



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL  
PIRHUA

# DESEMPEÑO SÍSMICO EN EDIFICACIONES CON AISLADORES ELASTOMÉRICOS Y AMORTIGUADORES DE FLUIDO VISCOSO

Marco Herrera-Mena

Piura, enero de 2018

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

Herrera, M. (2018). *Desempeño sísmico en edificaciones con aisladores elastoméricos y amortiguadores de fluido viscoso* (Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

**UNIVERSIDAD DE PIURA**

FACULTAD DE INGENIERÍA



**“DESEMPEÑO SÍSMICO EN EDIFICACIONES CON AISLADORES  
ELASTOMÉRICOS Y AMORTIGUADORES DE FLUIDO VISCOSO”**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Civil

Bach. Marco Tulio Herrera Mena

Asesor: Dr. Ing. Danny Jim Yong Ayón

Piura, enero 2018



*A mis padres, Santiago y Gladys, quienes con su amor y apoyo me han acompañado y ayudado a lograr todas mis metas.*



## **Prólogo**

La costa del Perú se ubica en una de las zonas con mayor actividad sísmica en el mundo, razón por la cual, las estructuras construidas en nuestro país deben tener la capacidad de resistir sismos de gran magnitud, garantizando la seguridad de las personas. Asimismo, en edificaciones de gran importancia como los hospitales, es necesario evitar daños significativos para que las labores continúen con normalidad.

Entre las metodologías de diseño que se han desarrollado durante los últimos años, se encuentra la incorporación de dispositivos de protección sísmica en las edificaciones. En países como Estados Unidos, Chile, México y Japón, su utilización es cada vez más cotidiana. No obstante, en el Perú son escasas las estructuras diseñadas con estos dispositivos, y actualmente no se tiene una normativa de diseño para ellos.

En este contexto, basándose en el FEMA274 (1997), esta tesis presenta las metodologías de diseño para los dispositivos de protección sísmica más utilizados en la actualidad que son los aisladores elastoméricos de núcleo de plomo y los amortiguadores de fluido viscoso. Asimismo, con los resultados de un análisis tiempo-historia realizado a dieciocho modelos de concreto armado, se presentan las mejoras que generan estos dispositivos en el desempeño de las estructuras.

Se espera que esta tesis sea utilizada como una guía para que futuros investigadores e ingenieros civiles continúen analizando el comportamiento de las estructuras con amortiguadores y aisladores; y de esta manera, con el tiempo se incremente en el Perú, el número de edificaciones construidas con estos dispositivos.

Finalmente, quisiera expresar mi agradecimiento a mis padres que me brindaron todo su apoyo durante mis estudios y durante mi formación como persona. Y además, a mi asesor el Dr. Ing. Danny Yong, quien con su sabiduría supo guiarme y aconsejarme correctamente para desarrollar este trabajo.



## **Resumen**

En la actualidad, los dispositivos de protección sísmica, tales como los amortiguadores y aisladores, se presentan como alternativas en el diseño de estructuras. Sin embargo, nuestra norma E-030 no contempla metodologías para el diseño de estructuras con estos dispositivos, ya que sólo contempla una metodología tradicional que consiste en la combinación de resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía en el rango inelástico. El presente trabajo de tesis tiene como objetivo principal evaluar y comparar el desempeño sísmico en estructuras aporticadas de concreto armado, diseñadas con aisladores elastoméricos y con amortiguadores de fluido viscoso. Se emplearon metodologías de diseño de normas internacionales para el diseño de estos dispositivos; y para la obtención de resultados, se trabajó con modelos de estructuras con diferentes esbelteces, rigideces y frecuencias. Asimismo se empleó el software SAP2000 para realizar el análisis tiempo-historia a estas estructuras con la finalidad de verificar su estado posterior a la sollicitación sísmica. Con los resultados de las derivadas máximas de entrepiso y de las fuerzas internas en los elementos estructurales se evaluó el nivel de desempeño de cada estructura. Se concluye que, para edificaciones aporticadas con poca esbeltez y bajo periodo de vibración, los aisladores funcionaron mejor; mientras que, para edificaciones muy esbeltas y alto periodo de vibración, los amortiguadores tuvieron un mejor desempeño.



## Índice General

<b>Prólogo .....</b>	<b>i</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>iii</b>
<b>Índice General.....</b>	<b>v</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo I. Marco teórico .....</b>	<b>7</b>
1.1. Historia y desarrollo de los sistemas de protección sísmica .....	7
1.2. Tipos de sistemas de protección sísmica .....	9
1.2.1. Sistema de aislación basal .....	9
1.2.1.1. Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LRD).....	9
1.2.1.2. Aisladores de bajo amortiguamiento con núcleo de plomo (LRB) .....	11
1.2.1.3. Aisladores de caucho alto amortiguamiento (HDR).....	13
1.2.2. Sistema de amortiguadores.....	14
1.2.2.1. Amortiguadores de fricción .....	14
1.2.2.2. Amortiguadores de fluencia metálica .....	15
1.2.2.3. Amortiguadores visco-elásticos .....	16
1.2.2.4. Amortiguadores de fluido viscoso.....	17
1.3. Desempeño sísmico .....	23
1.4. Enfoques sismorresistentes .....	26
1.4.1. Enfoque sismorresistente tradicional .....	26
1.4.2. Enfoque sismorresistente de los sistemas de protección sísmica .....	26
1.5. Comportamiento de la estructura .....	27
1.5.1. Sistema de aislación basal .....	28
1.5.2. Sistema de amortiguamiento fluido viscoso.....	30
1.6. Normas vigentes de diseño .....	31
1.6.1. Federal Emergency Management Agency – FEMA274 (1997).....	31
1.6.2. SEAOC- COMMITTEE VISION 2000 (1995).....	32
1.6.3. ASCE (2010).....	33
1.6.4. Norma chilena NCh2745 (2013) .....	33
<b>Capítulo II. Metodologías de Análisis y Diseño .....</b>	<b>35</b>
2.1. Aisladores Elastoméricos.....	35
2.1.1. Formulaciones y recomendaciones de las normas de diseño.....	36
2.1.1.1. Federal Emergency Management Agency –FEMA274 .....	36

2.1.1.2. Norma peruana E-030.....	38
2.1.2. Consideraciones generales para el diseño .....	40
2.1.3. Procedimiento de diseño del sistema de aislación .....	40
2.1.4. Diseño de la estructura con aisladores .....	47
2.2. Amortiguadores de Fluido Viscoso.....	48
2.2.1. Procedimiento de diseño del sistema de amortiguamiento .....	48
2.2.2. Diseño de la estructura con amortiguadores .....	54
<b>Capítulo III. Ejemplo práctico para analizar estructuras con protección sísmica .....</b>	<b>55</b>
3.1. Descripción de la estructura y de los parámetros sísmicos a utilizar .....	55
3.1.1. Características de la estructura .....	55
3.1.2. Distribución de los dispositivos de protección sísmica.....	57
3.1.3. Factores correspondientes al espectro de aceleraciones.....	58
3.1.4. Registros sísmicos .....	60
3.2. Análisis y diseño .....	62
3.2.1. Análisis de la estructura sin dispositivo sísmico .....	62
3.2.1.1. Consideraciones .....	62
3.2.1.2. Resultados del análisis .....	62
3.2.2. Análisis y diseño con aisladores en la base.....	64
3.2.2.1. Diseño de los aisladores.....	64
3.2.2.2. Resultados del análisis .....	70
3.2.3. Análisis y diseño con amortiguadores.....	71
3.2.3.1. Diseño de los amortiguadores.....	71
3.2.3.2. Resultados del análisis .....	76
<b>Capítulo IV. Análisis comparativo del desempeño sísmico .....</b>	<b>79</b>
4.1. Descripción de los modelos de estructuras .....	79
4.2. Configuraciones de los dispositivos sísmicos .....	83
4.3. Dimensionamiento de los aisladores y de los amortiguadores.....	84
4.4. Cuadros comparativos del periodo .....	86
4.5. Cuadros comparativos de los desplazamientos .....	88
4.6. Cuadros comparativos de las derivas máximas de entrepiso .....	99
4.7. Cuadros comparativos de la cortante basal máxima .....	104
<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>109</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>111</b>
<b>Anexo A .....</b>	<b>115</b>

<b>Anexo B</b> .....	<b>119</b>
<b>Anexo C</b> .....	<b>125</b>
<b>Anexo D</b> .....	<b>131</b>
<b>Anexo E</b> .....	<b>145</b>
<b>Anexo F</b> .....	<b>157</b>



## **Introducción**

### **Justificación**

Los aisladores basales y amortiguadores son los dispositivos de protección sísmica más utilizados en edificaciones porque permiten mejorar la respuesta ante un sismo, aumentando los periodos y proporcionando amortiguamiento y absorción de energía adicional. Sin embargo, desde el punto de vista estructural, ambos sistemas trabajan de forma muy diferente. Los aisladores, que desacoplan la estructura del terreno, reducen notablemente la rigidez del sistema estructural haciendo que el periodo fundamental de la estructura aislada sea mucho mayor que el de la misma estructura con base fija. En cambio los amortiguadores, o también conocidos como disipadores sísmicos, tienen como función disipar las acumulaciones de energía, asegurándose de que otros elementos de la estructura no se sobre esfuerzen; es decir, los disipadores sísmicos ofrecen un incremento de la amortiguación a la estructura.

En países como EEUU y Japón, se emplean con mucha regularidad estos dispositivos en sus edificios para evitar daños a la estructura.

A pesar que Perú es un país con gran actividad sísmica, son muy pocos los edificios construidos con aisladores o con amortiguadores. Algunos de los edificios más recientes que se pueden mencionar, y que emplean estos dispositivos, son: el edificio de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (2013), que empleó aisladores en la base; y el edificio del Banco de la Nación en Lima (2015), que utilizó amortiguadores. Cabe indicar además que nuestra norma E-030 no presenta una metodología para el diseño de estos dispositivos de protección sísmica; y son muy escasos los trabajos de investigación realizados sobre el desempeño sísmico de las edificaciones construidas con estos dispositivos. Asimismo, no existe un estudio que evalúe la conveniencia de usar aisladores o amortiguadores en una edificación.

El presente trabajo de tesis presenta un estudio sobre el desempeño sísmico en edificaciones apertadas de concreto armado con protección sísmica, usando aisladores elastoméricos y amortiguadores de fluido viscoso. Se analizarán edificaciones de poca y gran altura (entre 12 a 60 metros) con la finalidad de evaluar el desempeño de los dispositivos para distintas alturas de edificación. Para el diseño de los aisladores y de los amortiguadores, se emplearán las especificaciones del FEMA274 (1997); además, se considerarán los niveles de desempeño sísmico propuestos por el COMMITTEE VISION 2000 – SEAOC. Por último, se presentarán cuadros comparativos del periodo, desplazamiento lateral máximo, deriva máxima y cortante basal máxima para evaluar el desempeño sísmico de las edificaciones consideradas en esta tesis.

## Antecedentes

En la actualidad, países como EEUU, Japón y Chile presentan metodologías de diseño de aisladores y amortiguadores en sus respectivas normas. En Estados Unidos, en 1986, la SEAOC (Structural Engineers Association of California) presentó una publicación llamada “Tentative Seismic Isolation Design Requirements”, enfocada principalmente al diseño de dispositivos sísmicos con métodos estáticos. Posteriormente, en 1995, el COMMITTEE VISION 2000, creado por SEAOC, estableció niveles de desempeño sísmico en edificaciones, que son de utilidad para el diseño de dispositivos. En ese mismo año, 1995, el FEMA (Federal Emergency Management Agency) incorpora en sus especificaciones los requerimientos para el diseño de estructuras con aislación sísmica y disipación de energía. Finalmente, se publica el FEMA274 en 1997, el cual adiciona nuevas formulaciones para el diseño de los disipadores sísmicos a la versión de 1995.

En el caso de Sudamérica, Chile es el país con mayor desarrollo en ingeniería sísmica. En 1996, su norma NCh433-1996 no incluía ninguna especificación sobre dispositivos de protección sísmica. Pero en el 2003, basándose en el FEMA274 (1997), se publicó la norma NCh2745, en donde se presenta un procedimiento de diseño para aisladores basales. Posteriormente, en el 2013, a raíz de eventos sísmicos ocurridos durante los últimos años, esta norma se actualiza con nuevas pautas y requerimientos. Actualmente existen en Chile numerosas edificaciones construidas con aisladores sísmicos, las cuales han tenido un buen comportamiento ante sismos severos. En cambio en Perú, la norma E-030 no contempla ningún tipo de metodología de diseño para edificaciones con dispositivos de protección sísmica.

Desde que se empezó a implementar el uso de los aisladores y amortiguadores en edificaciones, en distintas partes del mundo, se han realizado varios estudios sobre su desempeño. Uno de ellos fue el trabajo de Arriagada (2005), quien en su tesis de grado realizó un análisis sísmico de un edificio dual de siete pisos utilizando el software SAP2000. Evaluó el edificio con y sin aisladores en la base para comparar el desempeño sísmico entre ambas variantes. Para el diseño de estos dispositivos utilizó formulaciones propuestas por el FEMA274 (1997), y sus resultados mostraron una disminución de las derivas de entrepiso y una menor cortante basal con el uso de aisladores. Posteriormente, Marsico (2008) realizó un análisis matemático del conjunto edificio-sistema de aislación. Con esto se propuso un modelo numérico de dos grados de libertad, que es de gran utilidad para evaluar el comportamiento de una estructura con aisladores. Unos años después, Miyamoto y Gilani (2011) utilizaron el SAP2000 para evaluar el desempeño sísmico de una edificación con amortiguadores sísmicos. Asimismo, realizaron un análisis comparativo entre los costos originados por el uso de amortiguadores y los gastos de reparación que tiene una edificación sin protección sísmica, concluyendo que el segundo gasto es mucho mayor. Por último, Terán (2013) presentó un análisis del comportamiento de las estructuras con dispositivos sísmicos. Además, propuso nuevos sistemas para la disipación de energía y protección sísmica, como por ejemplo la utilización de neumáticos reciclados para la elaboración de aisladores basales.

Dentro de los trabajos de investigación realizados en Perú, se puede mencionar la tesis de pregrado de Korswagan, Arias y Huaranga (2012), quienes efectuaron un análisis tiempo-historia a ocho estructuras con aisladores, con alturas que varían de 8 a 50 metros.

Trabajaron con estructuras aporticadas, estructuras con placas y duales. Utilizaron la norma chilena NCh2745 del 2003 para el diseño de los dispositivos. Asimismo, emplearon el programa SAP2000 para modelar y analizar las estructuras. Sus resultados fueron presentados en función de la esbeltez, la cual se define como la relación entre la altura del edificio y su menor dimensión en planta. Al igual que Arriagada (2005), Korswagen, Arias y Huaranga (2012) obtuvieron menores derivas y cortantes basales en estructuras con aisladores, y concluyeron que los aisladores mejoran el desempeño sísmico de las estructuras. En las estructuras menos esbeltas, el nivel de desempeño mejoró notablemente frente a una estructura sin protección sísmica; mientras que en las estructuras más esbeltas, no se obtuvo una clara diferencia en el desempeño. En consecuencia, Korswagen, Arias y Huaranga (2012) recomendaron la utilización de aisladores en la base en estructuras con una esbeltez inferior a 1.5.

Por otro lado, Guevara y Torres (2012) analizaron en su tesis estructuras con amortiguadores de fluido viscoso basándose en los requerimientos de FEMA274 (1997) y en los niveles del desempeño propuestos por el COMMITTEE VISION 2000. Utilizaron la metodología simplificada para el diseño de amortiguadores, que consiste en fijar una deriva de entrepiso objetivo, y a partir de este valor empezar el diseño de los dispositivos. Con ayuda del SAP2000, analizaron una estructura aporticada de 7 pisos con 4 vanos en la dirección “x” y 6 vanos en la dirección “y”. Trabajaron con dos variantes, utilizando amortiguadores lineales y amortiguadores no lineales. Los resultados muestran que al usar un sistema de amortiguamiento lineal es necesario un coeficiente de amortiguamiento “C” cuatro veces mayor que el coeficiente “C” de un sistema no lineal. Explicaron que esto ocurre porque en un sistema no lineal las fuerzas actuantes son siempre menores a las de un sistema lineal, y dado que la fuerza en el amortiguador es directamente proporcional al coeficiente de amortiguamiento, éste también tendrá un menor valor en un sistema no lineal. Asimismo, la energía disipada por el sistema de amortiguamiento alcanza valores alrededor del 80% bajo todas las sollicitaciones sísmicas. Finalmente, concluyeron que para poder llegar a la deriva objetivo, tanto en las estructuras con amortiguadores lineales como en las estructuras con amortiguadores no lineales, se debe iterar con la cantidad, fuerza, características y posición de los dispositivos.

## **Objetivos**

El objetivo principal del presente trabajo de tesis es evaluar y comparar el desempeño de las edificaciones aporticadas de concreto armado con aisladores y amortiguadores ante sollicitaciones sísmicas. Se analizarán diferentes alturas de edificación entre 12 m a 60 m.

Además, se presentan los siguientes objetivos específicos:

- Presentar las características de los amortiguadores y de los aisladores que existen en el mercado.
- Presentar metodologías para dimensionar los dispositivos sísmicos usando las especificaciones del FEMA274 (1997).
- Presentar un ejemplo de análisis de una estructura de edificación con aisladores y con amortiguadores. Se incluirá en este ejemplo el diseño de los aisladores y amortiguadores.

- Mostrar cuadros comparativos del período, desplazamiento horizontal, deriva máxima y cortante basal máxima en las edificaciones analizadas.

## **Metodología**

En primer lugar, se buscará información sobre los elementos de protección sísmica. Se estudiarán los tipos de aisladores y amortiguadores que existen en la actualidad. Además, se estudiarán detalladamente las metodologías de diseño propuestas por el FEMA274 (1997) para los aisladores y amortiguadores, y los niveles de desempeño propuestos por el COMMITTEE VISION 2000 (1995). El trabajo de tesis se enfocará en el análisis y diseño de los aisladores elastoméricos y de los amortiguadores de fluido viscoso por ser los más comerciales. Para el análisis sísmico de las estructuras se realizará un análisis tiempo historia utilizando el software SAP2000.

Para cumplir con los requerimientos de la Norma E-030, en el análisis tiempo historia se utilizarán cinco registros de aceleraciones obtenidos del CISMID-UNI, que corresponden a sismos ocurridos en Pisco (2007), Ica (2013), Huánuco (2011), Piura (2014) y Tarapacá (2005). Dichos registros se normalizarán a una aceleración máxima de 0.45g que corresponde a la zona 4 de mayor sismicidad en el Perú.

Se trabajará con tres grupos de modelos de estructuras con alturas de edificación de 12m a 60m (de 4 pisos a 20 pisos con altura de entrepiso de 3m). Los tres grupos tendrán distintas distribuciones en planta. Los modelos del Grupo 1 tendrán una planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>, los del Grupo 2 tendrán también una planta cuadrada pero con un área de 324 m<sup>2</sup>; y los del Grupo 3 tendrán una planta rectangular de 540 m<sup>2</sup>.

Las edificaciones tendrán losas aligeradas de 20 cm de espesor, y su uso estará destinado a oficinas en todos sus pisos; además contarán con una azotea. Para todos los modelos las dimensiones de las vigas serán de 35x35 cm, y las dimensiones seccionales de las columnas disminuirán en los pisos superiores para evitar un sobredimensionamiento. Se realizará un pre-dimensionamiento de las columnas utilizando la carga vertical y una carga lateral equivalente al 30% de la carga muerta. Con este pre-dimensionamiento se podrá obtener la deriva máxima de entrepiso en cada edificación. Además, con la finalidad de tener características similares en todos los modelos a analizar, se realizarán iteraciones de las dimensiones de las columnas hasta que la deriva máxima de entrepiso de todas las edificaciones se encuentren en el rango de 0.01, que es superior al límite de 0.007 establecido por la norma E-30. Con las dimensiones de las columnas obtenidas de la iteración se trabajarán los modelos de cada grupo. La idea es evaluar el efecto de los amortiguadores y aisladores para reducir la deriva de 0.01 a valores aceptables acorde con la norma E-30.

Los modelos de cada grupo tendrán distintas variantes utilizando los dispositivos de protección sísmica.

Los modelos del Grupo 1 tendrán 6 variantes:

- a) Una variante empleará aisladores en la base (un aislador debajo de cada columna).
- b) Cuatro variantes utilizarán amortiguadores con distintas configuraciones en los pórticos exteriores.

c) La última variante no tendrá ningún dispositivo de protección sísmica.

Los modelos del Grupo 2 tendrán 3 variantes:

a) Una variante empleará aisladores en la base (un aislador debajo de cada columna).

b) Una variante utilizará amortiguadores en los pórticos exteriores.

c) La última variante no tendrá ningún dispositivo de protección sísmica.

Los modelos del Grupo 3 tendrán 3 variantes:

a) Una variante empleará aisladores en la base (un aislador debajo de cada columna).

b) Una variante utilizará amortiguadores en los pórticos exteriores. Estos amortiguadores estarán ubicados en la dirección más corta para evaluar la situación más crítica.

c) La última variante no tendrá ningún dispositivo de protección sísmica.

Con los resultados obtenidos de cada una de las variantes se analizarán los periodos, los desplazamientos, las derivas máximas de entrepiso y las cortantes basales. Esto con el propósito de evaluar el nivel de desempeño sísmico de las estructuras con aisladores y con amortiguadores. Los resultados de la variante sin dispositivos se emplearán como referencia para analizar el efecto que producen los aisladores y los amortiguadores en la edificación.



# Capítulo I

## Marco teórico

En este primer capítulo se presenta el desarrollo que han tenido los aisladores y amortiguadores sísmicos en los últimos años. Asimismo, se incluye una descripción de los dispositivos más utilizados junto con sus ventajas, desventajas y principales propiedades. Finalmente, se presentan una síntesis de los enfoques utilizados en el diseño de estructuras con dispositivos de protección sísmica, y las consideraciones tomadas por diversas normas sísmicas que recomiendan el uso de aisladores y amortiguadores.

### 1.1. Historia y desarrollo de los sistemas de protección sísmica

Hace más de medio siglo que se empezaron a estudiar los conceptos de aislación y disipación sísmica de energía, y en las últimas décadas se han desarrollado investigaciones sobre su aplicación en edificaciones con el propósito de protegerlas ante eventos sísmicos de gran magnitud.

Korswagen, Arias, Huaranga, (2012) mencionaron en su tesis que dentro de los primeros estudios realizados sobre los elementos de protección sísmica en edificaciones, aparece el trabajo realizado por el profesor de ingeniería John Milne de la Universidad de Tokio en 1885. En su experimento simuló la aislación basal en una edificación, logrando disminuir la rigidez horizontal de la base utilizando esferas de deslizamiento de 10 pulgadas de diámetro. Sin embargo, el edificio no se desempeñó correctamente ante cargas de viento, así que realizó varias iteraciones hasta definir un tamaño de esferas de  $\frac{1}{4}$  de pulgada, con el cual la estructura tuvo un buen desempeño.

Asimismo, Korswagen, Arias, Huaranga, (2012) mencionaron que en las cuatro últimas décadas se han buscado diversos mecanismos para desacoplar la estructura del suelo con el objetivo de reducir la rigidez en la base, y por tanto disminuir las fuerzas que ingresan a la estructura. En 1980 ya se habían planificado edificaciones con sistema de aislamiento basal en Japón, y durante los siguientes años aumentó considerablemente el número de edificios construidos con aislamiento en la base.

En Estados Unidos el primer edificio que se diseñó con aisladores fue el *Foothills Communities Law and Justice Center*, cuya construcción fue concluida en 1985 en Los Ángeles. Esta edificación cuenta con aisladores elaborados a base de caucho de alto amortiguamiento.

Avilés (2001) señala que la primera aplicación de amortiguadores de fluido viscoso en estructuras se dio en 1993 en cinco edificios del centro médico San Bernardino County, en

los Ángeles. Uno de los primeros edificios con amortiguadores visco elásticos fue las torres gemelas en *New York* (1969), en el *World Trade Center*.

