto a compresión, y esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo, que se usó para las losas y las trabes. Estos datos se muestran en la tabla 3.1. Se usaron las mismas cargas y sus respectivos factores de carga, que se usaron para las losas.

La carga última axial se obtuvo multiplicando la carga de diseño, por el área tributaria, y multiplicando este valor por el número de losas que descargarán en esta columna. En la tabla 3.7b se muestra los resultados obtenidos.

Se comenzó por determinar el área necesaria de las columnas para resistir la carga axial última, dividiendo esta entre la resistencia del concreto a la compresión. En la tabla 3.5 se muestran las dimensiones y propiedades obtenidas de la columna.

Propiedad	Valor	Unidad
Área requerida	757.51	cm ²
Ancho de la columna	30.00	cm
Ancho de la columna*	40.00	cm
*Se aumento el ancho 1.3 veces por no considerar efectos sísmicos		

Tabla 3.5: Dimensiones de las columnas

3.4. Análisis de cargas

Las cargas se dividieron en los siguientes grupos principales.

3.4.1. Gravitacionales

Son aquellas que actúan en la dirección vertical de la estructura y se clasifican como:

1. Carga muerta (CM). Esta es cualquier carga que se pueda considerar constante y permanente, tal como el peso propio de la estructura (PP), elementos arquitectónicos, entre otros.

2. Carga viva (CV). Esta es cualquier carga que varía en el tiempo, por lo que se considera variable, tal como sería el caso de los muebles, los ocupantes, entre otros. De acuerdo con las NTC sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones, este tipo de carga se determina en función del uso de la construcción, y se propone un valor máximo (CVM), instantáneo (CVI) y medio (CVMed). En la tabla 3.6 se muestran las cargas vivas que se ocuparan en este proyecto.

de azotea			de entrepiso		
máxima	100	kg/m ²	máxima	190	kg/m ²
instantánea	70	kg/m ²	instantánea	100	kg/m ²
media	15	kg/m ²	media	80	kg/m ²

Tabla 3.6: Cargas vivas

En esta sección se determinaron las cargas necesarias para crear el modelo computacional para simulación numérica.

Este es calculado por el programa de cómputo, entendiéndose por peso propio (PP), como aquel propio de las vigas, columnas y muros.

La carga muerta en losas que se usó se muestra en la tabla 3.7, esta consiste en el peso propio de esta, y la carga adicional propuesta por las NTC como se indicó en la sección 3.3.1.

Concepto	Cantidad	Unidad
Peso losa maciza de 17 cm	408	kg/m ²
Peso adicional	40	kg/m ²
Peso total	448	kg/m ²

Tabla 3.7: Carga muerta en losas

Sobrecarga muerta es la provocada por elementos no estructurales, que se encuentren de forma permanente sobre la estructura. Estas se muestran en las tablas 3.8, y 3.9.

Concepto	Cantidad	Unidad
Peso de plafones	26	kg/m ²
Peso del terrado	76	kg/m ²
Peso del enladrillado	28	kg/m ²
Peso del entortado	40	kg/m ²
Peso total	170	kg/m ²

Tabla 3.8: Sobrecarga muerta propuesta en losas de azotea

Concepto	Cantidad	Unidad
Peso del firme para nivelar	48	kg/m ²
Peso de instalaciones	5	kg/m ²
Peso de plafones	15	kg/m ²
Peso del piso cerámico	48	kg/m ²
Peso total	116	kg/m ²

Tabla 3.9: Sobrecarga muerta propuesta en losas de la planta tipo

Las cargas vivas se obtuvieron de las NTC como se indicó en sección 3.4, y se muestran en la tabla 3.10.

Uso de piso	Media	Instantánea	Máxima	Unidades
Azotea	15	70	100	kg/m ²
Entrepisos	80	100	190	kg/m ²

Tabla 3.10: Cargas vivas en losas

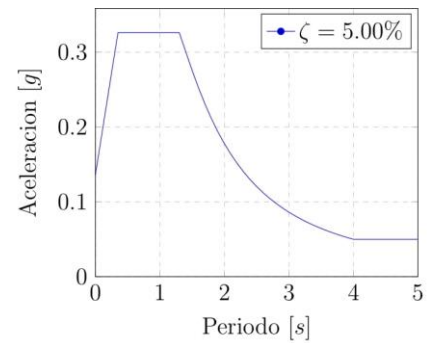
3.4.2. Laterales

Son aquellas que actúan paralelas al plano de los pisos, y se dividen en relación con su origen siendo estos los siguientes.

1. Sismo (SX y SY, donde X y Y denotan la dirección en que actúa). Para la ciudad de México (CDMX), se pueden obtener espectros de respuesta elástica por medio del sistema de acciones sísmicas de diseño (SASID), en la figura 3.8 se muestran estos datos.

Propiedad	Valor
Latitud	19.438753°
Longitud	-99.081922°
Periodo del suelo (T_s)	3.843s
Aceleración máxima del suelo (a_0)	0.136g
Ordenada de la meseta (c)	0.326g
Periodo inicial de la meseta (T_a)	0.350s
Periodo final de la meseta (T_b)	1.301s
Cociente entre desplazamientos (k)	1.5

(a) Tabla de valores del espectro



(b) Espectro elástico de respuesta

Figura 3.8: Espectro de sitio de acuerdo con el SASID

2. Viento (WX y WY, donde X y Y denotan la dirección en que actúa el viento). La magnitud de estas depende de la velocidad regional del viento (VR). Que se puede encontrar en las NTC para diseño por viento, para diferentes regiones de la CDMX.

Capítulo 4

Control de la respuesta estructural

Para realizar el análisis del aislamiento con un programa de cómputo, primero debemos determinar las propiedades preliminares del sistema de aislamiento.

4.1. Estructura de base fija

Para ello primero debemos conocer el periodo de la estructura sin aislar, para ello se realizó un modelo tridimensional de la estructura, este se realizó en el programa ETABS 19 y se muestra en la figura 4.1. Con este modelo se determinó que el periodo del primer modo de vibrar, también conocido como periodo fundamental de la estructura, es de 0.41 segundos.

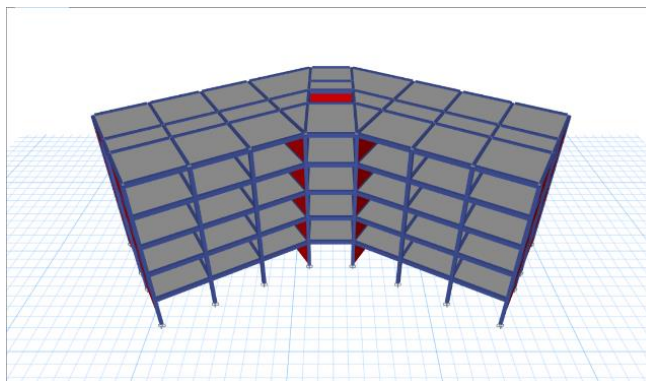


Figura 4.1: Modelo de la estructura sin aislar

Con este periodo de vibración se obtiene que el cortante basal que la estructura deberá de resistir para mantenerse elástica es de 889 toneladas para el sismo en X, y de 781 toneladas para el sismo en Y.

Y para el caso en que se le permite presentar comportamiento no lineal a la estructura, el cortante basal que deberá de resistir, considerando una Q de 2, es de 530 toneladas para el sismo en X, y de 522 toneladas para el sismo en Y.

Por último, se determinó el peso estructura de la estructura como de 4,713 toneladas.

4.2. Estructura de base aislada

Los códigos y normas de diseño sísmico por lo general consideran dos niveles de intensidad para el análisis sísmico, por lo que se repasara brevemente los niveles de intensidad considerados por las NTC para diseño por sismo y el ASCE-7.

Las NTC llaman a estos niveles de intensidad, estados limites, siendo el estado límite de seguridad contra colapso, el que corresponde a la condición sísmica más crítica. Y adicionalmente se considera el estado límite de limitación de daños, que corresponde a un sismo de menor intensidad, pero de mayor probabilidad de ocurrencia.

El ASCE-7 llama a estos mismos niveles de intensidad, maximum capable earthquake (MCE) y design basis earthquake (DBE), respectivamente.

En esta norma se maneja el coeficiente S_{M1} para el MCE, y S_{D1} para el DBE, que corresponden al sismo de seguridad contra colapso y limitación de daños de las NTC para diseño por sismo, respectivamente.

Esta provee figuras para obtener el coeficiente S_1 , que corresponde a la aceleración máxima en roca, y con este se calcula la aceleración máxima del sitio S_{M1} como

$$S_{M1} = F_v S_1$$

donde F_v es un coeficiente de sitio. En nuestro caso se nota que S_{M1} es igual 0.326 unidades como fracción de la gravedad.

En nuestro caso, S_{M1} corresponde a la meseta del espectro elástico, ya que el SASID provee espectros de sitio.

Posteriormente el ASCE-7 define S_{D1} como

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1}$$

En nuestro caso se nota que S_{D1} es igual 0.217 unidades como fracción de la gravedad.

