



**BUAP**

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**DISEÑO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO TIPO LRB  
DE UN EDIFICIO CONFORME A LA NORMA  
CHILENA  
TESINA**

para obtener el grado de

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

Presenta:

**ING. SHAYURI BARRANCO ALONSO**

Director de tesis:

**PhD. JUAN PABLO HIDALGO TOXQUI**

Codirector de tesis:

**M.I. MARCOS ALFREDO LEÓN PORQUILLO**

Puebla, Pue.

Mayo 2024



**BUAP**

**Oficio No. SIEP/0096/2024**

**C. Shayuri Barranco Alonso**

Matrícula 222470051

Pasante de la Maestría en Ingeniería  
con opción terminal en Estructuras

Facultad de Ingeniería, BUAP.

Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesina, le autoriza desarrollar el tema titulado: **Diseño del sistema de aislamiento tipo LRB de un edificio conforme a la Norma Chilena**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Estructuras. Asignándose como Director de tesina al Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui y Codirector al M.I. Marcos Alfredo León Porquillo.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Zaragoza, a 15 de enero de 2024.

**M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora**

Director



C.c.p. Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui y M.I. Marcos Alfredo León Porquillo, Director y Codirector del tema de tesina.

C.c.p. Archivo  
AEPS/JPHT/sco\*

Facultad  
de Ingeniería

Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
222 229 55 00 Ext. 7610



**BUAP**

Oficio No. SIEP/026 /2024

Asunto: Carta de autorización de impresión de Tesina

**Mtro. Alfredo Avendaño Arenaza**

Director General de Bibliotecas

Presente

Por este medio me dirijo a usted para informarle que el trabajo de titulación que se describe más adelante ha sido avalado bajo los preceptos de integridad académica; por tanto, se autoriza la impresión de la Tesina de la alumna:

Nombre de la alumna: **Ing. Shayuri Barranco Alonso**

Matrícula: **222470051**

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería con Opción Terminal Estructuras

Nombre de la Tesina: **“Diseño del Sistema de Aislamiento tipo LRB de un edificio conforme a la Norma Chilena”**

Sin más por el momento, agradezco la atención al presente.

Atentamente

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Z., a 21 de mayo de 2024

**M. I. Ana Elena Posada Sánchez**

Secretaria de Investigación y Estudios  
de Posgrado



**Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui**

Director de la Tesina

**M. I. Marcos Alfredo León Porquillo**

Codirector de la Tesina

## DEDICATORIA

A mis padres Adriana y Octavio quienes me han dado su apoyo incondicional y todo su amor para continuar con cada una de mis metas, todo lo que soy se los debo a ellos.

A mi esposo Esteban quien a pesar de la distancia día tras día me daba esa motivación para seguir esforzándome hasta en los días más difíciles y agotadores.

A mi hermano Iván por brindarme fortaleza en los momentos difíciles y ser uno de los motores de mi vida.

## AGRADECIMIENTOS

A mi Director de Tesina el Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui y Codirector de Tesina el Mtro. Marcos Alfredo León Porquillo por su tiempo y compartirme su experiencia durante el proceso de elaboración de dicho trabajo.

A cada uno de mis profesores del Posgrado por el enriquecimiento que significaron para mí sus clases.

Al Ing. Miguel Granillo Altamirano quien apoyo mi proyecto profesional y al mismo tiempo me brindó la confianza para continuar creciendo en el ámbito laboral.

Al Maestro Ricardo Juárez Méndez por su asesoría y apoyo para ampliar su tema de tesis.

## **RESUMEN / ABSTRACT**

En el presente trabajo se lleva a cabo el diseño del sistema de aislamiento sísmico para un edificio empleando dispositivos tipo LRB con la norma chilena. El objetivo principal es comprender la filosofía que ocupan las normativas de dicho país, aunado a esto, se le suman criterios presentados por diferentes exponentes en la literatura que aborda este tema y se destaca la importancia de que la superestructura se comporte como un cuerpo rígido y el carácter iterativo del diseño de los aisladores.

In this work, the design of the seismic isolation system (LRB) with the Chilean standard is carried out. The main objective is to understand the philosophy behind the regulations of that country, in addition to the criteria presented by different authors in the literature dealing with this subject, and the importance of the superstructure behaving as a rigid body and the iterative nature of the design of the isolators are emphasized.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	VIII
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES.....	1
1.1 HISTORIA DE LOS AISLADORES SÍSMICOS.....	1
1.2 SISTEMAS DE CONTROL DE COMPORTAMIENTO SÍSMICO .....	3
1.3 AISLAMIENTO SÍSMICO .....	4
1.4 REQUISITOS DEL AISLAMIENTO SÍSMICO.....	5
1.5 TIPOS DE AISLADORES SÍSMICOS.....	5
1.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE AISLADORES.....	8
1.6.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE AISLADORES TIPO LRB .....	9
1.7 ESTRUCTURAS CON AISLADORES TIPO LRB EN MÉXICO .....	10
1.8 ANTECEDENTE: TESIS “COMPARATIVA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS CON AISLADORES SÍSMICOS, UN CASO DE ESTUDIO” .....	11
CAPÍTULO 2 NORMATIVA DE DISEÑO CHILENA.....	12
2.1 FILOSOFÍA DE NORMATIVIDAD CHILENA .....	12
2.1.1 NORMATIVA NCh2745. ....	12
2.1.2 NORMATIVA NCh433. ....	16
CAPÍTULO 3 ESTRUCTURA DE BASE FIJA.....	22
3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA .....	22
3.2 CARGAS PERMANENTES Y DE USO .....	25
3.2.1 CARGA MUERTA .....	25
3.2.2 CARGA VIVA .....	25
3.3 COMBINACIONES DE CARGA .....	25
3.3.1 FACTORES DE COMBINACIÓN DE CARGAS EMPLEANDO EL DISEÑO POR RESISTENCIA. ....	25
3.4 CONSIDERACIONES DE MODELADO NCh433 .....	26
3.5 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO.....	27
3.6 ANÁLISIS SÍSMICO DE LA ESTRUCTURA EMPOTRADA.....	27
3.6.1 PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN MODAL .....	28
CAPÍTULO 4 ESTRUCTURA DE BASE AISLADA.....	32
4.1 CONSIDERACIONES DE MODELADO NCh2745 .....	32
4.2 ANÁLISIS ESTÁTICO DE ACUERDO CON LA NORMA NCh2745.....	32
4.2.1 DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO .....	34
4.2.2 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO .....	35
4.2.3 DESPLAZAMIENTO TOTAL .....	36
4.3 PREDIMENSIONAMIENTO DEL AISLADOR.....	38
4.3. PREDIMENSIONAMIENTO DEL DIÁMETRO NÚCLEO DE PLOMO.....	41

4.3.2 DISEÑO DEL AISLADOR SISMICO TIPO LRB.....	41
4.3.3 PREDIMENSIONAMIENTO DEL ÁREA DE CAUCHO .....	42
4.3.4 RIGIDEZ VERTICAL DEL AISLADOR.....	45
4.3.5 FUERZAS LATERALES DE DISEÑO.....	47
4.4 ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL DE ACUERDO CON LA NCh2745 .....	50
4.4.1 SOLICITACIÓN SÍSMICA.....	54
4.4.2 CORTANTE BASAL .....	58
4.4.3 FUERZA DE RESTITUCIÓN LATERAL .....	58
4.4.4 ESTABILIDAD PARA CARGAS VERTICALES.....	59
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	61
5.1 DISTORSIÓN DE ENTREPISO.....	61
5.2 ACTUALIZACIÓN DE DISEÑO DEL AISLADOR SÍSMICO.....	64
5.3 REVISIÓN DE LA ESTABILIDAD VERTICAL.....	70
5.3 ACELERACIONES DE ENTREPISO.....	71
CONCLUSIONES .....	74
ANEXO A.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	80



## INTRODUCCIÓN

Una de las tecnologías desarrolladas en las últimas décadas para mejorar el comportamiento de los edificios ante un evento sísmico son los aisladores. Estos dispositivos han sido utilizados en diferentes partes del mundo y han demostrado un buen comportamiento, por esto mismo su uso ha ido en aumento.

Hoy en día, el diseño por desempeño ya ha permeado en muchas de las normativas del mundo y el uso de aisladores permite controlar los daños tanto de la estructura como de sus contenidos.

Si bien los aisladores no siempre son la respuesta idónea para todos los casos debido a sus limitantes en cuanto a espacio, costos e incluso características del suelo de desplante y zona sísmica, estos dispositivos sí suponen una alternativa viable en los casos en que se busca la integridad de los contenidos y servicialidad de la edificación.

Por lo anterior expuesto se considera de interés conocer lo señalado en la norma de Chile, país donde el uso de los aisladores sísmicos se ha vuelto más común a partir del sismo del Maule del 2010 donde se observó el buen desempeño de los edificios que contaban con este sistema.

El análisis desarrollado en el presente trabajo se ha llevado a cabo siguiendo las recomendaciones de los distintos apartados de la norma chilena NCh2745, 2012 y para ello fue necesario llevar a cabo el análisis sísmico de una estructura de base fija con la norma NCh433, 2012 para tener un punto de comparación para los niveles de reducción de los desplazamientos, aceleraciones de entrepiso y cortante basal, beneficios técnicos del uso de dispositivos de aislación.

Los aisladores seleccionados son de caucho con núcleo de plomo (tipo LRB), estos dispositivos en particular son de los más estudiados en cuanto a comportamiento brindando así una mayor certeza de su desempeño.

# **CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES**

En este capítulo se dará una breve introducción a las tecnologías desarrolladas a través del tiempo para los sistemas de control de comportamiento sísmico empleados en diversas estructuras. Para los dispositivos de aislación en la base, que son el tema que compete al presente trabajo, se describen los tipos, ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

## **1.1 HISTORIA DE LOS AISLADORES SÍSMICOS**

Existen civilizaciones, que a través del tiempo, han sufrido los embates de la actividad sísmica en sus construcciones, lo cual, les brindó la experiencia necesaria para establecer conceptos que ayudaron a minimizar los efectos adversos de los sismos en las estructuras, ejemplo de ello son: la simetría, armonía, centro de gravedad, solidez en la cimentación y el aislamiento, volviéndose estos tan fundamentales para minimizar el riesgo de colapso que forman parte de nuestra filosofía actual de diseño.

En el caso del aislamiento, la relación que se logra hacer entre las demandas generadas y el tipo de conexión que hay entre el suelo y la estructura, dio como resultado diversos sistemas a lo largo del mundo, teniendo como principal objetivo el generar conexiones menos rígidas que realicen una menor transmisión de los movimientos del suelo hacia la estructura, y por ende, una disminución de las demandas en los elementos; ejemplo de ello son el uso de capas de piedra debajo de las estructuras como en Perú con las Shicras. De manera similar en Japón se emplearon piezas de madera y en la Antigua Grecia se colocaron capas de suelo fino y algas marinas entre los bloques de piedra en el Partenón (Kirikov, 1992).

Los sistemas de aislación modernos tuvieron como precursor el sistema de cimentación con caucho artificial de una escuela en Skopje en Macedonia, Yugoslavia, en 1979 (Figura 1) esta primera aplicación del material tuvo como inconveniente su baja rigidez axial, problemas de acoplamiento de vibración horizontal y vertical y un abultamiento lateral en los bloques de caucho. Una segunda aplicación de este material como parte de un sistema de aislamiento, es el edificio William Clayton, Wellington en 1981 (Figura 2), el cual fue el primer edificio en ser aislado sobre dispositivos compuestos por caucho y plomo recién inventados por el Ingeniero sísmico neozelandés, el Dr. Bill Robinson. (Charleson & Guisasola, 2017).



*Figura 1. Caucho utilizado en la escuela en Skopje (Naeim & Kelly 1999).*

A partir de ahí, el uso de los aisladores sísmicos tuvo un crecimiento lento, pero su adopción fue potenciada por los eventos sísmicos que tuvieron lugar en Japón (Kobe 1995), China (Wenchuan 2008), Italia (Abruzzo 2009), Chile (Región del Maule 2010) y Nueva Zelanda (Christchurch 2011). Después de cada uno de dichos eventos sísmicos, en los que hubo edificios que colapsaron, se apreció el buen desempeño de los edificios aislados ya existentes. Como un ejemplo más de esto podemos mencionar el reciente evento ocurrido en Turquía y Siria el 6 de febrero de 2023 dado que en Turquía en 2013 se decretó que todos los hospitales con vulnerabilidad alta debían contar con base aislada. Con esto se dio lugar a una comparativa entre los hospitales que no contaban con estos dispositivos y los que sí, siendo los hospitales no aislados los más afectados, los cuales fueron cerrados debido a su inoperancia producto de los daños a los elementos no estructurales.



*Figura 2. Edificio William Clayton, Nueva Zelanda, Wellington construido en 1981. Fuente: Science Learning Hub, 2019.*

## 1.2 SISTEMAS DE CONTROL DE COMPORTAMIENTO SÍSMICO

El diseño sísmico ha tenido, a través del tiempo, diferentes enfoques con respecto a lo esperado en el comportamiento de la estructura ante un evento de esta naturaleza. En la actualidad, el diseño de las estructuras considera que la disipación de energía producto del sismo ocurra permitiendo un comportamiento inelástico de los elementos, esto implica que se acepta un cierto nivel de daño en la estructura que evite el colapso de esta y que salvaguarde la vida de los ocupantes. Una práctica común al considerar esta interacción en los elementos es el permitir la generación de rótulas plásticas en las vigas, que si bien, cumple con la función de disipación de energía esperada, implica también una degradación de las propiedades dinámicas de la estructura y futuras reparaciones tanto de elementos estructurales como no estructurales, lo que puede condicionar su ocupación inmediata, algo que puede limitar los servicios prestados siendo crítico en edificios de gran importancia como lo son: hospitales, aeropuertos, centrales de bomberos, servicios de comunicación, entre otros.

Derivado de lo anterior y en conjunto con el desarrollo de nuevos enfoques, como es el caso del diseño basado en desempeño, se han generado sistemas de control de comportamiento sísmico que tienen como función brindar a la estructura la capacidad de incrementar la disipación de energía necesaria para evitar daños en la estructura o bien generar un desacoplamiento de la respuesta de la estructura con respecto al suelo (Genatios & Lafuente, 2016).

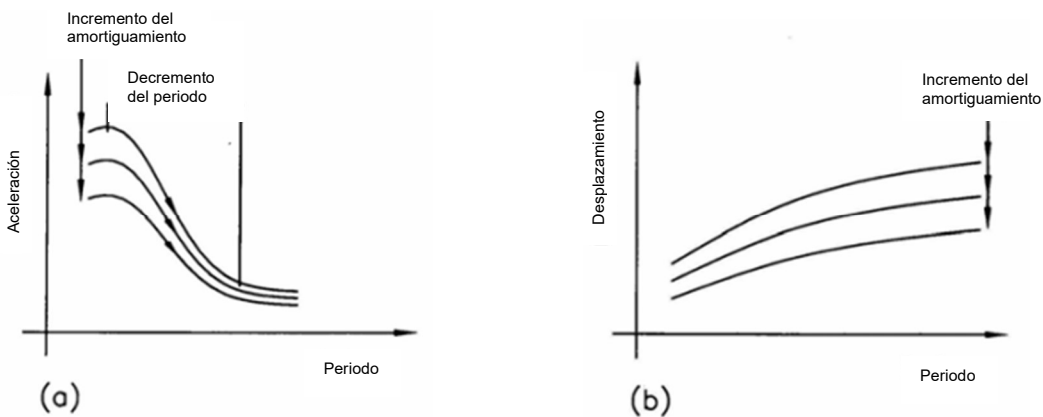
Una clasificación de los sistemas de control de la respuesta sísmica es la propuesta por Hanson en 1993:

- a) Sistemas pasivos: aisladores de base y los dispositivos suplementarios de disipación de energía.
- b) Sistemas activos: dispositivos mecánicos cuyas características cambian de acuerdo con mediciones de los movimientos de la estructura.

Dentro de la clasificación de los sistemas de control de comportamiento sísmico, el aislamiento sísmico es considerado un sistema pasivo, lo que significa que los dispositivos se activan al momento de que la estructura tiene interacción con una fuerza externa.

### 1.3 AISLAMIENTO SÍSMICO

Los periodos dominantes en el suelo producto de las aceleraciones sísmicas rondan de 0.1 s a 1 s, por lo que, una estructura que tenga un periodo fundamental entre estos dos valores podría tener una alta vulnerabilidad. Dicho esto, el hecho de tener una estructura fuera de este rango de valores en los periodos permite reducir las demandas a la estructura, esto se logra al aumentar la flexibilidad del sistema, lo cual aumenta el periodo fundamental de este. Dotar a una estructura de flexibilidad de manera inherente genera que los desplazamientos sean mayores, pero este efecto puede disminuirse con ayuda del amortiguamiento que diferentes dispositivos pueden brindar, Figura 3 (Skinner, Kelly, & Robinson, 2011).



- a) El aumento de período y amortiguamiento disminuyen la respuesta de aceleración sísmica.
- b) El aumento de periodo aumenta el desplazamiento total del sistema aislado, pero esto se compensa con el amortiguamiento.

Figura 3. Efecto de aumentar la flexibilidad de una estructura. Fuente: Skinner, Kelly & Robinson, 2011.

El aislamiento de la estructura la desacopla de los movimientos horizontales del suelo, esto hace que el modo fundamental de vibrar de la estructura sea mayor al periodo fundamental del suelo, limitando así la respuesta de la estructura ante el sismo. El desacoplamiento que brinda el aislamiento permite, debido a que su rigidez horizontal es muy baja, que el edificio se comporte muy similar a un cuerpo rígido ya que se minimizarían los drifts de entrepisos, limitando así los daños debido a los pequeños desplazamientos que desarrolla la estructura (Skinner, Kelly, & Robinson, 2011).

## 1.4 REQUISITOS DEL AISLAMIENTO SÍSMICO

Según Pinto (2022) los dispositivos de aislamiento sísmico contemporáneos deben cumplir las siguientes funciones:

- Rigidez lateral baja: esta característica permite el desacoplamiento del movimiento de la estructura con respecto al suelo.
- Rigidez vertical alta: característica que garantiza la transmisión de las cargas verticales en condiciones de servicio y ante un evento sísmico.
- Recentrado: disminuye la acumulación de desplazamientos producto de un sismo, lo cual afectaría el comportamiento del dispositivo.
- Amortiguamiento viscoso que puede llegar hasta un valor del 30%.

## 1.5 TIPOS DE AISLADORES SÍSMICOS

Hoy en día existen varios tipos de dispositivos de aislación, cada uno con diferentes características y ventajas, seleccionados a partir de las necesidades del proyecto. Dentro de ellos los de uso extendido son los elastoméricos y los de fricción.

### ELASTOMÉRICOS

- *Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB)*

Los aisladores tipo LDRB (low damping rubber bearing), Figura 4 y Figura 5, tienen como componentes láminas de caucho intercaladas con placas de acero, que deben ser dimensionados para generar la capacidad de carga vertical requerida y una rigidez horizontal pequeña que permita la concentración de desplazamientos en los dispositivos de aislación, aunque estos desplazamientos deben ser moderados. Tienen la capacidad de recentrado, aportan un amortiguamiento bajo entre el 2% al 4% y su comportamiento es elástico, pero sufre de degradación de rigidez ante cargas sísmicas (Naeim & Kelly, 1999).



Figura 4. Aislador elastomérico.  
Fuente: Sísmica.cl.



Figura 5. Aislador elastomérico.  
Fuente: Sísmica.cl.

- *Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB)*

Este tipo de aisladores HDRB (high damping rubber bearing) mantienen la estructura de un aislador tipo LDRB con la particularidad de que el caucho se altera de tal manera que alcance un amortiguamiento del 8% al 12% (Naeim & Kelly, 1999).

- *Aisladores elastoméricos de núcleo de plomo (LRB)*

En el caso de requerir un porcentaje de amortiguamiento mayor en los aisladores elastoméricos, se tienen como opción los aislantes LRB (lead rubber bearing), Figura 6 y Figura 7, en los cuales se recurre a uno o varios núcleos de plomo que en conjunto con el caucho brindan valores de amortiguamiento hasta del 30%. El plomo provee de rigidez contra el viento y se comporta de manera elastoplástica, es decir, tiene la capacidad de mantener su resistencia ante un gran número de ciclos de desplazamiento disipando una gran cantidad de energía debido a la fluencia del plomo y la recristalización de este (Naeim & Kelly, 1999).

Los aisladores tipo LRB tienen un comportamiento histerético que es producto de una combinación del comportamiento elástico lineal del caucho y el comportamiento histerético plástico del núcleo de plomo, este comportamiento permite brindar a los dispositivos, como ya se mencionó líneas arriba, un porcentaje de amortiguamiento alto alrededor del 25%-30% (Skinner, Kelly, & Robinson, 2011).



Figura 6. Aislador elastomérico con núcleo de plomo. Fuente: Sísmica.cl.



Figura 7. Aislador elastomérico con núcleo de plomo. Fuente: Sísmica.cl.

## AISLADORES DESLIZANTES

- *Péndulo de fricción (FPS)*

Los aisladores tipo péndulo de fricción FPD (friction pendulum bearing), Figura 8 y Figura 9, incluyen superficies esféricas de contacto que permiten un deslizamiento relativo y generan un movimiento pendular. Pueden ser de superficie curvada simple o doble. Estos péndulos funcionan de manera tal que, al producirse el desplazamiento entre las planchas, se produce un leve levantamiento de la estructura; dada la curvatura de las planchas, el peso de la estructura genera una acción restauradora que busca colocar a la estructura en su posición inicial de equilibrio, una vez finalizado el terremoto. El periodo de vibración es una función del radio de la curvatura de la superficie cóncava y es independiente de la masa de la superestructura. El amortiguamiento es proporcionado por la fuerza dinámica de fricción, generando valores de amortiguamiento que varían entre 10% y 30% del amortiguamiento crítico (Genatios & Lafuente, 2016).

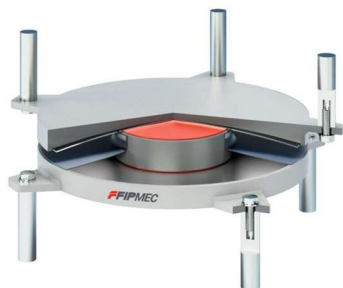


Figura 8. Aislador péndulo de fricción. Fuente: Sísmica.cl.