Tanto en Estados Unidos como en Japón, los primeros artículos y estudios sobre aisladores y amortiguadores fueron realizados por entidades privadas de gran reconocimiento. Y al comprobar que las estructuras con sistemas de protección sísmica tuvieron un alto nivel de desempeño ante sismos, se incluyeron las metodologías de diseño en sus respectivas normas sísmicas. La primera publicación trascendente en cuanto a metodología de diseño con dispositivos de protección sísmica fue realizada en 1986 por la Asociación de Ingenieros Estructurales del Norte de California (SEAOC) llamada “*Tentative Seismic Isolation Design Requirements*”. Posteriormente, esta publicación tuvo algunas modificaciones antes de incluirse como apéndice en el *Uniform Building Code* (UBC) de 1991. Luego, en 1997 el *Federal Emergency Management Agency* (FEMA274) presentó unas recomendaciones y formulaciones para la utilización de aisladores en la base y disipadores sísmicos en las estructuras.

En el documento elaborado por la Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción (2012), se menciona que en el año 1995, ocurrido el terremoto de Kobe en Japón, aumentó la tasa de construcción de edificaciones con aisladores. Esto se dio gracias al buen comportamiento que tuvieron las estructuras construidas con estos dispositivos frente al sismo mencionado. En 1998 ya se tenían más de 500 edificios construidos con aisladores, y con el avance de la tecnología actualmente es muy común construir edificios con aisladores en Japón como una alternativa constructiva para protegerse sísmicamente.

En el caso de Sudamérica, Chile ha sido uno de los pocos países en incorporar aisladores y disipadores sísmicos a sus estructuras. Además, su norma NCh2745 incluye pautas y formulaciones para el diseño de estos dispositivos. Actualmente en Chile se han construido un número considerable de edificios con aisladores, entre los que resaltan son: el centro Médico San Carlos de Apoquindo de la Universidad Católica de Chile construido en el año 2000, y el Hospital Militar inaugurado en el año 2008.

En el Perú, a pesar que en la norma E-030 no se brinden recomendaciones de diseño para los aisladores o los amortiguadores, existen algunos edificios diseñados con sistemas de protección sísmica. Entre ellos se tienen el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez reforzado con dispositivos de amortiguamiento sísmico (2012); el Centro de Información e Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI diseñado con aisladores en la base (2013); y por último el edificio del banco de la nación en Lima (2015), que presenta amortiguadores en los últimos pisos de la estructura. En la Figura 1.1 se presenta la colocación de los aisladores en el Centro de Información e Investigación de la UNI.



Figura 1.1. Instalación de aisladores en la construcción del Centro de Investigación FIC-UNI.  
Fuente: Colegio de Ingenieros del Perú, 2014.

## 1.2. Tipos de sistemas de protección sísmica

El objetivo principal de los sistemas de protección sísmica es disminuir la energía que ingresa a los elementos estructurales cuando ocurre un sismo. Existen dos sistemas que mejoran el desempeño de la estructura: el sistema de aislación en la base de la estructura y el sistema de amortiguadores, los cuales serán tratados con más detalles en los siguientes acápite.

### 1.2.1. Sistema de aislación basal

La aislación sísmica tiene por finalidad desacoplar horizontalmente la estructura del suelo. Esto se logra con dispositivos muy flexibles en la dirección horizontal y altamente rígidos en la vertical, permitiendo así desplazamientos horizontales en la base ante las sollicitaciones sísmicas.

El sistema de aislación basal está conformado por aisladores y por elementos estructurales utilizados como conexiones entre los aisladores y la superestructura. Los aisladores sísmicos permiten reducir la rigidez del sistema estructural, aumentando el período de vibración hasta tres veces el período de la estructura sin aisladores.

Entre los principales tipos de aisladores usados en la actualidad tenemos: los aisladores elastoméricos de caucho de bajo amortiguamiento (LRD), los aisladores elastoméricos de caucho con núcleo de plomo (LRB), los aisladores elastoméricos de caucho de alto amortiguamiento (HDR), el sistema de péndulo de fricción invertido y el sistema de péndulo de doble curvatura. A continuación, se describirán las características y propiedades de los aisladores elastoméricos puesto que estos serán analizados en este trabajo de tesis.

#### 1.2.1.1. Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LRD)

Estos tipos de aisladores son fabricados intercalando láminas de acero y caucho, y estas láminas son sometidas a presión a una temperatura de 140°C durante seis horas. Como se presenta en la Figura 1.2, se colocan adicionalmente unas placas gruesas de acero en la parte superior e inferior del aislador con la finalidad de confinar el caucho y darle una resistencia a compresión muy elevada.

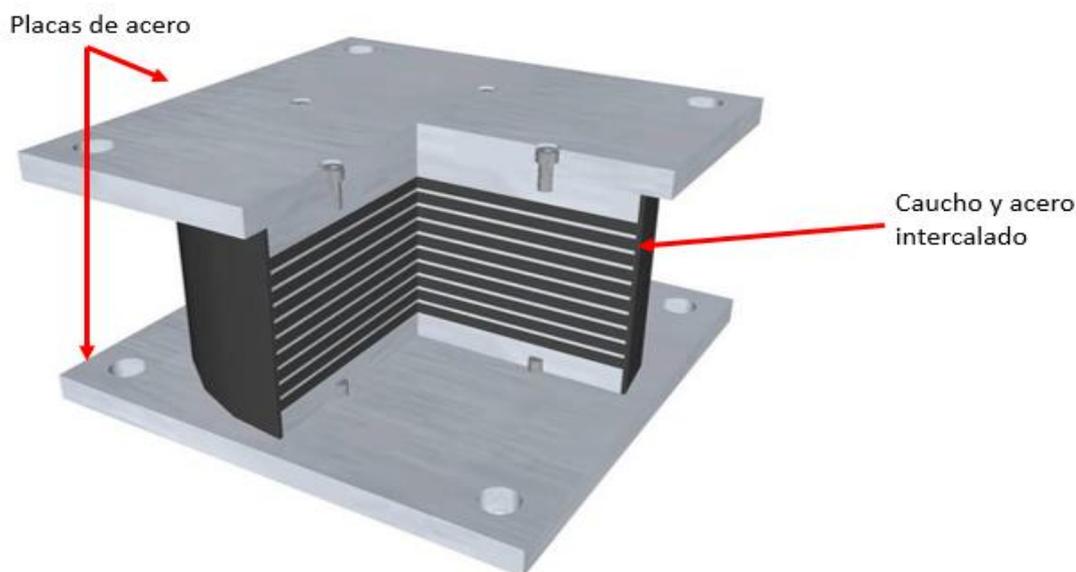


Figura 1.2. Aislador elastoméricos de bajo amortiguamiento. Fuente: CDV-Perú, 2012.

La rigidez vertical del aislador es tan elevada que se asemeja a la rigidez vertical de una columna de concreto armado. Asimismo, se logra una rigidez horizontal tan baja que permite un desplazamiento lateral relativo entre la estructura y el suelo.

Al ser muy baja la rigidez horizontal del aislador, se requerirá un amortiguamiento para evitar desplazamientos laterales excesivamente altos. Sin embargo, en este tipo de aisladores el amortiguamiento está entre el 5% y el 10% del amortiguamiento crítico, por lo que será necesario incrementarlo a valores de 15 a 20 % del crítico (Korswagen, Arias, Huaranga, 2012). Esto se puede lograr con la utilización de amortiguadores en la superestructura. El amortiguamiento crítico ( $C_c$ ) se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$C_c = 2 * m * \omega_n \quad (\text{Ec. 1.1})$$

siendo  $m$  la masa de toda la edificación y  $\omega_n$  la frecuencia natural del sistema.

Una de las principales ventajas de estos dispositivos es su fácil modelación y fabricación. La relación entre la fuerza cortante y la deformación lateral se considera como lineal. Dicha linealidad se puede corroborar con la Figura 1.3, en donde se muestra un ciclo de carga y descarga de fuerzas laterales para un aislador con un amortiguamiento efectivo ( $\xi$ ) de 7.8% del crítico, una altura total del aislador ( $H_t$ ) de 16.2 cm y un módulo de corte ( $G$ ) de 8.66 kg/cm<sup>2</sup>.

Las flechas de color rojo en la curva representan la secuencia del ciclo de carga y descarga. Desde el punto O se inicia la carga lateral hacia la derecha, y al llegar al punto A, que refleja un desplazamiento lateral de aproximadamente 16 cm, se inicia la descarga de la fuerza. Al llegar al punto B se inicia la carga hacia la izquierda hasta llegar al punto C, con un desplazamiento de 16 cm. Y finalmente se inicia la descarga hasta llegar al punto de partida O. Debido a la simetría y poco ancho que tiene la curva, es posible simplificarla a un comportamiento lineal.

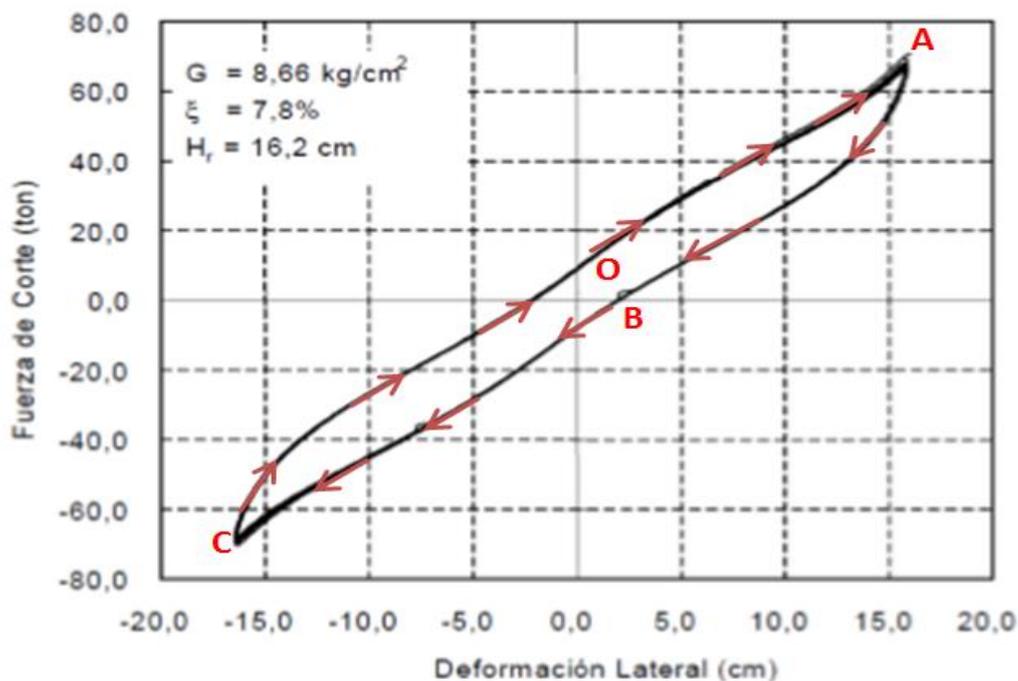


Figura 1.3. Fuerza de corte vs deformación lateral para un ciclo (LRD). Fuente: Korswagen, Arias, Huaranga, 2012.

### 1.2.1.2. Aisladores de bajo amortiguamiento con núcleo de plomo (LRB)

Los aisladores con núcleo de plomo se presentan como una mejora de los LRD, puesto que el plomo incrementa el amortiguamiento y evita los desplazamientos horizontales excesivos. El núcleo de plomo se coloca para producir numerosos ciclos histeréticos estables.

En el proceso de fabricación de estos aisladores, las láminas de caucho se intercalan con las láminas de acero dentro de un molde de acero que tiene la forma final del aislador, y luego se aplica presión a las láminas a una temperatura muy alta, alrededor de los 140 °C, por un tiempo que varía entre 4 a 8 horas. Esto permite al aislador ser muy flexible horizontalmente debido al caucho, y muy rígido verticalmente por la presencia de las láminas de acero que impiden la deformación vertical del caucho (Aguiar, 2008).

Una de las ventajas del LRB es que el amortiguamiento aumenta considerablemente, llegando a estar entre 15 y 35 % del amortiguamiento crítico. En la Figura 1.4 se presentan las partes del aislador LRB, que son muy similares a las del LRD.



Figura 1.4. Aislador elastoméricos con núcleo de plomo. Fuente: *Dynamic Isolation Systems*, 2007.

Como se observa en la Figura 1.4, los aisladores LRB poseen unas barras de anclaje, que se utilizan para conectarse con las columnas y la base de fundación. Cabe recalcar que las columnas que se encuentran sobre los aisladores, deberán estar interconectadas con vigas y losas, de tal manera que se garantice un diafragma rígido en la subestructura puesto que se necesita mantener un desplazamiento uniforme en todos los aisladores. Ese conjunto de vigas, losas y aisladores conforma el sistema de aislación basal que se puede apreciar en la Figura 1.5.

En el Anexo A se brindan más detalles sobre el proceso constructivo para los aisladores.

Dado que este tipo de aisladores será utilizado en este trabajo de tesis, por ser el más comercial se presentará a continuación una descripción de sus propiedades mecánicas.



Figura 1.5. Sistema de aislación basal. Fuente: *Seismic Protection Technologies*, 2014.

### a. Capacidad de carga de gravedad del LRB

La capacidad de carga de un aislador  $Q_d$  (t), sin deformación lateral, se puede calcular con la siguiente expresión:

$$Q_d = A_p * \tau_p \quad (\text{Ec. 1.2})$$

siendo:

$A_p$  = Área de plomo ( $\text{m}^2$ )

$\tau_p$  = Esfuerzo de fluencia del plomo ( $\text{t}/\text{m}^2$ )

### b. Rigidez lateral del LRB

La presencia del núcleo de plomo generará un lazo histerético cuando se generen ciclos de carga horizontal. Por lo tanto habrá distintas rigideces laterales. En la Figura 1.6 se presenta el modelo idealizado del ciclo histerético con la representación de las rigideces.

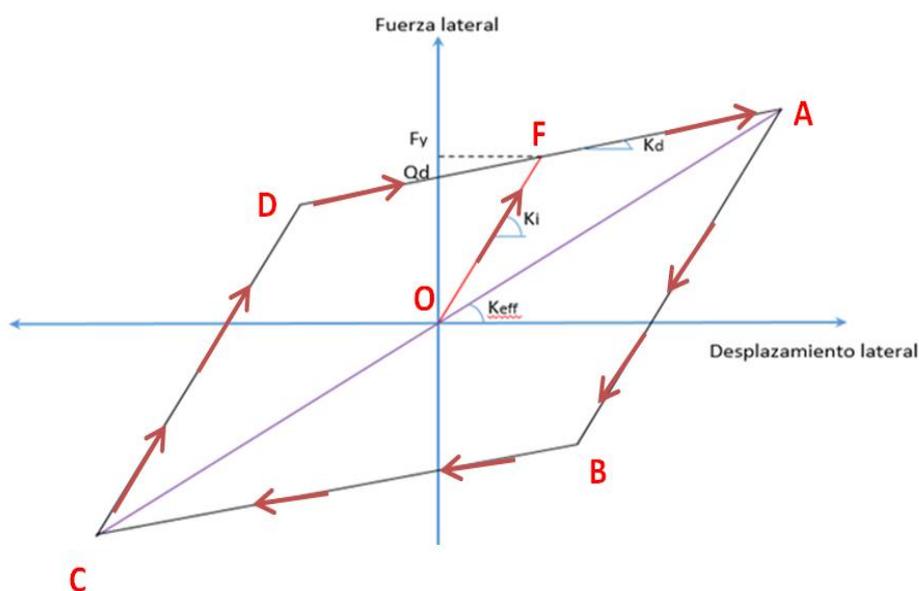


Figura 1.6. Ciclo histerético de un LRB. Fuente: *Dynamic Isolation Systems*, 2007

En esta figura, el ciclo sigue el recorrido de las flechas rojas. Desde el punto O empieza el ciclo de carga con una rigidez  $K_i$  hasta llegar a la fluencia que es representada por el punto F. Luego se sigue cargando hasta llegar al punto A, pero ahora se trabajará con una rigidez post-fluencia  $K_d$ . A partir del punto A se empieza la descarga pasando por el punto B y terminando en el punto C. Finalmente, se empieza otra vez la carga hasta pasar nuevamente por los puntos D y A. La pendiente de la recta que une los puntos A y C representa a la rigidez efectiva  $K_{eff}$  (t/m). Como se puede apreciar en la figura, se tendrá la rigidez inicial o elástica  $K_i$  (t/m), la rigidez post-fluencia o secundaria  $K_d$  (t/m) y la rigidez efectiva  $K_{eff}$  (t/m) que simplifica el comportamiento del aislador.

La rigidez efectiva  $K_{eff}$  se utiliza para el cálculo del amortiguamiento efectivo del aislador. Asimismo, para obtener la rigidez inicial  $K_i$  y la rigidez post-fluencia  $K_d$  de un aislador se utilizan las Ecuaciones 1.3 y 1.4 respectivamente.

$$K_i = \frac{(G_p * A_p + G_r * A_r)}{H_i} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

$$K_d = \frac{G_r * A_r}{H_i} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

donde:

$G_r$  = módulo de corte del caucho (0.5 a 1.0 MPa)

$G_p$  = módulo de corte del plomo (150 MPa a temperatura ambiente)

$A_r$  = área del caucho (m<sup>2</sup>)

$A_p$  = área del núcleo de plomo (m<sup>2</sup>)

$H_i$  = altura neta de caucho (m)

Sin embargo, muchos diseñadores recomiendan calcular la rigidez  $K_i$  como 10 veces  $K_d$ .

Según la Ecuación 1.4 la rigidez  $K_d$  es la rigidez brindada solamente por el caucho. Dicha suposición es conservadora, puesto que algunos diseñadores e incluso algunas normas consideran que la rigidez aumenta por la presencia del núcleo de plomo y proponen una rigidez de 1.15 a la calculada por la Ecuación 1.4 (Korswagen, Arias, Huaranga, 2012).

Con respecto a la fuerza de fluencia  $F_y$ , ésta se calcula de la siguiente manera:

$$F_y = Q_d + K_d * D_y \quad (\text{Ec. 1.5})$$

siendo:

$D_y$  = Desplazamiento de fluencia que equivale a  $Q_d/K_i$

Sin embargo, es usual considerar a  $F_y$  como  $1.1 * Q_d$ .

### 1.2.1.3. Aisladores de caucho alto amortiguamiento (HDR)

Los aisladores elastoméricos de caucho, de alto amortiguamiento, están elaborados de caucho modificado con aditivos, tales como aceites, carbón en polvo, resinas o polímeros. De la misma manera que los LRB, el caucho se intercala con láminas de acero, y en la parte superior e inferior se les coloca una placa de acero para confinar el núcleo. Para este tipo de aisladores, el amortiguamiento oscila entre el 10 y 20% del amortiguamiento crítico. Es importante tener extremo control de calidad en la elaboración de dichos elementos debido a que las propiedades pueden variar dependiendo del contenido de aditivos. Una desventaja que presentan estos aisladores es el rápido deterioro que tienen con el uso.

En la Figura 1.7 se muestra un ciclo de carga y descarga de fuerzas laterales para un aislador con un amortiguamiento efectivo ( $\xi$ ) de 16.8%, una altura total del aislador ( $H_t$ ) de 16.2 cm y un módulo de corte ( $G$ ) de  $4.54 \text{ kg/cm}^2$ . Las flechas de color rojo en la curva representan el orden del ciclo de carga y descarga. Desde el punto O se inicia la carga lateral. Al llegar al punto A, que refleja un desplazamiento lateral aproximadamente de 16 cm, se inicia la descarga de la fuerza. Al llegar al punto B, correspondiente a una deformación nula, se inicia la carga en el mismo sentido de la descarga hasta llegar al punto C con un desplazamiento de 16 cm. Finalmente se inicia la descarga hasta llegar al punto de partida O.

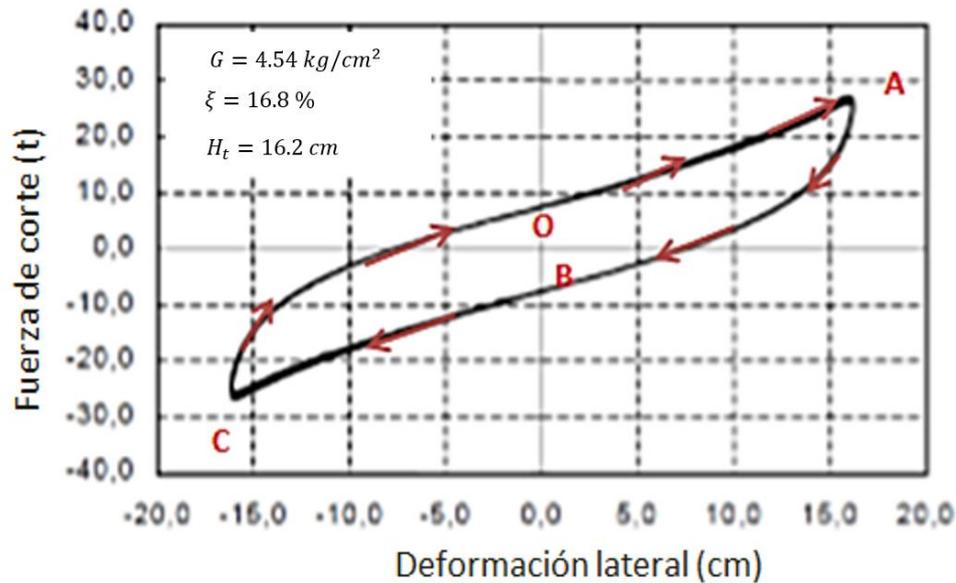


Figura 1.7. Fuerza de corte vs deformación lateral para un ciclo (HDR). Fuente: Korswagen, Arias, Huaríngá, 2012.

Tal como se aprecia en esta figura, la forma de la curva fuerza vs deformación lateral continúa siendo muy similar al caso de aisladores de bajo amortiguamiento (Figura 1.3).

## 1.2.2. Sistema de amortiguadores

La función de los amortiguadores es concentrar la energía de ingreso del sismo, reduciendo la energía que absorberían los elementos estructurales. Cuando un edificio no posee dispositivos de amortiguamiento, la energía total que ingresa al sistema es absorbida casi en su totalidad por los elementos estructurales y liberada mediante la deformación elástica e inelástica.

Los amortiguadores tienen distintas formas de disipar la energía proveniente de un sismo, algunos la disipan en función del desplazamiento del entrepiso, y otros en función de la velocidad del movimiento del entrepiso. (Burgos M., 2012).

Existen en el mercado diversos tipos de amortiguadores: amortiguadores de fricción, amortiguadores de fluencia metálica, amortiguadores visco elásticos, amortiguadores de fluido viscoso, los cuales serán tratados en los siguientes acápite.

### 1.2.2.1. Amortiguadores de fricción

Estos amortiguadores están compuestos por dos placas rugosas que están en contacto y ancladas a los entrepisos mediante cuatro brazos de anclaje. Dos brazos de anclaje unen

una placa con el entrepiso superior y los otros dos brazos unen la otra placa con el entrepiso inferior, esto se aprecia en la Figura 1.8. Cuando ocurre el movimiento relativo de entrepiso, la placa anclada con el piso superior generará una fricción con la placa anclada con el entrepiso inferior produciendo así una disipación de energía.

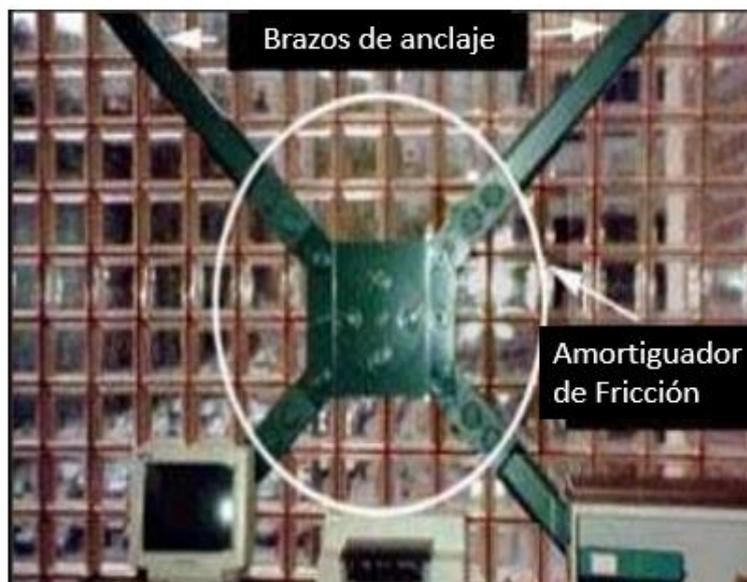


Figura 1.8. Disipador de fricción. Fuente: Burgos M., 2012.