Conociendo el origen de estos valores podemos continuar con la determinación de las propiedades del sistema de aislamiento, esto se realizó de acuerdo con la sección 9.13 del ASCE-7.

Es importante notar, que, en la mayoría de las estructuras con aislamiento sísmico, la condición más crítica corresponde al sismo de limitación de daños, esto es debido a que generalmente la rigidez de la interfaz de aislamiento es proporcional al desplazamiento,

por lo que, al tener menor desplazamiento en la interfaz de aislamiento durante el sismo de limitación de daños, mayor será la sollicitación sobre la estructura.

Dicho esto, primero se propusieron valores para el periodo de diseño durante el DBE (T_D), y durante el MCE (T_M), y el amortiguamiento efectivo (β_{eff}).

Para determinar el desplazamiento, correspondiente al sismo de limitación de daños (D_D), se utilizó la expresión

$$D_D = \frac{gS_{D1}T_D}{4\pi^2 B_D}$$

Donde

g = aceleración de la gravedad en m/s

S_{D1} = aceleración de la meseta del espectro elástico ($\zeta = 5\%$)

T_D = periodo efectivo de la estructura aislada, con el desplazamiento del DBE

B_D = coeficiente numérico de amortiguamiento, con el desplazamiento del DBE

Para determinar el desplazamiento, correspondiente al sismo de seguridad contra colapso (DM), se utilizó la expresión

$$D_M = \frac{gS_{M1}T_M}{4\pi^2 B_M}$$

Donde

g = aceleración de la gravedad en m/s

S_{M1} = aceleración de la meseta del espectro elástico ($\zeta = 5\%$)

T_M = periodo efectivo de la estructura aislada, con el desplazamiento del MCE

B_M = coeficiente numérico de amortiguamiento, con el desplazamiento del MCE

Para determinar B_D o B_M , el ASCE-7 contiene una tabla con varios valores de ζ y su coeficiente B_D o B_M , y sugiere realizar interpolación lineal para obtener valores desconocidos, sin embargo, se realizó una regresión cuadrática con los valores propuestos, y se obtuvo que la ecuación

$$B_D \text{ o } B_M = -3.97005x^2 + 4.4438x + 0.759754$$

se ajusta adecuadamente para valores de ζ entre 0.02 y 0.5, como se puede apreciar en la figura 4.2

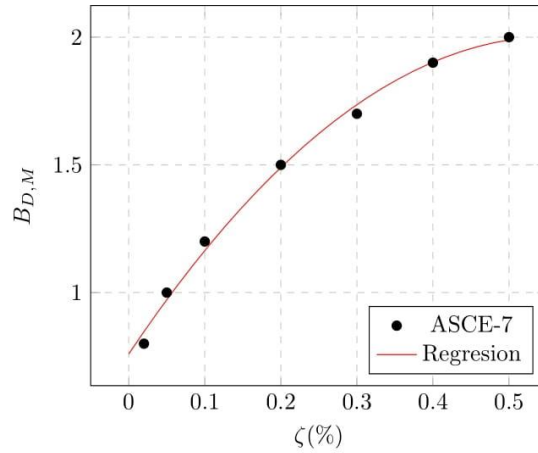


Figura 4.2: Coeficiente numérico B_D y B_M

Posteriormente se amplificó D_D y D_M para considerar la excentricidad accidental, con lo que se obtuvo el desplazamiento total para el DBD (D_{TD}), y para el MCE (D_{TM}) como:

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]$$

Donde

y = excentricidad inherente, en m

e = excentricidad accidental, en m

b = menor dimensión en planta, en m

d = mayor dimensión en planta, en m

Posteriormente se despejó $K_{D,min}$ y $K_{M,min}$ de

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{D,min}g}}$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{M,min}g}}$$

Donde

$W =$ peso total de la estructura

$k_{D,min} =$ rigidez efectiva mínima para el DBE

$k_{M,min} =$ rigidez efectiva mínima para el MCE

$g =$ aceleración de la gravedad

posteriormente se propusieron valores de rigidez efectiva máxima para el el DBE ($k_{D,max}$), y el MCE ($k_{M,max}$), asumiendo que puede haber una variación del 10 % con respecto a $k_{D,min}$ y $k_{M,min}$.

Calculamos el cortante que deberá resistir el sistema de aislamiento como

$$V_b = K_{D,max} D_D$$

y el cortante que deberá de resistir la estructura sobre el sistema de aislamiento como

$$V_s = \frac{K_{D,max} D_D}{R_1}$$

donde R_1 es el coeficiente numérico relacionado al sistema estructural sismo-resistente, en nuestro caso este puede considerarse igual a 1.0, ya que buscamos que la estructura no presente daños durante el evento sísmico.

Y determinamos la distribución del cortante sobre la estructura, como

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum w_i h_i}$$

Donde

$V_s =$ cortante basal total sobre la estructura

$w_x =$ peso del $x - \text{ésimo nivel}$

$h_x =$ altura a la que se encuentra el $x - \text{ésimo nivel}$

$w_i =$ peso del $i - \text{ésimo nivel}$

$h_i =$ altura a la que se encuentra el $i - \text{ésimo nivel}$

siguiendo este procedimiento se obtuvieron los resultados que se muestran en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

Concepto	Cantidad	Unidad
S_{D1}	0.217	-
S_{M1}	0.326	-
T_D	3.000	s
T_M	3.300	s
β_{eff}	0.240	-
B_D	1.600	-
B_M	1.600	-

Tabla 4.1: Propiedades propuestas del aislamiento

Concepto	Cantidad	Unidad
D_D	0.101	m
D_M	0.167	m
y	8.820	m
e	13.970	m
b	26.520	m
d	51.450	m
D_{TD}	0.150	m
D_{TM}	0.240	m
$K_{D,min}$	21.070	ton/cm
$k_{M,min}$	17.410	ton/cm
$K_{D,max}$	23.180	ton/cm
$k_{M,max}$	19.160	ton/cm
V_b	235.07	ton
V_s	235.07	ton

Tabla 4.2: Propiedades calculadas del aislamiento

Nivel	w_i (ton)	h_i (m)	$w_i \cdot h_i$ (ton*m)	F_x (ton)
6	929	18.0	16,722	79.42
5	911	14.4	13,118	62.30
4	910	10.8	9,828	46.67
3	910	7.2	6,552	31.12
2	910	3.6	3,276	15.56
1	143	0.0	0	0.00
Suma	4,713		49,496	235.07

Tabla 4.3: Distribución de las fuerzas sísmicas sobre la estructura aislada

De estos datos, los que nos interesan para determinar las características mecánicas del sistema de aislamiento, son la carga axial, el desplazamiento total para el DBE (D_{TD}), el amortiguamiento efectivo (β_{eff}), y el rango de rigideces para el BDE ($K_{D,min}$ y $K_{D,max}$).

4.3. Características mecánicas del aislamiento

En nuestro caso se propuso utilizar un aislador de péndulo friccionante, como ya se mencionó en la sección 2.4.1, este es un dispositivo muy simple, por lo que son pocas las variables que se pueden manipular.

Para este tipo de aislador es muy importante la carga axial sobre el mismo, ya que la fricción depende directamente de esta. En nuestro caso, debido a que la distribución de los apoyos es aproximadamente uniforme, se optó por dividir el peso de la estructura entre el número de apoyos, en este caso se tienen 40 apoyos, por lo que se consideró una carga axial (W) de 117.82 toneladas sobre cada aislador.

Mageba es una empresa suiza que se dedica a proveer dispositivos de aislamiento y amortiguamiento sísmico, y cuenta con un catálogo para su serie de aisladores del tipo de péndulo friccionante, a los que llaman PENDULUM PM (Mono), debido a que esencialmente es dispositivo es un solo plato curvo. Las especificaciones comunes que manejan para estos aisladores se muestran en la figura 4.3, y contiene una nota diciendo que las propiedades de la tabla consideran un radio de curvatura (R) de 3.6 m para los aisladores mono, por lo que, para este análisis preliminar, se vio conveniente utilizar el mismo valor. La superficie del aislador de Mageba, está recubierta por un material de su propiedad, al que llaman ROBO SLIDE L2, en su sitio de internet se puede encontrar un reporte técnico, con las propiedades de este material, de estas, la que más nos interesa para determinar el comportamiento mecánico del aislador, es el coeficiente de fricción (μ_s). De este, se dice que en zonas donde la temperatura no baja de 5°C, este es dependiente de la presión de contacto, tomando valores entre 0.015 y 0.06, por lo que se optó por un μ_s de 0.025.