Figura 9. Aislador péndulo de fricción. Fuente: Sísmica.cl.



- *Apoyos deslizantes planos*

Este tipo de aisladores consisten en dos superficies planas que permiten desplazamientos horizontales gracias a un material que de manera habitual es elastomérico. Por lo general las superficies deslizantes son de acero inoxidable y de un material polimérico de baja fricción.

Los aisladores de apoyos deslizantes en ocasiones se utilizan en conjunto con aisladores de tipo elastoméricos, principalmente en estructuras donde el volteo es despreciable, aprovechando así las bondades de ambos dispositivos.

## **1.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE AISLADORES**

El uso de aisladores está creciendo alrededor del mundo, esto debido al buen comportamiento que han presentado las estructuras aisladas existentes durante los eventos sísmicos de las últimas décadas. A continuación, se presentan las ventajas y desventajas que tienen estos dispositivos con respecto a una estructura de base rígida (Genatios & Lafuente, 2016).

### **Ventajas:**

- Simplifica el análisis de la estructura al mantenerla en el rango elástico.
- Reducción de las aceleraciones espectrales, lo que disminuye las demandas de los elementos estructurales.
- La respuesta es controlada por el primer modo de vibrar, por lo que se pueden despreciar los demás modos.
- Con un adecuado diseño, los aisladores ayudan a disminuir la torsión y se puede hacer uso de métodos estáticos simplificados.

### **Desventajas:**

- Se requiere una considerar un espacio que permita el desarrollo de los desplazamientos en caso de un sismo y que permita el acceso para inspección de estos dispositivos, así como su sustitución en caso de daños.
- Consideración de un entrepiso adicional para la instalación de los aisladores.
- Los desplazamientos pueden afectar a estructuras vecinas.
- Considerar el uso de tuberías flexibles para los servicios del edificio, agua potable, aguas servidas, luz, telecomunicaciones y todas aquella que crucen el plano de aislación.

- Permite una ocupación inmediata de las instalaciones después de un evento sísmico.
- Hacer uso de aisladores sísmicos puede generar ahorros en la construcción.
- La rehabilitación de estructuras aisladas es más barata con respecto a la tradicional.
- Mantenimiento para mantener libre la zona considerada para generar los desplazamientos en caso de un evento sísmico.
- No son elementos baratos.
- Tiempo de fabricación.
- Requiere un análisis más detallado en suelos blandos y en edificios altos.

### 1.6.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE AISLADORES TIPO LRB

El dispositivo de aislación a utilizar en el presente trabajo será tipo LRB para ampliar el análisis realizado por el Maestro Ricardo Juárez. Según Pinto (2022) para este tipo de aislador se tienen las siguientes ventajas y desventajas:

#### **Ventajas:**

- Estudios diversos, lo que brinda confiabilidad a los dispositivos.
- La disipación de energía provista por el plomo y las placas de acero evita un cambio de las propiedades del caucho debido a la temperatura generada durante el evento sísmico.
- No requiere elementos externos para añadir amortiguamiento.
- El plomo es estable bajo deformación, recristalización después de deformación.
- Numerosos fabricantes.
- Aceleraciones en la estructura moderadas.

#### **Desventajas:**

- Limitaciones en dimensiones.
- Errores de fabricación difíciles de identificar.
- El desempeño depende de la temperatura.
- El periodo depende de la carga sobre el aislador.
- Proceso algo complejo para su diseño.
- Desarrollo de momentos  $P-\Delta$ .

## 1.7 ESTRUCTURAS CON AISLADORES TIPO LRB EN MÉXICO

Si bien el uso de aisladores sísmicos en México no está extendido, se cuenta ya con varias estructuras aisladas con aisladores elastoméricos y friccionantes. A continuación, se enlistan las estructuras que cuentan con aisladores tipo LRB en el país (Pinto, 2022):

1994 – Puente San Rafael, México-Querétaro

1997 – Laboratorio de Conexant, Guadalajara

1998 – Ampliación Expo Guadalajara

2001 – Torre Administrativa, Univ. de Guadalajara

2001 – Edificio Investigación y Posgrado, Univ. Guadalajara

2001 – Edificio Conexant, Mexicali

2004 – Distribuidor Patria Acueducto, Guadalajara

2005 – Distribuidor Vial, Mexicali

2006 – Puente Tijuana, Tijuana

2015 – Hotel Vía Vallejo, Cd. de México Hotel desplantado sobre centro comercial

2016 – Segundo Piso en Puebla

2020 – Espacio Condesa, Cd. de México

2020 – Hospital general ISSSTE Tlahuac, Cd. de México

Una de las razones por la que hay una fracción tan pequeña de edificios aislados con respecto a otros países de alta sismicidad, se debe al hecho de que aún es reducido el número de Ingenieros que tienen una formación en este campo y donde la misma norma no había contemplado una sección específica de estructuras aisladas, hasta las recientes Normas Técnica Complementarias del año 2023, generando así un punto de incertidumbre para muchos Ingenieros de la práctica agregando además el costo de los dispositivos.

A través de los años, lo que pareciera ser un tema innovador en México es ya una práctica común en otros países, donde la cantidad de edificios aislados han ido en aumento ya que un aislador sísmico representa una forma eficiente de disipación de energía y control de la respuesta estructural, lo cual se alinea con el desarrollo de filosofías de diseño como el Diseño basado en desempeño, del cual ya podemos identificar su esencia en las Normas Técnicas Complementarias (NTC-2023) con diferentes consideraciones que permiten orientar, como tal, el desempeño que esperamos de una estructura una vez ocurrido un sismo.

Cuando se considera implementar el aislamiento en una estructura, como es el caso del presente trabajo donde se contempla el uso de aisladores tipo LRB, se espera una reducción considerable de los elementos mecánicos en los sistemas estructurales, simplificando el análisis al procurar mantener a la estructura en el rango elástico lineal y una reducción en costos de construcción de alrededor de un 10% en comparación a una estructura convencional, a esto se suma el ahorro en los costes de rehabilitación después de un sismo gracias al nivel de desempeño concebido en el diseño, y a la posibilidad de una ocupación inmediata que evita un cese de actividades.

### **1.8 ANTECEDENTE: TESIS “COMPARATIVA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS CON AISLADORES SÍSMICOS, UN CASO DE ESTUDIO”**

Del análisis realizado para la estructura con base rígida con las NTC-2017, en el trabajo realizado por el Maestro Ricardo Juárez (Juárez, 2021), se concluyó que la estructuración propuesta y el diseño del aislador sísmico cumplen con las condiciones de servicio y resistencia esperados para una estructura aislada con base a las metodologías señaladas en el ASCE/SEI-7/16 y el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MDOCCFE, 2015). En dicho trabajo, se demostró que los valores de los parámetros dinámicos de la estructura no variaban en gran medida entre metodologías, ni tampoco lo hacen los resultados de desplazamientos y fuerzas de los entrepisos. Esto parece congruente por el hecho de que en México el MDOCCFE-2015 ha sido un documento de referencia importante, esto debido a la incorporación de temas más específicos, siendo en México un primer acercamiento a las filosofías de diseño en las que se basa la norma ASCE/SEI-7/16.

Con base a lo mencionado del trabajo de la tesis base (Juárez, 2021), el presente trabajo tiene como objetivo el ampliar la comparativa realizada por el Maestro Ricardo Juárez complementándola con los resultados del diseño del aislador sísmico realizado con la normatividad la chilena, todo ello para permitir encontrar en las filosofías de diseño aspectos y criterios relevantes a tomar en cuenta en los diseños en México de estructuras con este sistema.

En este proyecto se lleva a cabo el análisis estático y el análisis dinámico modal espectral para el diseño del aislador sísmico, el análisis tiempo historia no se lleva a cabo ya que las características de la estructura no hacen obligatorio su uso.

## CAPÍTULO 2 NORMATIVA DE DISEÑO CHILENA

En el presente capítulo se describirán las filosofías de diseño de la normativa chilena tanto en un diseño sísmico estándar (NCh433, 2012) como uno para una estructura con base aislada (NCh2745, 2012) ya que esta última indica que se debe atender todo lo dispuesto en la NCh433.

A partir de ese capítulo, en el cuerpo de este trabajo, se indica en las expresiones utilizadas, el número de ecuación con la que se encuentran identificadas en las normas indicadas.

### 2.1 FILOSOFÍA DE NORMATIVIDAD CHILENA

#### 2.1.1 NORMATIVA NCh2745.

- *Filosofía de normatividad chilena (NCh 2745, 2012)*

En el país de Chile para estructuras aisladas se tiene la normativa NCh2745 “Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica”, cuya filosofía de diseño involucra lo siguiente (INN, Norma Chilena Oficial NCh2745, 2013):

- Resistir sismos pequeños y moderados sin daño en elementos estructurales, componentes no estructurales y contenidos del edificio.
- Resistir sismos severos sin que exista:
  - Falla del sistema de aislación.
  - Daño significativo a los elementos estructurales
  - Daño masivo a elementos no estructurales.

Si bien, para implementar el aislamiento sísmico se deben seguir los lineamientos de la NCh2745, en esta misma normatividad se indica que se debe cumplir con lo dispuesto en la NCh433, esto se aborda más adelante en el apartado *2.1.2 Normativa NCh433*.

- *Análisis estático NCh2745.*

La normativa busca limitar el análisis estático a superestructuras rígidas para lograr mayores reducciones de esfuerzos. Los requisitos para realizar un análisis estático lateral equivalente son (INN, Norma Chilena Oficial NCh2745, 2013):

- La estructura esté ubicada a más de 10 km de todas las fallas activas.
- La estructura esté ubicada en un tipo de suelo I o II clasificado a partir de lo señalado en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación sísmica del terreno. Fuente NCh433, 2012.

Tipo de suelo		$V_{s30}$ (m/s)	RQD	$q_u$ (MPa)	$N_1$ (golpes/pie)	$S_u$ (MPa)
A (I)	Roca, suelo cementado	$\geq 900$	$\leq 50\%$	$\geq 10$ ( $\varepsilon_{qu} \leq 2\%$ )		
B (II)	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o firme	$\geq 500$		$\geq 0.40$ ( $\varepsilon_{qu} \leq 2\%$ )	$\geq 50$	
C (entre suelo II & III)	Suelo denso o firme	$\geq 350$		$\geq 0.30$ ( $\varepsilon_{qu} \leq 2\%$ )	$\geq 40$	
D (III)	Suelo medianamente denso o firme	$\geq 180$			$\geq 30$	$\geq 0.05$
E (IV)	Suelo de compacidad o consistencia mediana	$< 180$			$\geq 20$	$< 0.05$
F	Suelos especiales	*	*	*	*	*

Donde:

$N_1$  : Índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 0.1 MPa.

RQD : Rock Quality Designation ASTM D 6032.

$q_u$  : Resistencia a la compresión simple del suelo.

$\varepsilon_{qu}$  : Deformación unitaria del suelo desarrollada cuando se alcanza la

resistencia máxima en el ensayo de compresión simple

$S_u$  : Resistencia al corte no-drenada del suelo

- La superestructura tenga menos de cinco pisos y una altura menor que 20 m.
- El período efectivo de la estructura aislada sea menor o igual que 3 segundos.
- El período efectivo de la estructura aislada sea mayor que tres veces el período elástico de base fija de la superestructura.
- La superestructura tenga una configuración regular.
- El sistema de aislación esté definido por las siguientes propiedades:
  - La rigidez efectiva (secante) del sistema de aislación para el desplazamiento de diseño es mayor que un tercio de la rigidez efectiva (secante) a un 20% del desplazamiento de diseño.
  - El sistema de aislación tiene la capacidad de producir una fuerza restitutiva, como se especifica en su apartado de Fuerza de restitución lateral.
  - El sistema de aislación tiene propiedades de fuerza-deformación que son independientes de la velocidad de carga.
  - El sistema de aislación tiene propiedades de fuerza-deformación que son independientes de las cargas verticales y efectos de sollicitaciones bidireccionales.
  - El sistema de aislación debe permitir alcanzar el desplazamiento sísmico máximo posible y no menos de 1.2 veces el desplazamiento total de diseño.
- *Análisis espectral*

Para el análisis espectral modal la normativa NCh2745 establece menos requisitos en comparativa con el análisis estático, pero limitando su uso a suelos que no clasifiquen como blandos ya que para esto se requiere elaborar un espectro específico del lugar (INN, Norma Chilena Oficial NCh2745, 2013).

Los requisitos para un análisis espectral son los siguientes (INN, Norma Chilena Oficial NCh2745, 2013):

- La estructura esté ubicada en un tipo de suelo I, II o III.
- El sistema de aislación esté definido por todas las propiedades mencionadas para el análisis estático.

La construcción del espectro de diseño se basa en lo señalado en la Figura 10 y debe ser escalado por el factor de la zonificación sísmica (Z) de la Tabla 2 y los valores de la Tabla 3.

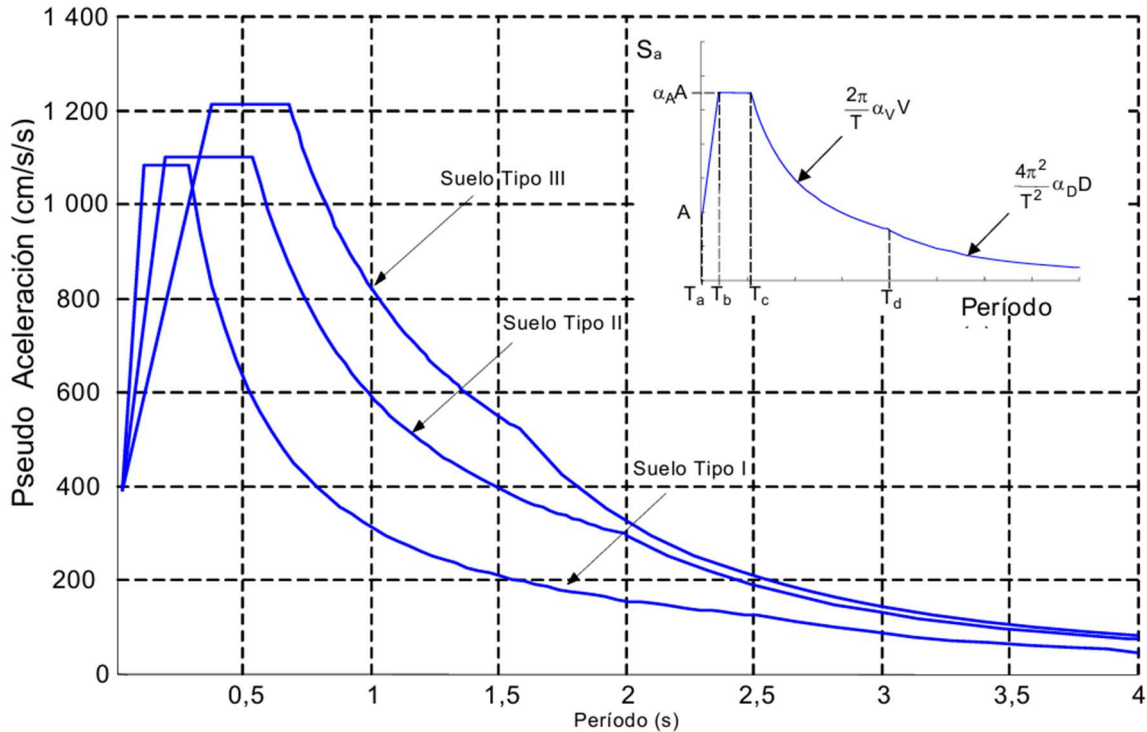


Figura 10. Espectro base de diseño para los tres tipos de suelos. Fuente: NCh 2745,2012.

Tabla 2. Factor que depende de la zonificación sísmica. Fuente: NCh2745, 2012.

Zona sísmica (ver Anexo A)	Z
1	$\frac{3}{4}$
2	1
3	$\frac{5}{4}$

Tabla 3. Definición del espectro de diseño, SDI. Fuente: NCh2745, 2012.

Suelo según NCh433	Suelo según NCh433:1996	$T_{a'}$	$T_{b'}$	$T_{c'}$	$T_{d'}$	$T_{e'}$	$T_f$	$\alpha_A A$ cm/s <sup>2</sup>	$\alpha_v v$ cm/s	$\alpha_D D$ cm
A	I	0.03	0.11	0.29	2.51	10	33	1085	50	20
B	II	0.03	0.20	0.54	2.00	10	33	1100	94	30
C y D	III	0.03	0.375	0.68	1.58	10	33	1212	131	33



Donde:

- $N_1$  : Índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 0.1 MPa.
- RQD : Rock Quality Designation de acuerdo con ASTM D 6032.
- $q_u$  : Resistencia a la compresión simple del suelo.
- $\varepsilon_{qu}$  : Deformación unitaria del suelo desarrollada cuando se alcanza la resistencia máxima en el ensayo de compresión simple
- $S_u$  : Resistencia al corte no-drenada del suelo

La norma NCh2745 señala que a menos que se usen sistemas de péndulos friccionales no es necesario usar 2/3 del espectro horizontal para el espectro vertical. En la práctica es común combinar los aisladores elastoméricos con los sistemas de péndulo friccionales así que es un punto importante para tener en cuenta si se requiere aplicar ambos sistemas.

- *Análisis tiempo historia.*

El análisis tiempo historia es posible usarlo para cualquier estructura, pero es obligatorio para estructuras que no cumplan con lo mencionado en el apartado del análisis estático.

### **2.1.2 NORMATIVA NCh433.**

- *Filosofía de normatividad chilena (NCh 433,2012)*

La normativa chilena NCh433 “Diseño sísmico de edificios” más el decreto supremo 61, post terremoto del 27 de febrero de 2010, conocido con el numerónimo 27 F, establece que para el diseño sismorresistente tradicional (excluyendo el uso industrial), es necesario reducir y controlar las fuerzas dinámicas provocadas por la fuerza sísmica, mediante la ductilidad y rigidez de la estructura permitiendo incluso que la estructura ingrese al rango inelástico, así como el desarrollo de articulaciones plásticas de los elementos para aprovechar al máximo la capacidad de disipación de energía.

La norma NCh433 establece principios para salvaguardar la seguridad estructural dejando entrever la filosofía de análisis por desempeño (INN, Norma Chilena Oficial NCh433, 2012):

- Que las estructuras resistan sin daños movimientos sísmicos de moderada intensidad.

- La limitación de los daños en elementos no estructurales durante sismos de mediana intensidad.
- Presencia de daño estructural con el fin de evitar el colapso durante sismos de severa intensidad.

El análisis para determinar los esfuerzos internos debido a la acción sísmica se basa en el comportamiento lineal y elástico de la estructura. El análisis de los efectos de otras cargas que se pueden combinar con los efectos de la acción sísmica, también se debe basar en la teoría lineal-elástica del comportamiento estructural por ello la norma NCh433 exige limitaciones a las deformaciones sísmicas procurando un adecuado comportamiento sísmico porque reconoce que no existen procedimientos de análisis inelásticos suficientemente sencillos para ser aplicados en la práctica profesional (INN, Norma Chilena Oficial NCh433, 2012).

Como se comentó líneas arriba, la norma NCh2745 tiene por complemento todo lo dispuesto en la NCh433 ya que de ella se obtienen los parámetros para la clasificación de la zonificación sísmica, el tipo de suelo, la clasificación de las estructuras y disposiciones generales sobre diseño.

- *Análisis estático.*

Se requiere llevar a cabo el análisis elástico para obtener el cortante basal con el periodo de la estructura aislada, para compararlo con el valor obtenido en la norma NCh2745 y determinar las fuerzas sísmicas con el valor más desfavorable. Como parte de lo solicitado en la NCh2745 se requiere que se le atribuya un factor de ocupación (I) a la edificación por ser aislada, ver Tabla 4. En el Anexo A se presenta el mapa de la zonificación sísmica.

Las restricciones para este método son las siguientes:

- Estructuras de las categorías de ocupación I y II ubicadas en la zona sísmica 1 ver Anexo A y Tabla 5.
- Estructuras de no más de 5 niveles y de hasta 20 m de altura.

Tabla 4. Descripción, categoría de ocupación I. Fuente: NCh433, 2012.

Naturaleza de la ocupación	Categoría de Ocupación
Edificios y otras estructuras aisladas o provisionales no destinadas a habitación, que representan un bajo riesgo para la vida humana en el caso de falla.	I

Tabla 5. Valor de la aceleración efectiva. Fuente: NCh433, 2012.

Zona sísmica (Ver Anexo A)	Aceleración efectiva máxima (A <sub>0</sub> )
1	0.2 g
2	0.3 g
3	0.4 g

Tabla 6. Valor del coeficiente I. Fuente: NCh433, 2012.

Categoría de ocupación del edificio	I
I	0.6
II	1
III	1.2
IV	1.2

El cálculo del esfuerzo de corte basal se realiza de acuerdo con la Ecuación 6-1 extraída de la norma NCh433 (INN, Norma Chilena Oficial NCh433, 2012):

$$Q = CIW \quad (1)$$

Donde:

$Q$  : esfuerzo de cortante basal.

$I$  : coeficiente relativo al edificio. Ver Tabla 6.

$W$  : peso de la estructura, incluye la carga muerta, peso propio y carga viva.

$C$  : coeficiente sísmico Ecuación 6-2 (INN, Norma Chilena Oficial NCh433, 2012).

$$C = \frac{2.75 \cdot S \cdot A_0}{g \cdot R} \left( \frac{T'}{T^*} \right)^n \quad (2)$$

$n, T', S$  : Son parámetros relativos al tipo de suelo.

$A_0$  : Parámetro de aceleración del suelo, relativo a la zona (costa, litoral central y cordillera).

$R$  : Factor de reducción, según el sistema estructural, Tabla 7.

$T^*$  : Periodo del modo con mayor masa traslacional equivalente en la dirección de análisis.

$g$  : Constante de aceleración de gravedad.

Este coeficiente está entre un rango limitado por las siguientes fórmulas proporcionadas en la norma NCh433 en los apartados 6.2.3.1.1 y 6.2.3.1.2 (INN, Norma Chilena Oficial NCh433, 2012):

Valor mínimo del coeficiente sísmico:

$$C_{MIN} = \frac{A_0 \cdot S}{6 \cdot g} \quad (3)$$

Valor máximo del coeficiente sísmico, Tabla 8:

$$C_{MAX} = (0.35 - 0.90) \frac{A_0 \cdot S}{g} \quad (4)$$

Tabla 7. Valor máximo del factor de modificación de respuesta. Fuente: NCh433, 2012.