Estos disipadores ejercen una fuerza que modifica la rigidez de la estructura y por consiguiente también modifica el periodo de la misma. Esta fuerza  $F$  está expresada por la siguiente ecuación:

$$F = \delta\mu \quad (\text{Ec. 1.6})$$

Siendo  $\delta$  el desplazamiento relativo entre superficies de contacto de las dos placas y  $\mu$  el coeficiente de fricción entre ambas superficies.

El problema de estos amortiguadores es que no se conoce con exactitud el valor del coeficiente de fricción. Este valor no se mantiene constante durante el movimiento porque además del desplazamiento, depende también de la velocidad del movimiento, la presión normal y las condiciones de contacto. Además, mientras mayor es la duración del movimiento sísmico, mayor será el desgaste de las superficies de contacto, produciendo una disminución de la fricción entre ellas. Asimismo, la vida útil de estos disipadores es limitada puesto que mientras más se usen, más se desgastarán las superficies y más lisas serán.

#### 1.2.2.2. Amortiguadores de fluencia metálica

Estos dispositivos tienen en su interior un componente de acero que disipa la energía mediante esfuerzos de flexión o cortante. Para estos dispositivos, el amortiguamiento ( $\xi$ ) está definido por la siguiente ecuación:

$$\xi = \frac{E_H}{2\pi * K * U_{m\acute{a}x}^2} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

siendo:

$E_H$  = energía histerética o el área encerrada del diagrama de fuerza vs desplazamiento lateral, acorde con la Figura 1.9, cuando se alcanza un desplazamiento lateral máximo permitido

$K$  = rigidez para el máximo desplazamiento

$U_{\text{máx}}$  = Máximo desplazamiento lateral, acorde a la Figura 1.9

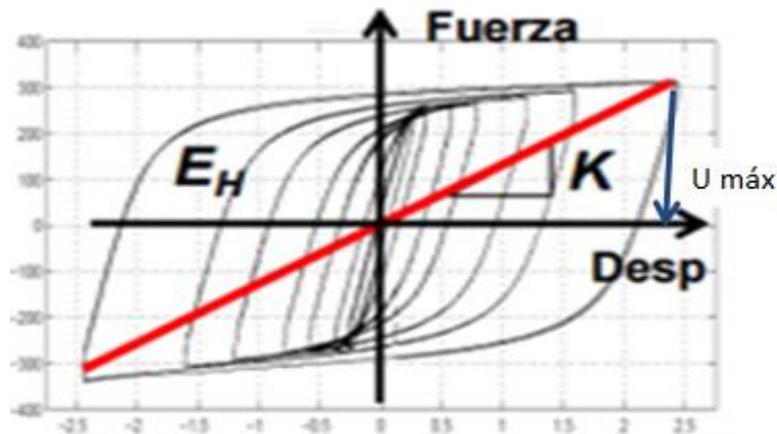


Figura 1.9. Ciclo histerético de amortiguadores de fluencia metálica. Fuente: Terán, 2013



Figura 1.10. Disipador de Fluencia Metálica. Fuente: Burgos M., 2012.

El problema central con la utilización de estos disipadores es que no se podrá ensayar antes de su utilización porque podría entrar al rango inelástico. Asimismo, requerirá un inmediato reemplazo tras un sismo. En la Figura 1.10 se muestra una imagen del dispositivo.

### 1.2.2.3. Amortiguadores visco-elásticos

Este amortiguador utiliza polímeros altamente disipativos que tienen un componente visco elástico. El amortiguador visco elástico está compuesto por dos o más capas de material con una configuración tipo sándwich como se muestra en la Figura 1.11. Generalmente, son introducidos en los arriostramientos diagonales simples (Avilés, 2001).

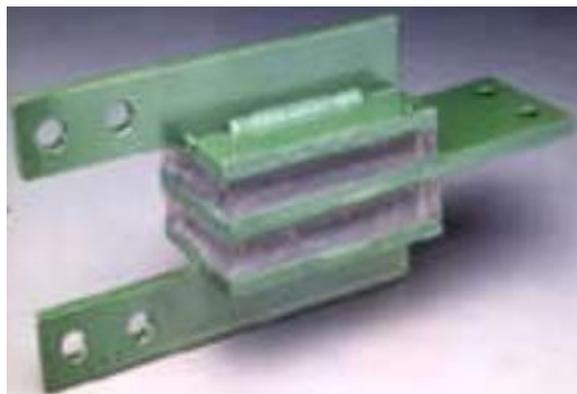


Figura 1.11. Disipador Visco-Elástico. Fuente: Fuente: Burgos M., 2012.

En la Figura 1.12 se muestra una instalación típica del amortiguador y su anclaje con la estructura.

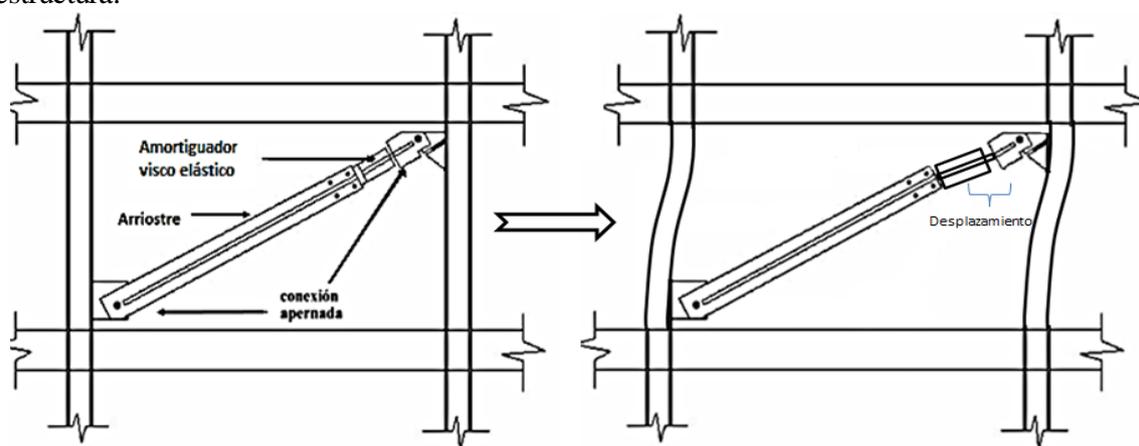


Figura 1.12. Ubicación amortiguadores visco elástico. Fuente: Avilés, 2001.

Estos dispositivos aprovechan el desplazamiento relativo entre el arriostre y la parte superior de la columna para disipar la energía de vibración, y de esta forma reducir el movimiento de respuesta de la estructura. Entre sus inconvenientes se tiene que los materiales visco-elásticos son muy sensibles a la variación de temperatura. Además, se necesitará un número considerable de amortiguadores para conseguir un amortiguamiento significativo.

#### 1.2.2.4. Amortiguadores de fluido viscoso

Este amortiguador está compuesto por un cilindro y un pistón de acero inoxidable. El cilindro tiene en su interior silicona incompresible como fluido viscoso, que puede mantenerse estable ante cambios considerables de temperatura.

Estos dispositivos disipan energía utilizando la fricción entre el fluido y los orificios del pistón. En la Figura 1.13 se muestra que el amortiguador se divide en tres secciones. Con el movimiento de la edificación se produce un empuje en el pistón hacia el interior del cilindro, comprimiendo el fluido de la sección 2. Por los orificios del cabezal del pistón pasa el flujo de la sección 2 a la sección 1, generando una fuerza de amortiguamiento que busca igualar la presión en ambas secciones. Al ser la presión en la sección 2 mayor que en la sección 3, el líquido ingresa a la sección 3 por una válvula de control, evitando que el pistón tenga un efecto rebote (Morales y Contreras, 2012).

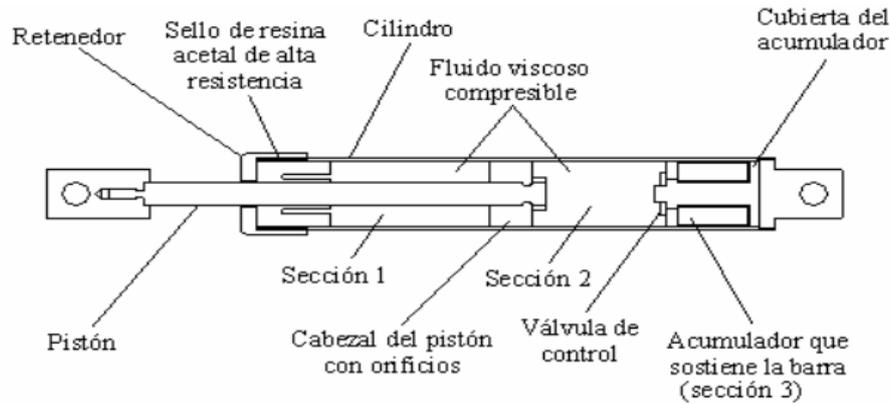


Figura 1.13. Partes de un disipador viscoso. Fuente: Morales y Contreras, 2012.

Estos dispositivos no aportan rigidez ni resistencia al sistema estructural. Además no generan fuerzas directamente al sistema porque tiene un comportamiento fuera de fase con la estructura. Esta característica del amortiguador puede explicarse recurriendo al comportamiento de un fluido viscoso, cuya fuerza resistente aumenta al incrementar la velocidad con la que es comprimido el fluido. Por lo tanto, cuando la estructura y los amortiguadores presentan una deformación máxima, la velocidad del pistón y la fuerza de amortiguamiento serán nulas; y viceversa, para una deformación igual a cero, la velocidad del pistón y la fuerza del amortiguamiento serán máximas.

Puesto que en el presente trabajo de tesis se utilizará este tipo de amortiguador, se presentarán a continuación sus propiedades principales: coeficiente de amortiguamiento, exponente de velocidad, fuerza de amortiguamiento y rigidez axial del brazo metálico.

#### a. Coeficiente de amortiguamiento “C”

Es la principal propiedad de un amortiguador y depende de las propiedades del fluido dentro del dispositivo. El coeficiente de amortiguamiento debe ser definido por el proyectista acorde con un amortiguamiento objetivo.

El coeficiente de amortiguamiento  $C$  se puede considerar constante en cada uno de los dispositivos; sin embargo, se conoce experimentalmente que su valor puede ser mayor en los niveles inferiores de la estructura porque depende del peso, y porque en los primeros pisos se tiene una mayor masa participativa.

El valor del coeficiente dependerá del tipo de disipador utilizado, si éste tiene un comportamiento lineal o un comportamiento no lineal.

Para amortiguadores que tengan un comportamiento lineal, el valor del coeficiente de amortiguamiento se puede obtener a partir de la ecuación del  $\beta_{visc}$  propuesta por el FEMA274 (1997).

$$\beta_{visc} = \frac{T * (\sum_i C * \phi_{ri}^2 * \cos^2 \theta_i)}{4\pi * \sum_i m_i * \phi_i^2} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

siendo:

$\beta_{visc}$  = Amortiguamiento viscoso objetivo.

$T$  = Período de la estructura. (s)

- $C$  = Coeficiente de amortiguamiento para cada dispositivo en cada piso. (t-s/m)
- $\phi_i$  = Desplazamiento lateral máximo de cada piso, normalizado.
- $\phi_{ri}$  = Desplazamiento lateral máximo relativo de cada piso, normalizado.
- $\theta_i$  = Ángulo de inclinación del disipador con respecto a la horizontal (rad).
- $m_i$  = Masa de entrepiso ( $t \cdot s^2/m$ ).

Tanto  $\phi_i$  como  $\phi_{ri}$  se obtienen de un análisis realizado a la estructura sin amortiguadores. Además, como se muestra en la Figura 1.14, estos valores son normalizados dividiendo el desplazamiento de cada entrepiso entre el desplazamiento del último piso. En la Figura 1.14 se presenta un ejemplo de esta normalización para una edificación de 3 pisos.  $U_1$ ,  $U_2$  y  $U_3$  son los desplazamientos laterales para cada piso.

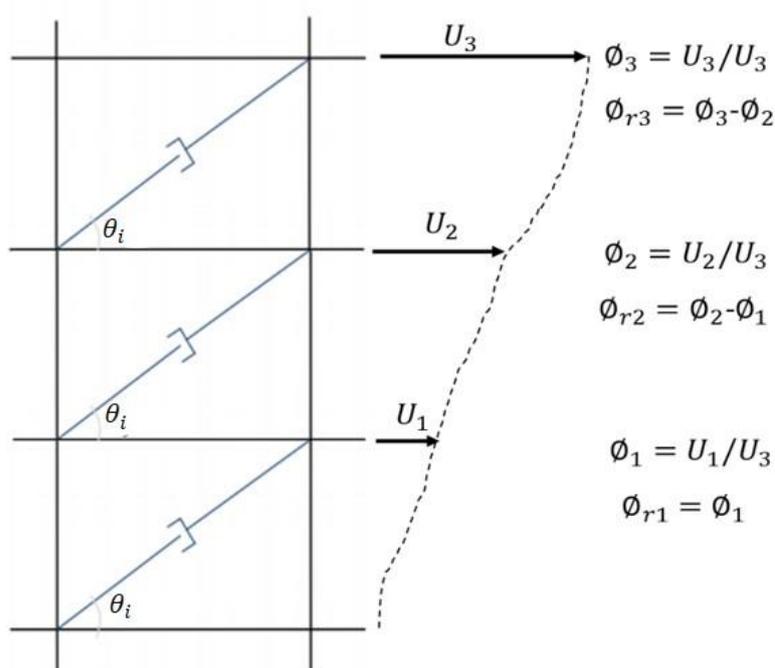


Figura 1.14. Desplazamientos normalizados para edificación con amortiguadores de fluido viscoso. Fuente: Avilés, 2001.

Por otro lado, para amortiguadores que tengan un comportamiento no lineal, el coeficiente  $C$  se obtiene a partir de la ecuación del  $\beta_{visc}$ , también propuesta por el FEMA274 (1997).

$$\beta_{visc} = \frac{\sum_i (\lambda) * (C) * (\phi_{ri}^{(1+\alpha)}) * (\cos \theta_i)^{(1+\alpha)}}{(2\pi) * (A^{1-\alpha}) * (\omega^{2-\alpha}) * (\sum_i \phi_i^2)} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

siendo:

- $\alpha$  = Exponente de velocidad.
- $A$  = Amplitud del desplazamiento del modo fundamental de la estructura. (m)
- $\omega$  = Frecuencia angular fundamental de la estructura ( $\omega = 2 * \pi / T_{\text{fundamental}}$ ).
- $\lambda$  = Parámetro que se obtiene de la Tabla 1.1, proporcionada por el FEMA 274.

Tabla 1.1: Valores del parámetro  $\lambda$ .  
Fuente: FEMA 274 (1997)

Exponente de Velocidad $\alpha$	Parámetro $\lambda$
0.25	3.70
0.50	3.50
0.75	3.30
1.00	3.10

### b. Exponente de Velocidad “ $\alpha$ ”

El exponente de velocidad define el comportamiento de los disipadores en el rango inelástico; en otras palabras, define la forma de su lazo histerético. Para dispositivos no lineales se utiliza un valor de  $\alpha < 1$ , mientras que en un dispositivo lineal se toma como  $\alpha$  igual a 1.

Según Miyamoto y Gilani (2011), para amortiguadores no lineales se recomienda utilizar valores de  $\alpha$  entre 0.4 y 0.6 en edificios con pocas irregularidades en planta. Asimismo, proponen que la relación fuerza-desplazamiento para un sistema de amortiguación fluido viscoso tenga una forma elíptica. En la Figura 1.15 se presenta la relación fuerza-desplazamiento para un dispositivo no lineal con  $\alpha=0.5$  (línea punteada) y para un dispositivo lineal donde  $\alpha=1.0$  (línea sólida). Como se puede apreciar en esta figura, la relación fuerza-desplazamiento de un amortiguador lineal ( $\alpha=1.0$ ) y de un amortiguador no lineal ( $\alpha=0.5$ ), es muy similar dado que ambas curvas no presentan diferencias significativas en su forma.

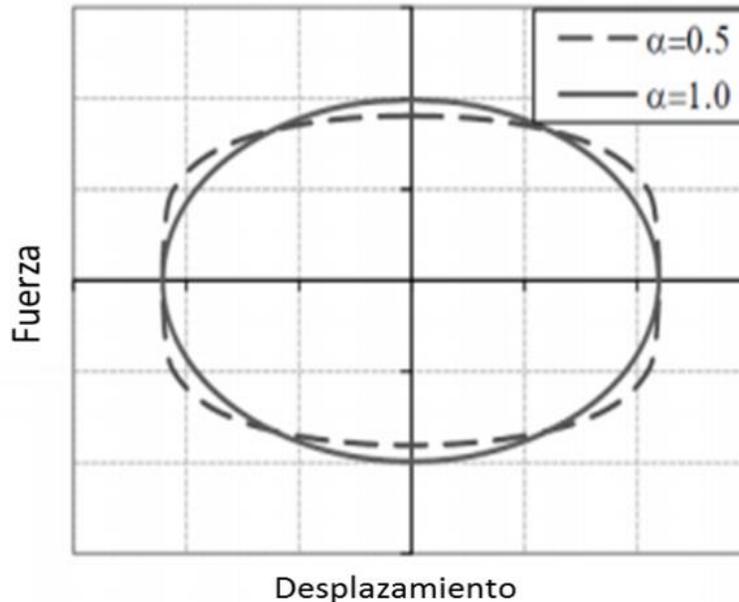


Figura 1.15. Variación Fuerza Desplazamiento. Fuente: Kit Miyamoto y Hideki, 2010

Para dispositivos no lineales, las fuerzas de amortiguamiento se reducen conforme disminuye la constante  $\alpha$ . A menor valor de  $\alpha$  la elipse va tomando una forma rectangular. Es importante controlar la fuerza que produce el amortiguador, puesto que una fuerza elevada puede traer el efecto de aumentar las axiales de las columnas adyacentes al dispositivo. Es por dicha razón que a pesar de que es más sencillo dimensionar y modelar

amortiguadores lineales, en algunos casos se prefiere la utilización de amortiguadores no lineales porque producen fuerzas de menor magnitud (Morales y Contreras, 2012).

### c. Fuerza de amortiguamiento “F”

Durante la vibración de la estructura, la diferencia de presiones entre cada lado de la cabeza del pistón produce una fuerza de amortiguamiento  $F$ , la cual se calcula con la siguiente formulación:

$$F = C * V^\alpha \quad (\text{Ec. 1.10})$$

donde:

- $F$  = Fuerza de amortiguamiento (t)
- $C$  = Coeficiente de amortiguamiento (t-s/m)
- $V$  = Velocidad de desplazamiento del pistón (o del entrepiso) (m/s)
- $\alpha$  = Exponente de velocidad

En la Figura 1.16 se ilustra la diferencia que existe cuando se trabaja con distintos exponentes de velocidad  $\alpha$ .

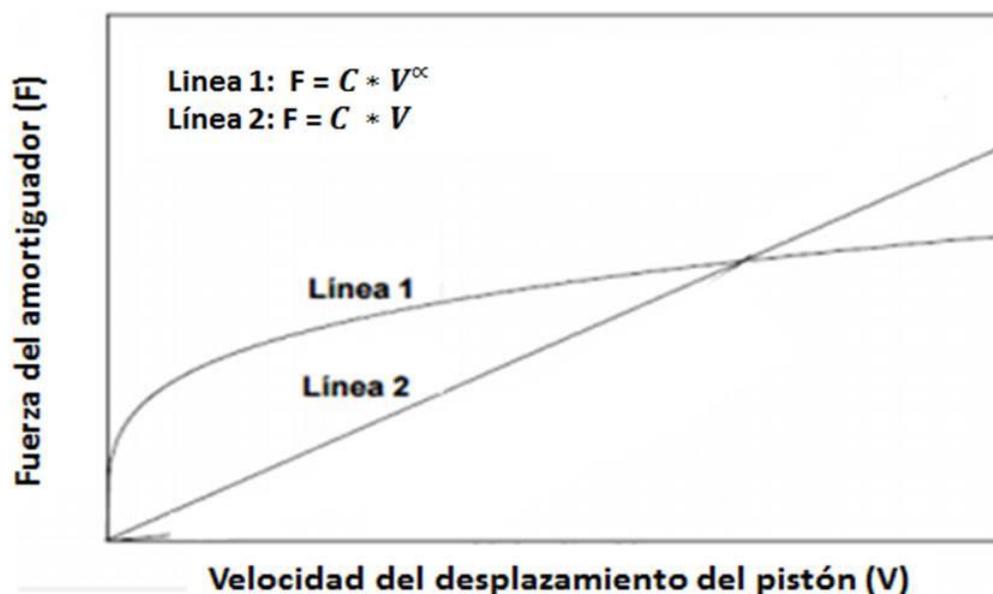


Figura 1.16. Relaciones fuerza - velocidad de disipadores viscosos. Fuente: Guevara y Torres, 2012.

Como se aprecia en la figura, sin importar si el dispositivo es lineal o no lineal, la fuerza en el disipador aumentará mientras aumente la velocidad del desplazamiento del pistón; y la fuerza será cero para una velocidad igual a cero.

### d. Rigidez axial del brazo metálico “K”

Para conectar el amortiguador con la estructura se utiliza un brazo metálico. La rigidez axial de este brazo es mucho mayor que la rigidez axial del dispositivo de amortiguamiento, por lo tanto los brazos pueden ser asumidos como elementos infinitamente rígidos. En la Figura 1.17 se presenta una idealización del brazo metálico y del amortiguador.

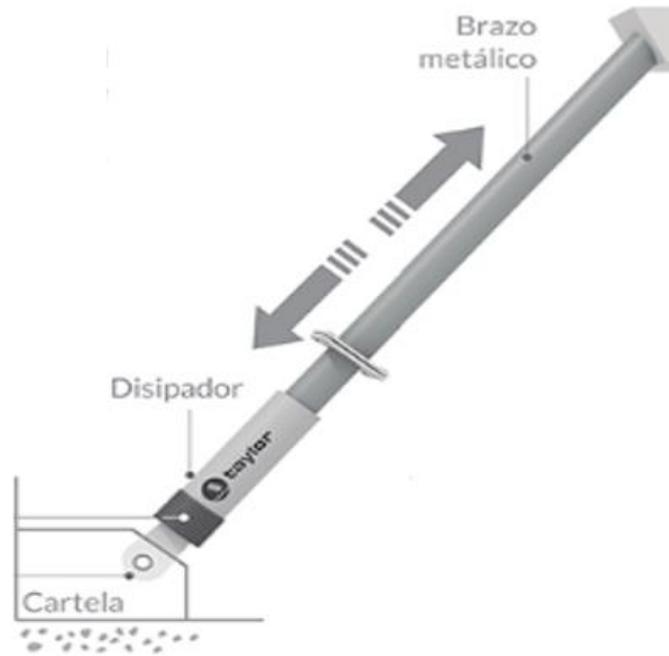


Figura 1.17. Disipador sísmico con brazo metálico. Fuente: CDV-Perú, 2012

Como la fuerza de amortiguamiento pasará al brazo metálico por equilibrio de fuerzas, el brazo metálico deberá tener una rigidez suficiente para evitar deformaciones axiales. Es muy común utilizar perfiles HSS (tubular cuadrado) o tipo PIPE (tubular circular) por razones de estética y por su facilidad de instalación. Con la siguiente ecuación se calcula la rigidez axial del brazo metálico  $K$ .

$$K = \frac{E \cdot A}{L} \quad (\text{Ec. 1.11})$$

donde:

$E$  = Módulo de elasticidad del acero ( $t/m^2$ )

$A$  = Área de la sección del brazo metálico ( $m^2$ )

$L$  = Longitud del brazo metálico (m)

Además del cálculo de la rigidez del brazo metálico, al igual que cualquier elemento estructural, se deberá verificar que no se superen los valores máximos de resistencia a tracción y a compresión. Para esto se utilizan las Ecuaciones 1.12 y 1.13 respectivamente.

$$\phi T_n = \phi F_y \cdot A_g > T_u \quad (\text{Ec. 1.12})$$

$$\phi P_n = \phi F_{cr} \cdot A_g > P_u \quad (\text{Ec. 1.13})$$

$\phi$  = Factor de reducción (0.9).