Sustituyendo u_m por D_{TD} , y el resto de los valores mencionados en esta sección, en la ecuación 2.4, determinamos una K_{sec} , mejor conocida como rigidez efectiva K_{eff} , igual a 0.53 ton/cm

PENDULUM PM (Mono)						PENDULUM PD (Duplo)					
Tipo	Carga vertical N_{sd} [kN]	Diámetro de la placa deslizante (mm)				Tipo	Carga vertical N_{sd} [kN]	Diámetro de la placa deslizante (mm)			
		dbd = ±100	dbd = ±200	dbd = ±300	dbd = ±400			dbd = ±100	dbd = ±200	dbd = ±300	dbd = ±400
PM-2	2,000	460	660	860	1,060	PD-2	2,000	317	455	593	731
PM-3	3,000	505	705	905	1,105	PD-3	3,000	348	486	624	762
PM-4	4,000	550	750	950	1,150	PD-4	4,000	379	517	655	793
PM-5	5,000	590	790	990	1,190	PD-5	5,000	407	545	683	821
PM-6	6,000	635	835	1,035	1,235	PD-6	6,000	438	576	714	852
PM-7	7,000	690	890	1,090	1,290	PD-7	7,000	476	614	752	890
PM-8	8,000	735	935	1,135	1,335	PD-8	8,000	507	645	783	921
PM-9	9,000	780	980	1,180	1,380	PD-9	9,000	538	676	814	952
PM-10	10,000	825	1,025	1,225	1,425	PD-10	10,000	569	707	845	983
PM-11	11,000	860	1,060	1,260	1,460	PD-11	11,000	593	731	869	1,007
PM-12	12,000	900	1,100	1,300	1,500	PD-12	12,000	621	759	897	1,034
PM-15	15,000	990	1,190	1,390	1,590	PD-15	15,000	683	821	959	1,097
PM-20	20,000	1,125	1,325	1,525	1,725	PD-20	20,000	776	914	1,052	1,190
PM-25	25,000	1,250	1,450	1,650	1,850	PD-25	25,000	862	1,000	1,138	1,276
PM-30	30,000	1,340	1,540	1,740	1,940	PD-30	30,000	924	1,062	1,200	1,338
PM-35	35,000	1,500	1,700	1,900	2,100	PD-35	35,000	1,034	1,172	1,310	1,448
PM-40	40,000	1,650	1,850	2,050	2,250	PD-40	40,000	1,138	1,276	1,414	1,552
PM-45	45,000	1,760	1,960	2,160	2,360	PD-45	45,000	1,214	1,352	1,490	1,628

dbd: máximo desplazamiento de diseño. Los valores de la tabla superior consideran un radio de curvatura de 3.6m para los aisladores Mono y 7.1m para los Duplo.
Nota importante: esta tabla debe utilizarse exclusivamente como referencia preliminar para el diseño del aislador. El diseño y los detalles técnicos definitivos se definen una vez se consideran todos los parámetros del proyecto en su fase final, como por ejemplo el periodo natural y las condiciones sísmicas.

Figura 4.3: Catalogo de aisladores PENDULUM PM (Mono) y DP (Duplo) de Mageba.

Sustituyendo u_m por D_{TD} , y el resto de los valores mencionados en esta sección, en la ecuación 2.9, determinamos una ζ_{eq} , mejor conocida como amortiguamiento efectivo β_{eff} , igual a 0.24.

En la tabla 4.4 se muestra un resumen de las propiedades obtenidas del aislador, estas son las propiedades que se introdujeron en el programa de cómputo para comprobar la precisión de los resultados.

Concepto	Cantidad	Unidad
K_{eff}	0.530	ton/cm
β_{eff}	0.240	-
μ_s	0.025	-
R	3.600	m

Tabla 4.4: Resumen de propiedades mecánicas del aislamiento

Sin embargo, el programa nos pide valores de amortiguamiento con unidades de fuerza * tiempo / distancia, este lo podemos determinar fácilmente. Para ello primero determinamos el periodo del dispositivo (T_{pend}), usando la ecuación 2.2. Y sustituimos, β_{eff} por ζ , $2\pi/T_{pend}$ por w_n y, W por M, en la ecuación

$$C = 2Mw_n\zeta \tag{4.1}$$

con lo que obtenemos un amortiguamiento efectivo β_{eff} de $0.0962 \text{ ton} * \text{s} * \text{cm}^{-1}$.

Con estos datos, se modificó el modelo tridimensional de la estructura de la figura 4.1. Se le agregaron vigas en los apoyos para ligar las columnas, y se asignaron elementos link de un nodo en los apoyos. Este elemento link es el que contiene las

características que se determinaron del aislamiento. Este modelo con el aislamiento se puede apreciar en la figura 4.4.

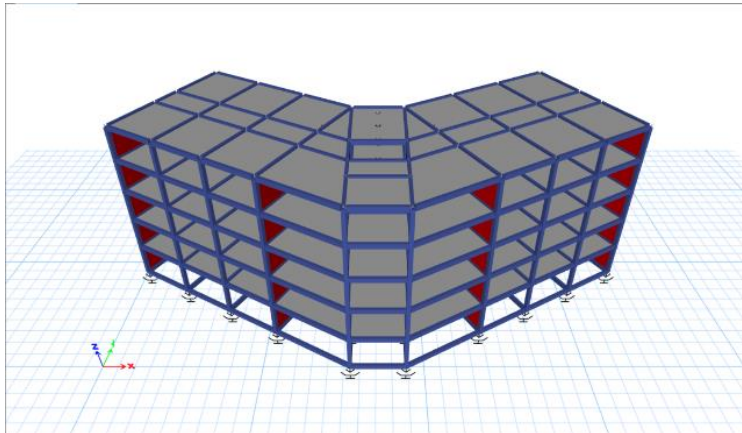


Figura 4.4: Modelo de la estructura con aislamiento

Con este modelo se determinó que el periodo del primer modo de vibrar es de 2.91 segundos, por lo que se acepta al estar razonablemente cerca de los 3 segundos propuestos.

Con este periodo de vibración se obtiene que el cortante basal, que la estructura deberá de resistir para mantenerse elástica es de 237 toneladas para el sismo en X, y de 240 toneladas para el sismo en Y. En los cálculos realizados previamente, se determinó un cortante basal de 235 toneladas, por lo que se aprecia que los resultados obtenidos del programa son correctos.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Distorsiones de entrepiso

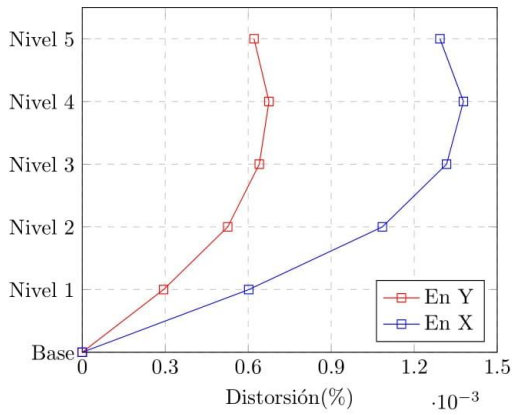
En esta sección se muestran las distorsiones de entrepiso obtenidas en cada nivel para el sismo SDX y SDY.

Las distorsiones de entrepiso de la estructura de base fija corresponden a las que se obtienen de un análisis convencional en el que se le permite presentar comportamiento no lineal a la estructura, considerando un factor de comportamiento sísmico (Q) igual a dos y que es una estructura del grupo A1 de importancia estructural. Las distorsiones en la estructura con aislamiento sísmico corresponden a las que se obtienen con el espectro sísmico elástico.

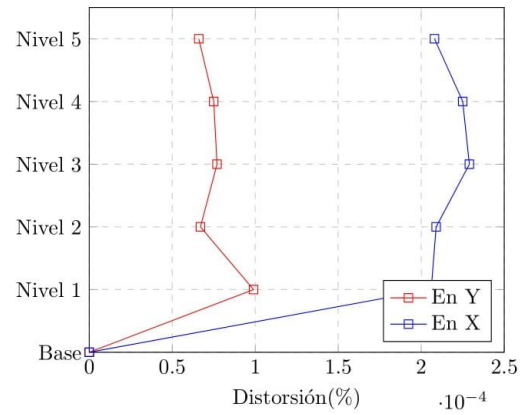
En la figura 5.1 se muestran las distorsiones de entrepiso debidas al sismo en X en ambas estructuras. En la figura 5.2 se muestran las distorsiones normalizadas como resultado de dividir los resultados que se muestran en la figura 5.1a entre los de la figura 5.1b

En la figura 5.3 se muestran las distorsiones de entrepiso debidas al sismo en Y en ambas estructuras. En la figura 5.4 se muestran las distorsiones normalizadas como resultado de dividir los resultados que se muestran en la figura 5.3a entre los de la figura 5.3b

Se puede apreciar que la reducción de las distorsiones de entrepiso es considerable en ambos casos, solo resalta que la distorsión en X del primer nivel para el sismo en Y, aumenta en la estructura aislada, sin embargo, esto no es muy relevante debido a que esta distorsión era muy reducida para la estructura sin aislamiento.