Sistema estructural	Materia estructural	R	R <sub>0</sub>
Muros y sistemas arriostrados	Acero estructural Marcos concéntricos especiales (SCBF)	5.5	8

Tabla 8. Valores máximos del coeficiente sísmico C. Fuente: NCh433, 2012.

R	C <sub>máx</sub>
2	0.9 SA <sub>0</sub> /g
3	0.6 SA <sub>0</sub> /g
4	0.55 SA <sub>0</sub> /g
5.5	0.4 SA <sub>0</sub> /g
6	0.35 SA <sub>0</sub> /g
7	0.35 SA <sub>0</sub> /g

Este corte basal se debe repartir en los centros de masa de los distintos pisos, distribuidos según el ponderado de peso según lo indicado en la norma NCh433 en el apartado 6.2.5 para estructura de no más de 5 niveles (INN, Norma Chilena Oficial NCh433, 2012):

$$F_k = \frac{A_k \cdot P_k}{\sum_{j=1}^N (A_j \cdot P_j)} \cdot Q_0 \quad (5)$$

$$A_k = \sqrt{1 - \frac{Z_{k-1}}{H}} - \sqrt{1 - \frac{Z_k}{H}} \quad (6)$$

Donde:

$F_k$  : Fuerza horizontal aplicada en el nivel k.

$A_k$  : Factor de ponderación para el peso asociado al nivel k.

Se deben considerar también, la torsión accidental, como un 10% de excentricidad del centro de masa.

- *Análisis modal espectral.*

En general, el espectro de diseño de pseudo-aceleraciones se construye con los datos de la Tabla 9 para calcular los siguientes valores:

$$S_a = \frac{S \cdot A_0 \cdot \alpha}{(R^*/I)} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1 + 4.5 \cdot \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^P}{1 + \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^3} \quad (8)$$

$$R^* = 1 + \frac{T^*}{0.10 \cdot T_0 + \frac{T^*}{R_0}} \quad (9)$$

Donde:

$S_a$  : Aceleración espectral de diseño, ecuación 6-8 (INN, Norma Chilena Oficial NCh433, 2012).

- $T_n$  : Periodo de vibración del modo n.
- $T_{0,p}$  : Parámetros relativo al tipo de suelo.
- $T^*$  : Periodo del modo con mayor masa traslacional.
- $R_0$  : Coeficiente relativo al tipo de estructura.
- $R^*$  : Factor de reducción de la aceleración espectral, calculado para el periodo del modo con mayor masa traslacional en la dirección de análisis, ecuación 6-10 (INN, Norma Chilena Oficial NCh433, 2012).
- $\alpha$  : Factor de amplificación de la aceleración defectiva máxima, ecuación 6-9 (INN, Norma Chilena Oficial NCh433, 2012).

Se debe considerar la superposición modal CQC.

Si la componente del esfuerzo de corte basal en la dirección de la acción sísmica resulta menor que  $ISA_0W/6g$  los desplazamientos y rotaciones de los diafragmas horizontales y las sollicitaciones de los elementos estructurales se deben multiplicar por un factor de manera que dicho esfuerzo de corte alcance el valor señalado, como mínimo.

Tabla 9. Parámetros que definen el espectro de diseño para una estructura de base fija. Fuente: NCh433, 2012.

Tipo de suelo	S	$T_0$ (s)	$T'$ (s)	n	p
A	0.9	0.15	0.2	1	2.0
B	1	0.3	0.35	1.33	1.5
C	1.05	0.4	0.45	1.4	1.6
D	1.2	0.75	0.85	1.8	1.0
E	1.3	1.2	1.35	1.8	1.0
F	*	*	*	*	*

## CAPÍTULO 3 ESTRUCTURA DE BASE FIJA

En este capítulo se realizará el análisis de la estructura con base fija ya que se requiere conocer su periodo como dato de entrada para el diseño del sistema con aislamiento.

Es importante resaltar que se siguieron las solicitudes de la normativa NCh433 para establecer las masas de entrepiso, ya que se establece que además de las cargas permanentes se requiere tomar en cuenta un porcentaje de sobrecarga por uso, lo que en México llamamos carga viva, en este caso por ser uso de oficinas le corresponde un 25% del valor establecido en la norma NCh1537-2009 “Diseño estructural- Cargas permanentes y cargas de uso”.

También se requiere conocer las descargas en los apoyos para el diseño del aislador sísmico, sin embargo, como primer dato de entrada se usó la descarga máxima producto de las combinaciones de carga señaladas en la normativa NCh3171-2010 “Diseño estructural- Disposiciones generales y combinaciones de carga”.

### 3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA

El sistema estructural en esta investigación se basa en marcos rígidos de acero estructural de cuatro crujeías de 5.5 m en un sentido y tres crujeías de 6.5 m en el otro sentido, resultando así una dimensión en planta de 22 m en el sentido X y 19.5 m en el sentido Y, en correspondencia a los ejes globales del programa de análisis. La estructura se compone de cuatro niveles de 3.5 m da altura cada uno resultando así un total de 14 m.

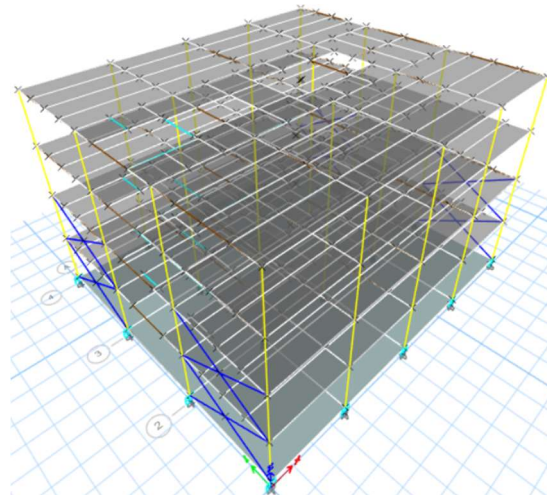


Figura 11. Estructura, vista 3D.

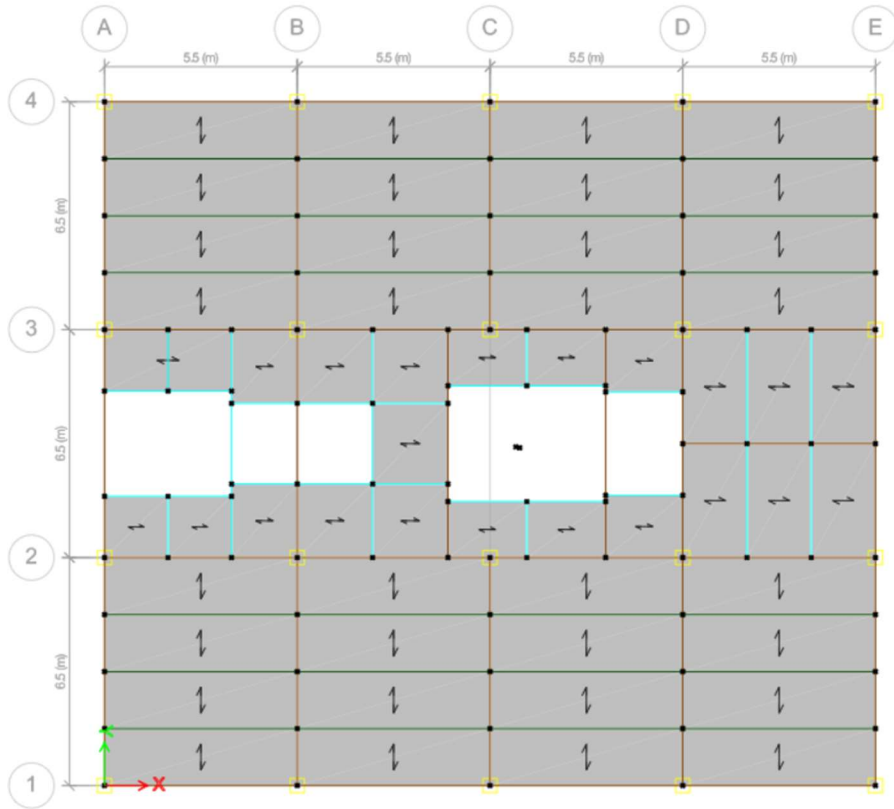


Figura 12. Planta estructural.

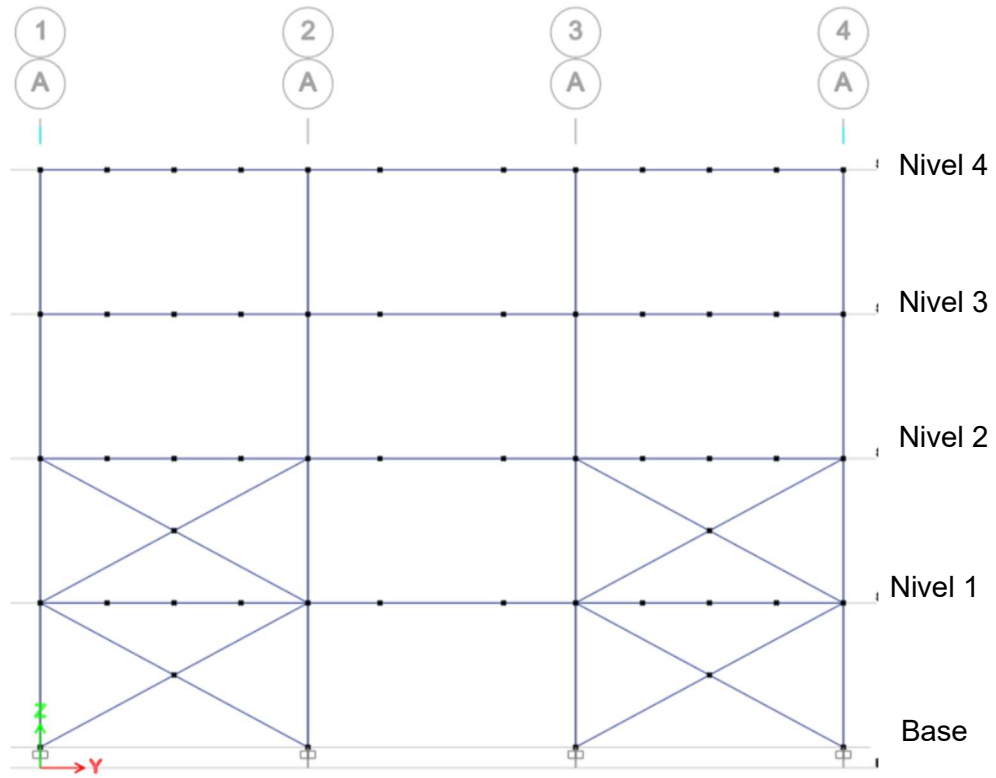


Figura 13. Elevación eje A.



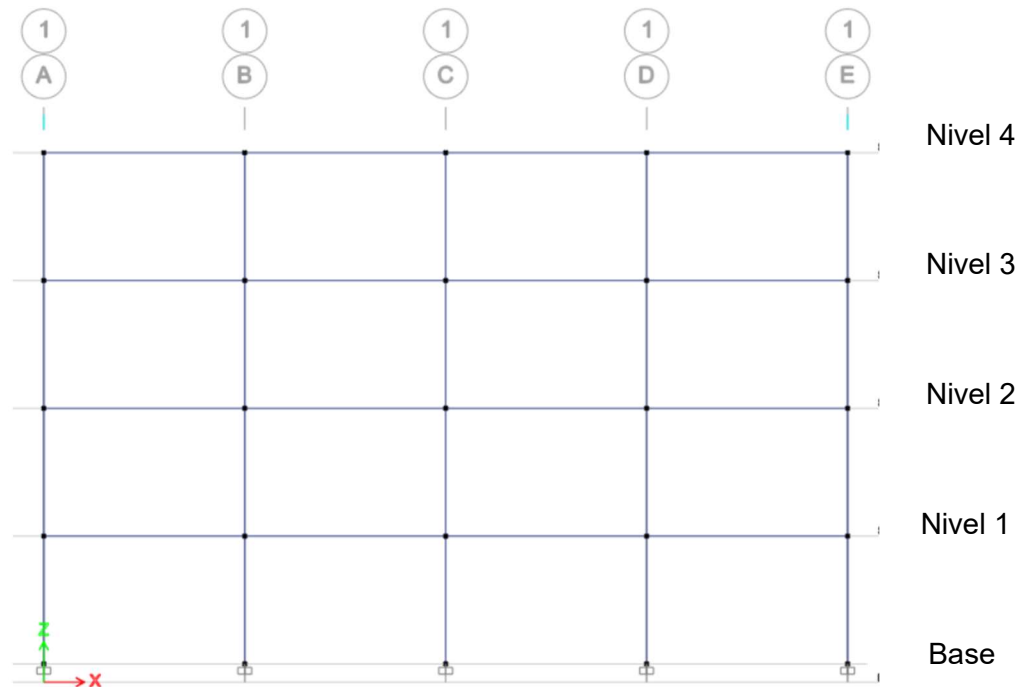


Figura 14. Elevación eje 1.

Los dos primeros niveles cuentan con contravientos en el sentido más corto como se muestra en la Figura 11, esto producto de los resultados del diseño del Maestro Juárez, (Juárez, 2021).

El sistema de piso está apoyado en una dirección como se aprecia en la Figura 12. Los perfiles estructurales para vigas primarias de entrepiso son IR 573 x 34.4, en el caso de la azotea las vigas primarias son IR 254 x 44.5, en todos los niveles las vigas secundarias son IR 254 x 38.5. En el caso de columnas y contravientos los perfiles utilizados son HSS 406 x 15.9 y HSS 254 x 6.4 según corresponde, ver Figura 13 y Figura 14.

En cuanto a la losa considerada para la zona superior al aislamiento sísmico también se respetaron las características señaladas de 70 cm de espesor de losa con un concreto  $f'_c = 350 \text{ kgf/cm}^2$  (Juárez, 2021).

## 3.2 CARGAS PERMANENTES Y DE USO

### 3.2.1 CARGA MUERTA

En cuanto al valor de la carga muerta se mantuvieron los datos entregados por el Maestro Ricardo Juárez con excepción a lo solicitado por la NCh1537 que indica una carga debido a tabiques móviles. Los valores de la carga muerta usados son los que se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Carga muerta Fuente: Juárez, 2018 y NCh1537, 2009.

Destino de piso o cubierta	CM (kg/m <sup>2</sup> )
Entrepiso Oficinas	360
Entrepiso Tabiquerías móviles	71.38
Entrepiso pasillos	360
Azotea Roof Garden	560
Azotea pendiente menor al 5%	560

### 3.2.2 CARGA VIVA

Para las cargas vivas, enlistadas en la Tabla 11, se ocuparon los datos provenientes de la norma NCh1537 correspondientes con un uso de oficinas (INN, Norma Chilena Oficial NCh1537, 2009).

Tabla 11. Cargas de uso. Fuente NCh1537, 2009.

Cargas de uso		
Destino de piso o cubierta	L <sub>0</sub> (kPa)	L <sub>0</sub> (kgf/m <sup>2</sup> )
Entrepiso Oficinas	2.5	250
Entrepiso pasillos	4	400
Azotea Roof Garden/Con acceso peatonal (uso privado)	5	500

## 3.3 COMBINACIONES DE CARGA

### 3.3.1 FACTORES DE COMBINACIÓN DE CARGAS EMPLEANDO EL DISEÑO POR RESISTENCIA.

Para las combinaciones de carga se atendió lo dispuesto en la norma NCh3171 del apartado 9.1.1, de las cuales se obtuvo la mayor descarga axial sobre los apoyos en la estructura empotrada para obtener el máximo valor y usarlo para el diseño del aislador.

Si bien, para el diseño del sistema de aislamiento siempre es importante tener presente los efectos del viento, ya que pudiesen activar los dispositivos, en el presente trabajo ese análisis no es abordado. Aunado a lo anterior tampoco son tomados en cuenta las combinaciones relacionadas a carga de nieve para homologar con el análisis realizado anteriormente (Juárez, 2021).

Las combinaciones de carga utilizadas son las siguientes (INN, Norma Chilena Oficial NCh3171, 2010):

Combinación 1.	$1.4 D$
Combinación 2.	$1.2 D + 1.6 L + 0.5 L_r$
Combinación 3.	$1.2 D + 1.6 L_r + L$
Combinación 4.	$1.2 D + 1.6 W_i + L + 0.5 L_r$
Combinación 5.	$1.2 D + 1.4 E + L + 0.2 S$
Combinación 6.	$0.9 D + 1.6 W_i$
Combinación 7.	$0.9 D + 1.4 E$

Donde:

- D : Carga permanente.
- E : Carga sísmica según NCh433.
- L : Carga viva de entepiso según NCh537.
- $L_r$  : Carga viva de azotea según NCh1537.
- S : Carga de nieve.
- $W_i$  : Carga de viento.

### **3.4 CONSIDERACIONES DE MODELADO NCh433**

Para el análisis sísmico de estructuras convencionales se establecen en la normativa NCh433 dos puntos a considerar en el modelamiento (INN, Norma Chilena Oficial NCh433, 2012):

1. Considerar para el cálculo de masas las cargas permanentes más un porcentaje de la carga de uso de un 25% para construcciones destinadas al uso público o habitación privada.

2. Se debe realizar una comprobación de que el diafragma permita la transmisión de los esfuerzos a los elementos estructurales que los sostienen.

### 3.5 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Debido a que en el presente trabajo se busca aplicar la Norma Chilena, se optó por establecer las características del suelo a partir de la velocidad de onda de corte de 700 m/s proporcionada en el trabajo del M.I. Juárez (Juárez, 2021) y las cuales se enlistan en la Tabla 12.

*Tabla 12. Características del suelo y la estructura.*

Características del suelo y la estructura	
Velocidad de onda de corte	700 m/s
Suelo tipo B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o firme
Categoría de ocupación	I
Zona sísmica	2
Estructuración	Marcos concéntricos especiales (SCBF) por ser un edificio de acero arriostrado

### 3.6 ANÁLISIS SÍSMICO DE LA ESTRUCTURA EMPOTRADA

De acuerdo con la metodología propia del diseño del sistema de aislamiento sísmico, es necesario establecer un periodo y un amortiguamiento objetivo del sistema aislado, por lo que conocer el periodo de la estructura de base fija es esencial.

En la Tabla 13 se enlistan los periodos naturales de vibración de la estructura de base fija, de estos datos se tomaron los dos primeros resultados, un periodo igual a 0.87 segundos para el sentido X y un periodo de 0.61 segundos para el sentido Y, pero debido a que el periodo objetivo de la estructura aislada debe ser tres veces el periodo de la estructura de base fija, de esta última se toma el periodo en sentido X para determinar dicho periodo objetivo.

Tabla 13. Periodos naturales de vibración de la estructura empotrada.

Modo	Periodo
<b>1</b>	<b>0.8780</b>
<b>2</b>	<b>0.6120</b>
3	0.5010
4	0.2730
5	0.2090
6	0.1750
7	0.1490
8	0.1300
9	0.1100
10	0.1030
11	0.0710
12	0.0610

### 3.6.1 PORCENTAJE DE PARTICIPACIÓN MODAL

Se debe asegurar una participación de masas traslacionales mínimo de un 90% en cada dirección de análisis ya que esto es un indicativo del acoplamiento de los periodos.

Tabla 14. Porcentajes de participación modal de la estructura empotrada.

Modo	% de participación en X	% de participación en Y
1	99.63%	0.01%
2	0.01%	98.61%
3	0.00425%	1.28%
4	0.35%	0%
5	0%	0.1%
6	0%	0.00064%
7	0.01%	0%
8	0%	0.00198%
9	0%	0%
10	0.00027%	0%
11	0%	0.00019%
12	0%	0%

### 3.6.2 ESPECTRO DE DISEÑO

Para generar el espectro de diseño es necesario partir de las características del suelo y de la estructura, enlistadas en la Tabla 12, para así obtener los parámetros que definirán dicho espectro y los cuales están señalados en la Tabla 15.

Tabla 15. Valores usados para definir el espectro de diseño.

Parámetros para crear el espectro de diseño	
S	1
N	1.33
T'	0.35 s
T <sub>0</sub>	0.3 s
P	1.5
A <sub>0</sub>	0.3 g
R	5.5
R <sub>0</sub>	8
R* (Sx)	7.28
R* (Sy)	6.75
W	1934 tonf

Los límites del cortante basal que resulta de estos espectros son los que señala la norma NCh433 en los puntos 6.2.3.1.1 y 6.2.3.1.2 (INN, Norma Chilena Oficial NCh433, 2012):

Cortante basal mínimo  $I \cdot S \cdot A_0 \cdot W / 6g = 58.02 \text{ tonf}$

Cortante basal máximo  $I \cdot C_{\max} \cdot W = 92.83 \text{ tonf}$

Donde:

W : Peso de la estructura.

A<sub>0</sub> : Aceleración efectiva.

C<sub>max</sub> : Coeficiente sísmico máximo.

g : Constante de aceleración de gravedad.

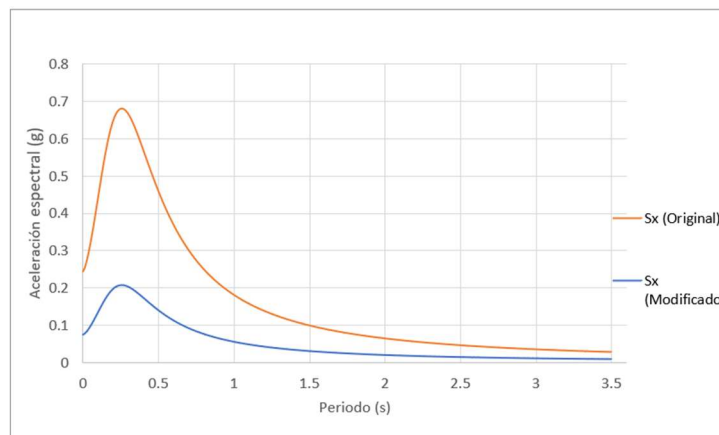


Figura 15. Comparativa de Espectro de diseño original y el Espectro de diseño modificado para la dirección X.