$T_n$  = Tensión nominal.

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia del material del brazo metálico.

$A_g$  = Área bruta de la sección del brazo metálico.

$T_u$  = Tensión última del disipador o fuerza última a tracción de amortiguamiento.

$P_n$  = Compresión nominal.

$F_{cr}$  = Esfuerzo crítico a compresión del material del brazo metálico.

$P_u$  = Compresión última del dissipador o fuerza última a compresión de amortiguamiento

Aparte de las propiedades del dissipador, es importante definir la cantidad de amortiguadores que tendrá el edificio, así como su distribución. Asimismo, es necesario ubicarlos simétricamente en la edificación para garantizar que todos los amortiguadores trabajen igual y no superen su resistencia debido a una torsión accidental. En el caso de amortiguadores de fluido viscoso se sugiere ubicarlos en los entrepisos que tienen un mayor desplazamiento relativo. Por consiguiente, para lograr un óptimo desempeño de la estructura se requerirá un procedimiento iterativo, en el cual se supondrán distintas distribuciones de amortiguadores hasta llegar a la más adecuada.

Los arreglos más comunes son la disposición Chevron y la disposición diagonal. En la disposición Chevron los amortiguadores se posicionan horizontalmente con un anclaje extra en las vigas, tal como se presenta en la Figura 1.18. En cambio, de la misma manera como se aprecia en la Figura 1.17, en la disposición diagonal se necesita un brazo metálico para anclarse al pórtico, el cual tendrá una rigidez tan elevada que se considerará como incompresible axialmente.

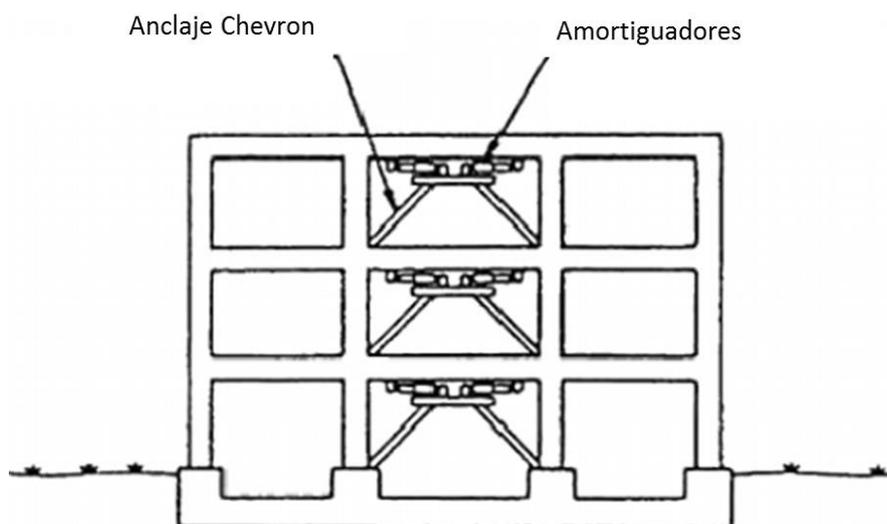


Figura 1.18. Amortiguadores en disposición Chevron. Fuente: Burgos M., 2012.

En el Anexo A se brindan más detalles sobre las recomendaciones constructivas para este tipo de amortiguador.

### 1.3. Desempeño sísmico

Diversas normas sísmicas en el mundo, incluyendo la norma peruana, presentan pautas y metodologías para diseñar edificaciones que garanticen la seguridad de las personas que las habitan. Sin embargo, no toman en cuenta el estado en que quedaría la estructura posterior a una sollicitación sísmica, sino que su enfoque se centra en asegurar que la estructura no colapse durante un evento de magnitud considerable. En los últimos años algunas normas han incorporado metodologías sobre el diseño sísmico por desempeño, que busca determinar el estado que tendrá la estructura posterior a una sollicitación sísmica. De manera general, el diseño basado en el desempeño sísmico consiste en la selección de un

nivel de desempeño para la edificación, a partir del cual se determinan las dimensiones y componentes de las estructuras. De esta forma, cuando ocurra un sismo, la estructura no debería ser dañada más allá del límite establecido. En las especificaciones del *COMMITTEE VISION 2000* (SEAOC, 1995) y del ATC-40 (1996) se presentan el desarrollo de estos conceptos, los cuales serán tratados a continuación:

**a. *COMMITTEE VISION 2000* (SEAOC - Asociación de Ingenieros Estructurales de California)**

Para aplicar el diseño por desempeño sísmico, SEAOC planteó en 1995 cuatro niveles de desempeño que puede tener la estructura luego de la ocurrencia de un siniestro:

a.1) *Totalmente Operacional*

En este nivel no ocurrirán daños. El edificio puede ser usado inmediatamente luego del evento sísmico y no requerirá reparación alguna.

a.2) *Operacional*

Igual que en el nivel anterior, la edificación puede ser ocupada inmediatamente después del evento sísmico. Sin embargo, se presentan daños estructurales leves en elementos no estructurales, los cuales pueden ser reparados con facilidad.

a.3) *Seguridad*

En este nivel ya se presentan daños moderados en los elementos estructurales y el contenido de la edificación se ve afectado. La rigidez lateral de la edificación se reduce notablemente, pero no se encuentra cerca al colapso. Es muy probable que cesen las actividades durante un tiempo puesto que será necesario una rehabilitación.

a.4) *Pre-Colapso*

El daño es severo, la rigidez lateral se degrada notablemente y no se podrá habilitar el edificio. En la mayoría de casos, el costo de reparación es tan alto que lo recomendable es construir un edificio nuevo.

Por otra parte, para poder escoger un nivel de desempeño, se debe tener en cuenta la función y la importancia de la edificación. Por esta razón, se clasificaron las estructuras de la siguiente manera:

- Estructuras Críticas: Contienen materiales peligrosos y las actividades realizadas en la edificación son de suma importancia.
- Estructuras Esenciales: Similares a las denominadas esenciales por la norma E-030, como hospitales, estaciones de bomberos, estaciones de policía, etc.
- Estructuras Básicas: Todas las estructuras que no pertenecen a las otras dos categorías.

Estos conceptos cualitativos deben ser transformados a parámetros cuantitativos, para así aplicarlos a un diseño correctamente. El parámetro más importante, en el cual concuerdan todas las normas de diseño, es la deriva de entrepiso. Por lo tanto, en el *COMMITTEE VISION 2000* se propusieron valores de deriva objetivo para cada nivel de desempeño, los cuales se presentan en la Tabla 1.2. En conclusión, el edificio será diseñado para que, al ocurrir un sismo, no se supere la deriva objetivo.

La deriva definida por la Norma Peruana E-030 para elementos de concreto armado es de 0.007, superando en 0.0012 a la deriva objetivo del nivel de Seguridad. Por otra parte, la deriva de 0.007 se encuentra muy por debajo del nivel de pre-colapso cuya deriva es

0.0156. Por consiguiente, el nivel de desempeño que más se ajusta a lo indicado por la norma peruana es el nivel de seguridad. Esto quiere decir que en nuestra norma se busca diseñar estructuras para que se mantengan en pie hasta que todas las personas puedan desalojar el edificio ante la ocurrencia de una solicitación sísmica, y es probable que cesen las actividades durante un tiempo puesto que será necesaria una rehabilitación en la edificación.

Tabla 1.2. Deriva objetivo para cada nivel de desempeño en edificaciones aporticadas de concreto armado. Fuente: SEAOC, 1995

Nivel de Desempeño	Deriva Objetivo
Totalmente Operacional	0.0020
Operacional	0.0033
Seguridad	0.0058
Pre-Colapso	0.0156

### **b. ATC-40 (Consejo de Tecnología Aplicada)**

En esta guía se propusieron cinco niveles de desempeño que están clasificados de una forma muy similar al SEAOC y siguen los mismos criterios. Se presentan a continuación estos niveles:

#### **b.1) Inmediata ocupación**

El sistema estructural permanece prácticamente inalterado, el peligro a la vida es despreciable y la edificación se mantiene funcionando en su totalidad.

#### **b.2) Daño controlado**

La vida de los ocupantes no está en peligro, aunque es posible que sean afectados.

#### **b.3) Seguridad**

Puede haber ocurrido daño significativo en la estructura; sin embargo, la mayoría de los elementos estructurales se mantienen estables. La amenaza a la vida de los ocupantes interiores y exteriores pudo haber sido afectada. Asimismo, hay costos elevados asociados a las reparaciones estructurales.

#### **b.4) Seguridad limitada**

Corresponde a un estado de daño que varía entre las condiciones límites de seguridad y de estabilidad estructural con alto peligro para los ocupantes.

#### **b.5) Estabilidad estructural**

En este nivel, acontecen daños sustanciales con una significativa degradación de rigidez y resistencia de los elementos estructurales. Existe un elevado peligro para ocupantes y transeúntes, así como un peligro elevado en caso de réplicas. Estas edificaciones requieren reparaciones estructurales significativas.

Asimismo, cabe indicar que el ATC-40 no proporciona una relación entre los niveles de desempeño y parámetros de diseño como las derivas, las fuerzas inducidas por el sismo, periodo de la estructura, etc. Sólo hace hincapié en la importancia de definir un objetivo de desempeño para el diseño de la estructura.

## **1.4. Enfoques sismorresistentes**

En la norma peruana E-030 se presenta una metodología de diseño tradicional que contempla una combinación de resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía de los elementos estructurales en el rango inelástico. En cambio, en otros países tales como Estados Unidos, Japón y Chile, se incorporaron en las normas sísmicas distintas metodologías de diseño utilizando enfoques que consideran el uso de amortiguadores y/o aisladores. A continuación se presenta el enfoque sismorresistente tradicional que emplea la Norma E-030 y el enfoque sismorresistente de los sistemas de protección sísmica.

### **1.4.1. Enfoque sismorresistente tradicional**

Korswagen, Arias, Huaranga (2012) indicaron que el diseño de las estructuras está basado en añadir resistencia y rigidez a los elementos estructurales. La rigidez de los elementos estructurales, definida por su material y dimensiones, debe ser suficiente para garantizar que la estructura permanezca en el rango elástico ante sismos leves, e ingrese al rango inelástico ante sismos severos. Esto implica que el desempeño está basado en la capacidad que tienen los elementos estructurales para absorber la energía introducida por el sismo y liberarla mediante deformaciones.

Cuando la estructura ingresa al rango inelástico, los elementos estructurales absorben energía, y empiezan a disiparla a través de deformaciones no recuperables. Las deformaciones inelásticas ocasionan un daño en los elementos estructurales y no estructurales. Por consiguiente, las estructuras deben tener una alta rigidez para disminuir las deformaciones inelásticas y mantener la edificación en funcionamiento.

### **1.4.2. Enfoque sismorresistente de los sistemas de protección sísmica**

Debido a los fuertes sismos ocurridos en distintas regiones del mundo, se buscaron distintas alternativas para proteger a las estructuras de tal manera que queden en un buen estado luego de ocurrido el sismo.

Entre las alternativas de protección sísmica más usadas, se tienen los sistemas de aislación sísmica y los sistemas de disipación de energía. Los sistemas de aislación tienen las características de reducir ampliamente la rigidez en la base de la estructura, produciendo también una reducción de las aceleraciones y de las fuerzas provenientes del sismo. Con esta disminución de fuerzas, los elementos estructurales desarrollarán deformaciones y esfuerzos mucho menores, previniendo el daño estructural y no estructural. Por otra parte, los sistemas de disipación de energía no disminuyen la energía que proviene del sismo sino más bien absorben gran parte de esta energía, evitando así que los elementos estructurales absorban grandes cantidades de energía que luego la liberarán como energía inelástica.

En las Figuras 1.19 y 1.20 se presenta ilustrativamente el comportamiento que tendrían las estructuras con aisladores y amortiguadores respectivamente ante un evento sísmico. En ambas figuras se aprecia que, para los edificios sin ningún dispositivo, la aceleración sísmica en el suelo se amplificará en el último piso de la estructura. En cambio, al usar aisladores o amortiguadores, dicha aceleración será mucho menor.

Los edificios que incluyen estos dispositivos tendrán un comportamiento muy distinto con respecto a los edificios sin dispositivo. Esto se debe a que tanto los amortiguadores como los aisladores modifican algunas de las propiedades de las estructuras, tales como la rigidez, el periodo y el amortiguamiento.

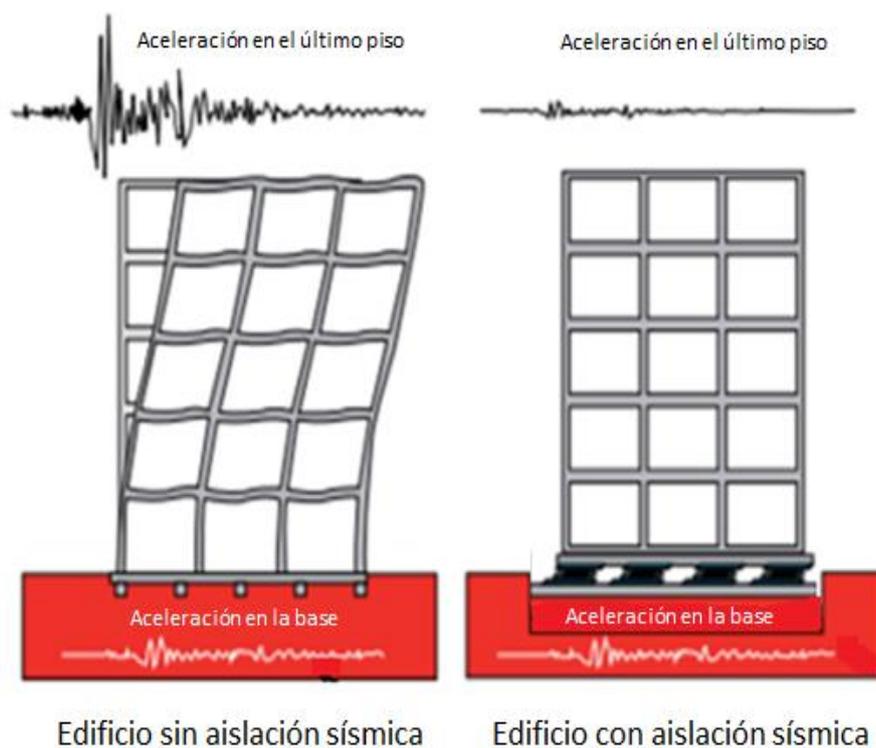


Figura 1.19. Características de un edificio con aisladores en la base. Fuente: Corporación de desarrollo tecnológico, 2012.

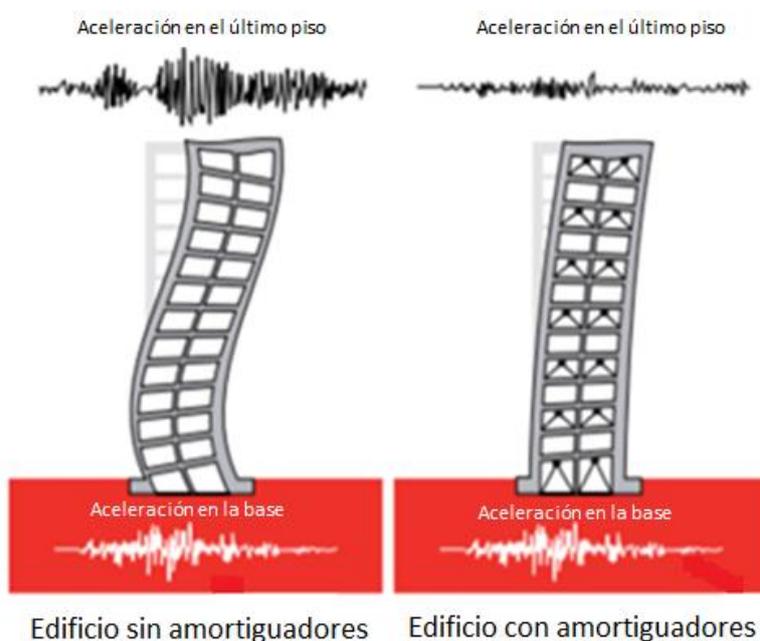


Figura 1.20. Características de un edificio con disipadores de energía. Fuente: Corporación de desarrollo tecnológico, 2012.

### 1.5. Comportamiento de la estructura

En este acápite se presentan los cambios que ocurren en la edificación cuando se incorporan aisladores y amortiguadores sísmicos en el diseño.

### 1.5.1. Sistema de aislación basal

En un evento sísmico se mantiene el concepto de balance de energía, es decir que la energía proveniente del sismo se mantiene constante pero se transforma. Una parte de la energía que recibe la estructura se transforma en movimiento (energía cinética); otra parte, se almacena como energía de deformación recuperable (energía elástica); y el resto de la energía se disipa por medio del amortiguamiento de la estructura, o se disipa a través la energía histerética o inelástica, que es la más dañina en una sollicitación sísmica. Con el uso del aislamiento sísmico se logra reducir el deterioro estructural con la reducción de la energía total que ingresa al edificio. La idealización de un sistema de aislación fue realizada a través de un sistema de dos grados de libertad. Este sistema fue desarrollado por Kelly, J.M. (1995) y aplicado en la tesis doctoral de Marsico M. (2008). En la Figura 1.21 se presenta el sistema y su idealización. Los dos grados de libertad son el desplazamiento del sistema de aislación  $U_1$  y el desplazamiento de la estructura  $U_2$ . Estos desplazamientos dependen de la rigidez y del amortiguamiento de las columnas, y de los aisladores colocados en la base.

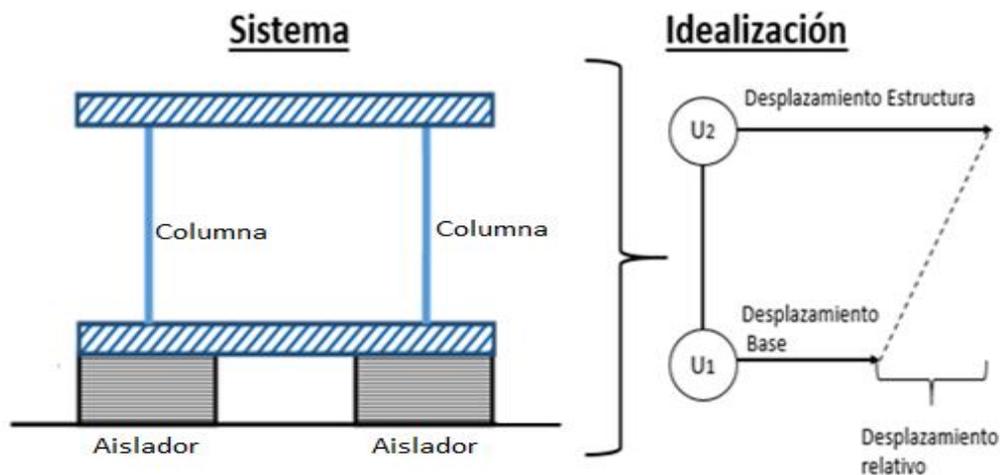


Figura 1.21. Representación del modelo con aislación en la base. Fuente: Marsico, 2008.

Asimismo, el desplazamiento relativo de la edificación se obtiene calculando la diferencia entre el desplazamiento de la estructura en el último piso y el desplazamiento en la base. Si el desplazamiento relativo es pequeño, menor será el daño en la estructura.

La finalidad del sistema de aislación es flexibilizar la base, reduciendo las fuerzas sísmicas y aumentando el período. En la Figura 1.22 se presenta una curva de color azul, que representa el espectro de aceleraciones de la norma peruana E-030. Esta curva se obtuvo con los factores Z (zonificación sísmica), U (importancia), C (amplificación sísmica) y S (suelo); tabulándolos en función de distintos periodos que podría tener la estructura. Como se puede observar en esta figura, al aumentar el período de la estructura, la aceleración en el edificio disminuye, por consiguiente se logran disminuir también las fuerzas que se desarrollan en los elementos estructurales porque las fuerzas sísmicas serán menores.

En esta misma figura se presenta una curva de color rojo, que representa el espectro de aceleraciones para un amortiguamiento efectivo mayor al 5% del crítico. Esta curva se obtuvo utilizando los mismos factores que se usaron para la curva color azul, pero se vio afectada por un factor de reducción que está en función del amortiguamiento efectivo de la estructura.

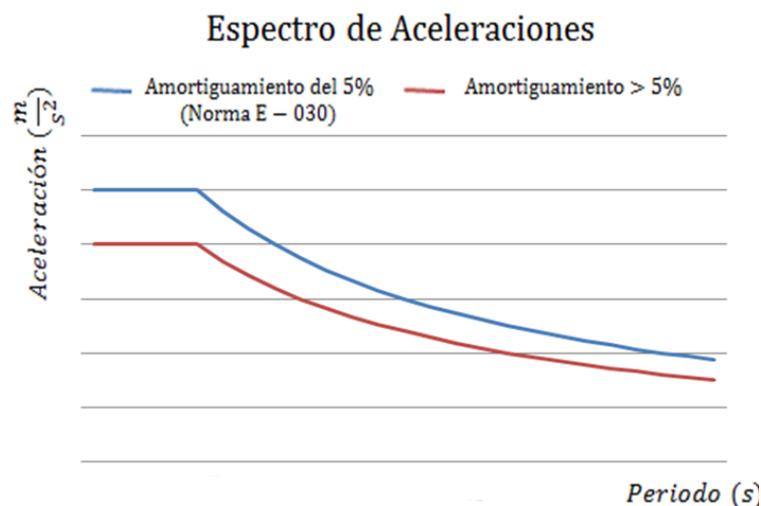


Figura 1.22. Variaciones del espectro de aceleraciones. Fuente: Norma E-030.

En ambas curvas se observa que para un periodo bajo se obtienen aceleraciones mayores. Asimismo, la curva de color rojo, correspondiente al espectro de aceleraciones para un amortiguamiento mayor al 5% del crítico, presenta valores inferiores de aceleraciones.

En una estructura con aisladores la base tendrá muy poca rigidez y permitirá un desplazamiento lateral. Es importante tener en consideración que dicho desplazamiento no puede ser excesivo puesto que ocasionaría desplazamientos muy elevados a lo largo de toda la estructura. Por lo tanto será necesario controlar el desplazamiento en la base para evitar daños, y para lograrlo se puede usar el amortiguamiento proporcionado de los propios aisladores. Si en caso no es suficiente se pueden utilizar amortiguadores en la superestructura. (Korswagen, Huaranga y Arias, 2012). En la Figura 1.23 se aprecia más detalladamente como afecta el incremento del amortiguamiento en el desplazamiento en la base.

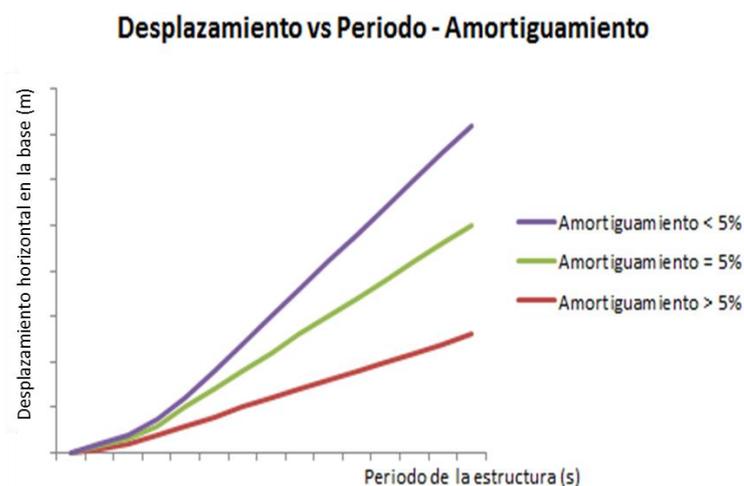


Figura 1.23. Variación del desplazamiento horizontal en la base con el incremento del amortiguamiento.

Fuente: Korswagen, Arias, Huaranga, 2012.

Tal como se observa en la figura, al incrementar el periodo de la estructura, el desplazamiento horizontal será mayor. Asimismo, al usar un amortiguamiento menor del 5% del crítico, se obtendrán desplazamientos excesivos. Con un mayor porcentaje de

amortiguamiento efectivo, el desplazamiento horizontal disminuirá en la estructura. En conclusión, para encontrar un desplazamiento adecuado en la base se deberá encontrar un equilibrio entre la flexibilidad que permite el sistema de aislación y el amortiguamiento que proporciona el aislador.