(a) En la estructura sin aislamiento



(b) En la estructura aislada

Figura 5.1: Distorsiones de entrepiso debido al sismo en X

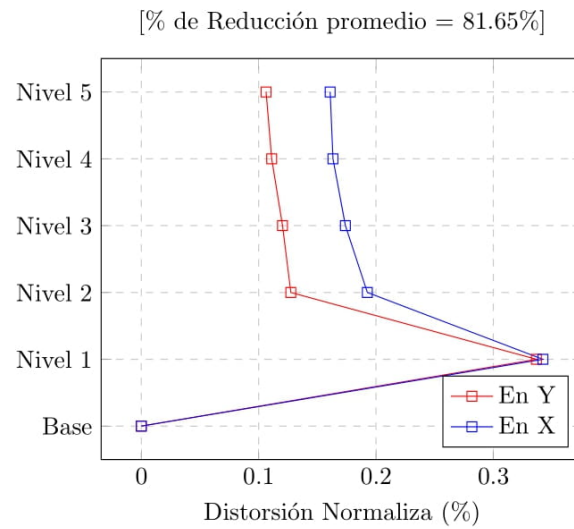
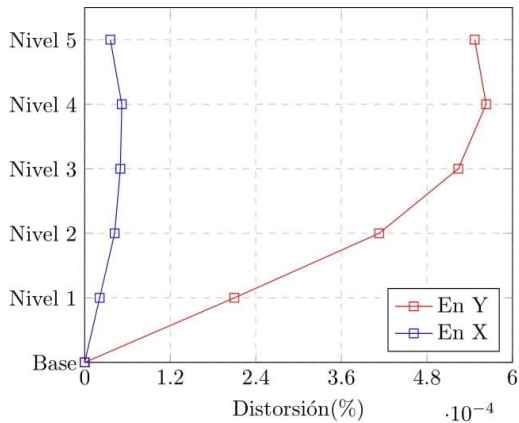
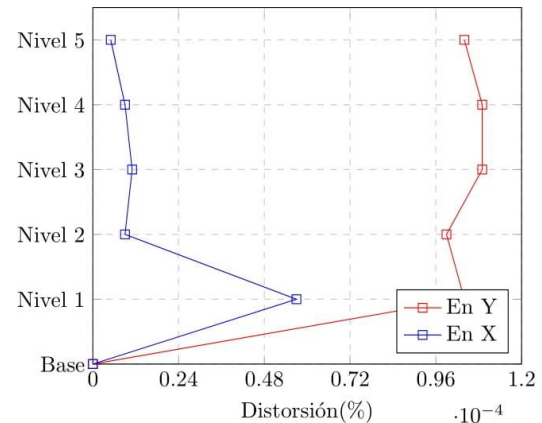


Figura 5.2: Distorsiones de entrepiso normalizadas debido al sismo en X



(a) En la estructura sin aislamiento



(b) En la estructura aislada

Figura 5.3: Distorsiones de entrepiso debido al sismo en Y

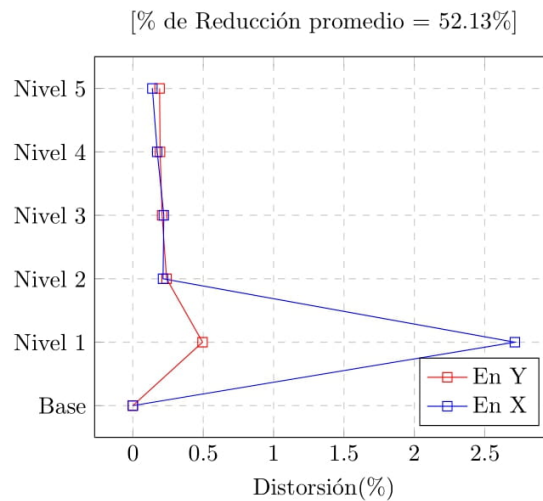


Figura 5.4: Distorsiones de entrepiso normalizadas debido al sismo en Y

5.2. Fuerzas internas

En esta sección se muestran los momentos obtenidos en el eje de inercia mayor de columnas y trabes para el sismo dinámico en la dirección X (SDX) y el sismo dinámico en la dirección Y (SDY) sobre el eje 1L.

Las acciones en la estructura de base fija corresponden a las que se obtienen de un análisis convencional en el que se le permite presentar comportamiento no lineal a la estructura, considerando una Q de 2 y que es una estructura del grupo A1 de importancia estructural. Las acciones en la estructura con aislamiento sísmico corresponden a las que se obtienen con el espectro sísmico elástico.

En las figuras 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8 se muestra un alzado del eje 1L y se puede apreciar a simple vista que los momentos disminuyen. En las figuras 5.9a, 5.9b, 5.11a, 5.11b se muestra por medio de gráficas de barras los momentos actuantes sobre los elementos del eje 1L, y se puede apreciar de forma general, que los momentos son menores en la estructura aislada.

Sin embargo, de esta forma es difícil cuantificar la efectividad del aislamiento. Por lo que se procedió a normalizar los resultados, dividiendo los momentos obtenidos en la estructura aislada, entre los momentos de la estructura sin aislamiento. Estos se muestran en las figuras 5.10 y 5.12.

Posteriormente se procedió a separar los resultados normalizados por cada nivel para así poder dar un porcentaje de reducción de las acciones por nivel. En las figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17 se muestran los resultados por cada nivel para el sismo en dirección X. En las figuras 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 y 5.22 se muestran los resultados por cada nivel para el sismo en dirección Y.

Se puede apreciar que mientras que la reducción de las distorsiones de entrepiso es bastante uniforme, no se puede decir lo mismo de los elementos mecánicos, ya que, en este caso específico de los momentos, la reducción de estos varía considerablemente en cada nivel.