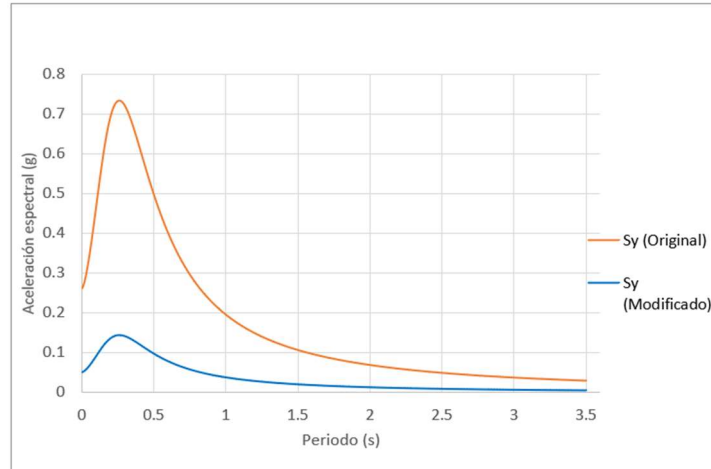


Figura 16. Comparativa de Espectro de diseño original y el Espectro de diseño modificado para la dirección Y.

En la Tabla 16 se muestra el cortante basal resultante del análisis modal espectral:

Tabla 16. Cortante basal.

Dirección	Cortante basal Q (tonf)	
	Espectro original	Espectro modificado
X	305.35	92.82
Y	472.52	92.84

La NCh433 menciona que el límite máximo del cortante basal es exclusivo para las sollicitaciones de los elementos estructurales, pero su reducción no aplica para el cálculo de desplazamientos ni rotaciones de los diafragmas de piso por lo que las distorsiones de entrepiso deberán revisarse con los resultados del espectro sin modificar.

Se aclara en este apartado que, el dato del peso de la estructura para obtener los límites del cortante basal es diferente al que se ocupa para el diseño de los aisladores, este cambio obedece a que para el uso de los aisladores es necesario agregar una losa para la distribución de cargas.

Con el espectro anterior se determinaron los desplazamientos de la estructura empotrada en el centro de masas y se comparó con el límite establecido en la NCh433 de distorsión de 0.002 por la altura del entrepiso, es decir,  $0.002 \cdot 3.5 \text{ m}$  resultando un valor de 0.007.

Tabla 17. Desplazamientos a los espectros en dirección X y dirección Y.

X	Desplazamiento (m)	Drift	Evaluación
Nivel 4	0.054	0.009	No cumple
Nivel 3	0.044	0.014	No cumple
Nivel 2	0.030	0.017	No cumple
Nivel 1	0.013	0.013	No cumple
Y	Desplazamiento (m)	Drift	Evaluación
Nivel 4	0.048	0.018	No cumple
Nivel 3	0.030	0.019	No cumple
Nivel 2	0.011	0.006	Cumple
Nivel 1	0.005	0.005	Cumple

Lo presentado en la Tabla 17 indica que, no se cumple con el límite de distorsión de entrepiso señalado en la Norma NCh433 para la estructura de base fija.

El análisis desarrollado hasta el momento para una estructura de base fija sirve para verificar el comportamiento de la superestructura ya que esto nos permite percatarnos de posibles cambios en la estructuración, los cuales normalmente conviene realizarlos en estas primeras etapas del análisis. En este punto, para una estructura convencional se requeriría realizar un cambio de estructuración que permita alcanzar los niveles de distorsiones límite estipulados, pero es de interés abordar si el ocupar un sistema de aislamiento mejora el comportamiento de la superestructura.



## **CAPÍTULO 4 ESTRUCTURA DE BASE AISLADA**

Para el diseño del sistema de aislación se requiere establecer un periodo y un amortiguamiento objetivos para determinar el desplazamiento de diseño del dispositivo de aislamiento.

El desplazamiento de diseño de acuerdo con la norma NCh2745 se puede obtener con un análisis estático o con un análisis dinámico. Para el presente trabajo para el diseño del sistema de aislamiento se contemplan el análisis estático y el análisis modal espectral.

### **4.1 CONSIDERACIONES DE MODELADO NCh2745**

Para el análisis sísmico de estructuras aisladas se establecen en la normativa NCh2745 dos puntos a considerar en el modelamiento (INN, Norma Chilena Oficial NCh2745, 2013):

1. Considerar la distribución espacial de los aisladores.
2. Poder determinar los momentos de volteo o que provoquen levantamiento sobre cada aislador.

### **4.2 ANÁLISIS ESTÁTICO DE ACUERDO CON LA NORMA NCh2745**

En la metodología para el análisis estático se busca hallar el desplazamiento de diseño, el desplazamiento máximo y el desplazamiento total máximo por medio de una serie de ecuaciones dependientes de las características de la estructura y del suelo, enlistadas en la Tabla 18, cada uno de estos desplazamientos se define en los apartados 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3 respectivamente. Una vez realizado el diseño del sistema de aislamiento, la norma permite calcular las fuerzas cortantes de diseño para el sistema de aislación y los elementos de la superestructura basándose en la rigidez mínima y máxima del sistema de aislación.

Tabla 18. Propiedades de la estructura.

Propiedades de la estructura	
Peso de la estructura	W= 2458 tonf
Masa de la estructura	M= 250.64 tonf
Dimensión en X	b= 22 m
Dimensión en Y	d= 19.5 m
Centro de masa	XCM= 11.38 m YCM= 10.03 m
Centro de Rigidez	XRG= 11 m YRG= 9.75 m
Periodo traslacional	$T_x = 0.878$ s $T_y = 0.612$ s
Rigidez de la estructura	$K_{ex} = 3846.15$ tonf/m $K_{ey} = 5773.67$ tonf/m

Tabla 19. Factores establecidos en la NCh2745.

Factores establecidos en la NCh2745	
Factor de amplificación para el sismo máximo posible	$M_M = 1.2$
Factor que depende de la zonificación sísmica	Z= 1
Coeficiente $\alpha$	$\alpha=225.7$

Si bien todos los requisitos que establece la NCh2745 para el análisis estático han sido enlistadas en el capítulo 2, un par de ellos forman un punto de partida para el análisis ya que establecen que el periodo efectivo de la estructura aislada debe ser mayor que tres veces el periodo elástico de la estructura de base fija, pero menor a 3 s. Los valores objetivo del diseño del aislador se enlistan en la Tabla 20.

Tabla 20. Valores objetivo.

Valores objetivo	
Periodo objetivo	$T_{ob} = 3 * T_x = 2.63 \text{ s}$
Porcentaje de amortiguamiento propuesto del sistema aislado	$\zeta_{ob} = 0.10$
Porcentaje de amortiguamiento propuesto del sistema de aislamiento	$\zeta_a = 0.12$

#### 4.2.1 DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO

El desplazamiento de diseño ( $D_D$ ) es el valor mínimo que debe soportar el sistema de aislamiento medido en el centro de masas. Para ello la norma define un valor constante para el coeficiente sísmico ( $C_D$ ) el cuál se ve afectado por un coeficiente de reducción por amortiguamiento ( $B_D$ ) dependiente del tipo del suelo.

Cálculo del desplazamiento de diseño, ecuación 1 de la norma NCh2745:

$$D_D = \frac{C_D}{B_D} \quad (10)$$

Cálculo del coeficiente sísmico, ecuación 7.3.1 de la norma NCh2745. Para el valor de Z ver Tabla 19:

$$C_D = 300 * Z = 0.3 \text{ m} \quad (11)$$

Para razones de amortiguamiento  $\zeta_a$  mayores que 0.05 el factor  $B_0$  se debe calcular usando la ecuación C.19 de la norma NCh2745:

$$B_0 = 2 * \left( \frac{1 + \beta}{1 + 14.68 * \zeta_a^{0.865}} \right) = 0.67 \quad (12)$$

Cálculo del coeficiente de modificación de respuesta se obtiene de la ecuación C.18 de la NCh2745:

$$B_D = \frac{1}{B_0 - (B_0 - 1) * e^{(-\alpha * |\zeta_a - 0.05| * T_{ob})}} = 1.49 \quad (13)$$

Sustituyendo todos los valores en la ecuación 10, el desplazamiento de diseño resulta igual a 20 cm.

$$D_D = 0.2 \text{ m}$$

#### 4.2.2 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO

En apartados anteriores se definió al Sismo máximo posible (SMP), utilizado en el análisis dinámico, este resulta de multiplicar el Sismo de Diseño (SDI) por un factor de amplificación ( $M_M$ ). El uso del SMP sirve para estimar el máximo desplazamiento al que puede estar sometido el sistema de aislamiento debido a un evento sísmico extraordinario y el contemplar dicho desplazamiento es una forma de asegurar que los diseños estén del lado de la seguridad. En el caso del análisis estático esto último se logra multiplicando el coeficiente sísmico por el factor de amplificación ( $M_M$ ).

Cálculo del desplazamiento de diseño, ecuación 3 de la norma NCh2745:

$$D_M = \frac{C_M}{B_M} \quad (14)$$

Cálculo del coeficiente sísmico, ecuación 7.3.3 de la norma NCh2745. Para el valor de Z ver Tabla 19:

$$C_M = 300 * M_M * Z = 0.36 \text{ m} \quad (15)$$

El valor del factor  $B_M$  se obtiene de la interpolación de los valores de la Tabla 21.

Tabla 21. Factor de modificación de respuesta por amortiguamiento. Fuente NCh2745, 2012.

Amortiguamiento $\zeta_a$	Factor $B_M$
$\leq 2$	0.8
5	1
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
$\geq 50$	2

$$B_M = 1.49$$

Sustituyendo todos los valores en la ecuación 14, el desplazamiento máximo resulta igual a 24 cm.

$$D_M = 0.24 \text{ m}$$

Según lo mencionado por la norma NCh2745, para el cálculo del desplazamiento máximo la norma asume que la superestructura es rígida ya que, de no ser así, el valor decrecería debido a la flexibilidad y deformación de la superestructura (INN, Norma Chilena Oficial NCh2745, 2013).

#### 4.2.3 DESPLAZAMIENTO TOTAL

El desplazamiento de diseño total  $D_{TD}$  y el desplazamiento máximo total  $D_{TM}$  toman en cuenta los desplazamientos adicionales debido a la torsión natural y accidental siempre que la distribución espacial de rigidez lateral sea uniforme (INN, Norma Chilena Oficial NCh2745, 2013). Estos valores de desplazamiento se obtienen de las ecuaciones 5 y 6 de la norma NCh2745 respectivamente:

$$D_{TD} = D_D \left[ 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (16)$$

$$D_{TM} = D_M \left[ 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (17)$$

Los valores de  $y_x$  y  $y_y$  son la distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislación en cada una de las direcciones de análisis y el elemento de interés que resulta ser el elemento con mayor descarga de la estructura de base fija (INN, Norma Chilena Oficial NCh2745, 2013).

$$y_x = 5.5 \text{ m}$$

$$y_y = 3.2 \text{ m}$$

Las excentricidades  $e_x$  y  $e_y$  resultan de lo señalado en la Norma NCh2745 donde indica que son la suma de la excentricidad real medida en planta entre el centro de masa de la superestructura y el centro de rigidez del sistema de aislación más una excentricidad accidental del 5% de la dimensión en planta perpendicular a la dirección de la sollicitación sísmica considerada (INN, Norma Chilena Oficial NCh2745, 2013), para mayor referencia ver los valores de la Tabla 18.

$$e_x = XCM - XRG + 0.05 b = 1.48 \text{ m}$$

$$e_y = YCM - YRG + 0.05 d = 1.26 \text{ m}$$

Con los datos anteriores se obtienen los siguientes valores para el desplazamiento total y el desplazamiento máximo total del sistema en cada una de las direcciones de análisis.

$$D_{TDx} = 0.22 \text{ m}$$

$$D_{TDy} = 0.27 \text{ m}$$

$$D_{TMx} = 0.21 \text{ m}$$

$$D_{TMy} = 0.26 \text{ m}$$

### 4.3 PREDIMENSIONAMIENTO DEL AISLADOR

En la Figura 17 se presenta el modelo analítico bi-lineal de un aislador elastomérico LRB donde se aprecia la capacidad del aislador a cero deformación ( $Q_0$ ) o también conocida como fuerza característica, la cual es la contribución del plomo al amortiguamiento del aislador dotando de esa rigidez inicial ( $k_i$ ) al dispositivo y que no es hasta que se alcanza su fuerza de fluencia del plomo ( $F_y$ ) cuando recién el caucho comienza a trabajar aportando la rigidez post-fluencia ( $k_p$ ) (Méndez, 2022).

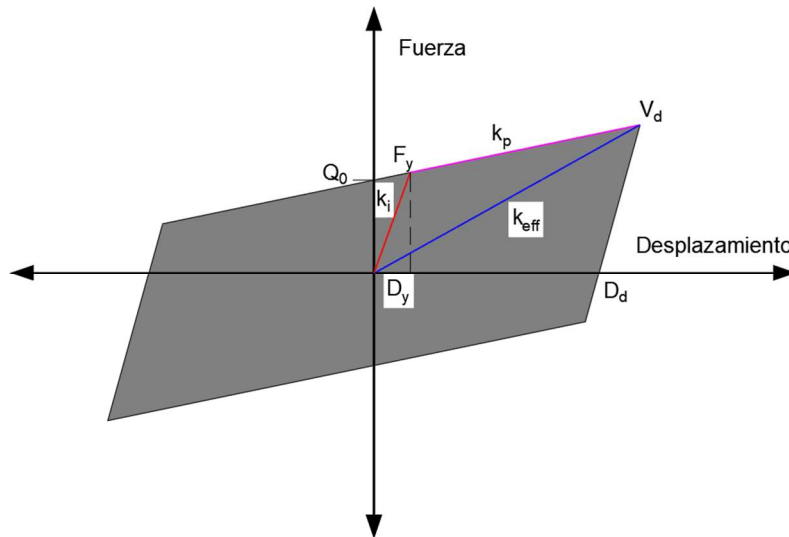


Figura 17. Modelo analítico bi-lineal de un aislador elastomérico LRB.

Debido a que el análisis estático de la NCh2745 tiene una filosofía de control de desplazamientos, inicia calculando la energía que debiese disipar el aislador de acuerdo con los desplazamientos ya obtenidos. Para obtener dicha energía disipada se contempló un apartado de la referencia *Ejemplos de diseño de acuerdo con las normas técnicas complementarias para diseño por sismo 2017/2020* ((SMIE) Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C. , 2021) donde se propone un proceso iterativo para hallar los valores que conforman la constitutiva.

Ya que la NCh2745 establece que el sistema de aislación debe alcanzar el desplazamiento sísmico máximo posible y no menos de 1.2 veces el desplazamiento total de diseño, se opta por tomar el valor de desplazamiento máximo total  $D_{TMx}$  para que el diseño considere el desplazamiento que se puede desarrollar por un sismo extraordinario.

Cálculo de la energía disipada por un aislador:

$$E_D = 2\pi * k_a * D_{TMx}^2 * \zeta_a \quad (18)$$

Cálculo del periodo objetivo de un aislador:

$$T_a = \sqrt{T_{ob}^2 - T_x^2} = 2.48 \text{ s} \quad (19)$$

Cálculo de la rigidez objetivo del sistema aislado:

$$K_{ob} = \left(\frac{2\pi}{T_a}\right)^2 * \frac{W}{g} = 1604.51 \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \quad (20)$$

Cálculo de la rigidez objetivo de un aislador:

$$k_a = \frac{K_{ob}}{n} = 80.23 \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \quad (21)$$

Con los datos obtenidos se sustituyen estos valores para calcular la energía que disipa un aislador y con ello poder obtener los datos que conforman la constitutiva.

$$E_D = 4.37 \text{ tonf} * \text{m} \quad (22)$$

Cálculo de la capacidad del aislador a cero deformaciones:

$$Q_0 = \frac{E_D}{4 * (D_{TMx} - D_y)} = 4.07 \text{ tonf} \quad (23)$$

Cálculo de la rigidez post-fluencia del aislador:

$$k_p = k_a - \frac{Q_0}{D_{TMx}} = 65.1 \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \quad (24)$$



Cálculo de la rigidez inicial del aislador:

$$k_i = 10 k_p = 651.03 \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \quad (25)$$

Cálculo del desplazamiento de fluencia del aislador:

$$D_y = \frac{Q_0}{9 k_p} \quad (26)$$

Donde:

- $E_D$  : Energía disipada por un aislador.
- $k_a$  : Rigidez objetivo de un aislador.
- $K_{ob}$  : Rigidez objetivo del sistema aislado.
- $T_{ob}$  : Periodo objetivo del aislador.
- $N$  : Número de apoyos (en este estudio n=20).
- $D_y$  : Desplazamiento de fluencia.
- $Q_0$  : Fuerza característica.
- $k_p$  : Rigidez post-fluencia del aislador.
- $k_i$  : Rigidez inicial del aislador.
- $W$  : Peso de la estructura ver Tabla 18.
- $F_y$  : Fuerza de fluencia.

Suponiendo un desplazamiento de fluencia igual a cero, se realiza un proceso iterativo para hallar el valor del desplazamiento de fluencia acorde a la energía disipada. Los valores de este proceso iterativo se muestran en la Tabla 22.

*Tabla 22. Iteraciones para hallar el valor del desplazamiento de fluencia.*

Iteración	$D_y$	$Q_0$	$k_p$	$k_i$	$D_y$
1	0.0000	4.070	65.100	651.00	0.0069
2	0.0069	4.072	65.147	651.47	0.0069
3	0.0069	4.072	65.147	651.47	0.0069

Con los parámetros anteriores obtenidos se procede al diseño del aislador elastomérico con núcleo de plomo.

### 4.3. PREDIMENSIONAMIENTO DEL DIÁMETRO NÚCLEO DE PLOMO

El dato de la tensión de fluencia del plomo se tomó del valor teórico proporcionado en la referencia *Seismic Isolation for designers and structural engineers* (Skinner, Kelly, & Robinson, 2011).

Cálculo del área de plomo ecuación C.4 proporcionada por la norma NCh2745:

$$A_p = \frac{Q_0}{\tau_y} = 0.0038 \text{ m}^2 \quad (27)$$

El diámetro del núcleo de plomo se obtiene a partir del área del plomo calculada:

$$\phi_p = \sqrt{\frac{4 A_p}{\pi}} = 0.07 \text{ m} \quad (28)$$

Donde:

Tensión de fluencia del plomo  $\tau_y = 1070.7 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2}$

Área del núcleo de plomo  $A_p$

Diámetro del núcleo de plomo  $\phi_p$

#### 4.3.2 DISEÑO DEL AISLADOR SISMICO TIPO LRB

En este apartado se hará uso del desplazamiento de diseño ( $D_D$ ) para establecer un diámetro del dispositivo, ya que durante la actividad sísmica se genera un traslapé en el área del aislador como se observa en la Figura 18 ((SMIE) Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C. , 2021).

$$\phi_a = 3 D_D = 0.6 \text{ m} \quad (29)$$

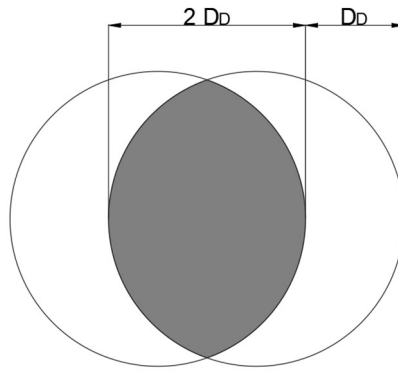


Figura 18. Área de traslape en un aislador.

### 4.3.3 PREDIMENSIONAMIENTO DEL ÁREA DE CAUCHO

Para calcular el área transversal de caucho se tomó el mayor valor de las áreas siguientes:

1. La resta del área del aislador y el área del núcleo de plomo.
2. El área de caucho requerida debido a la carga máxima identificada del modelo de la estructura empotrada con las combinaciones de carga generadas de acuerdo con la normativa chilena dividida entre la tensión admisible a compresión del caucho  $\sigma_{ac} = 1200 \frac{tonf}{m^2}$ .

Para obtener el espesor del caucho ( $H_r$ ) se emplea el dato del módulo de corte del caucho ( $G_r$ ) (Naeim & Kelly, 1999):

$$H_r = \frac{G_r A_r}{k_p} = 0.17 \text{ m} \quad (30)$$

Donde:

$$G_r = 40.79 \frac{tonf}{m^2} \quad (31)$$

Ya que el proceso de diseño de un aislador es iterativo se plasman aquí las dimensiones finales del aislador. Este proceso se complementó de manera analítica y con apoyo de un software de análisis, en primera instancia, cumplir con el periodo objetivo ( $T_{ob}$ ), el desplazamiento máximo total ( $D_{TMx}$ ) y la frecuencia vertical del aislador.

$$\phi_a = 0.5 \text{ m}$$

$$\phi_p = 0.07 \text{ m}$$

$$H_r = 0.18 \text{ m}$$

Donde:

Diámetro del aislador  $\phi_a$

Diámetro del núcleo de plomo  $\phi_p$

Espesor total del caucho  $H_r$

Para la altura total del aislador se considera el uso de placas intermedias de acero de 0.0032 m (1/8 in), placas exteriores de 0.0254m (1 in) y placas de caucho con un espesor de 0.0095 m (3/8 in) ya que son valores que se encuentran en los catálogos comerciales (Reveco & Silva, 2015). Se tiene entonces que la altura total del aislador tipo LRB de 0.24 m compuesto por 19 placas de caucho, 20 placas de acero intermedias y dos placas de acero en los extremos.

Con los datos anteriores se procede a obtener los valores del modelo analítico bi-lineal presentado en la Figura 17 y complementándolos con el factor  $f_L$  solicitado en la NCh2745 que incrementa un 15 % la rigidez post-fluencia del aislador lo que termina incrementando la rigidez efectiva del dispositivo.

Reveco y Silva (2015) mencionan que este factor  $f_L$  resulta que la rigidez post-fluencia de un aislador tipo LRB es un 15% mayor que la rigidez del caucho del aislador sin el corazón de plomo. Este aumento en la rigidez del caucho influye en la selección final de las dimensiones del aislado haciendo que dichas dimensiones sean menores a las calculadas de manera analítica sin incluir dicho factor  $f_L$ .