### 1.5.2. Sistema de amortiguamiento fluido viscoso

La estructura que utiliza disipadores de energía posee dos sistemas: el sistema estructural compuesto por todos los elementos estructurales ya sea de concreto armado, albañilería o acero; y el sistema de amortiguamiento que está compuesto por los amortiguadores y las conexiones metálicas utilizadas para unir los amortiguadores con el sistema estructural.

La energía de entrada al edificio es la misma tanto para las estructuras convencionales como para las estructuras con amortiguadores. Sin embargo, al usar amortiguadores, los elementos estructurales absorberán menos energía porque una porción significativa de la energía de entrada será absorbida por el sistema de amortiguamiento. Esto ocurre porque se cumple que la energía de entrada se mantendrá constante, cumpliéndose la siguiente ecuación:

$$E. \text{ entrada} \approx E. \text{ Elástica} + E. \text{ Histerética} + E. \text{ Viscosa} \quad (\text{Ec. 1.14})$$

Un ejemplo de este concepto se puede presentar para un sistema con las siguientes condiciones: la energía producida por el sismo en la estructura sin amortiguadores se reparte en energía elástica y energía histerética, siendo mayor la elástica (Figura 1.24). Por otro lado, al usar amortiguadores en la estructura, aparecerá una energía viscosa ocasionando que disminuya la energía histerética y la elástica; pero la elástica seguirá siendo mayor que la histerética (Figura 1.24).

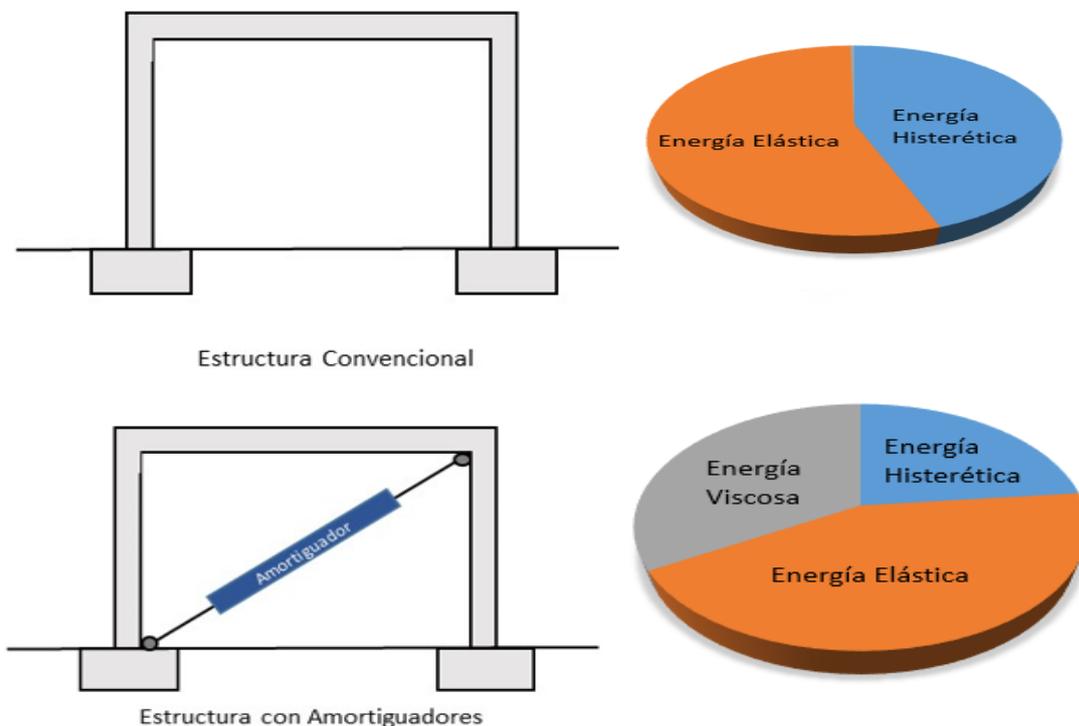


Figura 1.24. Participación de la energía en una edificación sin amortiguadores y con amortiguadores.

## 1.6. Normas vigentes de diseño

En este acápite se presentarán los enfoques del FEMA, SEAOC, ASCE y norma chilena para el diseño de los elementos de protección sísmica y la evaluación del desempeño sísmico de la edificación.

### 1.6.1. Federal Emergency Management Agency – FEMA274 (1997)

En 1997, el FEMA274 presentó metodologías para analizar la aislación basal y la disipación sísmica como elementos para proteger sísmicamente las edificaciones. En sus especificaciones técnicas presenta formulaciones detalladas y recomendaciones para su correcta utilización.

Además, en el FEMA274 se incluyen procedimientos para analizar y diseñar estructuras con dispositivos de protección sísmica incorporados.

Similar a la norma técnica peruana, el FEMA274 presenta la deriva máxima de entrepiso como el principal parámetro a controlar. Sin embargo, en vez de centrarse en el incremento de la rigidez para controlar el desplazamiento lateral, utiliza el amortiguamiento efectivo de la estructura para poder disminuir dicho desplazamiento. En muchos casos el amortiguamiento del 5% del crítico brindado por la propia estructura es insuficiente para un apropiado desempeño ante eventos sísmicos, siendo así necesaria la utilización de aisladores o amortiguadores para brindar un amortiguamiento adicional que supere el 5%.

El amortiguamiento efectivo que resulta de la incorporación de los aisladores o amortiguadores producirá una disminución de las aceleraciones generadas a la estructura. Para poder cuantificar la disminución de las aceleraciones, el FEMA274 propone un factor  $B_M$  que está en función del amortiguamiento efectivo. Dicha relación se presenta en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Factor  $B_M$ . Fuente: FEMA274, 1997.

Amortiguamiento Efectivo (%)	$B_M$
$\leq 2$	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
$\geq 50$	2.0

El valor de  $B_M$  será utilizado para escalar el espectro de aceleraciones de la estructura y es calculado con la Ecuación 1.15. Así, mientras mayor sea el factor  $B_M$ , menores serán las aceleraciones en la estructura; y mientras mayor sea el amortiguamiento que proporcionan los aisladores o los amortiguadores, mejor comportamiento tendrá la estructura.

$$Espectro_{Amort.Eff.\neq 5\%} = \frac{Espectro_{5\%}}{B_M} \quad (Ec. 1.15)$$

Por último, cabe mencionar que para diseñar un sistema de aisladores, se debe tomar en cuenta la ocurrencia de un sismo máximo posible, que es mayor al utilizado para el diseño sismorresistente. Además, en estructuras con aisladores, la norma limita el valor del factor

de reducción de fuerzas sísmicas  $R$  a un máximo de 2, con la finalidad de mantener la estructura en el rango elástico.

### 1.6.2. SEAOC- COMMITTEE VISION 2000 (1995)

La propuesta del SEAOC fue desarrollada en 1995 a través del *COMMITTEE VISION 2000* y según esta propuesta, el desempeño de una edificación se establece de acuerdo a la importancia de la estructura, al sismo de diseño y al estado de la estructura posterior a la sollicitación sísmica (Muñoz, 2001).

SEAOC clasifica el nivel de desempeño de una edificación en cuatro grupos, los cuales fueron detallados en el Acápíte 1.3:

- Totalmente Operacional
- Operacional
- Seguridad
- Pre-colapso

Además, para escoger el nivel de desempeño, se deben clasificar las estructuras según su grado de importancia:

- Estructuras Críticas
- Estructuras Esenciales
- Estructuras Básicas

En el *COMMITTEE VISION 2000* se proponen distintos sismos de diseño que deberán ser evaluados para cada tipo de edificación. Para poder asociar el nivel de desempeño objetivo con el tipo de estructura y el sismo esperado de diseño, el SEAOC propuso una matriz la cual se presenta en la Tabla 1.4. Los distintos sismos de diseño con sus respectivas probabilidades de excedencia son mostrados en la Tabla 1.5

Tabla 1.4. Nivel de desempeño objetivo para un sismo de diseño y un tipo de estructura. Fuente: SEAOC, 1995.

Tipo de estructura Sismo de diseño	Nivel de desempeño recomendado para las estructuras		
	Estructuras Críticas	Estructuras Esenciales	Estructuras Básicas
Frecuente	Totalmente operacional	Totalmente operacional	Totalmente Operacional
Ocasional	Totalmente operacional	Totalmente operacional	Operacional
Raro	Totalmente operacional	Operacional	Seguridad
Muy Raro	Operacional	Seguridad	Pre-colapso

Tabla 1.5. Sismos de diseño. Fuente: SEAOC, 1995.

Sismo de Diseño	Probabilidad de excedencia
Frecuente	50% en 30 años
Ocasional	50% en 50 años
Raro	10% en 50 años
Muy Raro	10% en 100 años

Cuando una estructura ingresa al rango inelástico, el daño será mayor en la estructura debido al incremento del desplazamiento lateral de cada piso. Este daño puede ser controlado si se define en el diseño una deriva objetivo que será la deriva límite que tendrá la estructura luego de introducirse los amortiguadores sísmicos. En la Tabla 1.6 se presentan los valores de deriva objetivo para cada nivel de desempeño según el SEAOC. Estos valores fueron mostrados también en la Tabla 1.2.

Tabla 1.6. Derivas objetivo para cada nivel de desempeño en edificaciones aporcadas de concreto armado. Fuente: SEAOC, 1995.

Niveles de desempeño y derivas objetivo para edificaciones	
Nivel de Desempeño	Deriva Objetivo
Totalmente Operacional	0.0020
Operacional	0.0033
Seguridad	0.0058
Pre-Colapso	0.0156

### 1.6.3. ASCE (2010)

El enfoque del ASCE-2010 (Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles) más que centrarse en evaluar los desplazamientos o el desempeño de la estructura, se enfoca en evaluar la capacidad de la estructura para que pueda resistir fuerzas sísmicas sin recibir un daño considerable. El código del ASCE incluye también propuestas sobre la utilización de disipadores sísmicos en la superestructura brindando pautas y recomendaciones para su uso correcto, y presentando metodologías para el diseño de los amortiguadores sísmicos. Al igual que el FEMA274, el ASCE propone la utilización de disipadores porque éstos aportan un amortiguamiento significativo que logra disminuir las fuerzas sísmicas que ingresan a los elementos estructurales.

En este código, muchas de las formulaciones presentadas fueron propuestas por el FEMA274 (1997). Entre ellas se tienen a las Ecuaciones 1.8 y 1.9, que se utilizan para el cálculo del amortiguamiento viscoso  $\beta_{visc}$ . Además, entre las consideraciones para el uso correcto de los amortiguadores, se tienen las siguientes:

- La estructura tendrá que ser regular y se recomienda distribuir los amortiguadores simétricamente.
- Como mínimo se requerirán dos amortiguadores en cada piso y en cada dirección del análisis, para que logren aportar el amortiguamiento necesario y no se sobre esfuercen los dispositivos.

Esta norma considera que el amortiguamiento es un parámetro fundamental para el control de las fuerzas sísmicas, porque al incrementar el amortiguamiento aportado por los dispositivos sísmicos, menores serán las fuerzas actuantes en los elementos estructurales y menor será el daño en la estructura.

### 1.6.4. Norma chilena NCh2745 (2013)

En Chile, a comparación de Perú, existen dos normas sísmicas de diseño. Por un lado, se tiene a la norma NCh433, que brinda las recomendaciones necesarias para un correcto diseño sísmico (muy similar a la E-030). Y por otro lado, la NCh2745 que se centra en el

aislamiento sísmico basal, dejando de lado el diseño de edificaciones sin protección sísmica.

El objetivo principal de la NCh2745 es la reducción de los esfuerzos en la estructura para minimizar los daños producidos en un sismo y que la estructura siga en funcionamiento luego de ocurrido dicho evento.

La norma NCh2745 (2013) propone el uso de dos escalas de sismo: a) la del sismo de diseño y b) la del sismo máximo posible. El sismo de diseño es aquel que tiene una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, mientras que el máximo posible tiene una probabilidad de excedencia del 10% en 100 años. La superestructura deberá ser capaz de resistir el sismo de diseño, mientras que el sistema de aislación deberá ser diseñado para resistir el sismo máximo posible.

Como límites de desplazamientos se establecen los siguientes valores:

- El desplazamiento relativo entre dos pisos consecutivos no debe ser mayor que la altura de entrepiso multiplicada por 0.002 (Andrade, 2004).
- El desplazamiento relativo máximo entre dos pisos consecutivos, medido en cualquier punto de la planta del entrepiso, en cada una de las direcciones del análisis, no debe exceder en más de  $0.001h$  al desplazamiento relativo de los centros de masas de ambos pisos consecutivos, en donde  $h$  es la altura de entrepiso (Andrade, 2004).

## **Capítulo II**

### **Metodologías de Análisis y Diseño**

En este capítulo se presentan detalladamente las metodologías para el diseño de los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo y los amortiguadores lineales de fluido viscoso. Los procedimientos presentados en este capítulo fueron obtenidos de las normas sísmicas internacionales y de las pautas brindadas por los fabricantes de los dispositivos sísmicos.

#### **2.1. Aisladores Elastoméricos**

El uso de aisladores en la base genera una estructura más flexible, ocasionando que las aceleraciones que ingresan al sistema estructural disminuyan considerablemente. Al existir bajas aceleraciones, las fuerzas sísmicas también disminuyen y no se requerirá utilizar elementos estructurales de gran rigidez como en un diseño convencional. Sin embargo, en una estructura con aisladores es necesario controlar el desplazamiento lateral en la base, y para lograrlo se deben diseñar los aisladores de tal manera que aporten un amortiguamiento que logre controlar dichos desplazamientos.

En una estructura está presente un amortiguamiento efectivo o equivalente que resulta de la suma de los amortiguamientos proporcionados por los elementos estructurales (5% del crítico en caso de estructuras de concreto armado) y por los aisladores. El amortiguamiento del 5% del crítico no será suficiente para evitar los desplazamientos laterales excesivos en la base, por lo tanto, será necesario que los aisladores tengan un amortiguamiento significativo. En la Figura 2.1 se presenta la variación que tiene el desplazamiento lateral en la base en función de dos parámetros: el amortiguamiento efectivo y el periodo de la estructura. Como se aprecia en la figura, al incrementar el amortiguamiento efectivo se logra disminuir el desplazamiento lateral en la base de la estructura. Asimismo, mientras mayor sea el periodo de la estructura, mayor será la flexibilidad de la misma y mayor será el desplazamiento lateral en la base. En ese sentido, será importante encontrar un equilibrio entre la flexibilidad permitida por los aisladores y el amortiguamiento que aportan, de tal manera que se obtengan desplazamientos laterales aceptables que no ocasionen daños a los elementos estructurales y no estructurales que conforman la edificación.

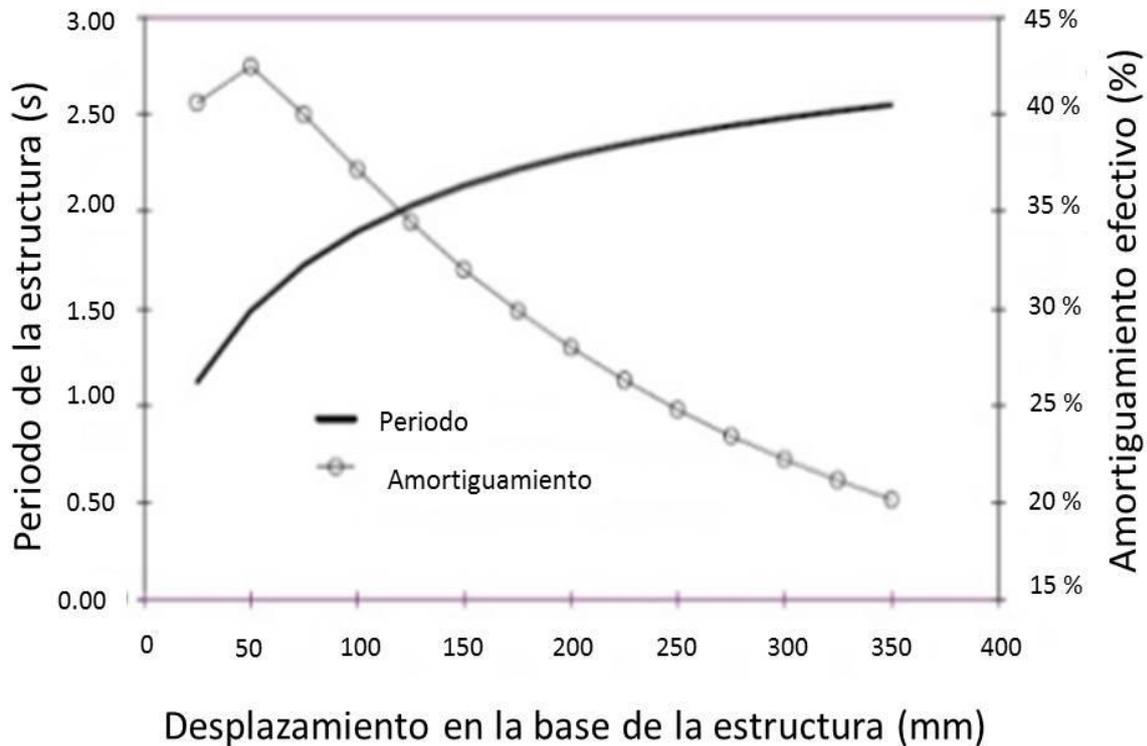


Figura 2.1. Variación del amortiguamiento efectivo y del periodo de la estructura en función del desplazamiento basal. Fuente: Korswagen, Arias, Huaranga, 2012.

### 2.1.1. Formulaciones y recomendaciones de las normas de diseño

Para el diseño de los aisladores elastoméricos, y para el análisis y diseño de las estructuras con aisladores, se tomaron como referencia las formulaciones y recomendaciones brindadas por el FEMA274. Se escogió esta norma porque ésta presenta un claro desarrollo en el diseño de estos dispositivos. Además, con esta norma se diseñaron y construyeron edificaciones que tuvieron un buen desempeño ante los últimos sismos.

#### 2.1.1.1. Federal Emergency Management Agency –FEMA274

En el FEMA274 de 1997 se consideran dos métodos para analizar y diseñar estructuras con aisladores: el primero es el método estático o método de la fuerza lateral equivalente; y el segundo es el método dinámico, que puede ser modal espectral o tiempo-historia.

El método estático sólo se aplica para edificaciones que no tengan irregularidades en planta ni en altura; además, sólo considera el modo fundamental de vibrar en su análisis. Asimismo, este método es utilizado para el diseño y dimensionamiento de los aisladores porque se trabaja con los valores más críticos y se puede asumir que los aisladores tienen un comportamiento lineal.

En cambio, el análisis tiempo-historia es recomendado en cualquier tipo de edificación, teniendo como condición la utilización de un mínimo de tres registros de sismos en ambas direcciones y que estén escalados a valores de aceleración máxima del sitio.

A continuación se presentan breves consideraciones para cada uno de los métodos considerados en el FEMA:

### Método Estático o Método de la fuerza lateral equivalente

Tal como se mencionó anteriormente, este método se recomienda para el diseño de los aisladores por su procedimiento sencillo y porque considera unos valores críticos.

El parámetro a controlar es el desplazamiento del aislador  $D_D$ , debido a que un desplazamiento excesivo podría generar una excentricidad de la carga vertical proveniente de los pisos superiores y producir un momento flector adicional que sobre esfuerce y dañe la estructura. Este parámetro se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$D_D = \frac{g * S * T}{4 * \pi^2 * B_M} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

En la ecuación,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $T$  es el periodo fundamental de la estructura con aisladores,  $S$  es la aceleración espectral y  $B_M$  un parámetro que reduce el espectro de aceleraciones en función del amortiguamiento.

Los valores de  $B_M$  dependen del amortiguamiento efectivo de la estructura y se obtienen de la Tabla 1.3. Cuanto mayor sea el amortiguamiento efectivo, mayor será el factor de reducción  $B_M$ . Asimismo, cuando el amortiguamiento sea 5% del crítico, el valor de  $B_M$  será 1.

El periodo de la estructura con aisladores "T" se obtiene de la siguiente manera:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K * g}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

siendo  $M$ , la masa total de la estructura; y  $K$ , la rigidez lateral en la base de la estructura. Se utiliza esta fórmula para el cálculo del período porque, tal como se menciona en las especificaciones del FEMA, el periodo de la edificación con aisladores dependerá de las características de rigidez lateral del sistema de aislación. Cabe mencionar que esta fórmula brinda una primera y rápida estimación del periodo fundamental de vibrar, y su valor exacto se determina con softwares de computación o métodos numéricos más complejos.

El desplazamiento obtenido con la Ecuación 2.1 es para un aislador. Sin embargo, al usar muchos aisladores, se debe considerar una excentricidad accidental porque el desplazamiento total del conjunto podría ser un poco mayor. Por consiguiente se calcula un desplazamiento total máximo  $D_{TD}$  con la siguiente expresión:

$$D_{TD} = D_D * \left(1 + y \frac{12e}{d^2 + b^2}\right) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

siendo  $y$ , la distancia desde el centro de masa proyectado en planta hacia el aislador más alejado;  $d$  y  $b$ , las dimensiones en planta de la estructura; y  $e$  equivale al 5% de la dimensión mayor en planta.

Finalmente, la fuerza cortante máxima  $V$  que soporta la estructura se obtiene con la siguiente formulación:

$$V = \frac{K * D_{TD}}{R} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

siendo  $K$ , la rigidez lateral total de los aisladores;  $D_{TD}$ , el desplazamiento total máximo del sistema de aisladores; y  $R$ , el factor de reducción de fuerza sísmica. El valor de este último parámetro es diferente al utilizado para una estructura sin aisladores. Se puede estimar como 3/8 del valor  $R$  de una estructura sin aisladores, pero siempre tendrá que ser menor o igual 2. En el caso de una estructura aperticada, el valor de  $R$  es 8 según la norma peruana,

y si se utilizan aisladores, el valor de  $3/8$  de  $R$  equivaldría a 3. Sin embargo, el valor de  $R$  se tendrá que limitar a 2 con la finalidad de asegurar que la superestructura permanezca en el rango elástico para el sismo de diseño.

La repartición de las fuerzas sísmicas a lo largo de la altura se realiza tal como está indicado en la Norma E-030, utilizando la siguiente ecuación:

$$F_i = \frac{P_i h_i}{\sum P_i h_i} * V \quad (\text{Ec. 2.5})$$

donde:

$F_i$  = Fuerza sísmica para un piso (t)

$P_i$  = Peso del piso (t)

$h_i$  = Altura acumulada del piso medida desde la base hasta el entrepiso (m)

$V$  = Cortante basal de la estructura (t)

#### Método dinámico de combinación modal espectral

Como recomendación inicial se limita el amortiguamiento efectivo a un máximo de 30% del crítico; y las fuerzas obtenidas deberán respetar un valor mínimo, de aquellas obtenidas con el análisis estático. Además, será necesario un análisis con 100% del espectro en una dirección y 30% en la otra, al mismo tiempo.

#### Análisis Tiempo-Historia

Se recomienda la aplicación de este método en todas las situaciones. En este método se define como máximo siete y como mínimo tres registros de sismos evaluados en ambas direcciones. Estos registros deben ser escalados a la máxima aceleración esperada en el sitio.

#### **2.1.1.2. Norma peruana E-030**

Para poder realizar el diseño de los aisladores correctamente, será necesario considerar los factores sísmicos de diseño que son indicados por la norma peruana E-030, los cuales dependen de la zonificación sísmica del Perú (Figura 2.2). Para este trabajo de tesis, se decidió trabajar con la zona de mayor sismicidad en el Perú, la zona 4.

En Perú, en lugar de utilizar el factor  $S$ , tal como se emplea en la norma estadounidense, se utiliza la multiplicación de los factores  $Z*U*C*S$ , que equivale a la aceleración espectral usada en la norma peruana E-030. De esta forma, la Ecuación 2.1, que se utiliza para calcular el desplazamiento del aislador  $D_D$ , resultará en la siguiente expresión:

$$D_D = \frac{g * ZUCS * T}{4 * \pi^2 * B_M} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

En la ecuación,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $T$  es el periodo fundamental de la estructura con aisladores y  $B_M$  un parámetro que reduce el espectro de aceleraciones en función del amortiguamiento.