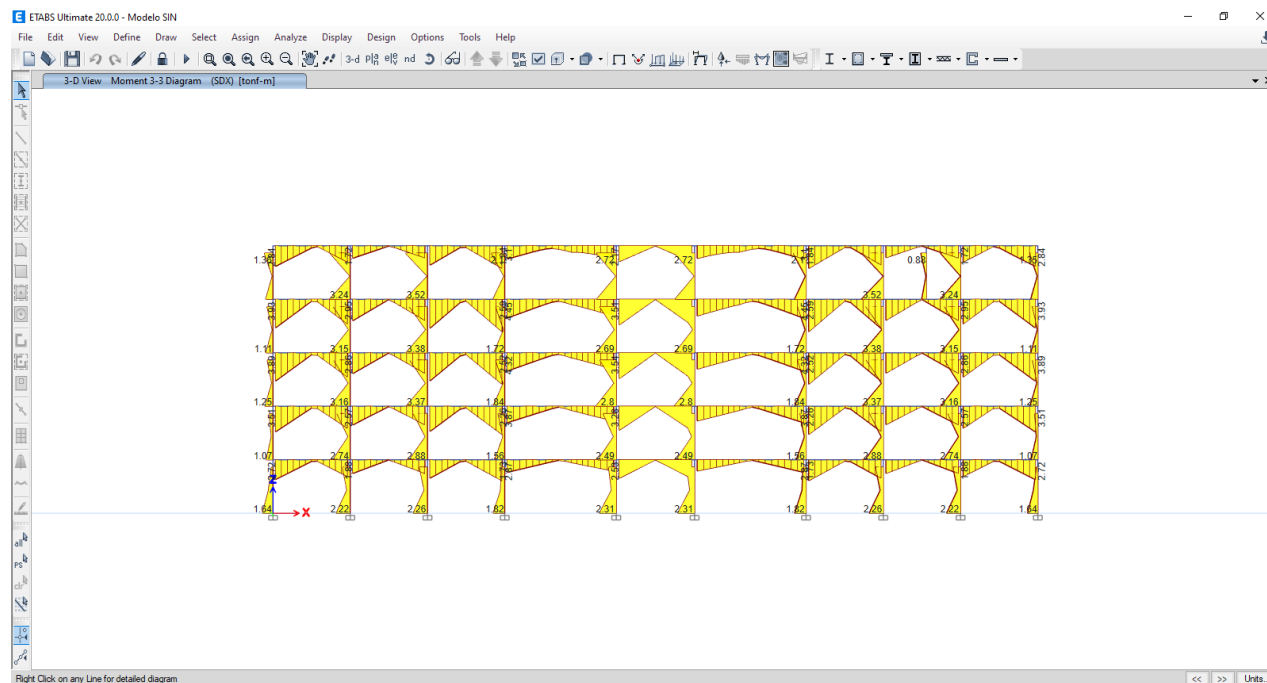


Figura 5.5: Sismo en X sobre el eje 1L en estructura sin aislamiento

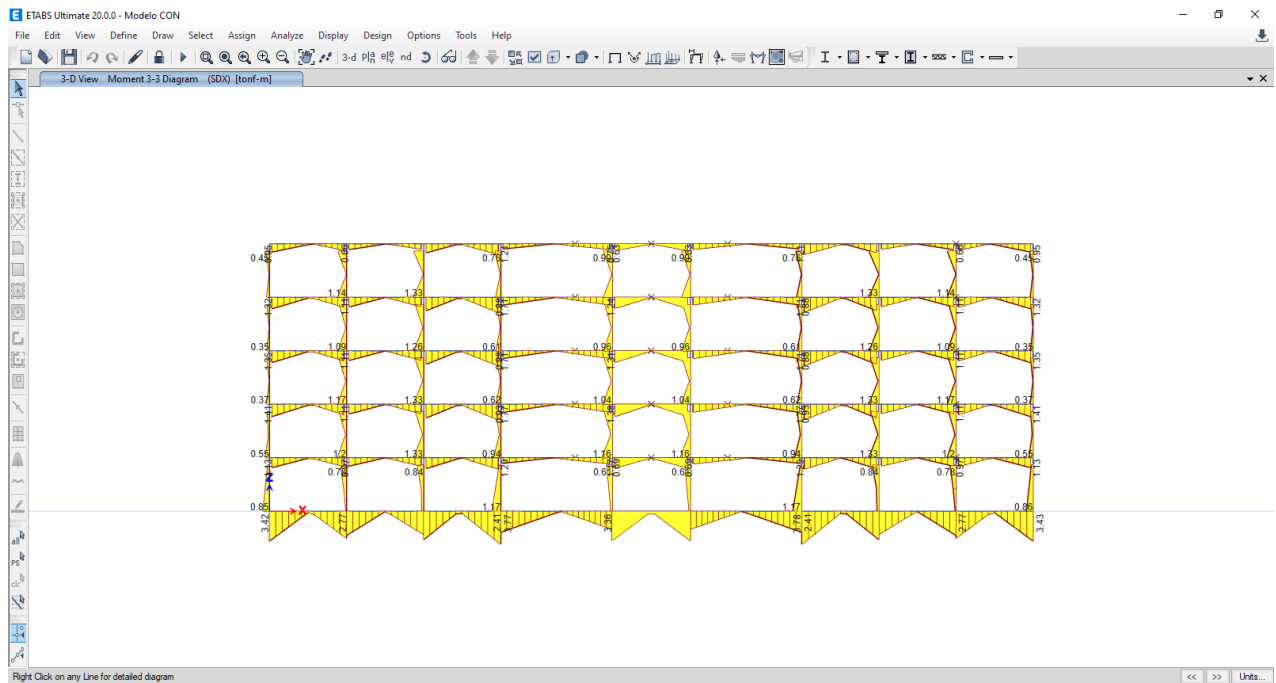


Figura 5.6: Sismo en X sobre el eje 1L en estructura aislada

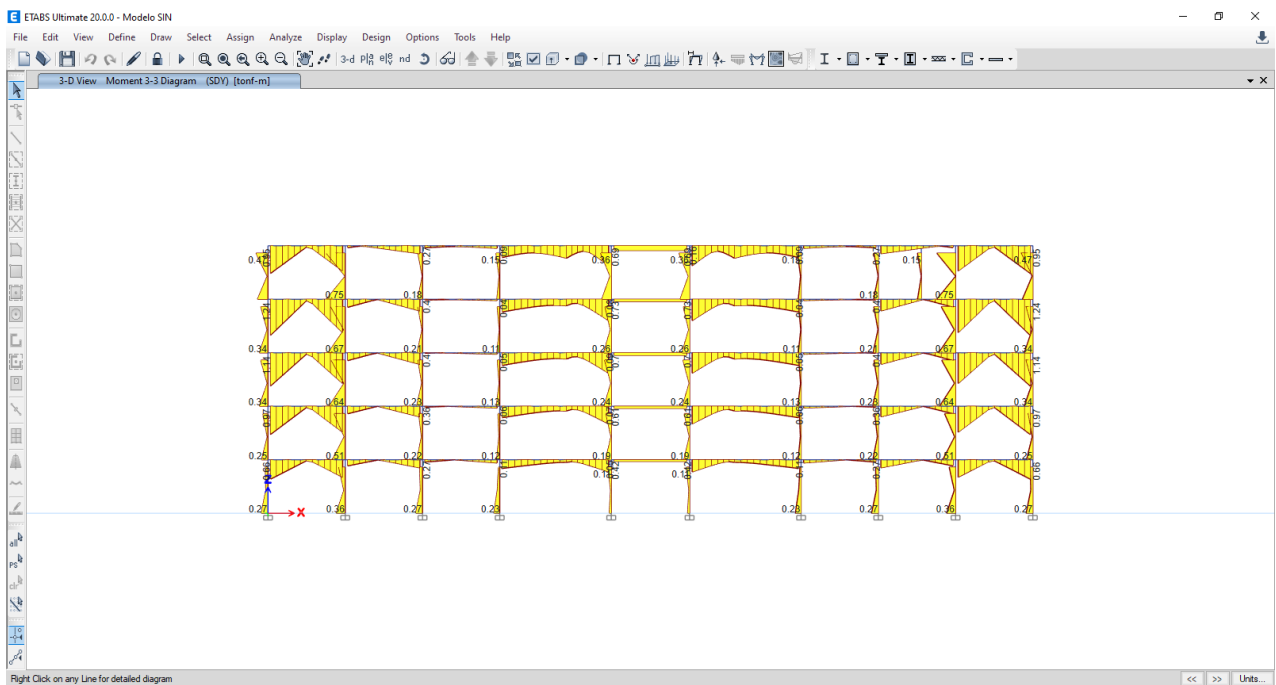


Figura 5.7: Sismo en Y sobre el eje 1L en estructura sin aislamiento

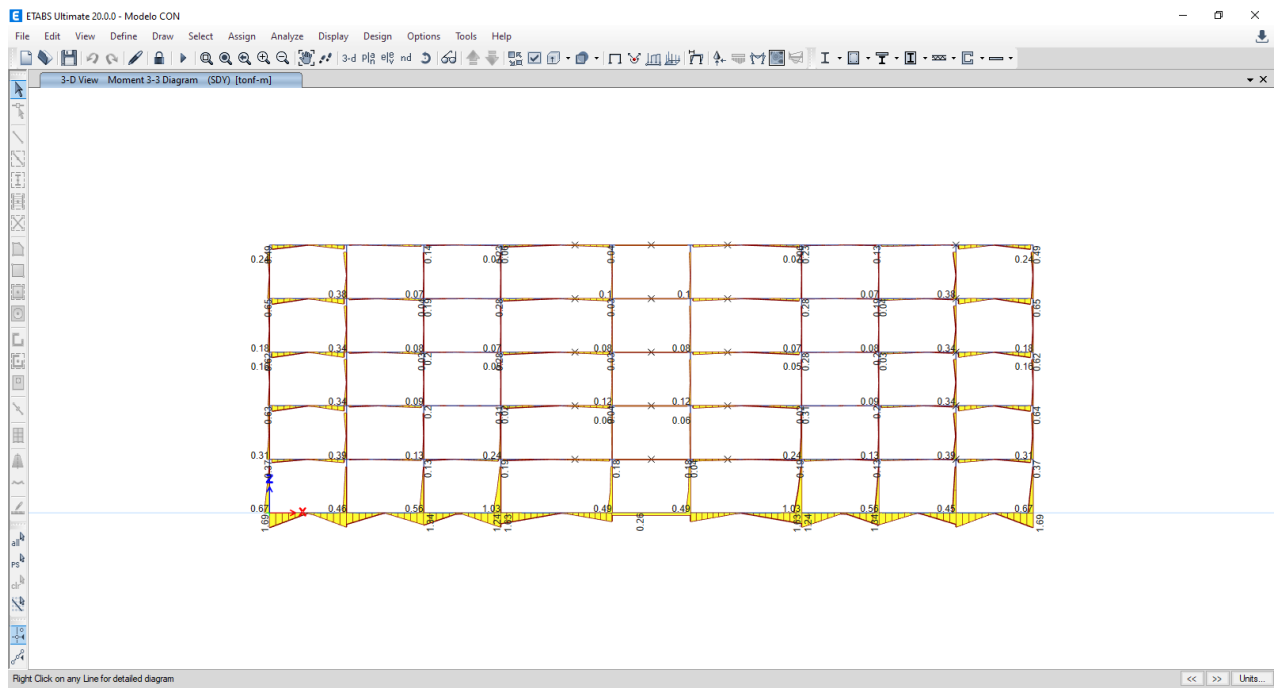
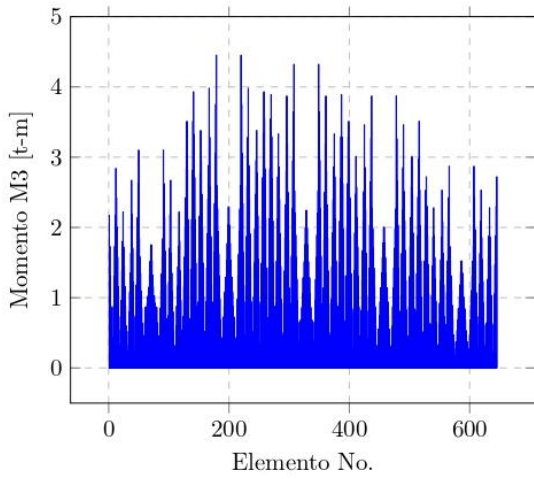
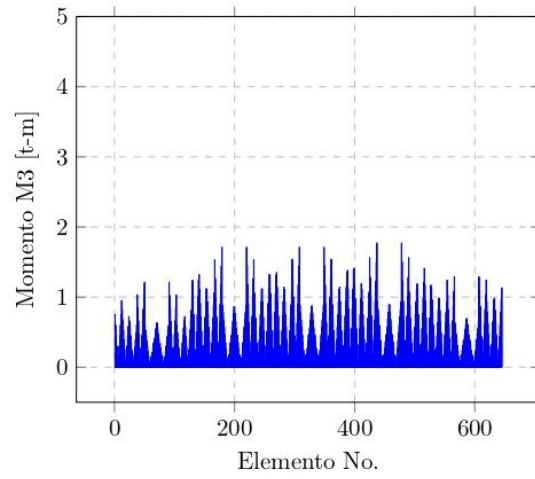