Capacidad del aislador a cero deformaciones, ecuación C.4 de la norma NCh2745:

$$Q_0 = A_p \tau_y = 4.1 \text{ tonf} \quad (32)$$

Cálculo de rigidez post-fluencia del aislador, ecuación C.4 de la norma NCh2745:

$$k_p = f_L \frac{G_r A_r}{H_r} = 49.89 \frac{tonf}{m} \quad (33)$$

Donde:

$$f_L = 1.15 \quad (\text{C7.2.B.2 NCh2745})$$

Cálculo de rigidez inicial del aislador:

$$k_i = 10k_p = 498.94 \frac{tonf}{m} \quad (34)$$

Cálculo de desplazamiento de fluencia:

$$D_y = \frac{Q_0}{9k_p} = 0.009 \text{ m} \quad (35)$$

Cálculo de la fuerza de fluencia, ecuación C.3 de la norma NCh2745:

$$F_y = Q_0 + k_p * D_y = 4.58 \text{ tonf} \quad (36)$$

Cálculo máxima fuerza horizontal:

$$F_m = Q_0 + k_p * D_{TMx} = 17.5 \text{ tonf} \quad (37)$$

Cálculo de rigidez efectiva del sistema de aislación:

$$k_{eff} = k_p + \frac{Q_0}{D_{TMx}} = 65.2 \frac{tonf}{m} \quad (38)$$

Cálculo rigidez efectiva del sistema de aislación:

$$K_{eff} = n * k_{eff} = 1304.3 \frac{tonf}{m} \quad (39)$$

Cálculo del porcentaje de amortiguamiento efectivo del aislador:

$$\zeta_a = \frac{2 * Q_0 * (D_{TMx} - D_y)}{\pi * k_{eff} * D_{TMx}^2} = 14\% \quad (40)$$

Cálculo del porcentaje de amortiguamiento del sistema aislado:

$$\zeta_{sis} = \frac{\zeta_a + \frac{0.05 * k_{eff} * n}{K_{ex}}}{1 + \frac{k_{eff} * n}{K_{ex}}} = 12\% \quad (41)$$

Cálculo del periodo de la estructura aislada:

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g * k_{eff} * n}} = 2.75 \text{ s} \quad (42)$$

Frecuencia horizontal:

$$f_h = \frac{1}{T_e} = 0.36 \frac{1}{s} = 0.36 \text{ Hz} \quad (43)$$

#### 4.3.4 RIGIDEZ VERTICAL DEL AISLADOR

La rigidez vertical es una propiedad de los aisladores que garantiza la transmisión de cargas verticales y contempla cambios de volumen y deflexiones debido a la deformación por corte del caucho (Skinner, Kelly, & Robinson, 2011), (Juárez, 2021) & (Reveco & Silva, 2015).

Cálculo del módulo de compresión del conjunto goma-acero:

$$E_c = \frac{6G_r S_f^2 K}{6G_r S_f^2 + K} = 33798.44 \frac{\text{tonf}}{\text{m}^2} \quad (44)$$

Cálculo del factor de forma de la capa de apoyo:

$$S_f = \frac{\phi_a^2 + \phi_p^2}{4 * \phi_a * t_r} = 12.87 \quad (45)$$

Cálculo de la rigidez vertical de un aislador:

$$k_v = \frac{E_c A_a}{H_r} = 359607.4 \frac{tonf}{m} \quad (46)$$

Módulo de compresión para el conjunto goma-acero	$E_c$
Área del aislador	$A_a = 0.2 \text{ m}^2$
Número de capas de caucho	$n_c = 19$
Espesor de capas de caucho	$t_r = 0.0095 \text{ m} \left( \frac{3}{8} \text{ in} \right)$
Factor de forma de la capa del apoyo	$S_f$
Módulo de corte del caucho	$G_r = 40.79 \frac{tonf}{m^2}$
Módulo de compresibilidad de la goma	$K = 203943.24 \frac{tonf}{m^2}$
Diámetro del aislador	$\phi_a$
Diámetro del núcleo de plomo	$\phi_p$

En la NCh2745 se solicita como requisito que la frecuencia vertical de vibración del sistema sea superior a 10 Hz y brinda la ecuación C.14 (NCh2745) para obtener la relación entre la frecuencia vertical con respecto a la horizontal y a partir de esta relación obtener así la frecuencia vertical de 10.17 Hz cumpliendo así con lo estipulado en la norma.

$$\frac{f_v}{f_h} = \sqrt{\frac{\left( \frac{1}{6 * G_r * S_f^2} + \frac{4}{3K} \right)^{-1}}{G_r}} = 28.02 \quad (47)$$

$$f_v = 32.64 * f_h = 10.17 \frac{1}{s} \quad (48)$$

#### 4.3.5 FUERZAS LATERALES DE DISEÑO

Es sabido que una de las desventajas de los aisladores elastoméricos es la incertidumbre de su comportamiento real, todo esto producto de la manufactura ya que a menos que se hagan pruebas a cada dispositivo, es difícil asegurar que se cumpla con sus propiedades de diseño; por esto mismo en la norma NCh2745 se menciona que para calcular las fuerzas laterales de diseño se debe hacer uso de los datos de rigidez mínima y máxima obtenidos en ensayos de los dispositivos. Por lo anterior se propone, a manera de tener un valor preliminar con fines de diseño, retomar lo expuesto con base a investigaciones sobre el tema, que producto de la manufactura, la rigidez de diseño se puede reducir hasta un 10% e incrementarse hasta un 10% motivo del envejecimiento del caucho (Choun, Park, & Choi, 2014).

Cálculo de la fuerza lateral mínima de diseño de elementos estructurales de la superestructura se obtiene de la ecuación 7 brindada por la norma NCh2745:

$$V_b = n * \frac{k_{Dmax} * D_D}{R_b} = 342.26 \text{ tonf} \quad (49)$$

Donde:

$R_b=1$  para el sistema de aislación.

El cálculo de la fuerza horizontal al desplazamiento de diseño se obtiene a partir del desplazamiento de diseño  $D_D$  y los datos de la capacidad del aislador a cero deformaciones  $Q_0$  y la ridez post-fluencia del aislador  $k_p$ , con esta fuerza horizontal junto con los factores de reducción de rigidez por manufactura y por edad del caucho se calcula la rigidez efectiva máxima que tiene el dispositivo cuando ocurre el desplazamiento de diseño.

$$F_{kD} = Q_0 + k_p * D_D = 14.14 \text{ tonf} \quad (50)$$

Cálculo de la rigidez efectiva máxima al desplazamiento de diseño:

$$k_{Dmax} = \frac{F_{kD}}{D_D} * F_{manplus} * F_{edge} = 85.19 \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \quad (51)$$



Donde la fuerza lateral mínima para diseñar los elementos de la subestructura deberá ser el mayor valor entre de  $V_s$  o  $Q$ , este último es el cortante basal resultante del análisis estático de acuerdo con la NCh433, ver ecuación 1 del presente trabajo.

El valor de  $V_s$  es la fuerza cortante calculada con la ecuación 8 brindada por la norma NCh2745:

$$V_s = n * \frac{k_{Dmax} * D_D}{R_s} = 213.9 \text{ tonf} \quad (52)$$

Donde:

$R_s = 1.6$  para sistemas arriostrados

Factor de influencia por manufactura  $F_{manmin} = 0.9$

$F_{manmax} = 1.1$

Factor de influencia por la edad  $F_{edge} = 1.1$

Como ya se mencionó, se debe tomar el valor máximo entre  $V_s$  o  $Q$ , siendo este último calculado con el procedimiento descrito en el Capítulo 2 del análisis estático de la norma NCh433 donde se debe considerar el peso y periodo de la estructura aislada y se deben tomar los factores  $I = 1$  y  $S = 1$ .

$$Q = CIW = 122.9 \text{ tonf}$$

Se obtienen las fuerzas sísmicas para cada nivel de acuerdo con la fuerza  $V_s$  y son aplicadas en el centro de masas de cada uno de los diafragmas de entrepiso según corresponda, ver Figura 19.

$$F_0 = 6.5 \text{ tonf}$$

$$F_1 = 32.1 \text{ tonf}$$

$$F_2 = 36.9 \text{ tonf}$$

$$F_3 = 47.8 \text{ tonf}$$

$$F_4 = 90.7 \text{ tonf}$$

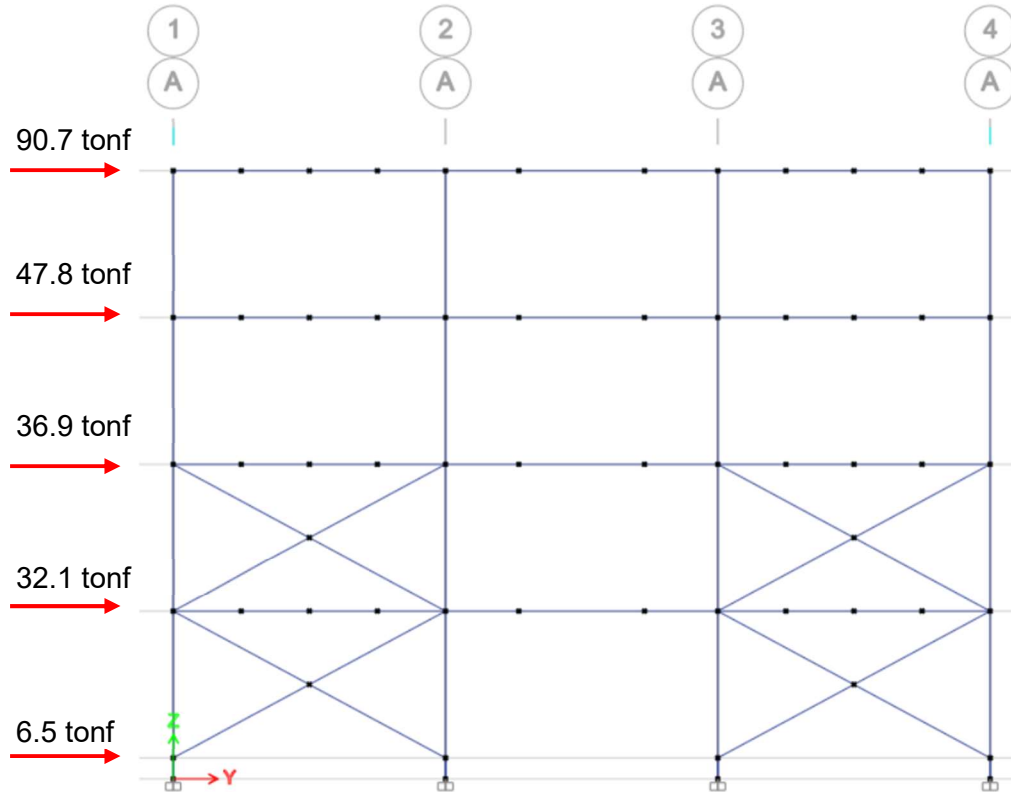


Figura 19. Distribución de fuerzas horizontales.

Los resultados de las distorsiones de entrepiso son los mostrados en la Tabla 23 su límite es delimitado por la norma NCh2745 para un análisis estático como 0.002 de la altura de entrepiso, es decir, 0.007.

Tabla 23. Resultados de distorsiones de entrepiso de la estructura aislada. Análisis estático acorde a la norma NCh2745, 2012.

Sentido X	Desplazamiento (m)	Drift	Evaluación
Nivel 4	0.204	0.007	Cumple
Nivel 3	0.197	0.011	No cumple
Nivel 2	0.186	0.013	No cumple
Nivel 1	0.174	0.010	No cumple
Sentido Y	Desplazamiento (m)	Drift	Evaluación
Nivel 4	0.189	0.008	No cumple
Nivel 3	0.180	0.009	No cumple
Nivel 2	0.171	0.004	Cumple
Nivel 1	0.167	0.003	Cumple

#### 4.4 ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL DE ACUERDO CON LA NCh2745

Una vez obtenidas las características del aislador se introducen esos datos al programa para verificar el cumplimiento del periodo objetivo.

$$T_{ex} = 2.73 \text{ s}$$

$$T_{ey} = 2.68 \text{ s}$$

Identification	
Property Name	Aislador
Direction	U2
Type	Rubber Isolator
NonLinear	Yes

Linear Properties	
Effective Stiffness	65.21 tonf/m
Effective Damping	0 kN-s/m

Shear Deformation Location	
Distance from End-J	0 m

Nonlinear Properties	
Stiffness	49.89 tonf/m
Yield Strength	4.58 tonf
Post Yield Stiffness Ratio	0.1

Figura 20. Propiedades del aislador LRB.

El espectro de diseño es obtenido a partir de lo señalado en la Figura 21 y el espectro para el sismo máximo posible resulta de multiplicar el espectro de diseño por el factor  $M_M$  que para este caso es 1.2.

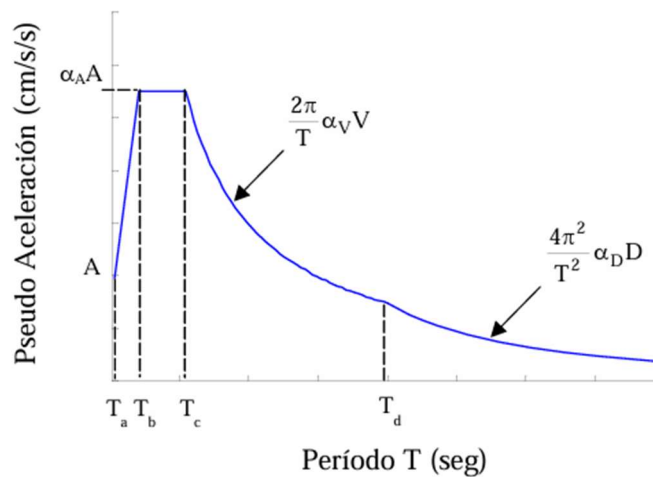


Figura 21. Espectro de diseño. Fuente: NCh2745, 2012.

El espectro de diseño se ocupa para obtener las fuerzas laterales de la estructura aislada y el espectro del sismo máximo posible se ocupa para obtener el desplazamiento máximo del sistema de aislación.

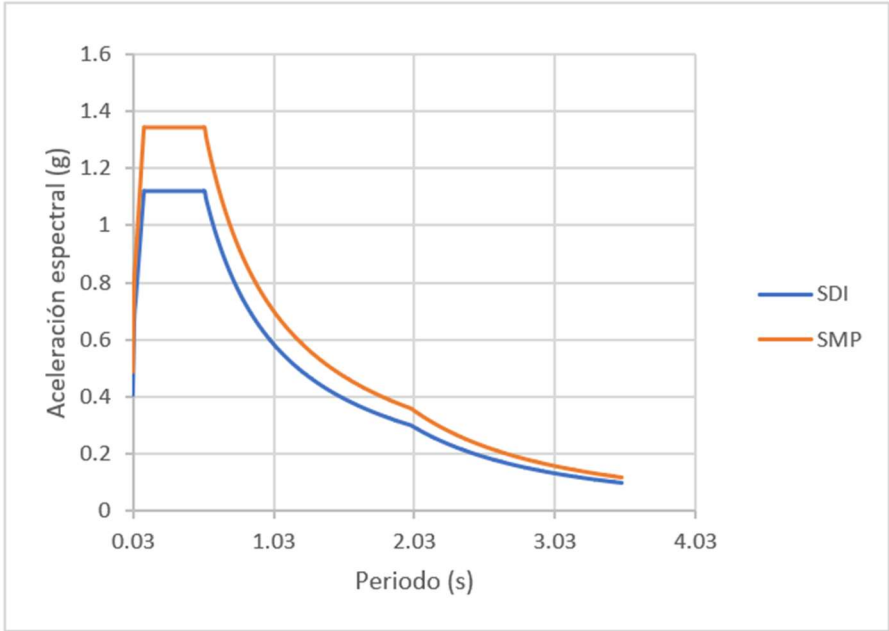


Figura 22. Espectro de diseño y espectro para el Sismo Máximo Posible.

En la norma NCh2745 se hace alusión al factor de modificación de respuesta, producto del amortiguamiento efectivo del sistema de aislación, que modifica al espectro de diseño lo cual contribuye a la reducción de las fuerzas sísmicas, este factor de modificación de respuesta se grafica en la Figura 23 para el amortiguamiento efectivo calculado de cada aislador  $\zeta_a = 14\%$ .

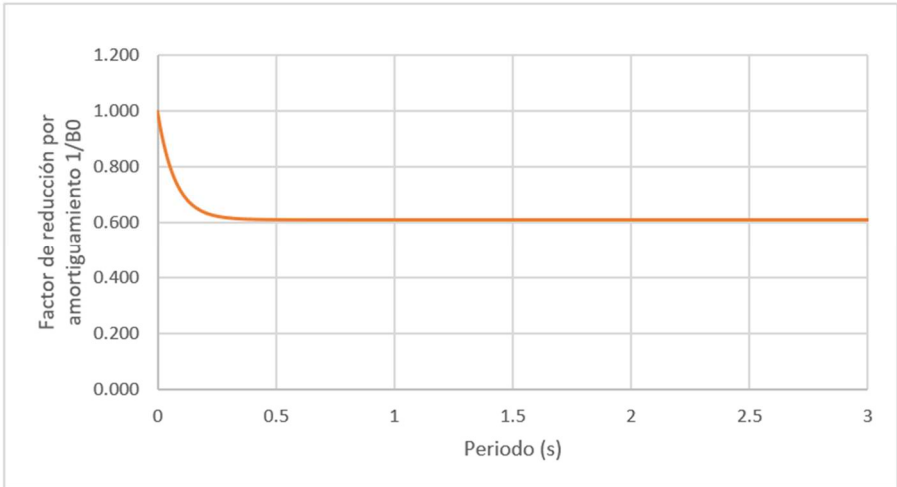


Figura 23. Factor de reducción por amortiguamiento.

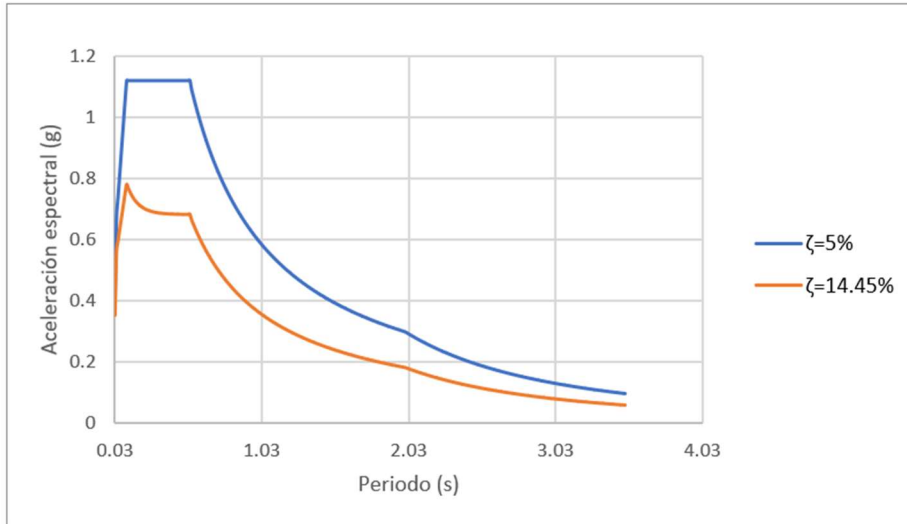


Figura 24. Espectro de diseño y espectro reducido por amortiguamiento.

A partir del factor de reducción y en conjunto con el espectro de diseño ya obtenido, ver Figura 24, se forma el Espectro de diseño compuesto para cada una de las direcciones de análisis, ver Figura 25 y Figura 26, siendo el periodo de la dirección de análisis el límite entre el espectro de diseño original y el espectro de diseño afectado por el factor de modificación de respuesta producto del amortiguamiento efectivo del sistema de aislación.

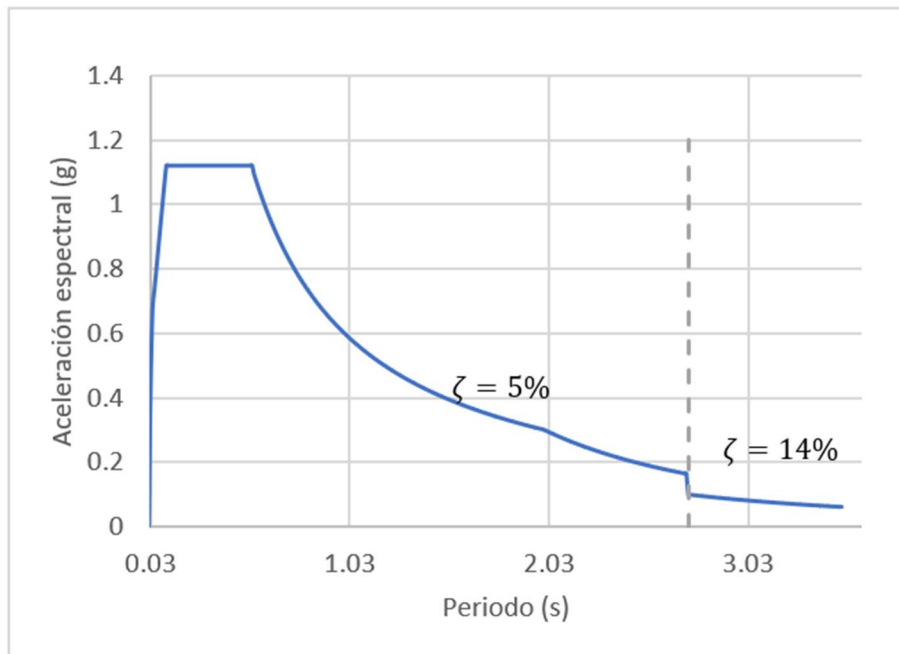


Figura 25. Espectro de diseño compuesto, dirección X.

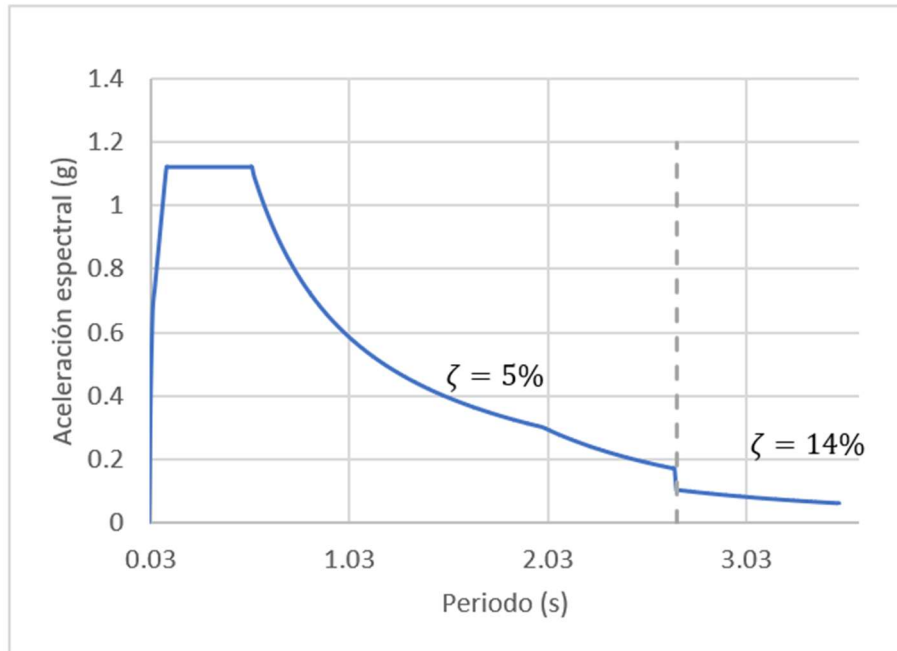


Figura 26. Espectro de diseño compuesto, dirección Y.