Los factores pertenecientes a la norma Peruana E-030 son:

Factor de zona  $Z$ : Es la aceleración máxima del terreno con una probabilidad del 10% de ser excedida en 50 años. Para la zona 4 ese valor es de 0.45g, siendo  $g=9.81\text{m/s}^2$ . Además,

se debe tener en cuenta que para el diseño de los aisladores se utilizará el sismo máximo posible cuya aceleración máxima del terreno es de 0.675g para la zona 4, con una probabilidad del 10% de ser excedida en 100 años.

Factor de Suelo S: Los valores de factor de suelo de la Norma E-030 se muestran en la Tabla 2.1. Considerando un tipo de suelo  $S_3$ , que corresponde a un suelo blando, se obtendrá un factor de suelo 1.10.

Tabla 2.1 Factor de Suelo "S". Fuente: Norma E-030.

Zona \ Suelo	Factor de suelo "S"			
	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
$Z_4$	0.80	1.00	1.05	1.10
$Z_3$	0.80	1.00	1.15	1.20
$Z_2$	0.80	1.00	1.20	1.40
$Z_1$	0.80	1.00	1.60	2.00

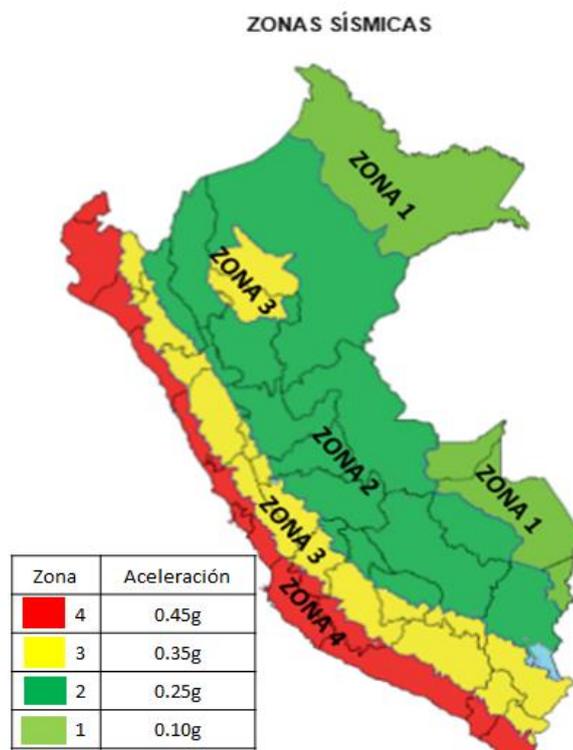


Figura 2.2. Mapa del factor Z. Fuente: Norma E-030.

Coefficiente de uso e importancia U: Las edificaciones de oficinas se encuentran dentro de la categoría de edificaciones comunes. Por lo tanto, el factor U equivale a 1.

Coefficiente de reducción sísmica R: El coeficiente de reducción sísmica correspondiente a un edificio aporticado es 8.

Factor de amplificación sísmica C: Acorde con la norma E-030, para calcular el factor de amplificación sísmica se deberá calcular previamente el periodo fundamental  $T$  de la estructura con aisladores. El cálculo de dicho periodo se realiza utilizando la Ecuación 2.2. Asimismo, se considera que el periodo  $T_p$  y el periodo  $T_L$ , son los brindados por la norma peruana E-30, siendo:

$T_p$  = periodo que define la plataforma del factor C, para la zona 4. Su valor es 1 s.

$T_L$  = periodo que define el inicio de la zona del factor C con desplazamiento constante. Para la zona 4 su valor es 1.6 s.

Las expresiones de cálculo que se emplean según la norma E-030 son:

Para  $T < T_p$ :  $C = 2.5$

Para  $T_p < T < T_L$ :  $C = 2.5 * \left(\frac{T_p}{T}\right)$

Para  $T > T_L$ :  $C = 2.5 * \left(\frac{T_p * T_L}{T^2}\right)$

### 2.1.2. Consideraciones generales para el diseño

Es importante seguir las siguientes recomendaciones para un correcto procedimiento de diseño y para que la estructura tenga un buen comportamiento:

- Generar un diafragma rígido para uniformizar los desplazamientos. Para lograrlo se recomienda utilizar vigas y losas que conecten las columnas apoyadas encima de los aisladores. De esta manera se evitan los desplazamientos diferenciales.
- Verificar que la carga vertical no supere la capacidad de cada aislador, la cual es brindada por los fabricantes. Para evitar sobrepasarla es necesario repartir las cargas de manera uniforme en cada aislador verificando que exista un factor de seguridad entre la carga aplicada y la capacidad del aislador.
- Buscar la simetría en el sistema de aislamiento con lo que se evitan excentricidades entre el centro de masas y el centro de rigidez.
- Verificar que no se supere la resistencia a la tracción de los aisladores. Sus valores son aproximadamente un 15% de la resistencia a la compresión.
- Se deberá verificar que la excentricidad generada por el desplazamiento de la base no produzca momentos adicionales que no pueda resistir la estructura.
- Deberán instalarse los aisladores de tal manera que sea posible su reparación o cambio en caso de daños producidos por un sismo.

### 2.1.3. Procedimiento de diseño del sistema de aislación

Los aisladores elastoméricos se pueden diseñar correctamente siguiendo las recomendaciones y formulaciones propuestas tanto por las normas internacionales como por los fabricantes. Asimismo, es importante incorporar los coeficientes brindados por la norma peruana E-030. La metodología de diseño consiste en un procedimiento iterativo; y para su aplicación se requiere inicialmente suponer valores de los parámetros estructurales propios de la estructura con aisladores, como el periodo  $T_M$  y el amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$ .

El diseño culminará cuando los valores finales obtenidos en el proceso coincidan con los valores supuestos. En la Figura 2.3 se presenta un diagrama de flujo en donde se indica el procedimiento a desarrollar en forma general. A continuación se presenta el detalle paso a

paso de la metodología de diseño de los aisladores según lo indicado en el diagrama de flujo.

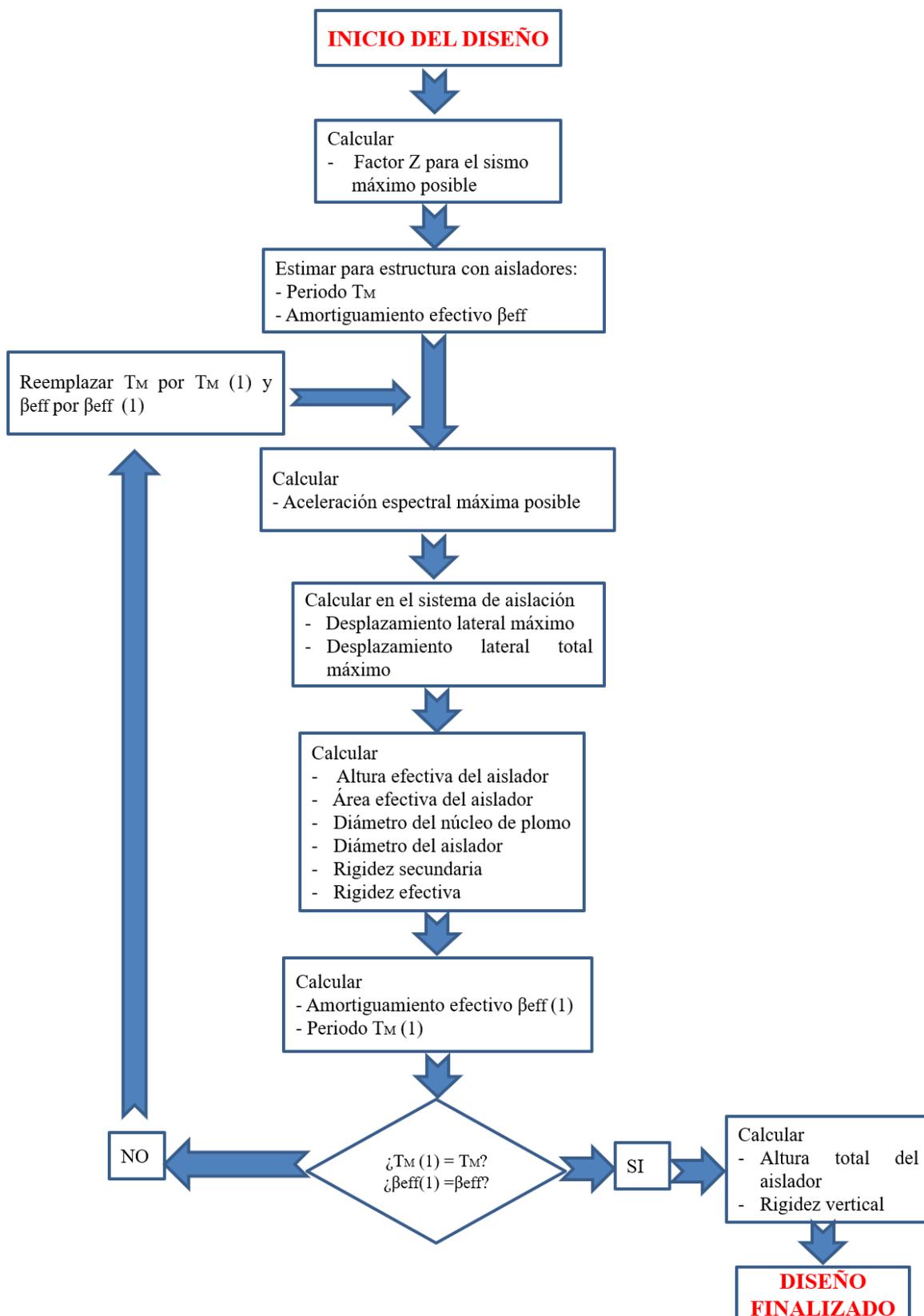


Figura 2.3. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de los aisladores elastoméricos. Fuente: Elaboración propia

Paso 1. Cálculo del factor de zonificación sísmica para un sismo máximo posible

Como se mencionó anteriormente, para el dimensionamiento de los aisladores se utilizará el sismo máximo posible o sismo que tiene 10% de probabilidad de ser excedido en 100 años. Para la Zona 4, el factor Z es igual a 0.675g.

Para la obtención de este valor de Z se utilizan procedimientos estadísticos. En primer lugar se debe obtener el periodo de retorno para el sismo de diseño y para el sismo máximo posible con ecuación del periodo de retorno:

$$T = \frac{1}{1-(1-p)^{1/n}} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

siendo:

T = periodo de retorno

p = probabilidad de excedencia para un tiempo determinado

n = años para que el sismo sea excedido con una probabilidad dada

Luego, si se conoce la aceleración esperada para el sismo de diseño (según la norma peruana E-030, para la zona 4 es 0.45g); se puede estimar la aceleración para el sismo máximo posible utilizando la siguiente expresión:

$$\frac{a_2}{a_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^k \quad (\text{Ec. 2.8})$$

siendo:

$a_2$  = la aceleración del sismo máximo posible

$a_1$  = la aceleración del sismo de diseño

$T_2$  = el periodo de retorno del sismo máximo posible

$T_1$  = el periodo de retorno del sismo de diseño

K = factor probabilístico que depende de la zona sísmica

Según Korswagen, Arias, Huaranga (2012), el factor K se estima como 0.58 para la zona 4.

Así, el sismo de diseño tiene un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años y su periodo de retorno será:

$$T_1 = \frac{1}{1 - (1 - 0.1)^{1/50}} = 475 \text{ años}$$

El sismo máximo posible tiene un 10% de probabilidad de excedencia en 100 años, entonces su periodo de retorno será:

$$T_2 = \frac{1}{1 - (1 - 0.1)^{1/100}} = 950 \text{ años}$$

Luego, conociendo la aceleración esperada para el sismo de diseño (0.45g), se puede estimar la aceleración para el sismo máximo posible:

$$\frac{a_2}{0.45g} = \left(\frac{950}{475}\right)^{0.58}$$

$$a_2 \approx 0.675g$$

### Paso 2. Estimación de las propiedades de la estructura con aisladores

El primer parámetro característico de la estructura es el periodo  $T_M$ , que se puede asumir inicialmente como 3 veces el periodo de la estructura sin aisladores, aunque este valor deberá ser verificado y ajustado.

El otro parámetro inicial es el amortiguamiento efectivo de la estructura  $\beta_{eff}$ . El cual se puede suponer como 15% del amortiguamiento crítico. De la misma manera que el periodo, el amortiguamiento deberá ser verificado posteriormente.

### Paso 3. Cálculo de la aceleración espectral máxima posible

Según la Norma E-030 esta aceleración espectral se obtiene multiplicando los siguientes factores: factor de zona sísmica (Z), importancia (U), factor de amplificación sísmica (C) y tipo de suelo (S):

$$\text{Aceleración} = Z * U * C * S \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Se usará un valor de R igual a 1 para el sistema de aislación basal, mientras que para la superestructura se usará un valor de R no mayor a 2 (FEMA274, 1997).

### Paso 4. Cálculo del desplazamiento máximo ( $D_M$ ) y desplazamiento total máximo ( $D_{TM}$ )

Usando el método estático del FEMA274 se puede obtener el desplazamiento máximo y el desplazamiento total máximo. Los subíndices utilizados serán "M" en vez de "D" puesto que para el diseño de los aisladores se trabaja con el sismo máximo posible.

Así el desplazamiento máximo en el sistema de aislación se calcula con la siguiente ecuación:

$$D_M = \frac{(g/4\pi^2) * ZUCS * T_M}{B_M} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

siendo g, la aceleración de la gravedad;  $T_M$ , el periodo de la estructura con aisladores que puede ser estimado inicialmente como 3 veces el periodo fundamental de la estructura sin dispositivo, y el factor  $B_M$  se obtiene de la Tabla 1.3 y se estima para un amortiguamiento inicial de 15%. Puesto que en la tabla no se encuentra su valor directamente se puede realizar una interpolación lineal, obteniendo así un valor de  $B_M = 1.35$ .

Como se mencionó anteriormente, el desplazamiento del conjunto de aisladores será un poco mayor que el de un aislador, dado que se considera una excentricidad accidental. Para calcular el desplazamiento total máximo del sistema de aislamiento ( $D_{TM}$ ) se utiliza la ecuación mostrada a continuación:

$$D_{TM} = D_M * \left(1 + y \frac{12e}{d^2 + b^2}\right) \quad (\text{Ec. 2.11})$$

donde  $D_M$  es del desplazamiento máximo; b y d son las dimensiones en planta de la estructura; y es la distancia desde el centro de masa proyectado en planta hacia al aislador más alejado; y e es la excentricidad accidental que equivale al 5% de la dimensión más larga de la planta.

Paso 5. Cálculo de la altura efectiva del aislador ( $H_i$ )

La altura efectiva del aislador, que es equivalente a la altura del caucho, se obtiene de la siguiente manera:

$$H_i > \frac{D_{TM}}{\gamma_s} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

donde  $\gamma_s$  es la deformación lateral por corte, equivalente a 1.5.

No será necesario ajustar la altura efectiva a un valor entero, más bien el valor obtenido deberá dividirse entre el espesor de láminas de caucho a utilizar, el cual es proporcionado por los fabricantes. No obstante se puede usar el espesor  $t_{\text{caucho}}$  comercial más utilizado de 6 mm. Teniendo esa información se podrá calcular el número de láminas a utilizar.

$$N^\circ = \frac{H_i}{t_{\text{caucho}}} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Luego de definir el número exacto de láminas de caucho, se podrá calcular la altura efectiva.

Paso 6. Cálculo del área neta o área efectiva del aislador

El área neta o área efectiva del aislador corresponde al área de caucho. Su dimensionamiento dependerá de la carga vertical aplicada directamente al aislador y su valor se obtiene de esta forma:

$$\text{Área neta} = \frac{P_{u,m\acute{a}x}}{\sigma_{m\acute{a}x \text{ perm}}} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

siendo  $P_{u,m\acute{a}x}$  (t) la carga que recibe cada aislador y que se obtendrá a partir de la combinación "1.25CM+1.25CV+ CS". CM es carga muerta, CV es carga viva y CS es carga de sismo. Se puede considerar la carga de sismo CS como el 30% de la carga muerta CM. El esfuerzo axial permisible del caucho  $\sigma_{m\acute{a}x \text{ perm}}$  debe ser especificado en las características del aislador o se podrá tomar el valor referencial de 815 t/m<sup>2</sup>.

Paso 7. Estimación de la capacidad de carga del aislador correspondiente a una deformación igual a cero ( $Q_d$ )

Este parámetro es utilizado para controlar la amortiguación y la rigidez efectiva del sistema de aislamiento. Para estimarlo, se obtiene la carga vertical W que recibe cada aislador según la masa participativa (CM+0.25CV); y luego con la relación  $Q_d/W$  cuyo valor se encuentra en el rango establecido por los fabricantes, entre 3 a 10%, se obtiene la carga  $Q_d$ .

Para el presente trabajo de tesis se empezará suponiendo una relación  $Q_d/W$  igual a 6%, que es un valor conservador y aproximadamente está en la media de los posibles valores que puede tomar.

Paso 8. Cálculo del diámetro del núcleo de plomo ( $D_p$ )

El diámetro del núcleo de plomo  $D_p$  se calcula a partir de la relación entre la capacidad del aislador  $Q_d$  y el esfuerzo de fluencia del núcleo de plomo  $\sigma_y$  (1020 t/m<sup>2</sup>). Su fórmula de cálculo es la siguiente:

$$D_p = \sqrt{\frac{4*Q_d}{\pi*\sigma_y}} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

El valor obtenido de  $D_p$  deberá ajustarse a un valor viable constructivamente, y luego con este mismo valor se recalcula el valor de  $Q_d$  usando la misma Ecuación 2.15.

Paso 9. Definición del diámetro del aislador a utilizar ( $D_i$ )

Con el área obtenida en el Paso 6, se podrá obtener el diámetro del aislador. Éste se deberá ajustar a valores comerciales, los cuales son proporcionados por los fabricantes. En la Tabla 2.2 se presentan los aisladores comerciales con su respectivo diámetro  $D_i$ , su rigidez lateral  $K_d$ , capacidad de carga del aislador  $Q_d$ , rigidez vertical  $K_v$  y la máxima carga que resiste el aislador  $P_{u,máx}$ .

Además, los fabricantes de aisladores DIS (Dynamic Isolation Systems) recomiendan una relación que se debe cumplir entre el diámetro del núcleo de plomo y el diámetro del aislador a usar:

$$D_i/6 < D_p < D_i/3 \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Tabla 2.2. Propiedades de los aisladores. Fuente: Dynamic Isolation Systems, 2007.

Diámetro del aislador $D_i$ (mm)	Rigidez lateral del aislador $K_d$ (t/m)	Máxima capacidad de carga del aislador $Q_d$ (t)	Rigidez Vertical $K_v$ (t/m)	$P_{u,máx}$ (t)
305	20 – 40	6.5	5000	45
355	20 – 40	6.5	10000	70
405	30 – 50	11.0	10000	90
455	30 – 70	11.0	10000	115
520	40 – 70	18.0	20000	135
570	50 – 90	18.0	50000	180
650	50 – 110	22.0	70000	270
700	50 – 140	22.0	80000	310
750	70 – 160	26.5	90000	360
800	70 - 160	26.5	10000	400
850	70 – 180	35.5	120000	490
900	70 – 190	35.5	140000	580
950	70 – 200	49.0	180000	670
1000	80 – 200	49.0	190000	760
1050	90 – 210	58.0	210000	850
1160	110 – 210	66.5	280000	1380
1260	120 – 230	75.5	370000	2050
1360	140 – 250	89.0	510000	2760
1450	160 – 250	102.5	530000	3340
1550	180 – 250	102.5	650000	4000

Paso 10. Cálculo de la rigidez secundaria ( $K_d$ )

La rigidez secundaria o rigidez de recuperación depende netamente del área de la corona circular de caucho. Para fines de diseño se utiliza un valor de rigidez  $G=54 \text{ t/m}^2$ , que equivale al promedio del rango de valores que puede tomar la rigidez del caucho entre 27 a 72  $\text{t/m}^2$ .

$$K_d = \frac{\text{Área}_{\text{caucho}} * G}{H_i} = \frac{\pi * (D_i^2 - D_p^2) * G}{4 * H_i} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

### Paso 11. Cálculo de la rigidez efectiva ( $K_{\text{eff}}$ )

La rigidez efectiva  $K_{\text{eff}}$  es la suma de la rigidez obtenida al dividir la capacidad de carga con el desplazamiento total máximo, más la rigidez secundaria  $K_d$ :

$$K_{\text{eff}} = \frac{Q_d}{D_{\text{TM}}} + K_d \quad (\text{Ec. 2.18})$$

### Paso 12. El amortiguamiento efectivo ( $\beta_{\text{eff}}$ )

Esta propiedad se obtendrá con la energía disipada en un ciclo histerético, el desplazamiento total máximo y la rigidez efectiva. Tal como lo indica la siguiente ecuación obtenida del FEMA274, 1997:

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{2 * \text{Energía}}{\pi * K_{\text{eff}} * (D_{\text{TM}}^2 + D_{\text{TM}}^2)} = \frac{4 Q_d (D_{\text{TM}} - F_y / K_i)}{2 \pi * K_{\text{eff}} * D_{\text{TM}}^2} = \frac{4 Q_d (D_{\text{TM}} - 1.1 Q_d / 10 K_d)}{2 \pi * K_{\text{eff}} * D_{\text{TM}}^2} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

La energía equivale al área bajo la curva del ciclo histerético del aislador (área del paralelogramo ABCD en la Figura 1.6). Mientras que la fuerza de fluencia  $F_y$  se considerará como  $1.1 * Q_d$  tal como se mencionó en el Capítulo I, y la rigidez inicial  $K_i$  será considerada como 10 veces  $K_d$ .

### Paso 13. Cálculo del periodo ( $T_M$ )

El periodo de la estructura con aisladores se calcula con la siguiente expresión:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_M * g}} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Siendo  $M$ , la masa de la estructura; y  $K_M$ , la rigidez de todo el sistema de aislamiento, que se calcula multiplicando la rigidez  $K_d$  por el número de aisladores. Según el FEMA274, se utiliza la rigidez  $K_d$  en lugar de la rigidez  $K_{\text{eff}}$  dado que así se obtiene un valor de periodo más alto, resultando en un desplazamiento lateral mucho mayor, que será la situación más crítica.

### Paso 14. Verificación de los valores estimados

El amortiguamiento efectivo  $\beta_{\text{eff}}$  obtenido en el Paso 12 y el periodo  $T_M$  obtenido en el Paso 13 deben ser muy similares a los valores estimados en el Paso 2. Si los valores estimados no concuerden con los obtenidos, se deberá reiniciar el procedimiento desde el Paso 3 usando los nuevos valores de  $T_M$  y  $\beta_{\text{eff}}$ . Este proceso se repite iterativamente hasta que los valores de  $T_M$  y  $\beta_{\text{eff}}$  converjan lo suficiente. Finalmente se seleccionan los aisladores con características similares a las calculadas por medio de las fórmulas donde los desplazamientos laterales, periodos, amortiguamiento y capacidad de carga sean los adecuados. En caso de que los valores de  $T_M$  y  $\beta_{\text{eff}}$  converjan, pasar al Paso 15.

### Paso 15. Cálculo de la altura total del aislador ( $H_T$ )

Para obtener la altura total del aislador  $H_T$  se debe añadir el espesor de las láminas de acero colocadas entre las láminas de caucho:

$$H_T = H_i + (N^\circ - 1) * t_{acero} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

donde  $N^\circ$  es el número de láminas de caucho;  $H_i$  es la altura efectiva de caucho; y  $t_{acero}$  es el espesor de la placa de acero que deberá ser brindado por el fabricante, aunque se suele utilizar un valor comercial de 3 mm.

### Paso 16. Cálculo de la rigidez vertical ( $K_V$ )

La rigidez vertical  $K_V$  se calcula sumando las rigideces proporcionadas por el conjunto acero-caucho y el plomo. Se obtiene con la siguiente ecuación:

$$K_V = \frac{E_c A_{acero}}{H_i} + \frac{E_p A_{plomo}}{H_T} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

siendo  $A_{acero}$ , el área de acero que es igual al área efectiva de caucho;  $E_p$ , el módulo de elasticidad del plomo igual a  $14 \times 10^5$  t/m<sup>2</sup>; y  $E_c$ , el módulo de compresión para el conjunto acero-caucho. Existen variados métodos para evaluar este último parámetro, y para este trabajo de investigación se utilizará la siguiente ecuación presentada en el FEMA274.