Figura 5.8: Sismo en Y sobre el eje 1L en estructura aislada



(a) En estructura sin aislamiento



(b) En estructura aislada

Figura 5.9: Momentos debido al sismo en X

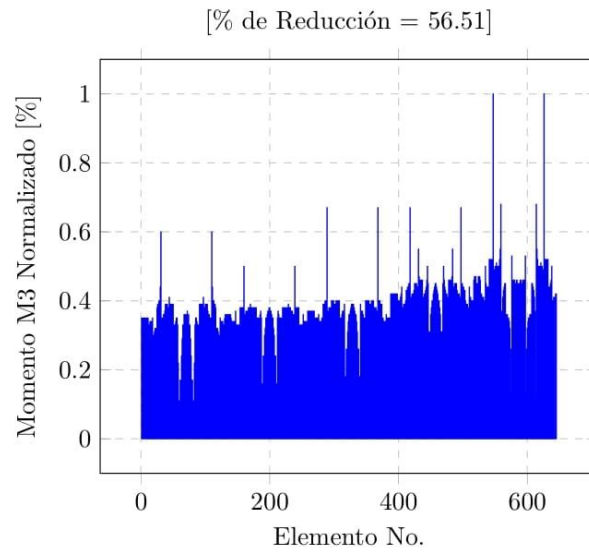
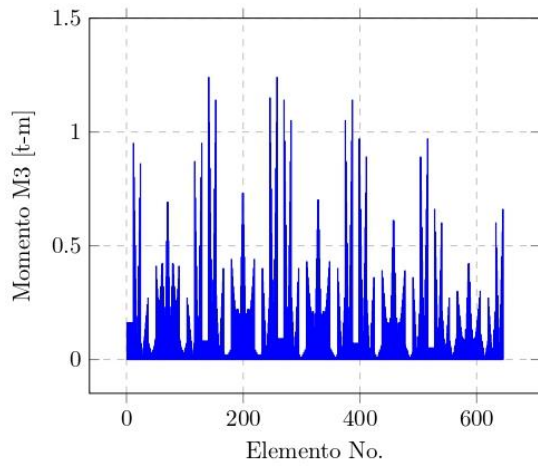
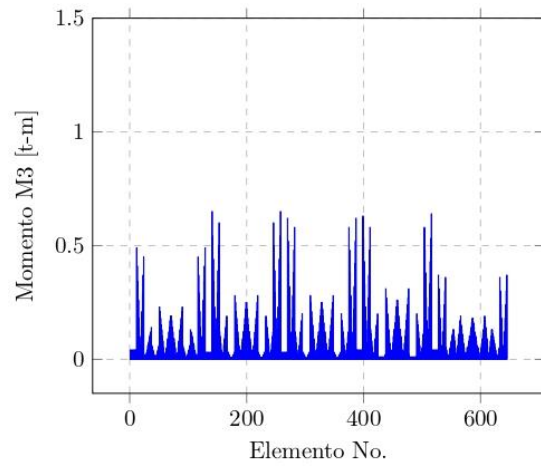