En cuanto a los resultados de las distorsiones de entrepiso son las mostradas en la Tabla 24 y corresponden al Espectro de diseño compuesto, cuyo límite es 0.0025 de la altura de entrepiso, es decir, 0.0085.

Tabla 24. Resultados de distorsiones de entrepiso de la estructura aislada. Análisis modal espectral acorde a la norma NCh2745, 2012.

X	Desplazamiento (m)	Drift	Evaluación
Nivel 4	0.196	0.004	Cumple
Nivel 3	0.192	0.006	Cumple
Nivel 2	0.186	0.008	Cumple
Nivel 1	0.177	0.007	Cumple
Y	Desplazamiento (m)	Drift	Evaluación
Nivel 4	0.191	0.005	Cumple
Nivel 3	0.186	0.005	Cumple
Nivel 2	0.181	0.003	Cumple
Nivel 1	0.178	0.003	Cumple

#### 4.4.1 SOLICITACIÓN SÍSMICA

De acuerdo con lo señalado con la norma NCh2745 el sismo de diseño se debe utilizar para calcular el desplazamiento de diseño del sistema de aislación, las fuerzas horizontales y desplazamientos laterales de la estructura aislada.

Para el cálculo del desplazamiento total de diseño se debe considerar la acción simultánea del 100% del sismo en la dirección evaluada más el 30% del sismo del eje ortogonal.

Como se observa en la Tabla 25, todos los desplazamientos están por debajo del desplazamiento  $D_{TMx} = 0.27$  m utilizado para el diseño del aislador en la sección 4.3. Con ello se concluye que el diseño anterior del aislador sísmico es adecuado para el resultado del análisis modal espectral y el dispositivo es idóneo para utilizarse en cada uno de los apoyos de la estructura.

Tabla 25. Desplazamiento de diseño para los aisladores sísmicos.

No. de aislador	SDI	
	Desplazamiento dirección X (m)	Desplazamiento dirección Y (m)
1	0.183	0.169
2	0.183	0.172
3	0.183	0.176
4	0.183	0.183
5	0.183	0.192
6	0.175	0.169
7	0.175	0.172
8	0.175	0.176
9	0.175	0.183
10	0.175	0.192
11	0.174	0.169
12	0.174	0.172
13	0.174	0.176
14	0.174	0.183
15	0.174	0.192
16	0.182	0.169
17	0.182	0.172
18	0.182	0.176

Continuación		
No. de aislador	SDI	
	Desplazamiento Dirección X (m)	Desplazamiento Dirección Y (m)
19	0.182	0.183
20	0.182	0.192

En cuanto al Espectro para el Sismo Máximo Posible, se debe utilizar para calcular el desplazamiento máximo del sistema de aislación y para la separación mínima entre edificios, ver Figura 27 y Figura 28.

De igual manera que con el cálculo del desplazamiento total de diseño, para el desplazamiento máximo del sistema de aislación se debe considerar la acción simultanea del 100% del sismo en la dirección evaluada más el 30% del sismo del eje ortogonal.

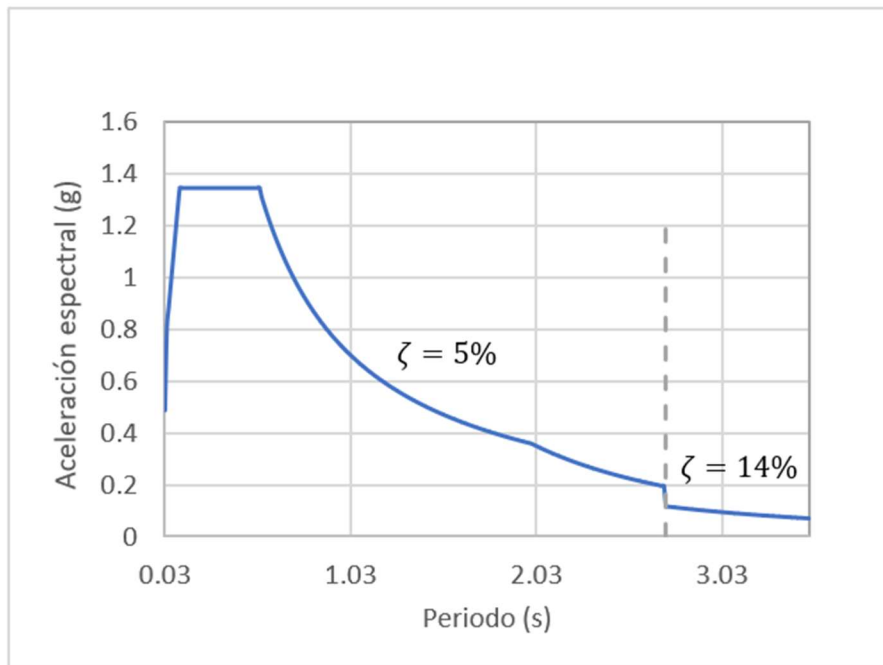


Figura 27. Espectro para el sismo máximo posible, dirección X.



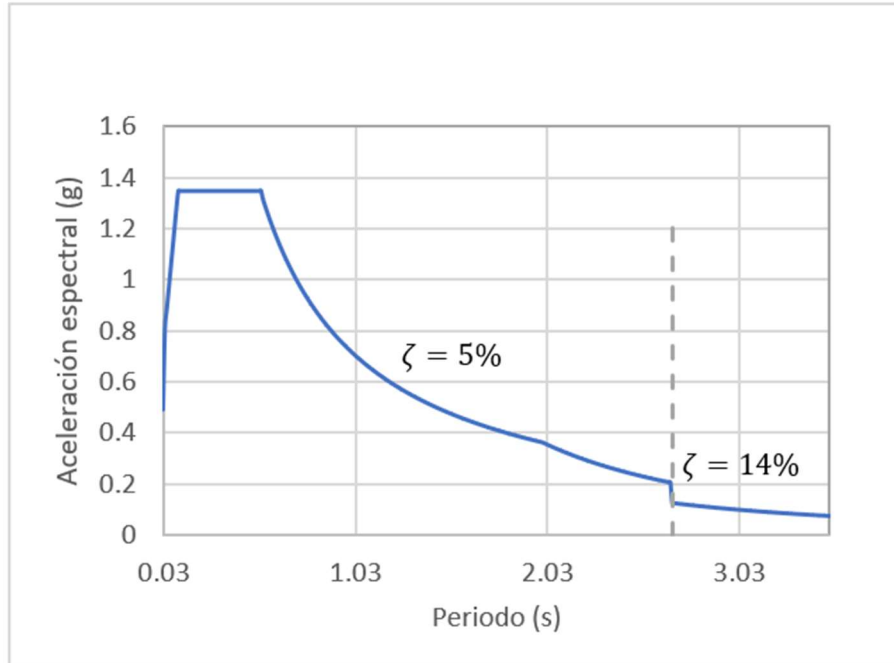


Figura 28. Espectro para el sismo máximo posible, dirección Y.

Como se observa en la Tabla 25, los desplazamientos obtenidos continúan por debajo del desplazamiento  $D_{TMx} = 0.27$  m, utilizado para el diseño del aislador, por lo que el dispositivo cumple con el nivel de seguridad que busca la norma chilena con la aplicación del concepto del Sismo Máximo Posible que se desarrolló en el análisis estático.

Tabla 26. Desplazamiento total máximo del sistema de aislación.

No. de aislador	SMP	
	Desplazamiento dirección X (m)	Desplazamiento dirección Y (m)
1	0.220	0.203
2	0.220	0.206
3	0.220	0.212
4	0.220	0.220
5	0.220	0.231
6	0.209	0.203
7	0.209	0.206
8	0.209	0.212
9	0.209	0.220
10	0.209	0.231

Continuación		
No. de aislador	SMP	
	Desplazamiento Dirección X (m)	Desplazamiento Dirección Y (m)
11	0.209	0.203
12	0.209	0.206
13	0.209	0.212
14	0.209	0.220
15	0.209	0.231
16	0.218	0.203
17	0.218	0.206
18	0.218	0.212
19	0.218	0.220
20	0.218	0.231

Para obtener la fuerza cortante de diseño de los elementos del aislador se toma el mayor de los valores de la Tabla 26 y se multiplica dicho desplazamiento máximo ( $D_M$ ) por la rigidez del aislador para el Sismo Máximo Posible ( $k_{smp}$ ). Esta rigidez  $k_{smp}$  depende de la fuerza cortante máxima  $F_{smp}$ , producto de la respuesta del modelo del software al Espectro de diseño para el Sismo Máximo Posible.

$$F_{smp} = 15 \text{ tonf} \quad (53)$$

$$D_{smp} = 0.23 \text{ m} \quad (54)$$

$$k_{smp} = \frac{F_{smp}}{D_{smp}} = 65.2 \frac{\text{tonf}}{\text{m}} \quad (55)$$

$$V_{smp} = k_{smp} * D_{smp} = 15.76 \text{ tonf} \quad (56)$$

Donde:

$k_{smp}$  : Rigidez del aislador para el Sismo Máximo Posible (SMP).

$F_{smp}$  : Fuerza cortante del aislador producto del SMP.

$D_{smp}$  : Desplazamiento del aislador producto del SMP.

$V_{smp}$  : Fuerza cortante de diseño para los elementos del aislador.

#### 4.4.2 CORTANTE BASAL

Para el caso del cálculo de la fuerza cortante de diseño se especifica en la norma que, para una estructura irregular dicha fuerza cortante de diseño no puede ser menor que la fuerza lateral mínima  $V_s$  obtenida en el apartado 7.4 *Fuerzas laterales* (INN, Norma Chilena Oficial NCh2745, 2013). Con los resultados presentados en la Tabla 27 se llega a la conclusión de que los esfuerzos correspondientes para el diseño de los elementos de la superestructura requieren ser amplificados un 34%.

Tabla 27. Resultados del corte basal con el análisis modal espectral.

Dirección	Fuerza lateral mínima NCh2745 Análisis estático (tonf)		Fuerza lateral NCh2745 Análisis modal espectral (tonf)	
	Subestructura $V_b$	Superestructura $V_s$	Subestructura	Superestructura
X	342.26	213.9	400.21	160.32
Y			413.30	158.72

#### 4.4.3 FUERZA DE RESTITUCIÓN LATERAL

Con base a los señalado en la NCh2745 en el apartado 10.2.4 se requiere que el dispositivo desarrolle una fuerza de restitución lateral tal que la fuerza lateral para el desplazamiento total de diseño ( $D_{TD}$ ) sea por lo menos 0.025 W mayor que la fuerza lateral para el 50% del desplazamiento total de diseño (INN, Norma Chilena Oficial NCh2745, 2013).

Cálculo de la fuerza horizontal al desplazamiento máximo del sistema de aislación:

$$F_{r1} = (Q_0 + k_p D_{TDx}) * n = 305.51 \text{ tonf} \quad (57)$$

Cálculo de la fuerza horizontal al 50% del desplazamiento máximo:

$$F_{r2} = (Q_0 + k_p 0.5 D_{TDx}) * n = 193.96 \text{ tonf} \quad (58)$$

Por lo que:

$$F_{r1} - F_{r2} = 111.55 \text{ tonf} \quad (59)$$

$$0.025 W = 61.45 \text{ tonf} \quad (60)$$

$$111.55 \text{ tonf} > 61.45 \text{ tonf}$$

De esta manera se cumple la condición de la fuerza de restitución lateral.

#### 4.4.4 ESTABILIDAD PARA CARGAS VERTICALES

Para la revisión de la estabilidad de cargas verticales se contemplan en la norma NCh2745 dos combinaciones de carga en el apartado 10.2.6:

Combinación 1.  $1.2 D + L + |E_{\text{máx}}|$

Combinación 2.  $0.8 D - |E_{\text{mín}}|$

Donde:

D : Carga permanente.

$E_{\text{máx}}$  : Cara vertical máxima sobre el aislador proveniente del volcamiento de superestructura en respuesta al Sismo Máximo Posible.

$E_{\text{mín}}$  : Cara vertical máxima sobre el aislador proveniente del volcamiento de superestructura en respuesta al Sismo Máximo Posible.

L : Carga viva.

Todos los elementos del sistema de aislación y sus conectores con la estructura se deben diseñar para permanecer estables ante la carga vertical máxima y mínima producto de las dos combinaciones anteriores. En el caso de las cargas relacionadas del sismo, se deben tomar los resultados del espectro construido para el Sismo Máximo Posible.

Con los resultados de las combinaciones se revisa el desplazamiento máximo posible para cada tipo de aislador con la ecuación siguiente (Reveco & Silva, 2015):

$$D^i_{MAX} = \frac{\Phi_a}{1 + \frac{K_{eff} * H}{P_v^i}} \quad (61)$$

Donde:

$P_v$  : Carga vertical.

$H$  : Altura total del aislador (incluyendo las placas de acero).

Este desplazamiento máximo, calculado a partir de la ecuación 61 del presente documento, debe ser igual o mayor al desplazamiento total máximo de diseño obtenido del método de análisis modal espectral  $D_{TMx} = 0.27$  m, en la Tabla 28 se aprecia que los apoyos 1 y 16 no cumplen este requisito, pero dado a que no es una exigencia de la norma cumplir con este límite, el diseño de los elementos relacionados a los aisladores sísmicos y a las conexiones entre la estructura y la cimentación, deben considerar las demandas de estas combinaciones de carga.

Tabla 28. Estabilidad ante cargas verticales.

No. de aislador	P (tonf) Combinación 1	P (tonf) Combinación 2	$D_{MAX}$ (m) Combinación 1	$D_{MAX}$ (m) Combinación 2	Evaluación
1	121.44	15.99	0.62	0.23	No cumple
2	139.48	71.37	0.64	0.53	Cumple
3	148.88	80.75	0.65	0.55	Cumple
4	140.12	70.71	0.64	0.52	Cumple
5	135.13	20.12	0.64	0.27	Cumple
6	135.91	38.99	0.64	0.40	Cumple
7	201.57	113.19	0.69	0.61	Cumple
8	229.57	131.78	0.71	0.63	Cumple
9	218.96	124.91	0.70	0.62	Cumple
10	163.07	53.04	0.66	0.47	Cumple
11	135.25	38.82	0.64	0.40	Cumple
12	199.61	112.00	0.69	0.61	Cumple
13	228.95	131.51	0.71	0.63	Cumple
14	218.96	124.90	0.70	0.62	Cumple
15	163.26	52.90	0.66	0.47	Cumple
16	120.87	15.01	0.62	0.22	No cumple
17	135.33	68.72	0.64	0.52	Cumple
18	146.06	78.92	0.65	0.54	Cumple
19	139.83	70.42	0.64	0.52	Cumple
20	134.96	20.47	0.64	0.27	Cumple

## CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se recaban los resultados obtenidos de los análisis llevados a cabo conforme a las especificaciones de la norma NCh2745 y los resultados del software respetando la estructuración planteada en la tesis base (Juárez, 2021). Dado a que las distorsiones de entrepiso no cumplen con las exigencias de la normativa chilena se llega a la conclusión de cambiar la estructuración.

### 5.1 DISTORSIÓN DE ENTREPISO

En primer lugar, se compararán las distorsiones obtenidas en el presente trabajo con las que obtuvieron en la tesis base (Juárez, 2021), se resalta que la norma chilena NCh433 es más estricta en comparación al MDOCCFE del 2015 ya que la distorsión admisible para una estructura de base fija para este manual es de 0.015 en comparación al 0.007 solicitado en la NCh2745.

*Tabla 29. Comparativa de distorsiones de la estructura empotrada. Fuente: Juárez, 2018.*

X	MDOCCFE Análisis modal espectral Drift <sub>adm</sub> = 0.015		NCh433 Análisis modal espectral Drift <sub>adm</sub> = 0.007	
		Cumple		Cumple
Nivel 4	0.008	Sí	0.009	No
Nivel 3	0.012	Sí	0.014	No
Nivel 2	0.013	Sí	0.017	No
Nivel 1	0.009	Sí	0.013	No
Y				
Nivel 4	0.004	Sí	0.018	No
Nivel 3	0.004	Sí	0.019	No
Nivel 2	0.001	Sí	0.006	Sí
Nivel 1	0.001	Sí	0.005	Sí

Para las distorsiones de la estructura aislada el MDOCCFE del 2015 se vuelve más estricto en cuanto a los valores admisibles ya que para la estructura analizada el límite es 0.0075 en comparativa al 0.015 de una estructura de base fija. En el caso de la norma chilena varía sus límites de distorsión dependiendo del análisis realizado, para el análisis estático de la estructura aislada el valor admisible sigue siendo 0.007 de acuerdo con la altura de entrepiso y para el análisis dinámico modal espectral el límite es de 0.0085, con lo que se puede inferir que la norma chilena reconoce una mayor aproximación del comportamiento real de la estructura aislada permitiendo un poco más de desplazamiento de sus entrepisos.

En la Tabla 30 se indica el porcentaje de reducción en los entrepisos de la distorsión en los entrepisos tanto de los análisis estático y dinámico de la norma NCh2745 de la Estructura Aislada (EA) respecto a los resultados del análisis estático de la Estructura Empotrada (EE), ver Figura 29 y Figura 30.

Tabla 30. Comparativa de distorsiones entre estructura empotrada y estructura aislada.

	Estructura empotrada		Estructura aislada					
	NCh433 Análisis modal espectral Drift <sub>adm</sub> = 0.007		NCh2745 Análisis estático Drift <sub>adm</sub> = 0.007			NCh2745 Análisis modal espectral Drift <sub>adm</sub> = 0.0085		
X		Cumple		Cumple	Porcentaje de reducción de distorsión respecto a la estructura empotrada		Cumple	Porcentaje de reducción de distorsión respecto a la estructura empotrada
Nivel 4	0.009	No	0.007	Sí	24%	0.004	Sí	60%
Nivel 3	0.014	No	0.011	No	24%	0.006	Sí	54%
Nivel 2	0.017	No	0.013	No	27%	0.008	Sí	51%
Nivel 1	0.013	No	0.010	No	24%	0.007	Sí	45%
Y								
Nivel 4	0.018	No	0.008	No	52%	0.005	Sí	74%
Nivel 3	0.019	No	0.009	No	51%	0.005	Sí	71%
Nivel 2	0.006	Sí	0.004	Sí	40%	0.003	Sí	59%
Nivel 1	0.005	Sí	0.003	Sí	33%	0.003	Sí	47%

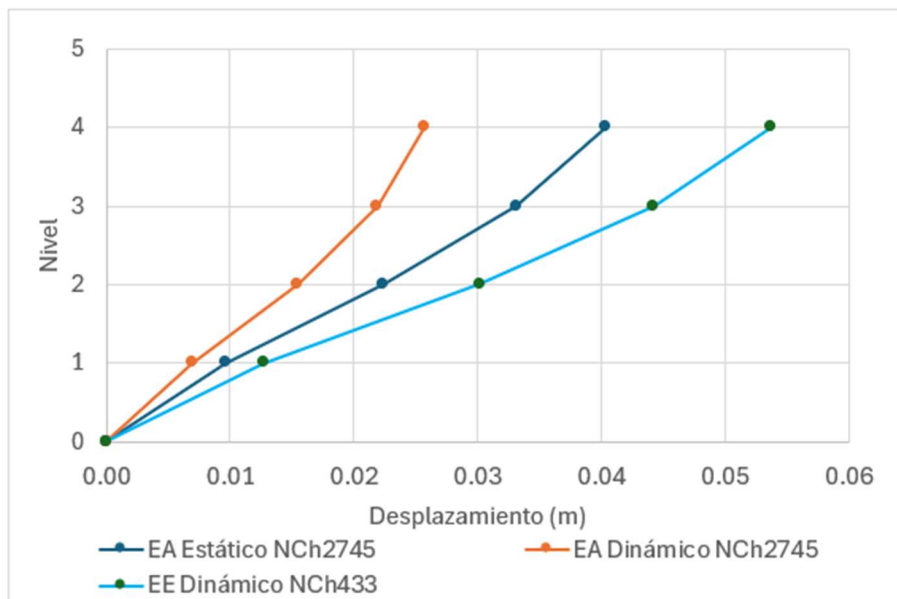


Figura 29. Comparativa de desplazamiento Dirección X.

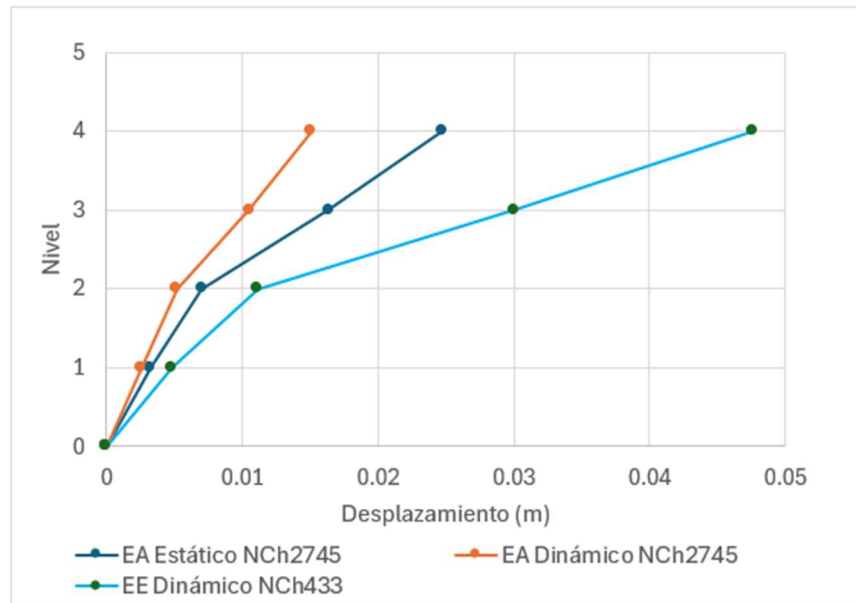


Figura 30. Comparativa de desplazamiento Dirección Y.