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{6 * G * S^2} + \frac{4}{3 * K} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

donde  $G$ , es la rigidez lateral del caucho;  $K$ , el módulo de compresibilidad del elastomérico estimado como  $2 \times 10^5$  t/m<sup>2</sup>; y  $S$ , es un factor de forma del aislador calculado de esta manera:

$$S = \frac{D_i^2 - D_p^2}{4 * D_i * t_{caucho}} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

siendo  $D_i$ , el diámetro del aislador;  $D_p$ , el diámetro del núcleo de plomo; y  $t_{caucho}$ , el espesor de las láminas de caucho.

#### **2.1.4. Diseño de la estructura con aisladores**

Para el diseño de la superestructura se utilizará el sismo de diseño, lo cual implica utilizar un valor de  $z = 0.45$  g (Zona 4); y con las dimensiones calculadas del aislador, obtenidas según el procedimiento indicado en el Acápite 2.1.3, se obtendrán nuevos valores de periodo de diseño  $T_D$ , amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$ , rigidez efectiva  $K_{eff}$  y el desplazamiento máximo del sistema de aislación  $D_{TD}$ .

Cuando se emplea el método estático, la cortante basal en el sistema de aisladores se calcula con el desplazamiento lateral obtenido, la rigidez efectiva y el factor de reducción de fuerzas sísmicas  $R$ :

$$V = \frac{K_D * D_{TD}}{R} \quad (\text{Ec. 2.25})$$

El valor de  $R$  para edificaciones aporcadas con aisladores resulta igual a 2. (Korswagen, Arias, Huaranga, 2012).

En cambio, cuando se emplea el método dinámico modal espectral o el análisis tiempo-historia, la cortante basal se determina con programas de modelación tales como el ETABS o SAP2000. Para esto se deberá definir la propiedad LINK que representa al aislador en ambos programas. Posteriormente se le deberán asignar las propiedades de rigidez vertical, rigidez horizontal y amortiguamiento. Este procedimiento se presenta en el Anexo B.

Tal como se menciona en el Acápito 2.1.2, cuando se utilizan aisladores sísmicos en la base será necesaria la inclusión de un sistema de losas y vigas en la base de la estructura (Ver Figura 1.5). Por lo tanto, al momento de realizar la modelación en el SAP2000, se debe incluir dicha losa como un piso más con altura 0. En la Figura 2.4 se aprecia la diferencia entre la edificación con aisladores y sin aisladores en el SAP2000.

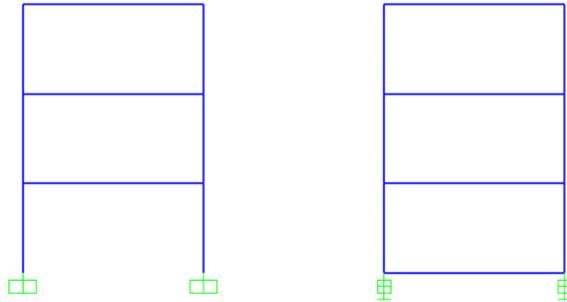


Figura 2.4. Diferencia entre edificación sin aisladores y con aisladores.

Como se ve en la figura, en el pórtico sin aisladores no existe una conexión entre las bases de las columnas. Sin embargo, en el pórtico con aisladores, las bases de las columnas se conectan mediante una losa. La colocación de esta losa en la base garantiza un diafragma rígido en el sistema de aislación, y, además, dado que los aisladores no son capaces de recibir el momento de las columnas, dichos momentos provenientes de las columnas son tomados por la losa. (Benavente y Traverso, 2013)

Por consiguiente, entre ambos modelos se presenta una diferencia con respecto a las condiciones de borde. Por el lado de la estructura sin aisladores, el modelo se idealiza como empotrado en la base. Y para la estructura con aisladores, la estructura ya no está empotrada, sino simplemente apoyada sobre los aisladores, los cuales se pueden idealizar como apoyos deslizables con una rigidez lateral igual a la rigidez lateral calculada para cada aislador.

## 2.2. Amortiguadores de Fluido Viscoso

En el presente trabajo de tesis se ha trabajado con amortiguadores lineales de fluido viscoso. Su dimensionamiento resulta de un procedimiento iterativo, en el cual se supondrá un valor inicial de amortiguamiento efectivo que luego deberá ser ajustado por medio de cálculos.

### 2.2.1. Procedimiento de diseño del sistema de amortiguamiento

En la Figura 2.5 se presenta un diagrama de flujo en donde se indica el proceso a seguir para un correcto diseño. A continuación se presentan en detalle los pasos del proceso.

#### Paso 1. Definición del tipo de estructura y del sismo de diseño

Para esto se debe determinar si la edificación es de tipo crítica, esencial o básica, y además se debe escoger un sismo de diseño utilizando la Tabla 1.5.

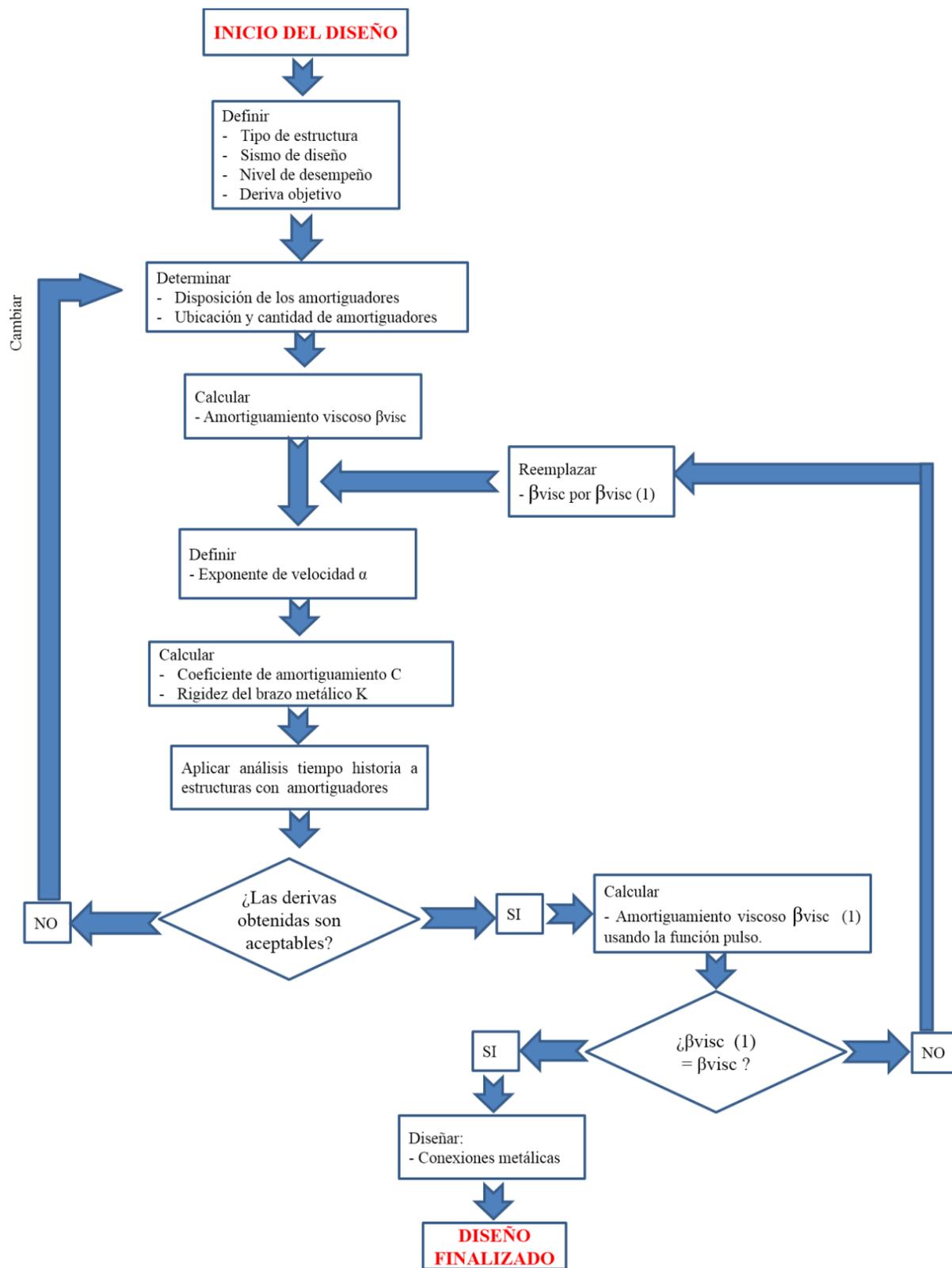


Figura 2.5. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de los amortiguadores de fluido viscoso.  
Fuente: Elaboración propia

### Paso 2. Elección del Nivel de Desempeño

En primer lugar, se debe definir el estado de la estructura después de una sollicitación sísmica. El nivel de desempeño escogido dependerá de la magnitud del sismo de diseño, de la importancia de la estructura y de las labores realizadas en la estructura. Los niveles de desempeño fueron descritos en el Acápite 1.3.

- Totalmente Operacional
- Operacional
- Seguridad
- Próximo al Colapso

El nivel de desempeño se define utilizando la Tabla 1.4 mostrada en el Acápite 1.6.2.

### Paso 3. Elección de la deriva objetivo

Después de escoger un nivel de desempeño, se emplea la Tabla 1.6 para determinar la deriva objetivo, que es la deriva límite que la estructura con amortiguadores deberá tener ante ese sismo de diseño.

### Paso 4. Determinación de la disposición y ubicación de los amortiguadores

Se recomienda distribuir los amortiguadores de tal manera que se genere una simetría en planta, evitando excentricidades entre el centro de masa y el centro de rigidez. Además, la distribución se deberá mantener constante en toda la altura, aunque puede haber pisos sin amortiguadores por piso para evitar un sobredimensionamiento.

Se recomienda que en ambas direcciones se ubiquen como mínimo dos dispositivos amortiguadores para que puedan aportar suficiente amortiguamiento y que ningún amortiguador se sobre esfuerce.

### Paso 5. Determinación del amortiguamiento viscoso $\beta_{visc}$

Para obtener el amortiguamiento viscoso primero se hallará un factor B, que relaciona la deriva máxima con la deriva objetivo. Este factor permitirá determinar el amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$  mediante la fórmula de Newmark, que es una relación semilogarítmica entre las derivas y el amortiguamiento efectivo:

$$\frac{\text{Deriva Máxima}}{\text{Deriva Objetivo}} = B = \frac{2.31 - 0.41 * \ln(5)}{2.31 - 0.41 * \ln(\beta_{eff})} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

El amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$  corresponde al amortiguamiento brindado por la estructura y los amortiguadores. Por lo tanto, para obtener el amortiguamiento viscoso  $\beta_{visc}$  brindado por los amortiguadores, será necesario restar el amortiguamiento brindado por la estructura que equivale al 5% del crítico:

$$\beta_{visc} = \beta_{eff} - 5\% \quad (\text{Ec. 2.27})$$

### Paso 6. Estimación del exponente de velocidad $\alpha$

El exponente de velocidad es inicialmente estimado por el proyectista acorde a la reacción del dispositivo que desee obtener. Siempre será menor que 1 para amortiguadores no lineales. Para facilidades de diseño se puede trabajar con amortiguadores lineales, ya que

como se expuso en el Capítulo I, no existen grandes diferencias entre uno lineal y uno no lineal. En esta tesis, se trabajará con amortiguadores lineales.

### Paso 7. Cálculo del coeficiente de amortiguamiento $C$

Para el cálculo del coeficiente de amortiguamiento se asume que todos los disipadores en la estructura tienen las mismas propiedades, así el coeficiente  $C$  para amortiguadores lineales podrá obtenerse de esta manera:

$$C = \frac{\beta_{visc} * 4\pi \sum_i m_i \phi_i^2}{T \sum_i \phi_{ri}^2 \cos^2 \theta_i} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

Esta ecuación fue deducida a partir de la Ec. 1.8, donde:

$\beta_{visc}$  = Amortiguamiento viscoso objetivo.

$T$  = Período de la estructura sin amortiguadores

$\phi$  = Desplazamiento máximo de cada piso

$\phi_{ri}$  = Desplazamiento relativo máximo de cada piso

$\theta_i$  = Ángulo de inclinación del disipador con respecto a la horizontal

Los valores de  $\phi_i$  y de  $\phi_{ri}$  se obtendrán a partir de los resultados del análisis tiempo historia de la estructura sin amortiguadores.

### Paso 8. Cálculo de la rigidez del brazo metálico $K$

Para conectar los amortiguadores con la estructura se emplean brazos metálicos en posición diagonal. Estos brazos poseen una rigidez axial  $K$ , cuyo valor debe ser suficiente para que los brazos no se deformen frente a sollicitaciones sísmicas, y permitan un adecuado performance del amortiguador.

$$K = \frac{EA}{L} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

donde:

$E$  = módulo de elasticidad del material ( $t/m^2$ )

$A$  = área de la sección del brazo metálico ( $m^2$ )

$L$  = longitud del brazo metálico (t)

### Paso 9. Evaluación de las nuevas derivas

Se realiza un análisis tiempo-historia a la estructura con amortiguadores para evaluar si las derivas máximas de entrepiso obtenidas son menores a la deriva objetivo definida en el Paso 3. Si las derivas no cumplieren con la deriva objetivo, se recomienda variar la cantidad y disposición de los amortiguadores.

### Paso 10. Verificación del amortiguamiento viscoso $\beta_{visc}$

Para verificar el amortiguamiento viscoso obtenido en el Paso 5, primero se debe determinar el amortiguamiento efectivo, siguiendo las especificaciones de la ASCE-2010 en donde se recomienda someter a la estructura a una función tipo pulso. Al aplicar esta función a la estructura se obtendrá una curva de desplazamiento vs tiempo muy similar al

de un movimiento libre amortiguado, y con la cual se podrá obtener el amortiguamiento en la estructura.

En la Figura 2.6 y Figura 2.7 se muestran, respectivamente, un ejemplo de función tipo pulso y un ejemplo de movimiento libre amortiguado.

## Función Pulso

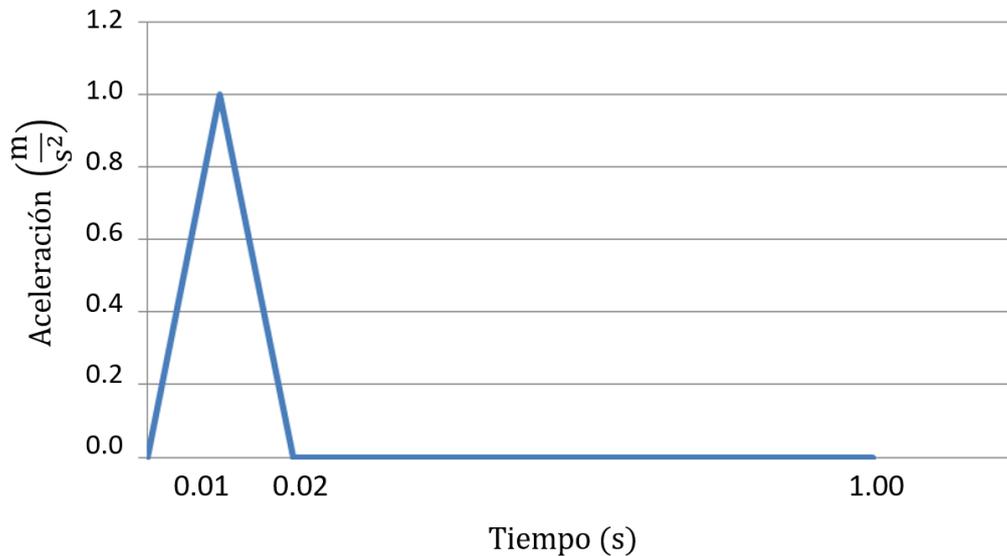


Figura 2.6. Ejemplo de una Función pulso. Fuente: Elaboración Propia

Los valores de la función tipo pulso pueden variar, sin embargo lo que importa es generar un movimiento similar al libre amortiguado. Así, si los valores de la función pulso se incrementan, la gráfica que resulta se incrementará proporcionalmente y no afectará al valor de amortiguamiento efectivo.

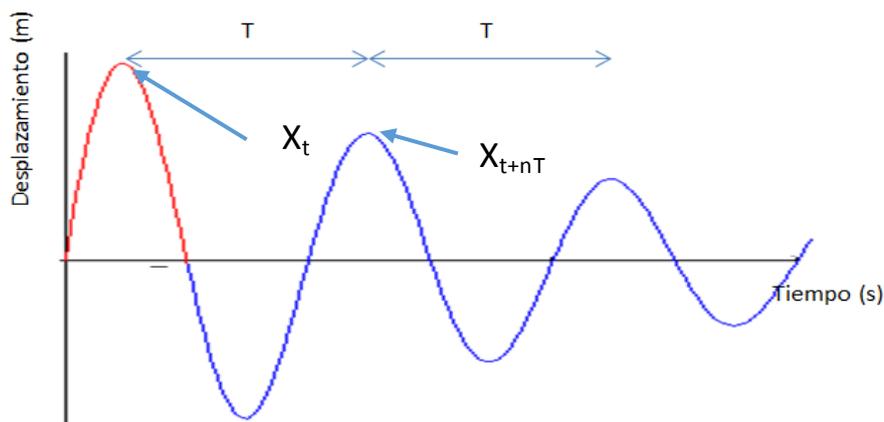


Figura 2.7. Ejemplo de una vibración libre amortiguada.

A partir de los datos obtenidos con la Figura 2.7 se puede obtener el amortiguamiento efectivo con la fórmula del decremento logarítmico:

$$\ln \left( \frac{x_t}{x_{(t+nT)}} \right) \approx \frac{2\pi n \beta_{eff}}{\sqrt{1 - \beta_{eff}^2}} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

donde:

$\beta_{eff}$  = Amortiguamiento efectivo de la estructura utilizando los amortiguadores.

$X_t$  = Desplazamiento en el tiempo “t” de vibración. (m)

$X_{t+nT}$  = Desplazamiento en el tiempo “t + nT” de vibración. (m)

n = Número de ciclos entre los dos desplazamientos máximos considerados

T = Duración del ciclo.

y a partir del  $\beta_{eff}$  se puede obtener el  $\beta_{visc}$  restándole el 5% del amortiguamiento crítico proporcionado por los elementos de concreto armado (Ecuación 2.27). Si el valor obtenido de  $\beta_{visc}$  es muy cercano al obtenido en el Paso 5, se dará por concluido el proceso iterativo; si no es cercano, se empezará todo a partir del Paso 4, considerando otra distribución de amortiguadores. Es importante tener en cuenta que con la Ecuación 2.27 el valor de  $\beta_{eff}$  se obtiene directamente en porcentaje, a diferencia de la Ecuación 2.30 que se obtiene en decimales.

### Paso 11. Diseño de los dispositivos de amortiguación y conexiones metálicas

Luego de realizar el análisis tiempo-historia, se obtienen los esfuerzos de compresión y tracción a los que estarán expuestos los amortiguadores. Con estos valores se escogerá un tipo de amortiguador que pueda resistir dichas cargas. Para esto es necesario contar con información proporcionada por el fabricante tal como las características físicas del amortiguador y el coeficiente de amortiguamiento C del fluido viscoso. En la Figura 2.8, se presenta un ejemplo de las características de un tipo de amortiguador Taylor, en donde se muestran la fuerza resistente (kip), las dimensiones físicas del dispositivo que contiene el fluido y el pistón (inches), y el peso del amortiguador (lbs).

Entre las características físicas que se muestra en la Figura 2.7 se tienen: los diámetros de los anclajes, las distancias entre anclajes, el diámetro y la longitud del cilindro que contiene al fluido viscoso. Estas especificaciones deberán tomarse en cuenta para el anclaje de los amortiguadores con la estructura.

Asimismo, es importante que en el brazo metálico utilizado se verifique que las fuerzas obtenidas cumplan con las Ecuaciones 2.31 y 2.32, tanto para tracción como para compresión respectivamente.

$$\phi T_n = \phi F_y * A_g > T_u \quad (\text{Ec. 2.31})$$

$$\phi P_n = \phi F_{cr} * A_g > P_u \quad (\text{Ec. 2.32})$$

$\phi$  = Factor de reducción (0.9)

$T_n$  = Tensión nominal (t)

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia ( $t/m^2$ )

$A_g$  = Área bruta de la sección del brazo metálico. ( $m^2$ )

$T_u$  = Tensión última del disipador (Fuerza de amortiguamiento) (t)

$P_n$  = Compresión nominal (t)

$F_{cr}$  = Esfuerzo crítico a compresión del material del brazo metálico ( $t/m^2$ )

$P_u$  = Compresión última del dissipador (Fuerza de amortiguamiento) (t)

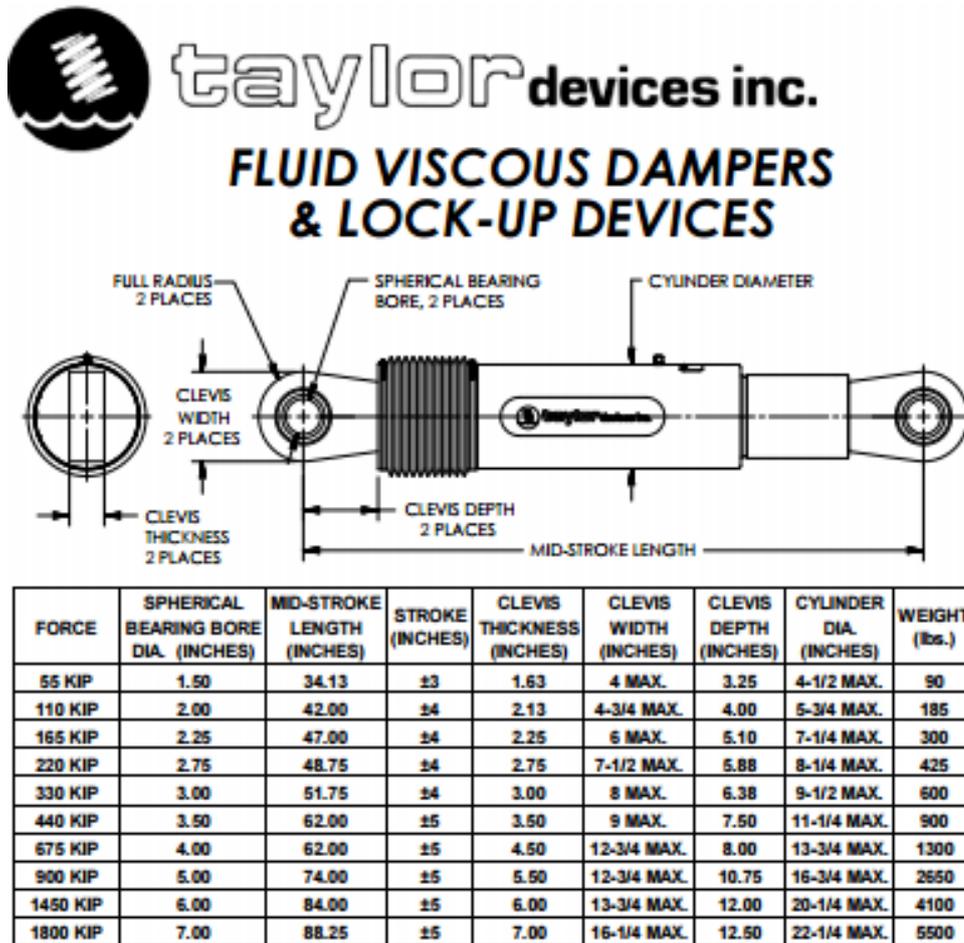


Figura 2.8. Características de los Amortiguadores Taylor. Fuente: Taylor Devices.

### 2.2.2. Diseño de la estructura con amortiguadores

Para el diseño de la superestructura se debe tener en cuenta que las fuerzas que ingresan a la estructura de concreto armado en la sollicitación sísmica son diferentes en comparación a las fuerzas que ingresan a esa misma estructura, pero con un sistema de amortiguamiento. Estas fuerzas podrán ser obtenidas luego de la modelación con algún software como el ETABS o el SAP2000. En muchos casos las fuerzas presentes en la estructura disminuyen de tal manera que se podrían variar algunas dimensiones. Sin embargo, es común no disminuir significativamente las dimensiones que se utilizarían para un diseño convencional sin amortiguadores por cuestión de seguridad, en caso los amortiguadores lleguen a tener problemas en su funcionamiento por algún daño en sus componentes ante sismos previos.