Figura 5.10: Momentos normalizados debido al sismo en X



(a) En estructura sin aislamiento



(b) En estructura aislada

Figura 5.11: Momentos debido al sismo en Y

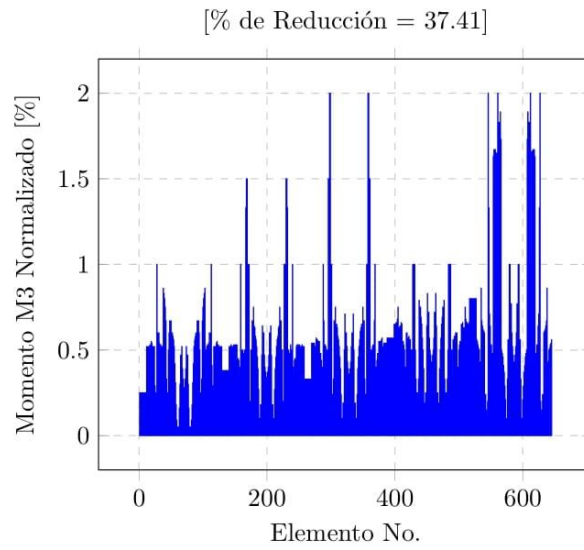


Figura 5.12: Momentos normalizados debido al sismo en Y

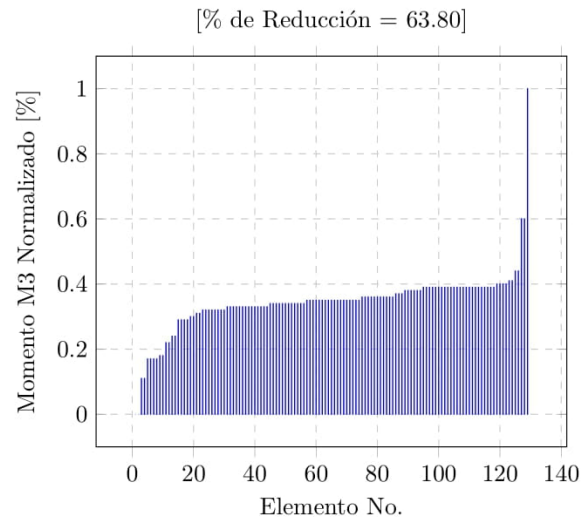


Figura 5.13: Momentos normalizados debido al sismo en X en el nivel 6

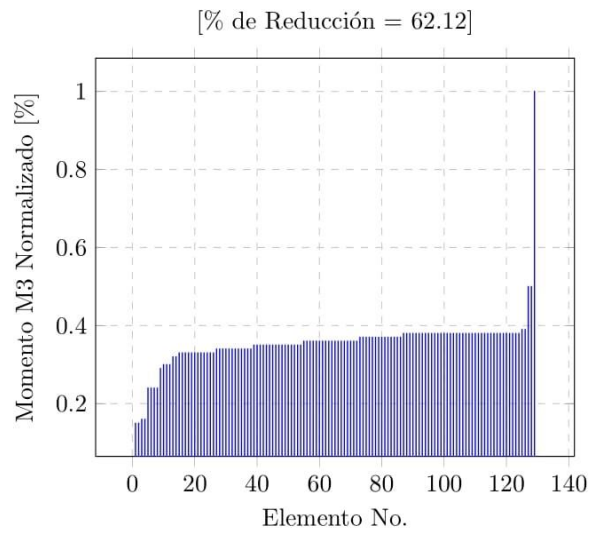


Figura 5.14: Momentos normalizados debido al sismo en X en el nivel 5

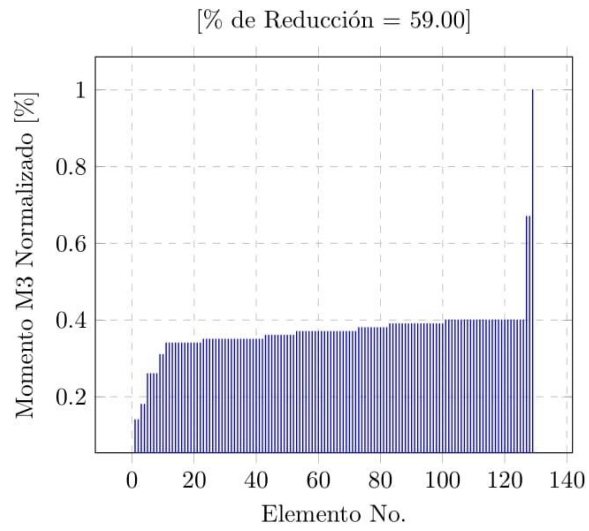


Figura 5.15: Momentos normalizados debido al sismo en X en el nivel 4

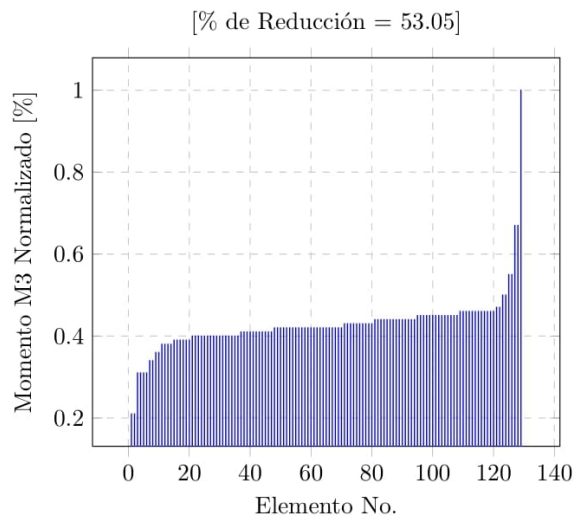


Figura 5.16: Momentos normalizados debido al sismo en X en el nivel 3

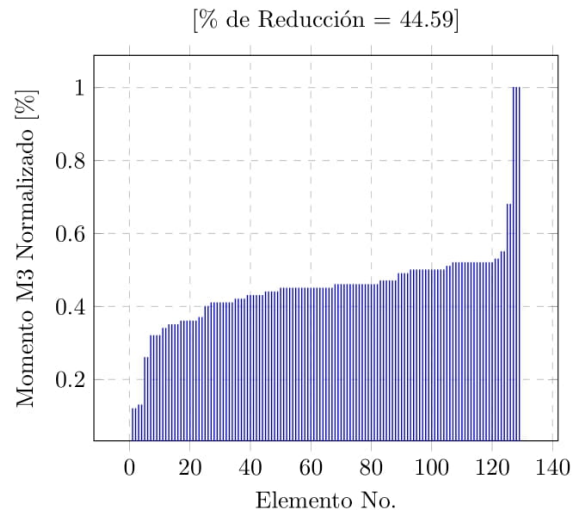


Figura 5.17: Momentos normalizados debido al sismo en X en el nivel 2

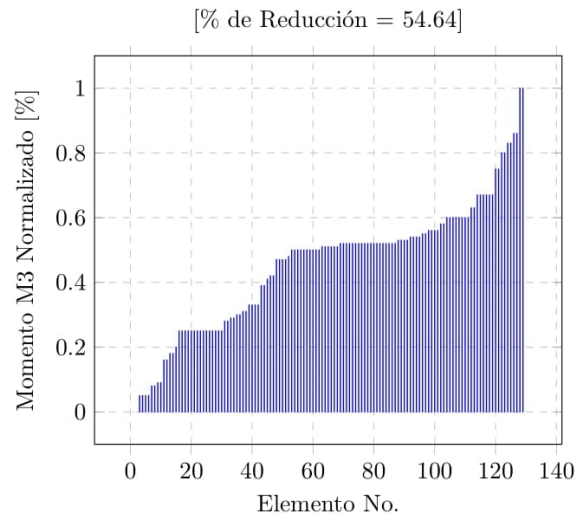


Figura 5.18: Momentos normalizados debido al sismo en Y en el nivel 6

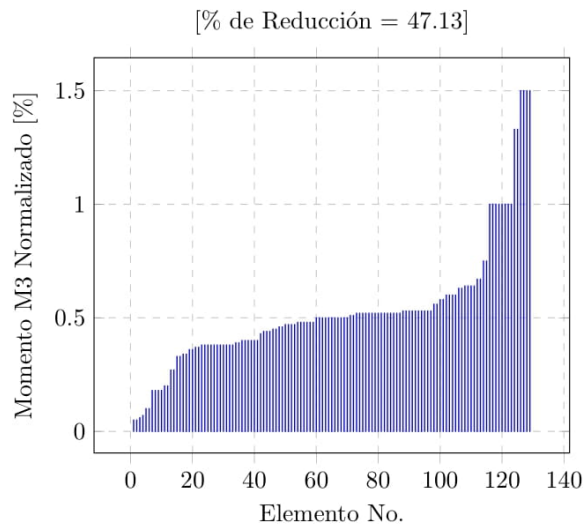


Figura 5.19: Momentos normalizados debido al sismo en Y en el nivel 5

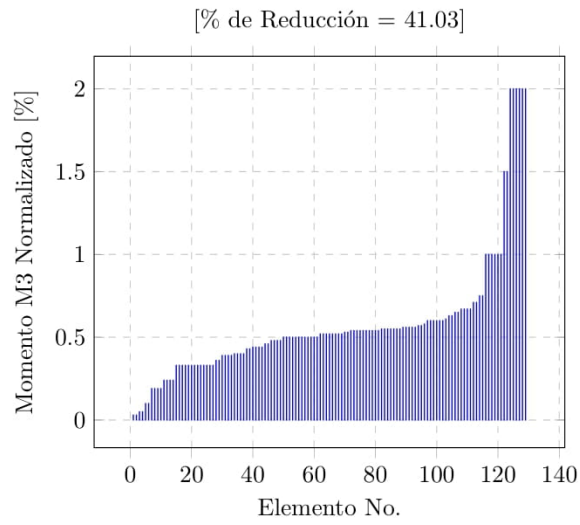


Figura 5.20: Momentos normalizados debido al sismo en Y en el nivel 4

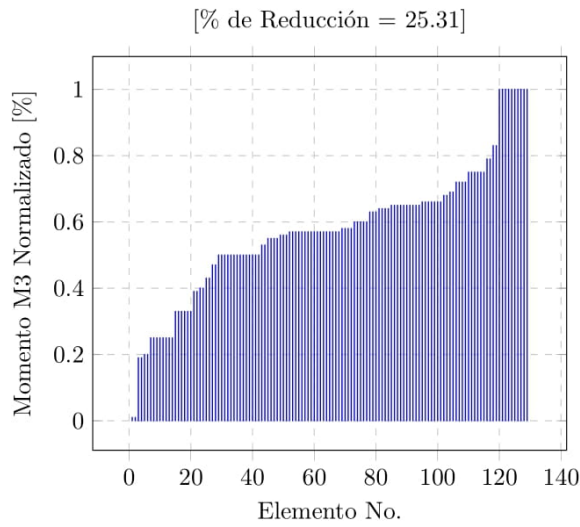


Figura 5.21: Momentos normalizados debido al sismo en Y en el nivel 3

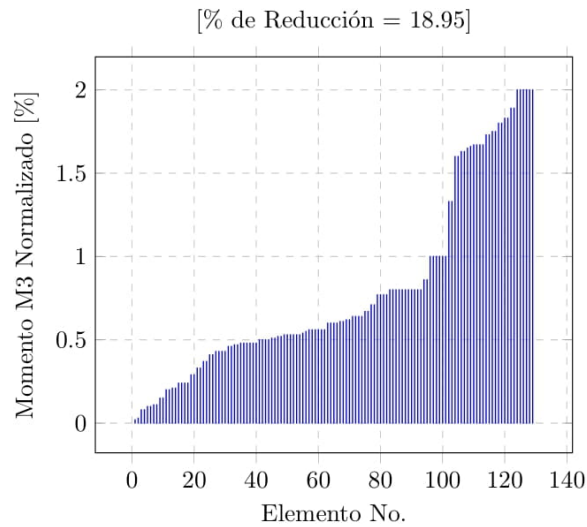


Figura 5.22: Momentos normalizados debido al sismo en Y en el nivel 2

5.3. Cortante Basal

En esta sección se muestra el cortante basal obtenido para el sismo SDX y SDY. Las acciones en la estructura de base fija corresponden a las que se obtienen de un análisis como el que se describe en las secciones 5.1 y 5.2.

En la figura 5.24 se muestran los cortantes basales normalizados de la estructura aislada con respecto a los de la estructura sin aislar, los cuales se muestran en las figuras 5.23a y 5.23b. De esta manera se puede apreciar de forma simple la reducción en las acciones debido al uso de aisladores de base.