En el capítulo 4 se mencionó que la estructura no cumple el estado límite de servicio y en la Figura 29 y la Figura 30 se evidencia que la superestructura no se comporta como cuerpo rígido, debido a ello es necesario realizar cambios en la estructuración, por lo que, se opta por colocar arriostramientos en todos los niveles en ambos sentidos como se muestra en la Figura 31, Figura 32 y Figura 33.

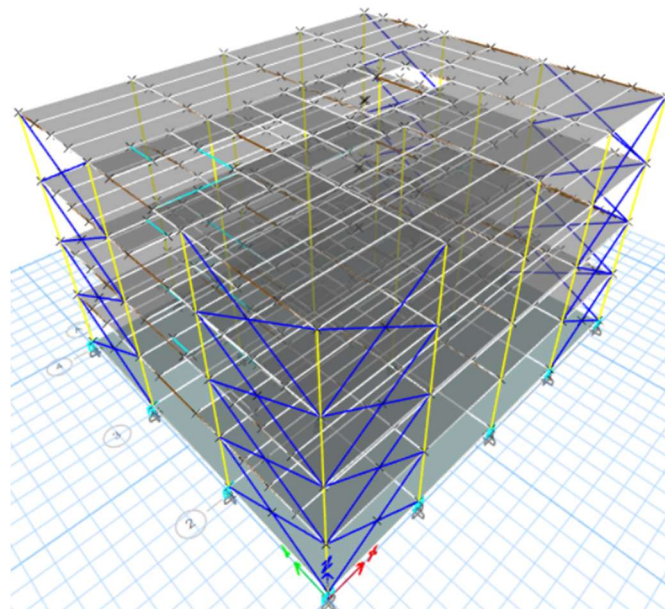


Figura 31. Estructuración modificada visualizada en 3D.



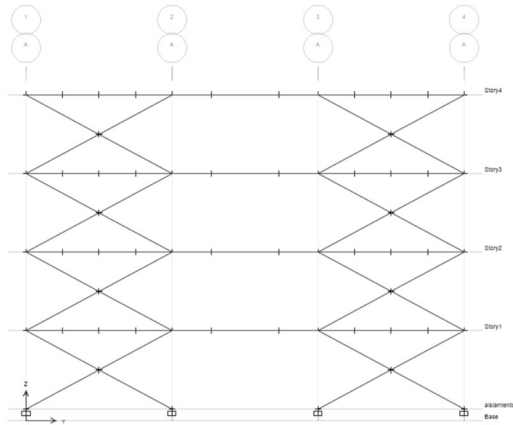


Figura 32. Elevación eje A, estructuración modificada.

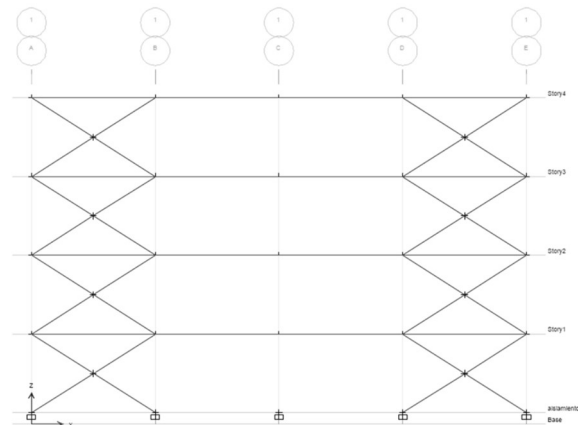


Figura 33. Elevación eje 1, estructuración modificada.

Tabla 31. Periodos naturales de vibración y porcentajes de participación modal de la estructura modificada empotrada.

Modo	Periodo	% de participación en X	% de participación en Y
1	0.594	70%	0%
2	0.416	1%	81%
3	0.272	7%	0%
4	0.18	14%	0%
5	0.133	0%	13%
6	0.103	3%	0%
7	0.086	3%	0%
8	0.078	0%	3%
9	0.076	2%	0%
10	0.06	0%	1%
11	0.052	1%	0%
12	0.042	0%	0%

## 5.2 ACTUALIZACIÓN DE DISEÑO DEL AISLADOR SÍSMICO

En esta sección dado que la estructuración del edificio ha cambiado no es posible realizar una comparativa con los resultados de la tesis base (Juárez, 2021).

Producto del cambio efectuado en la estructuración corresponden nuevos valores de las propiedades de la estructura y valores objetivo para el diseño del aislador, con estos nuevos datos se obtuvo el desplazamiento total de diseño y el desplazamiento total. El resumen de este nuevo diseño se presenta en la Tabla 32.

Tabla 32. Resumen del diseño del aislador para la estructura modificada.

Resumen del diseño del aislador	
Peso de la estructura	$W = 2468 \text{ tonf}$
Masa de la estructura	$M = 251.66 \text{ tonf}$
Periodo traslacional	$T_x = 0.594 \text{ s}$ $T_y = 0.416 \text{ s}$
Rigidez de la estructura	$K_{ex} = 16000 \text{ tonf/m}$ $K_{ey} = 16666.7 \text{ tonf/m}$
Valores objetivo	
Periodo objetivo	$T_{ob} = 2.4 \text{ s}$
Porcentaje de amortiguamiento propuesto del sistema aislado	$\zeta_{ob} = 0.10$
Porcentaje de amortiguamiento propuesto del sistema de aislamiento	$\zeta_a = 0.12$
Desplazamiento de diseño método estático NCh2745	
Desplazamiento de diseño	$D_D = 0.2 \text{ m}$
Desplazamiento máximo	$D_M = 0.24 \text{ m}$
Desplazamiento total de diseño	$D_{TDx} = 0.22 \text{ m}$ $D_{TDy} = 0.21 \text{ m}$
Desplazamiento total máximo	$D_{TMx} = 0.27 \text{ m}$ $D_{TMy} = 0.26 \text{ m}$
Características del aislador	
Diámetro del aislador	$\phi_a = 0.5 \text{ m}$
Diámetro del núcleo de plomo	$\phi_p = 0.07 \text{ m}$
Número de capas del apoyo	$n_c = 16$
Espesor de capas del apoyo	$t_r = \frac{3}{8} \text{ in}$
Espesor del caucho	$H_r = 0.15 \text{ m}$

Continuación	
Resumen del diseño del aislador	
Altura total del aislador	0.25 m
Capacidad del aislador a cero deformación	$Q_0 = 4.12 \text{ tonf}$
Rigidez post-fluencia del aislador	$k_p = 59.25 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$
Rigidez inicial del aislador	$k_i = 592.5 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$
Desplazamiento de fluencia	$D_y = 0.007 \text{ m}$
Fuerza de fluencia	$F_y = 4.58 \text{ tonf}$
Rigidez efectiva del aislador	$k_{eff} = 74.57 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$
Rigidez efectiva del sistema de aislación	$K_{eff} = 1491.45 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$
Amortiguamiento efectivo del aislador al desplazamiento de diseño	$\zeta_a = 0.127$
Porcentaje de amortiguamiento del sistema aislado	$\zeta_{sis} = 0.12$
Periodo de la estructura aislada	$T_e = 2.58 \text{ s}$
Rigidez vertical del aislador	$k_v = 427033.75 \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$
Frecuencia vertical de vibración del sistema	$f_v = 28.02 * f_h = 10.88 \frac{1}{\text{s}}$
Fuerza lateral mínima de diseño de elementos estructurales (subestructura)	$V_b = 387.74 \text{ tonf}$
Fuerza lateral mínima para diseñar los elementos estructurales sobre el sistema de aislamiento	$V_s = 242.34 \text{ tonf}$
Desplazamiento de diseño método modal espectral NCh2745	
Periodo traslacional	$T_x = 2.53 \text{ s}$ $T_y = 2.51 \text{ s}$
Desplazamiento total de diseño	$D_{TDx} = 0.2 \text{ m}$ $D_{TDy} = 0.21 \text{ m}$

Continuación	
Resumen del diseño del aislador	
Desplazamiento total máximo	$D_{TMx} = 0.24 \text{ m}$ $D_{TMy} = 0.25 \text{ m}$

Los desplazamientos totales de diseño y total máximo contemplan la acción simultánea del 100% del sismo en la dirección evaluada más el 30% del sismo del eje ortogonal.

En la Tabla 33 se observa que, en cada punto de apoyo para el Espectro de Diseño y el Espectro Sismo Máximo Posible, no hay desplazamientos que rebasen el desplazamiento máximo posible  $D_{TMx} = 0.27 \text{ m}$  utilizado para el diseño del aislador por lo que el aislador propuesto se considera adecuado.

Tabla 33. Desplazamientos de la estructura aislada modificada, Análisis dinámico.

No. de aislador	SDI		SMP	
	Desplazamiento dirección X (m)	Desplazamiento dirección Y (m)	Desplazamiento dirección X (m)	Desplazamiento dirección Y (m)
1	0.201	0.186	0.241	0.223
2	0.201	0.188	0.241	0.226
3	0.201	0.193	0.241	0.232
4	0.201	0.201	0.241	0.241
5	0.201	0.211	0.241	0.254
6	0.192	0.186	0.230	0.223
7	0.192	0.188	0.230	0.226
8	0.192	0.193	0.230	0.232
9	0.192	0.201	0.230	0.241
10	0.192	0.211	0.230	0.254
11	0.192	0.186	0.231	0.223
12	0.192	0.188	0.231	0.226
13	0.192	0.193	0.231	0.232
14	0.192	0.201	0.231	0.241
15	0.192	0.211	0.231	0.254
16	0.200	0.186	0.239	0.223
17	0.200	0.188	0.239	0.226
18	0.200	0.193	0.239	0.232
19	0.200	0.201	0.239	0.241
20	0.200	0.211	0.239	0.254

Se realiza una nueva comparativa de las distorsiones de entrepiso a fin de conocer el porcentaje de reducción que tienen las dos metodologías utilizadas para el diseño del sistema de aislamiento de la norma NCh2745 con respecto a las distorsiones de entrepiso de una estructura de base fija.

Tabla 34. Comparativa de distorsiones entre estructura de base fija y estructura aislada.

		Estructura empotrada		Estructura aislada				
		NCh433 Análisis modal espectral Drift <sub>adm</sub> = 0.007		NCh2745 Análisis estático Drift <sub>adm</sub> = 0.007			NCh2745 Análisis modal espectral Drift <sub>adm</sub> = 0.0085	
X		Cumple		Cumple	Porcentaje de reducción de distorsión respecto a la estructura aislada		Cumple	Porcentaje de reducción de distorsión respecto a la estructura aislada
Nivel 4	0.009	No	0.006	Sí	39%	0.004	Sí	54%
Nivel 3	0.012	No	0.007	Sí	43%	0.006	Sí	54%
Nivel 2	0.013	No	0.007	Sí	42%	0.006	Sí	50%
Nivel 1	0.008	No	0.006	Sí	22%	0.006	Sí	27%
Y								
Nivel 4	0.007	Sí	0.003	Sí	57%	0.003	Sí	66%
Nivel 3	0.010	No	0.004	Sí	63%	0.003	Sí	71%
Nivel 2	0.011	No	0.004	Sí	63%	0.004	Sí	67%
Nivel 1	0.008	No	0.004	Sí	52%	0.004	Sí	52%

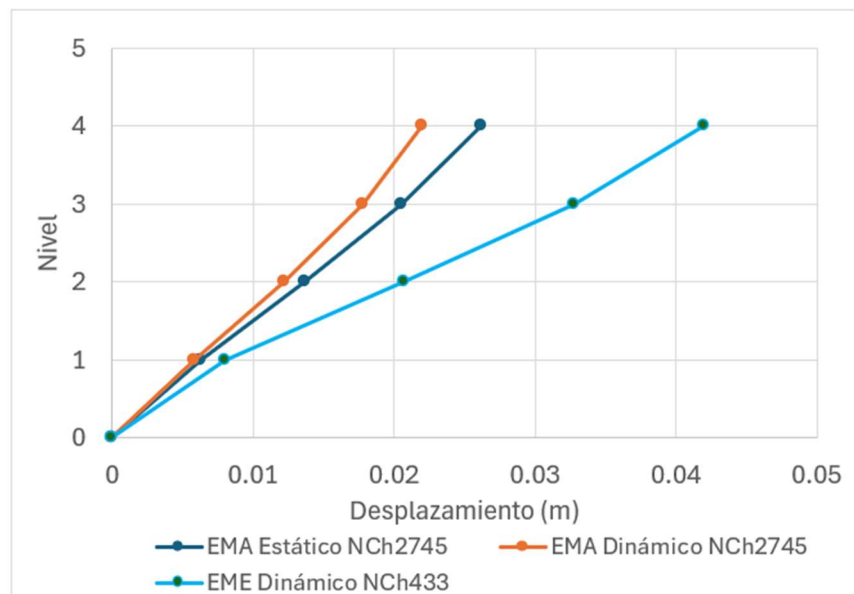


Figura 34. Comparativa de desplazamiento Dirección X.

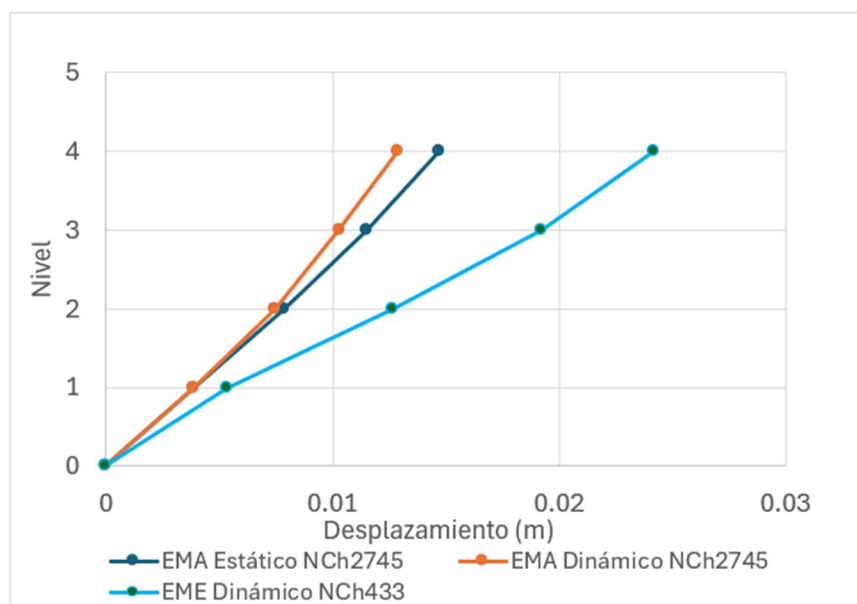


Figura 35. Comparativa de desplazamiento Dirección Y.

En la Figura 34 y la Figura 35 se observa que las distorsiones de entrepiso, de la nueva estructuración, determinadas por el análisis estático no distan mucho de los resultados del análisis modal espectral para la estructura aislada, y que la reducción de dichas distorsiones es significativa con respecto a las obtenidas para la estructura con base fija.

De la comparativa de estos últimos resultados y los obtenidos para la estructura original, se observa un comportamiento de cuerpo rígido, siendo más evidente en la dirección Y.

Para el cálculo del desplazamiento total de diseño se debe considerar la acción simultánea del 100% del sismo en la dirección evaluada más el 30% del sismo del eje ortogonal.

Debido a que la norma NCh2745 solicita que el corte de diseño para la subestructura no puede ser menor que la fuerza lateral mínima  $V_s$  obtenida del apartado 7.4 (*Fuerzas laterales*), con los resultados presentados en la Tabla 35, se llega a la conclusión de que los esfuerzos correspondientes para el diseño de los elementos de la superestructura deben ser amplificados un 25% para ambas direcciones.

Tabla 35. Resultados del corte basal con el análisis modal espectral.

Dirección	Fuerza lateral mínima NCh2745 Análisis estático (tonf)		Fuerza lateral NCh2745 Análisis modal espectral (tonf)	
	Subestructura $V_b$	Superestructura $V_s$	Subestructura $V_b$	Superestructura $V_s$
X	387.74	242.34	280.43	196.3
Y			281.65	194.19

### 5.3 REVISIÓN DE LA ESTABILIDAD VERTICAL

En cuanto a la revisión de estabilidad para cargas verticales se toman en cuenta las combinaciones tomadas del apartado 10.2.6 de la norma NCh2745, las cuales son:

Combinación 1.  $1.2 D + L + |E_{m\acute{a}x}|$

Combinación 2.  $0.8 D - |E_{m\acute{i}n}|$

Donde:

D : Carga permanente.

$E_{m\acute{a}x}$  : Cara vertical máxima sobre el aislador proveniente del volcamiento de superestructura en respuesta al Sismo Máximo Posible.

$E_{m\acute{i}n}$  : Cara vertical máxima sobre el aislador proveniente del volcamiento de superestructura en respuesta al Sismo Máximo Posible.

L : Carga viva.

Con los resultados de las combinaciones mostrados en la Tabla 36 se revisa el desplazamiento máximo posible para cada tipo de aislador, en este caso se emplea la ecuación compartida por Reveco & Silva (2015), ver ecuación número 61 de este documento.

Se aprecia en la Tabla 36, que hay dos apoyos, el 16 y el 20, que no cumplen con el límite del valor de desplazamiento de  $D_{TMx} = 0.27$  m para la segunda combinación, lo que nos indica que en un estado de servicio la estructura brinda una adecuada estabilidad ante cargas verticales, no siendo de la misma manera para una etapa constructiva. Cabe resaltar que no es una exigencia de la norma cumplir con este límite, ya que solo se menciona que el diseño de los elementos relacionados a los aisladores sísmicos, y las conexiones de la estructura y cimentación, deben considerar las demandas de estas combinaciones.

Tabla 36. Estabilidad ante cargas verticales.

No. de aislador	P (tonf) Combinación 1	P (tonf) Combinación 2	D <sub>MAX</sub> (m) Combinación 1	D <sub>MAX</sub> (m) Combinación 2	Evaluación
1	131.56	21.63	0.63	0.28	Cumple
2	141.51	65.74	0.64	0.51	Cumple
3	146.88	81.04	0.65	0.55	Cumple
4	142.41	66.85	0.64	0.51	Cumple
5	147.94	33.29	0.65	0.37	Cumple
6	152.16	25.91	0.65	0.32	Cumple
7	203.56	110.25	0.69	0.60	Cumple
8	229.42	131.64	0.71	0.63	Cumple
9	220.24	122.13	0.70	0.62	Cumple
10	173.02	37.51	0.67	0.39	Cumple
11	146.89	39.05	0.65	0.40	Cumple
12	202.50	107.07	0.69	0.60	Cumple
13	225.85	131.25	0.70	0.63	Cumple
14	220.45	119.92	0.70	0.62	Cumple
15	177.03	48.76	0.67	0.45	Cumple
16	191.48	-8.94	0.68	-0.23	No cumple
17	166.42	32.13	0.67	0.36	Cumple
18	145.91	74.46	0.65	0.53	Cumple
19	176.13	29.81	0.67	0.35	Cumple
20	198.41	-3.29	0.69	-0.07	No cumple

### 5.3 ACELERACIONES DE ENTREPISO

Comparando las aceleraciones de entrepiso de una estructura de base fija y una estructura aislada representadas en la Figura 36 y en la Figura 37, se observa la reducción significativa que supone el uso de los aisladores sísmicos, y el hecho de por qué son tan efectivos para evitar daños en los contenidos. Además, la estructura al posicionarse en modos superiores genera mayor certidumbre en la estimación de las aceleraciones de entrepiso, siendo uno de los objetivos principales para el control de daños en los contenidos (Zuñiga & Terán, 2012).

La norma chilena no contempla un apartado de aceleraciones ni tampoco lo hace la reciente norma mexicana pero esta última propone un dato que puede ser un indicador de una buena respuesta de aceleraciones, dicho indicador se basa en la relación del periodo de la estructura aislada para la intensidad sísmica infrecuente, relacionado al nivel de



desempeño de seguridad de vida, y el periodo de la estructura con base rígida, siendo para una estructura del Grupo B un valor de relación de periodos mayor o igual a 3.

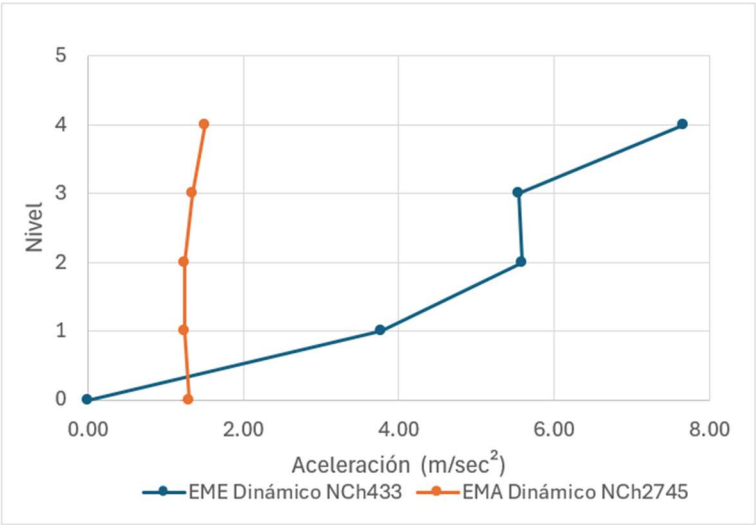


Figura 36. Comparativa de aceleraciones Dirección X.

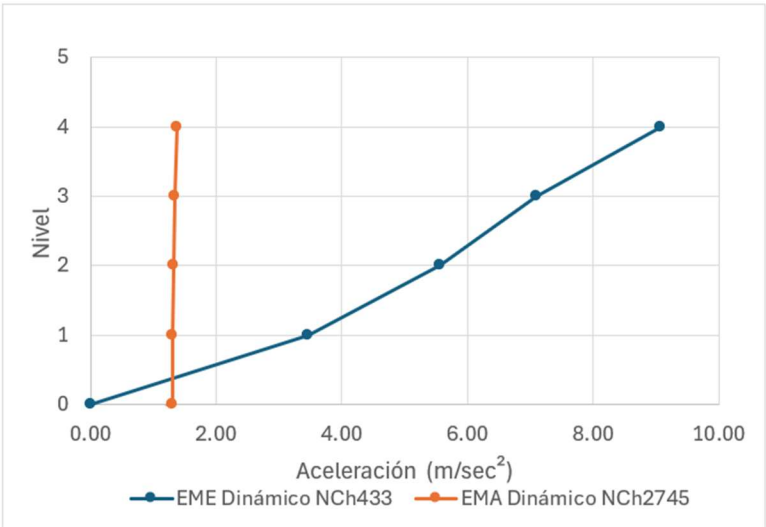


Figura 37. Comparativa de aceleraciones Dirección Y.

Tabla 37. Comparativa de aceleraciones de entrepiso entre estructura modificada empotrada y estructura modificada aislada.

	Estructura empotrada	Estructura aislada	
	NCh433 Análisis modal espectral	NCh2745 Análisis modal espectral	Porcentaje de reducción de aceleraciones respecto a la estructura de base fija
X	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	
Nivel 4	7.67	1.50	80.4%
Nivel 3	5.54	1.35	75.7%
Nivel 2	5.59	1.24	77.7%
Nivel 1	3.77	1.24	67.1%
Y			
Nivel 4	9.08	1.38	84.8%
Nivel 3	7.11	1.35	81.1%
Nivel 2	5.57	1.32	76.4%
Nivel 1	3.46	1.31	62.2%

## CONCLUSIONES

La estructura analizada satisface los requisitos de comportamiento planteados en la normativa chilena, para ello fue necesario brindar una rigidez uniforme en todos los niveles de entrepiso en cada dirección de análisis. Es importante asegurar el comportamiento de cuerpo rígido de la superestructura con el uso de aisladores tipo LRB ya que, si bien existe una reducción de la fuerza sísmica, esto podría no impactar en gran medida en el diseño de la estructura ya que de manera ideal se busca evitar el desarrollo de la no linealidad de los elementos estructurales. Lo anterior explica el por qué los límites en distorsiones de la normativa chilena son tan estrictos, pero la norma reconoce el carácter conservador de un análisis estático siendo ella misma más laxa con el análisis dinámico en general, haciendo una distinción aún más notable con el análisis modal espectral y el análisis de tiempo historia.

Para la estructura de base fija de acuerdo con lo señalado en la NCh433 se observó que la norma contempla un diseño por desempeño intrínseco en ella, ya que, si bien el espectro de diseño es reducido para el diseño de los elementos estructurales, esta reducción no aplica para la revisión de distorsiones, implicando que, para esa probabilidad de ocurrencia del sismo se prevenga el colapso de la estructura y no se comprometa su operabilidad.

En el análisis de la estructura y el diseño del sistema de aislación sísmica acorde a lo dispuesto en la normativa NCh2745 para la estructura inicial se concluyó que, si bien gracias a los aisladores hubo una reducción significativa en las distorsiones de entrepiso, debido a la diferencia de rigidez entre entrepisos, no se lograba el cumplimiento de los límites de distorsiones marcados en la norma para el análisis estático, motivo por el cual se optó por modificar la estructuración original.

Una vez realizado el cambio en la estructuración fue necesario rediseñar los aisladores ya que se vio afectada la rigidez lateral en ambas direcciones de análisis y dado que el diseño de los aisladores tipo LRB depende de la rigidez de la superestructura ya que influye en la cantidad de energía que los dispositivos tienen que disipar, de esta forma se propusieron nuevas características del aislador. Con esta nueva estructuración y el nuevo diseño de los aisladores la estructura ya cumple con los requisitos de distorsiones de entrepiso, así como con el límite mínimo del cortante basal y la fuerza de restitución lateral.

El diseño de los aisladores tipo LRB es un proceso iterativo en el que influyen las propiedades de la estructura, pero también el criterio del diseñador. Si bien la normativa marca ciertos requisitos que deben cumplir los aisladores, algunos de ellos están orientados a resultados de pruebas en los dispositivos seleccionados, por esto mismo en el presente trabajo se plantea complementar en el proceso de diseño con criterios con fundamentos en investigaciones ya que se brindará una visión preliminar del comportamiento esperado durante su vida útil.

Con respecto al periodo objetivo en la norma NCh2745 se marca como límite inferior tres veces el periodo de la estructura de base fija y como límite superior 3 s, si bien en el primer diseño para la estructuración original se respetó este requisito, para el segundo diseño del aislador producto del cambio de estructuración, debido al aumento de rigidez de la estructura, el periodo objetivo era inferior a los 2 s y ello implica que el periodo de la estructura correspondiera a un valor mayor del espectro de pseudo-aceleración, esto dio como resultado un diseño correcto del dispositivo pero una disminución en la eficacia de su uso, por lo que se optó por proponer un periodo objetivo de 2.4 s lo cual disminuyó la rigidez horizontal requerida para cada aislador y un decremento en las solicitudes sísmicas.

Como parte de las consideraciones del presente trabajo para el diseño de los dispositivos de aislamiento, en lugar de tomar el desplazamiento de diseño  $D_D$  ya que la norma solo lo señala como el valor mínimo de desplazamiento que debe desarrollar el aislador, se optó por tomar el desplazamiento máximo total  $D_{TM}$ , ya que implica que el dispositivo desde su diseño podrá desarrollar los desplazamientos producto del Sismo Máximo Posible.

Si bien la norma NCh2745 señala aspectos puntuales que deben cumplir los aisladores sísmicos tipo LRB, fue necesario complementar la metodología de análisis con propuestas que partieran de un desplazamiento de diseño, fue por ello se optó por realizar el análisis estático marcado por la NCh2745 para obtener este desplazamiento y poder comenzar el diseño del aislador.

En el caso de las fuerzas laterales de diseño para los elementos de la superestructura y la subestructura, se propuso integrar los porcentajes de variación de rigidez de los dispositivos en concordancia con las investigaciones enfocadas en una disminución de rigidez por manufactura y un aumento de rigidez producto del envejecimiento del caucho, para esto fue

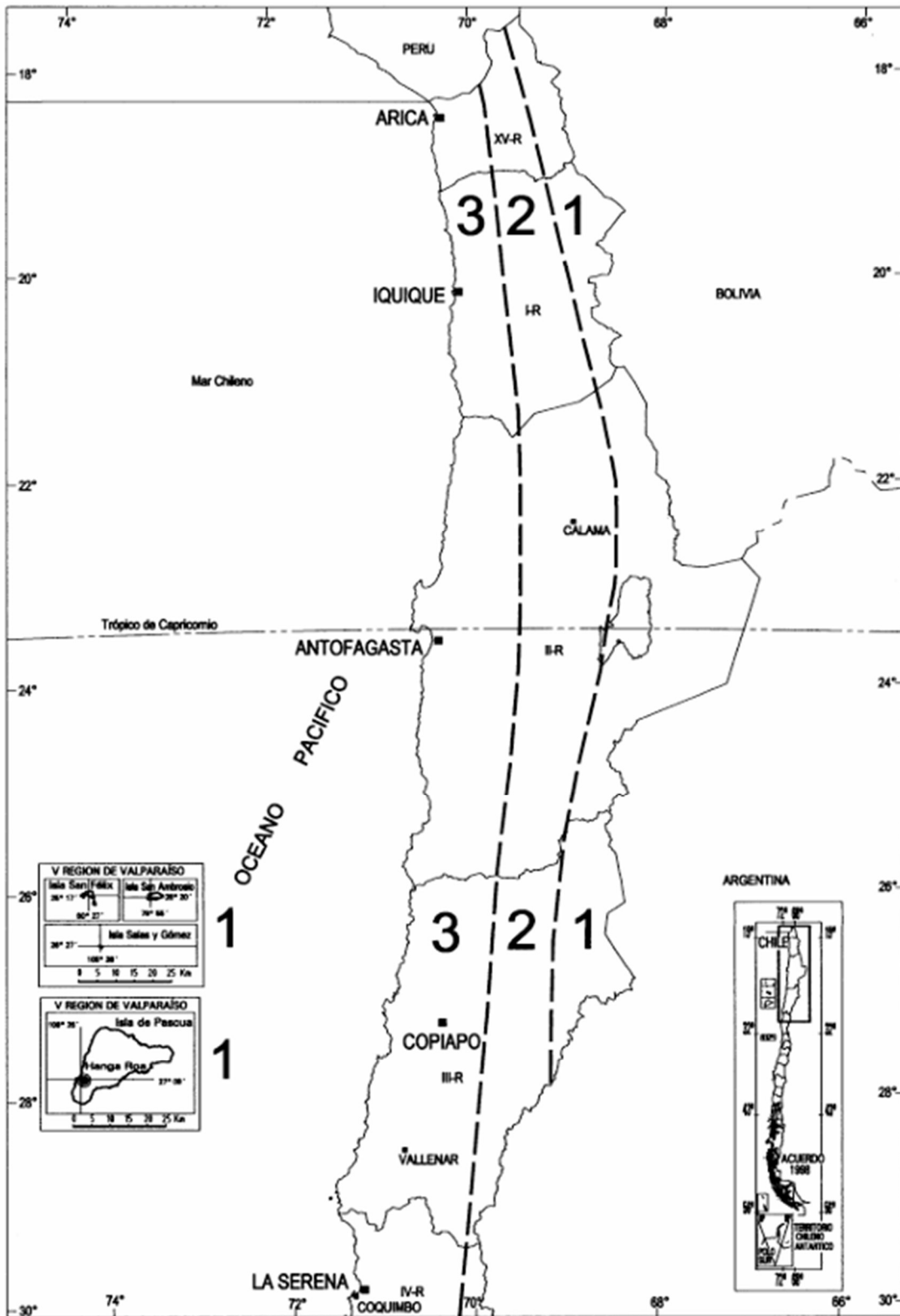
necesario realizar el análisis estático acorde a la norma NCh433 y obtener así el cortante basal mínimo y sus respectivas fuerzas sísmicas, esto en conjunto con el análisis modal espectral para una estructura aislada (marcado en la NCh2745) permitió retroalimentar las características del sistema disipador propuesto.

Se verificó que los desplazamientos resultantes del análisis modal espectral llevado a cabo para la estructura aislada fuesen menores al desplazamiento utilizado para el diseño del aislador y con esto se concluye que es práctico usar el desplazamiento máximo total del análisis estático para permanecer del lado de la seguridad que busca la norma chilena con la consideración del Sismo Máximo Posible. Además, se añade a esta conclusión que, llevar a cabo el análisis estático para una estructura aislada brinda un buen acercamiento al comportamiento del análisis modal espectral de la estructura aislada.

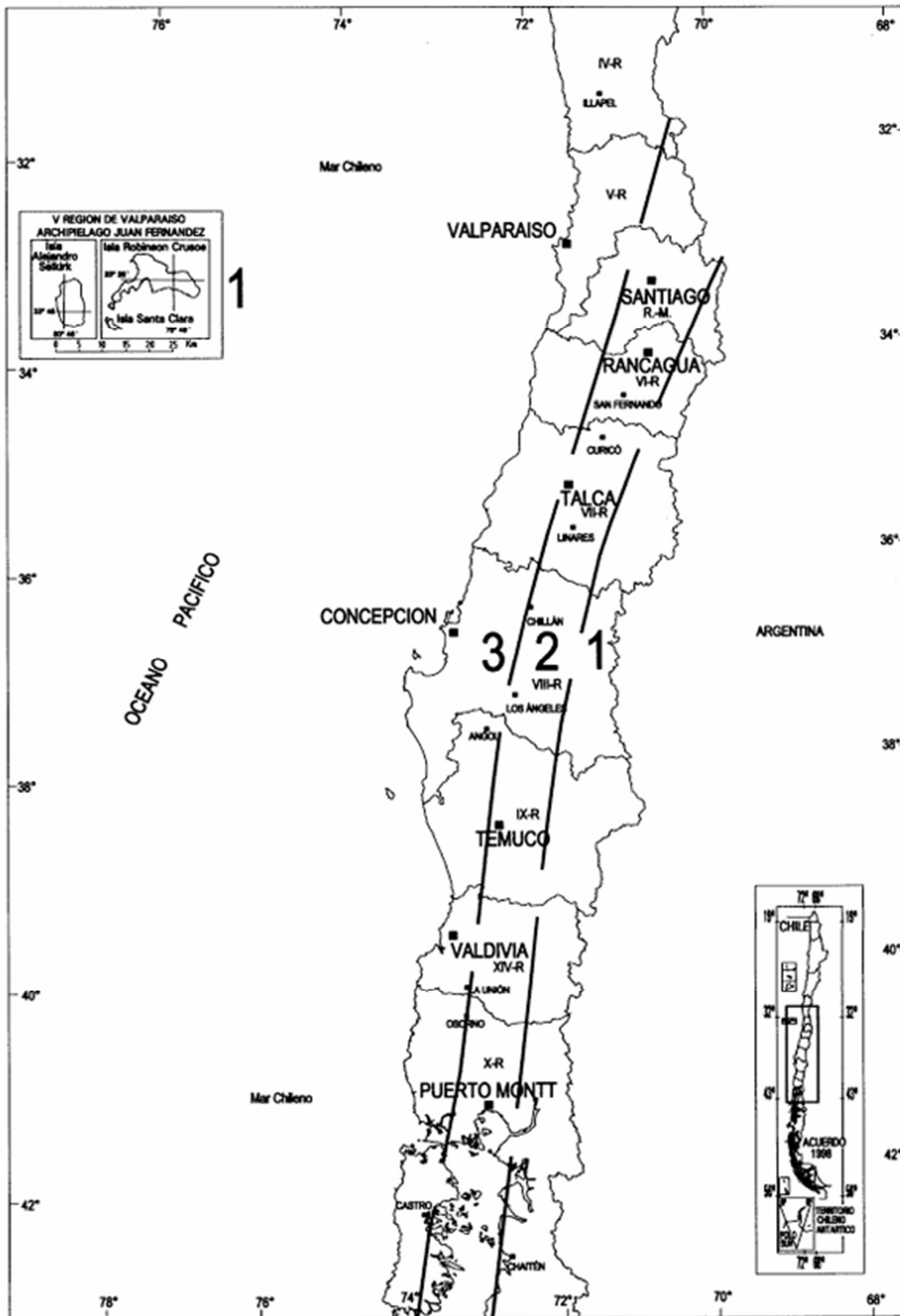
En cuanto al análisis modal espectral de la estructura aislada cabe resaltar que se usó el porcentaje de amortiguamiento calculado del sistema para formar el espectro de diseño, adaptándolo así a un comportamiento más real, tomando en cuenta las propiedades del dispositivo de aislamiento seleccionado. Relacionado a lo anterior se recomienda el uso de los espectros combinados, ya que contemplan el cambio del porcentaje de amortiguamiento para los modos fundamentales de la estructura aislada, y por lo tanto, un comportamiento más cercano a la realidad.

Como conclusión general de este trabajo de investigación se puede decir que, el uso de dispositivos de aislamiento sísmico tipo LRB tiene el objetivo de reducir las distorsiones de entrepiso, las aceleraciones de cada nivel y las demandas en los elementos estructurales siempre y cuando la estructura se comporte como un cuerpo rígido, esto es apreciable en las comparativas realizadas en la Tabla 30, Tabla 34 y la Tabla 37 donde se observa como los valores de distorsiones y aceleraciones de entrepiso disminuyeron, con esto se trata de favorecer que la edificación se mantenga en el rango elástico lineal.

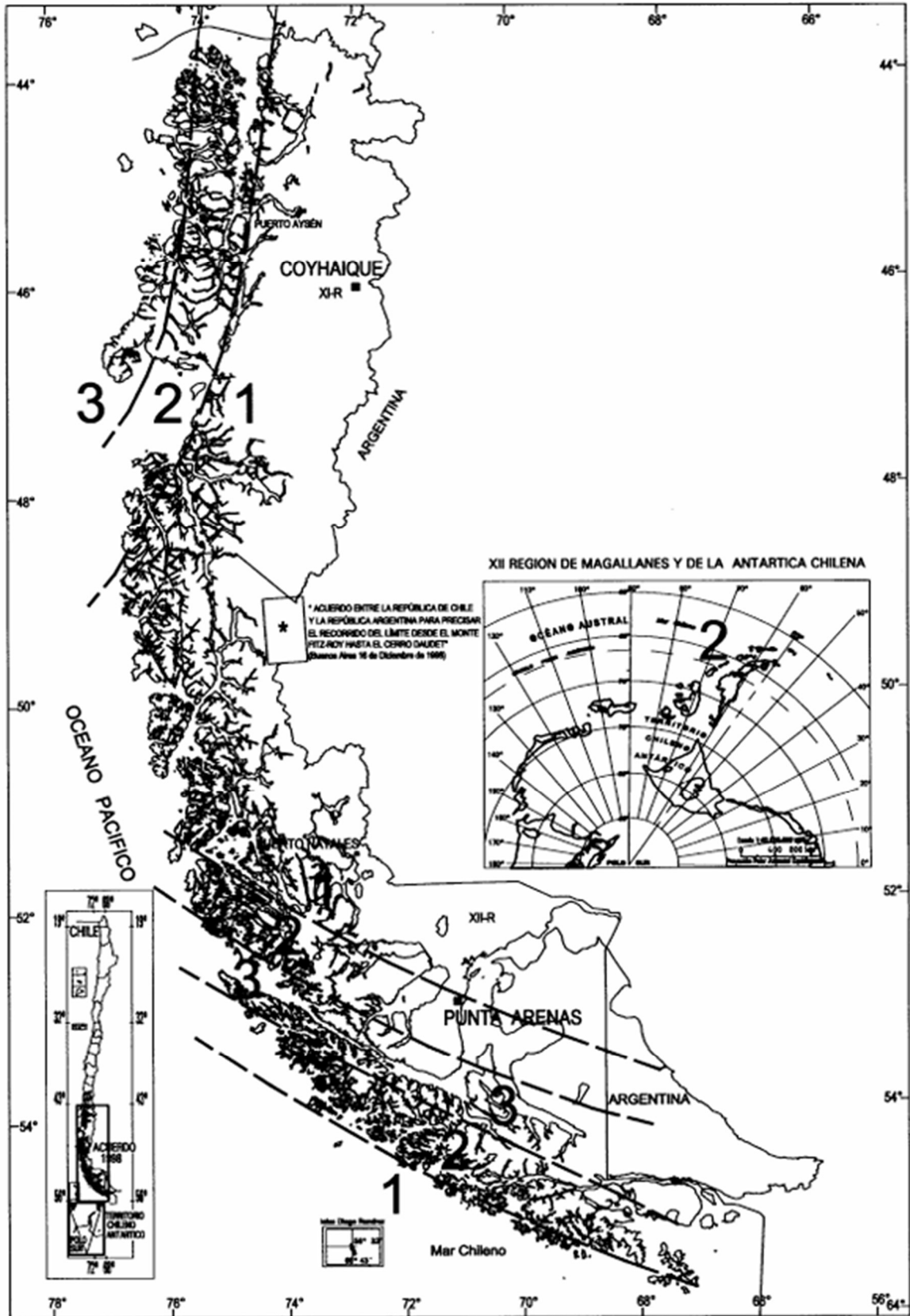
# ANEXO A



Zonificación sísmica Regiones I, II, III y XV. Fuente: Norma NCh433.



Zonificación sísmica Regiones IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XIV y Región Metropolitana. Fuente: Norma NCh433.



Zonificación sísmica Regiones XI y XII. Fuente: Norma NCh433.



## BIBLIOGRAFÍA

- (SMIE) Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C. . (2021). *Ejemplos de diseño de acuerdo a las Normas técnicas complementarias para diseño por sismo 2017/2020*. Ciudad de México: SMIS-SMIE.
- ASCE/SEI, C. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings And Other Structures*. Estados Unidos.
- Charleston, A., & Guisasola, A. (2017). *Seismic isolation for architects*. New York: Routledge Taylor & Francis Group.
- Choun, Y.-S., Park, J., & Choi, I.-K. (2014). *Effects of mechanical property variability in lead rubber bearings on the response of seismic isolation system for different ground motions*. Daejeon: Korean Atomic Energy Research Institute.
- Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. Caracas: Banco de Desarrollo de América Latina.
- INN. (2009). Norma Chilena Oficial NCh1537. *Diseño estructural - Cargas permanentes y cargas de uso*. Santiago de Chile, Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- INN. (2010). Norma Chilena Oficial NCh3171. *Diseño estructural -Disposiciones generales y combinaciones de cargas*. Santiago de Chile, Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- INN. (2012). Norma Chilena Oficial NCh433. *Diseño sísmico de edificios*. Santiago de Chile, Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- INN. (2013). Norma Chilena Oficial NCh2745. *Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*. Santiago de Chile, Chile: Instituto Nacional de Normalización (INN).
- Juárez, R. (2021). *Comparativa de diseño estructural de edificios con aisladores sísmicos, un caso de estudio*. Puebla: Benemérita universidad Autónoma de Puebla.
- Kirikov, B. (1992). *History of earthquake resistant construction from antiquity to our times*. Madrid: Acor Artes Gráficas S.A.
- MDOCCFE. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad*. Mexico: Comisión Federal de Electricidad.
- Méndez, G. (21 de julio de 2022). Conceptualización y diseño preliminar de sistemas de hule para edificios (presentación virtual). *Seminario de aislamiento sísmico*. México: (SMIS) Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.
- Naeim, F., & Kelly, J. (1999). *Design of seismic isolated structures*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

- NTC CRITERIOS, C. (2017). *Normas Técnicas Complementarias Sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones*. Ciudad de México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- NTC, C. (2017). *Normas Técnicas Complementarias*. Ciudad de México: Corporación Mexicana de Impresión S.A de C.V.
- Palacios, & Maycoli. (2015). *Mecánica de aisladores elastoméricos de caucho incompresible y su aplicación en el diseño de aisladores HDR*. Nicaragua: Universidad Centroamericana.
- Pinto, L. (9 de marzo de 2023). Conceptos fundamentales sobre aislamiento sísmico. *Diseño de estructuras con aislamiento y disipación*. Puebla, Puebla, México: (SMIS) Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.
- Pontón, J. A. (2018). *Tesina, Respuesta Sísmica de Edificios con Aislamiento de Base*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Reveco, T. I., & Silva, D. V. (2015). *Aislación sísmica basal elastomérica de edificio habitacional de 13 niveles*. Santiago de Chile: Universidad San Sebastián.
- Skinner, R., Kelly, T., & Robinson, B. (2011). *Seismic Isolation for designers and structural engineers*. Wellington: Robinson Seismic Ltd. & Holmes Consulting Group.
- Zuñiga, O., & Terán, A. (2012). Control de aceleraciones de entrepiso para sistemas. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 21.