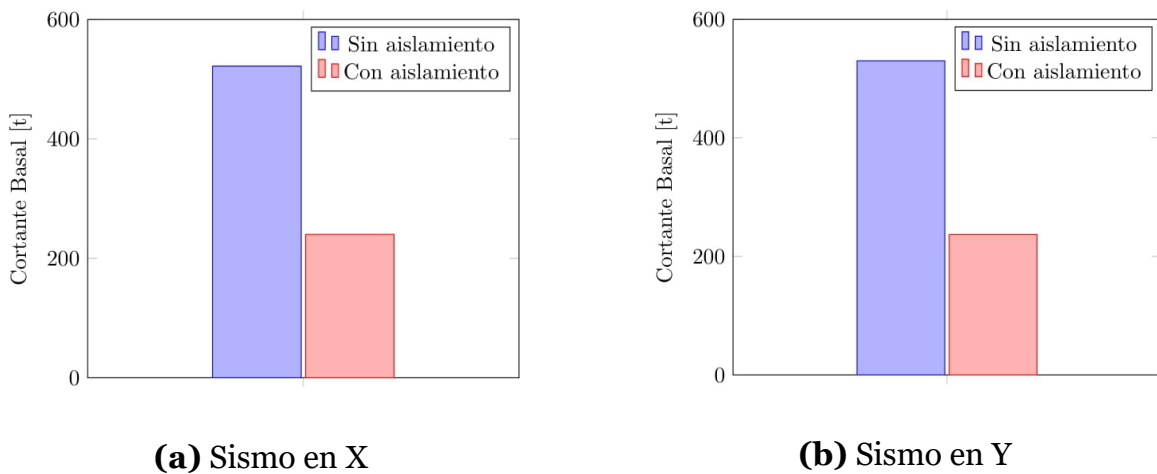


Figura 5.23: Cortante basal

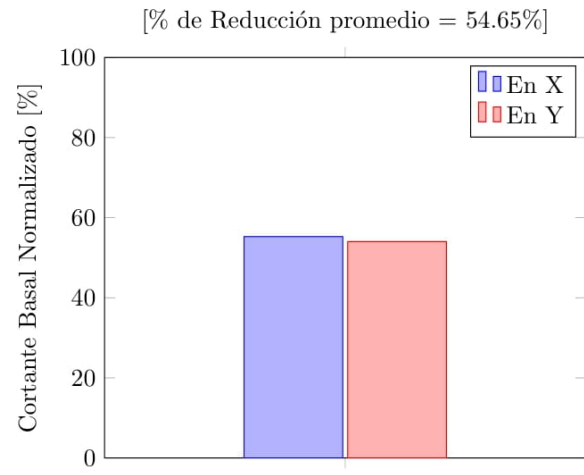


Figura 5.24: Cortante basal normalizado

Conclusiones y Recomendaciones

Se pudo observar que la efectividad del aislamiento es una realidad ya que esta ha sido probada al principio por modelos teóricos, los cuales se han ido refinando con el paso de años.

Posteriormente por modelos computacionales, los cuales al principio eran simples haciendo una cantidad considerable de simplificaciones y actualmente por medio de análisis más sofisticados como sería el caso de los análisis tiempo-historia no lineales, los cuales actualmente se pueden realizar de forma práctica y eficiente en computadoras modernas.

Seguidos de pruebas físicas en laboratorio con las cuales se puede comprobar que los dispositivos cumplen con las propiedades propuestas por la teoría y con las propuestas por el ingeniero estructurista.

Y finalmente al ver la respuesta de diversas estructuras modernas después de sufrir eventos sísmicos, de las cuales se han aprendido muchas cosas, desde errores constructivos que se pueden dar si no se detalla y/o supervisa correctamente la instalación de los dispositivos, hasta como mejorar las características mecánicas de los mismos. Como es el caso de los apoyos hechos a base de elastómeros, que pasaron de tener importantes limitaciones, a cumplir con todas las características necesarias en un dispositivo moderno.

También se pudo apreciar que, aunque los análisis y el diseño juegan un papel muy importante en la implementación de aislamiento sísmico, la parte arquitectónica, constructiva y económica juegan papeles igual de importantes, por lo que, para su correcta implementación de estas técnicas de control de la respuesta estructural, todos los involucrados deben de tener una buena comunicación y colaboración en la toma de decisiones para que el proyecto pueda ejecutarse sin problemas.

También se pudo ver que el aislamiento sísmico es un método sencillo y efectivo, para volver más seguras a las estructuras durante eventos sísmicos, ya que para el ejemplo práctico se logró reducir considerablemente el cortante basal en la estructura.

Se noto que, aunque el análisis de una estructura aislada es sencillo, su correcta realización y aplicación requiere de fundamentos sólidos de dinámica estructural.

Por lo mismo se recuerda que estas conclusiones solo son válidas para estructuras con características dinámicas similares, ya que en este trabajo no se trató una estructura de

periodo largo, o con configuraciones estructurales muy irregulares. Esto es importante ya que como se mencionó, se realizan muchas simplificaciones, bajo la hipótesis de que el periodo/modo fundamental de vibración, domina la respuesta dinámica de la estructura, y esta hipótesis no es válida para todo tipo de estructuras.

Asimismo, se nota que, una vez realizado el análisis preliminar, posteriormente el reto será realizar las pruebas de laboratorio necesarias, para comprobar que se puede producir un aislador con las propiedades mecánicas deseadas.

Se considera que sería pertinente que la próxima edición de las NTC de la CDMX, o el manual de obras civiles (MDOC) de la comisión federal de electricidad (CFE), contenga un apartado dedicado al análisis de este tipo de estructuras, ya que, por el momento, el obtener los desplazamientos de diseño, no se encuentra contemplado por ninguna norma, código o manual mexicano.

También se resalta el hecho de que aunque las bondades del aislamiento sísmico son muchas, este también presenta importantes limitaciones, entre estas destaca el costo ya que aun en la actualidad, implementar aislamiento como medio para controlar la respuesta estructural en edificios con uso de suelo de casa-habitación es una idea que no convence a muchos constructores ya que por lo general en la industria de la construcción se opera con márgenes de ganancia muy estrechos, por lo que la inversión inicial o la incertidumbre debido a que aun actualmente los ingenieros trabajando el aislamiento sísmico han tenido dificultades para hacer estándares de las etapas de análisis, diseño, pruebas físicas de laboratorio y construcción, son suficientes motivos para no considerar el aislamiento como una opción.

Debido a esto actualmente se discute más de los beneficios del aislamiento en estructuras cuya operación casi ininterrumpida es crítica después de un sismo, sin embargo, poco a poco son más y más variadas las estructuras en las que se opta por implementar estas técnicas, por lo que se considera que es cuestión de tiempo para que estas problemáticas sean cuestión del pasado.

Sin embargo por el momento el aislamiento sigue siendo visto como un lujo o algo experimental, y esto es de esperarse ya que la primer aplicación de lo que es considerado aislamiento moderno fue hace aproximadamente 50 años en 1969, y como ya se mencionó presenta diversos problemas, mientras que dispositivos más sofisticados como el apoyo elastómero con núcleo de plomo se inventó en 1974, y algunas de las estructuras diseñadas desde entonces, cuentan con dispositivos diseñados para sismos con periodos de retorno de hasta 1000 años, por lo que todavía se necesita más tiempo para documentar y estudiar la efectividad de los dispositivos de aislamiento sísmico.

También diversos estudios han señalado que conforme aumenta el periodo de las estructuras con la altura, estas se vuelven más difíciles de aislar efectivamente, ya que la participación del modo de vibrar fundamental se hace menos significativo, a la vez que participan más los modos de vibrar secundarios que son ignorados en los modelos simplificados.

Sin embargo, hay cada vez más proyectos que optan por el aislamiento sísmico, por lo que se considera es cuestión de tiempo para que estos puedan ser más accesibles

Referencias

E. Blanford, Eric Keldrauk, M. Laufer, Michael Mieler, J. Wei, Bozidar Stojadinovic, and Per Peterson. Advanced seismic base isolation methods for modular reactors. 05 2022.

Gobierno de la CDMX. Normas técnicas complementarias para diseño por sismo. Gobierno de la CDMX, 2017.

Gobierno de la CDMX. Normas técnicas complementarias para diseño por viento. Gobierno de la CDMX, 2017.

Gobierno de la CDMX. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones. Gobierno de la CDMX, 2017.

Gobierno de la CDMX. Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones. Gobierno de la CDMX, 2017.

Masahiko Higashino and Shin Okamoto. Response Control and Seismic Isolation of Buildings. Taylor and Francis, 2006.

James Kelly. Vertical flexibility in isolation systems. Civil Engineering Research Journal, 4, 03 2018.

Giuseppe Lomiento. Testing protocols for seismic isolation systems. 07 2011.

Mageba-Group. Protección antisísmica mageba – preservación fiable de estructuras, 2021. Última visita 16 mayo 2022. <https://www.mageba-group.com/global/data/docs/es/2575/BROCHURE-RESTON-PENDULUM-latam-es.pdf?v=1.4>

Nicos Makris. Seismic isolation: Early history. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10 2018.

Carlos Méndez Galindo, Jaime Higuera, and José Bahena. Recent applications of seismic protection of structures in Latin America, 10 2016. Última visita 19 Julio 2022. <https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Mendez-Galindo/publication/311512656/figure/fig9/AS:668317748572163@1536350776105/Isolators-at-the-base-of-the-Hotel-Via-Vallejo-building-during-construction.jpg>

Troy A. Morgan and Stephen A. Mahin. The Use of Base Isolation Systems to Achieve Complex Seismic Performance Objectives. Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2011.

Servicio Sismológico Nacional. Magnitud de un sismo. Technical report, Universidad Nacional Autónoma de México, 2020.

José Antonio Pérez Pontón. Respuesta Sísmica en Edificios con Aislamiento de Base. TESIUNAM, 2018.

Keri L. Ryan and Nhan D. Dao. Influence of vertical ground shaking on horizontal response of seismically isolated buildings with friction bearings. ASCE Journal of Structural Engineering, 01 2016.

Andrew Charleson y Adriana Guisasola. Seismic Isolation for Architects. Routledge, 2017.

Farzad Naeim y James M. Kelly. Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice. John Wiley and Sons, 1999.

Mageba. Aislador deslizante RESTON®PENDULUM. https://www.mageba-group.com/latam/data/docs/es_BR/2575/BROCHURE-RESTON-PENDULUM-latam-es.pdf?v=1.1