## Capítulo III

### Ejemplo práctico para analizar estructuras con protección sísmica

En este capítulo se explica detalladamente por medio de un ejemplo práctico, el proceso para diseñar los aisladores y amortiguadores en un modelo de estructura. Asimismo, se empleará el análisis tiempo-historia del programa SAP2000 para analizar el modelo con los dispositivos de protección sísmica incorporados.

El modelo que se analizará tendrá seis variantes: la primera no tendrá ninguna modificación, es decir se trabajará con una estructura convencional sin protección sísmica; la segunda variante utilizará aisladores en la base; y las cuatro variantes restantes utilizarán amortiguadores con distintas configuraciones de ubicación.

#### 3.1. Descripción de la estructura y de los parámetros sísmicos a utilizar

##### 3.1.1. Características de la estructura

La estructura que se analizará en este capítulo es de concreto armado con un sistema aporticado. El concreto tiene una resistencia a compresión  $f'_c$  de  $280 \text{ kg/cm}^2$  y un módulo de elasticidad  $E$  igual a  $2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ . La edificación cuenta con cuatro pisos, con una altura constante de entrepiso igual a tres metros. El edificio tiene un uso de oficinas y una azotea en el último nivel. Se realizó un pre-dimensionamiento de las columnas utilizando la carga vertical y una carga lateral equivalente al 30% de la carga muerta. Con este pre-dimensionamiento se obtuvo una primera estimación de la deriva de entrepiso. Dado que se busca medir la eficiencia de los dispositivos para mejorar el comportamiento estructural de la estructura a analizar, se iteraron las dimensiones de las columnas hasta que la deriva máxima de entrepiso estuviese en el rango de 0.01, que es superior al límite de 0.007 establecido por la norma E-30. Para el análisis se trabajará con una planta cuadrada de  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  ( $900 \text{ m}^2$ ), dividiéndose en cinco vanos en ambos sentidos. En la Figura 3.1 se ilustra la vista en planta del modelo; y en la Figura 3.2, una vista tridimensional del mismo.

Tal como se aprecia en la Figura 3.2, el empotramiento en la base es la condición de borde en la modelación del SAP2000 para los modelos sin aisladores. Por otro lado, como se menciona en el Acápite 2.1.4, el sistema con aisladores se idealiza sobre apoyos deslizables con una rigidez igual a la rigidez lateral de los aisladores. Este cambio en la condición de borde ocasiona que, en la base de las columnas de un modelo con aisladores se produzcan momentos flectores y cortantes menores que en un modelo sin aisladores. Además, como se mencionó anteriormente en el Acápite 2.1.4, los momentos en la base de las columnas no se transmiten a los aisladores; puesto que estos momentos son tomados por el sistema de losa y vigas que se ubica encima del sistema de aisladores y que conecta a las columnas en su base.



Figura 3.1. Planta típica del modelo. Fuente: Elaboración propia

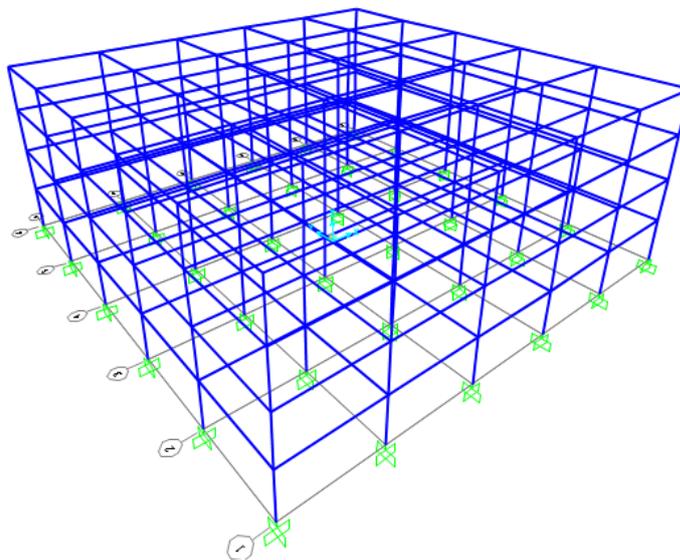


Figura 3.2. Vista tridimensional del modelo. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.1 se muestran las dimensiones de los elementos estructurales que conforman el modelo, que servirán posteriormente para realizar el metrado de carga de los elementos. En todos los niveles se trabaja con una losa aligerada en una dirección de 20 cm de espesor. Para trabajar en el modelo del SAP2000 estas losas se idealizan como un diafragma rígido en cada entrepiso, y la carga distribuida correspondiente a su peso se aplica sobre las vigas de apoyo.

Tabla 3.1. Detalles de las dimensiones de las columnas y vigas. Elaboración: Propia

Piso	Dimensiones Columnas (cm)	Dimensiones Vigas (cm)
1	40x40	35x35
2	40x40	35x35
3	35x35	35x35
4	35x35	35x35

### a) Cargas verticales

#### a.1) Carga muerta

El peso propio de los elementos estructurales modelados en el SAP2000 (vigas y columnas) lo calcula el propio software. Para eso se debe indicar en el programa que los elementos serán de concreto armado con una densidad de  $2400 \text{ kg/m}^3$ .

Las losas son aligeradas de 20 cm de espesor y son representadas como cargas muertas de  $300 \text{ kg/m}^2$ .

Se considera una carga de  $100 \text{ kg/m}^2$  que idealiza la carga del piso terminado.

#### a.2) Carga viva

Según la Norma E-020, para un uso de oficinas se considera una sobrecarga de  $250 \text{ kg/m}^2$ ; y para la azotea, una sobrecarga de  $100 \text{ kg/m}^2$ .

Se considera una tabiquería móvil de altura completa, la cual se representa como carga viva de  $100 \text{ kg/m}^2$ .

### b) Cargas laterales

Se despreciarán los efectos de las cargas de viento puesto que la edificación no tiene una altura considerable. Para el cálculo de las fuerzas sísmicas, primero se aplican registros de aceleraciones sísmicas en la base de la estructura, utilizando el software SAP2000. Así, el software calcula la magnitud de las fuerzas sísmicas multiplicando la aceleración aplicada en la base por la masa participativa de la estructura.

### 3.1.2. Distribución de los dispositivos de protección sísmica

Para la distribución de los aisladores, se utilizará uno debajo de cada columna. Como son 36 columnas, habrá 36 aisladores en la base. En cambio, los amortiguadores se colocarán en los pórticos exteriores de la estructura y se usarán cuatro configuraciones de ubicación de este dispositivo, las cuales son mostradas desde la Figura 3.3 a la Figura 3.6. Es importante mencionar que a pesar de utilizar distinto número de amortiguadores en cada configuración, se consideró que la capacidad de carga del sistema de amortiguamiento resulta ser la misma en todas las configuraciones.

Es preciso indicar que de la Figura 3.3 a la Figura 3.6 se presentan los amortiguadores colocados en un pórtico exterior. Sin embargo, puesto que se requiere emplear los amortiguadores en ambas direcciones para proteger a la estructura, en total habrá cuatro veces la cantidad de amortiguadores mostrados en cada figura.

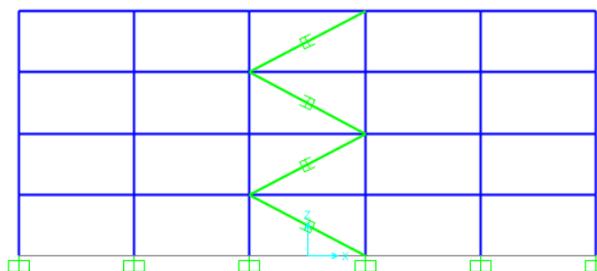


Figura 3.3. Configuración 1: Amortiguadores en el vano central (dos amortiguadores por piso en cada dirección). Fuente: Elaboración propia.

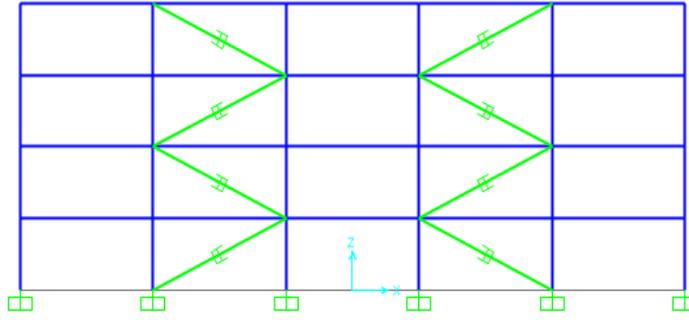


Figura 3.4. Configuración 2: Amortiguadores en el segundo y cuarto vano (cuatro amortiguadores por piso en cada dirección). Fuente: Elaboración propia.

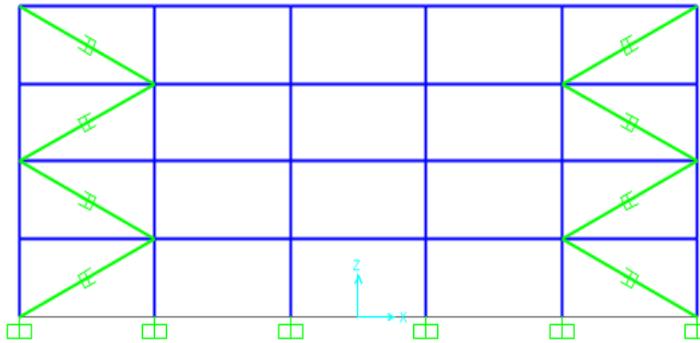


Figura 3.5. Configuración 3: Amortiguadores en el primer y quinto vano (cuatro amortiguadores por piso en cada dirección). Fuente: Elaboración propia.

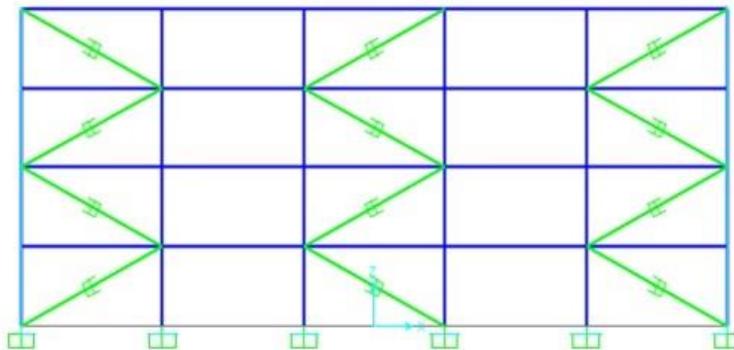


Figura 3.6. Configuración 4: Amortiguadores en el primer, tercer y quinto vano (seis amortiguadores por piso en cada dirección). Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.3. Factores correspondientes al espectro de aceleraciones

Los factores sísmicos que serán utilizados para el análisis y diseño son los indicados por la norma peruana E-030, y corresponden a la zona 4 de mayor sismicidad en el Perú. En la Figura 3.7 se presenta la zonificación sísmica para el Perú. Estos factores fueron descritos en el Acápite 2.1.1.2.

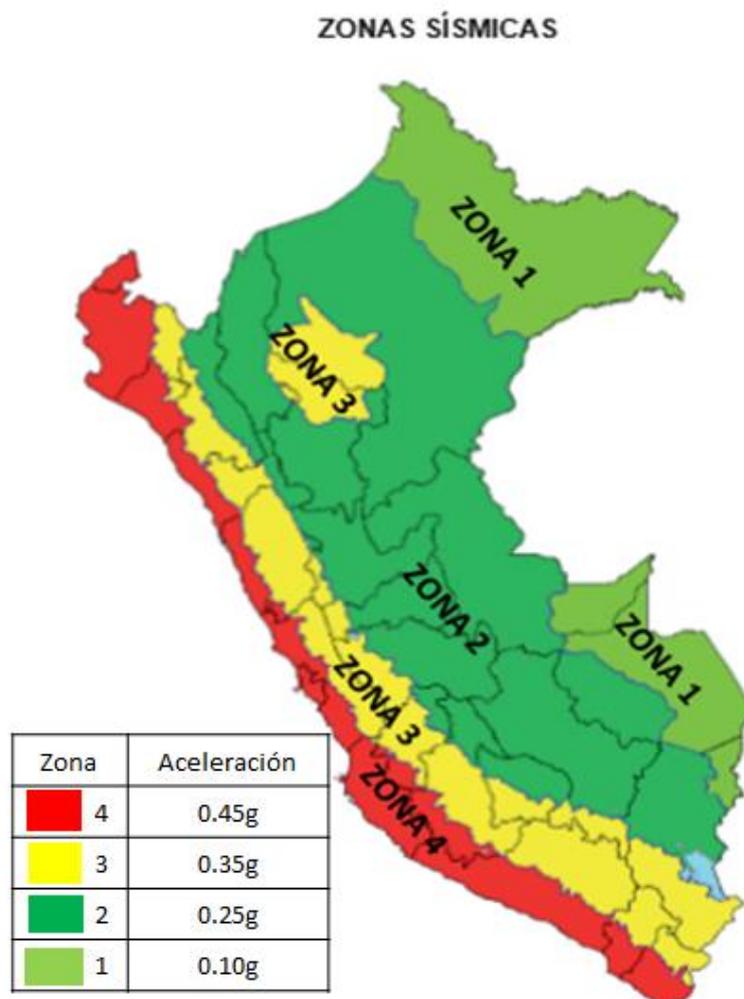


Figura 3.7. Mapa del factor Z. Fuente: Norma E-030.

Los factores que se emplearán en el análisis serán los siguientes:

**Factor de zona Z:** Es la aceleración máxima del terreno con una probabilidad del 10% de ser excedida en 50 años. Para la zona 4 ese valor es de 0.45g, siendo  $g=9.81\text{m/s}^2$ . Además, se debe tener en cuenta que para el diseño de los aisladores se utilizará el sismo máximo posible cuya aceleración máxima del terreno es de 0.675g para la zona 4, con una probabilidad del 10% de ser excedida en 100 años.

**Factor de Suelo S:** Los valores de factor de suelo de la Norma E-030 se muestran en la Tabla 3.2. Considerando un tipo de suelo  $S_3$ , que corresponde a un suelo blando, se obtendrá un factor de suelo 1.10.

Tabla 3.2 Factor de Suelo "S". Fuente: Norma E-030.

Zona \ Suelo	Factor de suelo "S"			
	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
$Z_4$	0.80	1.00	1.05	1.10
$Z_3$	0.80	1.00	1.15	1.20
$Z_2$	0.80	1.00	1.20	1.40
$Z_1$	0.80	1.00	1.60	2.00

Coeficiente de uso e importancia U: Las edificaciones de oficinas se encuentran dentro de la categoría de edificaciones comunes. Por lo tanto, el factor U equivale a 1.

Coeficiente de reducción sísmica R: El coeficiente de reducción sísmica correspondiente a un edificio apertado es 8; y para edificaciones con aisladores, según FEMA274 y la Norma Chilena 2745, el factor será 2. Cabe indicar que, a pesar que el factor de reducción sísmica para edificaciones sin dispositivo es 4 veces mayor al factor de reducción sísmica para edificaciones con aisladores, esto no implica que la cortante basal con aisladores sea 4 veces la cortante basal sin dispositivo. Esto sucede porque para el caso de los modelos con aisladores, la cortante basal se obtiene con las propiedades del sistema de aislación (Ecuación 2.25); mientras que, para el caso del sistema sin dispositivo, la cortante basal se obtiene multiplicando el peso de la estructura por los factores ZUCS de la norma peruana. Como resultado final, la cortante basal para la estructura con aisladores será menor. Por otra parte, cabe indicar que según la norma peruana, el factor R no se toma en cuenta para el análisis tiempo-historia.

Factor de amplificación sísmica C: Acorde con la norma E-030, para calcular el factor de amplificación sísmica se deberá calcular previamente el periodo fundamental de la estructura T. En nuestro caso este cálculo lo realizará el software SAP2000. Asimismo, el periodo  $T_p$  y el periodo  $T_L$  son los brindados por la norma peruana E-030, siendo:

$T_p$  = periodo que define la plataforma del factor C, para la zona 4. Su valor es 1 s.

$T_L$  = periodo que define el inicio de la zona del factor C con desplazamiento constante. Para la zona 4 su valor es 1.6 s.

Las expresiones de cálculo indicadas en la norma E-030 son:

Para  $T < T_p$ :  $C = 2.5$

Para  $T_p < T < T_L$ :  $C = 2.5 * \left(\frac{T_p}{T}\right)$

Para  $T > T_L$ :  $C = 2.5 * \left(\frac{T_p * T_L}{T^2}\right)$

### 3.1.4. Registros sísmicos

El análisis tiempo-historia se realizará utilizando cinco registros de sismos reales, tal como lo indica la norma E-030. Estos registros fueron obtenidos del CISMID-UNI y han sido normalizados de tal manera que la máxima aceleración sea la esperada en el sitio,  $z = 0.45g$ . El ingreso de los registros sísmicos en el SAP2000 se detalla en el Anexo C.

De la Figura 3.8 a la Figura 3.12 se presentan los acelerogramas normalizados que serán utilizados en el análisis tiempo-historia.

- Sismo Tarapacá, Chile - 13 de junio de 2005  
Magnitud: 7.2 ML  
Máxima Aceleración: 138.5 cm/s<sup>2</sup>  
Acelerograma escalado:

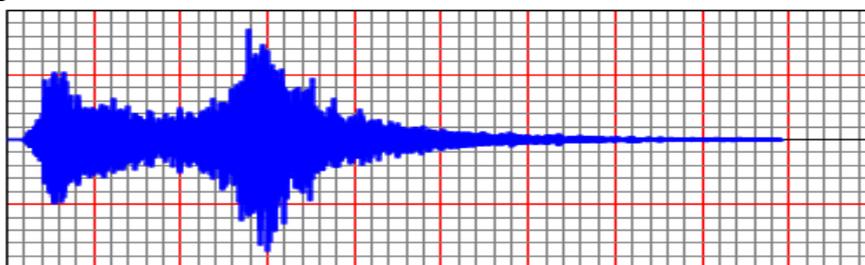


Figura 3.8. Acelerograma Sismo Tarapacá. Fuente: CISMID - UNI. Elaboración: Propia.

- Sismo Huánuco, Perú - 24 de agosto de 2011  
Magnitud: 7.0 ML  
Máxima Aceleración: 6.93 cm/s<sup>2</sup>  
Acelerograma escalado:

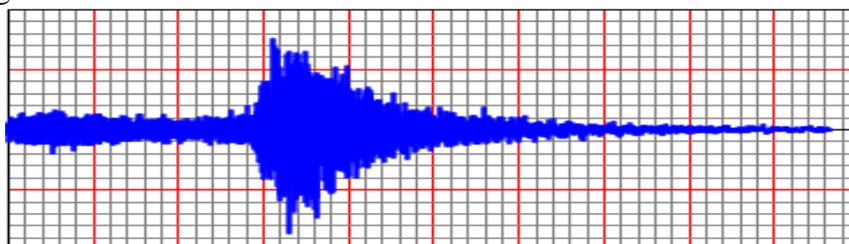


Figura 3.9. Acelerograma Sismo Huánuco. Fuente: CISMID – UNI. Elaboración: Propia.

- Sismo Pisco, Perú - 15 de agosto de 2007  
Magnitud: 7 ML  
Máxima Aceleración: 68.79 cm/s<sup>2</sup>  
Acelerograma escalado:

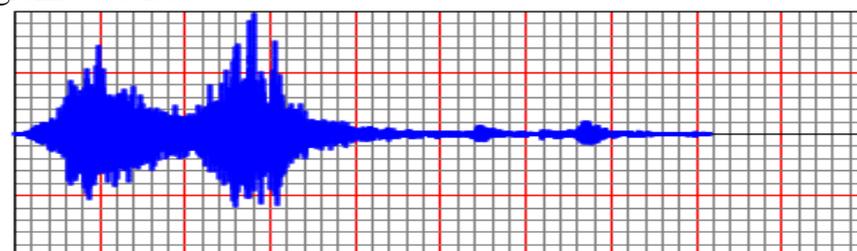


Figura 3.10. Acelerograma Sismo Pisco. Fuente: CISMID - UNI. Elaboración: Propia.

- Sismo Ica, Perú - 25 de setiembre de 2013  
Magnitud: 6.9 ML  
Máxima Aceleración: 10.35 cm/s<sup>2</sup>  
Acelerograma escalado:

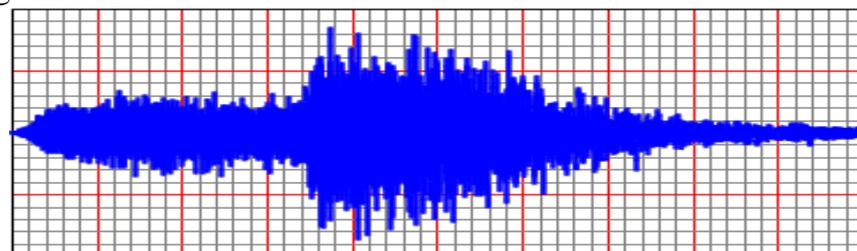


Figura 3.11. Acelerograma Sismo Ica. Fuente: CISMID - UNI. Elaboración: Propia.

- Sismo Piura, Perú - 23 de julio de 2014
- Magnitud: 5ML
- Máxima Aceleración: 1.64 cm/s<sup>2</sup>
- Acelerograma escalado:

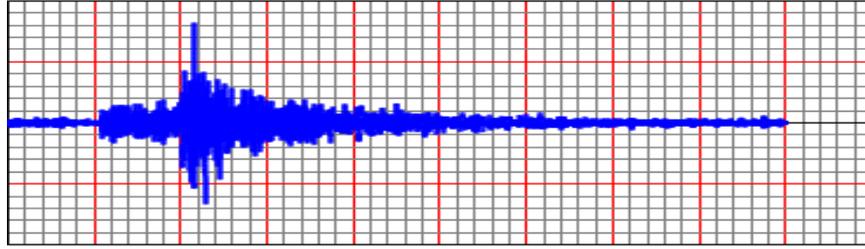


Figura 3.12. Acelerograma Sismo Piura. Fuente: CISMID - UNI. Elaboración: Propia.

### 3.2. Análisis y diseño

En este acápite se realizará el análisis tiempo historia del modelo con las siguientes variantes: a) sin ningún dispositivo, b) con aisladores y c) con amortiguadores. Se aplicarán los procedimientos explicados en el Capítulo II para dimensionar los dispositivos de protección sísmica.

#### 3.2.1. Análisis de la estructura sin dispositivo sísmico

##### 3.2.1.1. Consideraciones

Las consideraciones para aplicar correctamente el procedimiento de análisis para una estructura sin dispositivo sísmico son las siguientes:

- Es importante configurar el modelo en el software SAP2000 para que la masa participativa sea calculada como estipula la norma E-30. Masa participativa = CM + 0.25 CV. Ver Anexo C.
- El peso propio de las columnas y de las vigas serán calculados por el software SAP2000.
- La carga muerta, correspondiente a la losa y al piso terminado, será representada como carga uniformemente distribuida y aplicada a las vigas, tanto en las vigas principales como en las vigas secundarias.
- La carga viva será representada como carga uniformemente distribuida, aplicada a las vigas, tanto en las vigas principales como en las vigas secundarias.
- Por último, es importante asignar un diafragma rígido por piso para que todos los elementos de un mismo piso se desplacen uniformemente.

##### 3.2.1.2. Resultados del análisis

En primer lugar, se obtuvo el período fundamental de vibrar utilizando la función “*Modal*” en el SAP2000, en lugar de la Ecuación 2.2, dado que con el software se obtendrá un valor más exacto del periodo. Además, otra razón de usar el SAP2000 para obtener el periodo es que todos los parámetros de estudio como el desplazamiento lateral, la deriva y la cortante basal fueron obtenidos con este software al realizar el análisis tiempo-historia. El período fundamental es un indicador de la rigidez de la estructura y su valor servirá de referencia cuando se analicen las estructuras con amortiguadores y aisladores. Para este caso, el periodo de la estructura sin dispositivo sísmico resultó:

$$T = 0.989 \text{ s}$$

Además, con ayuda del SAP2000 se obtuvieron los desplazamientos horizontales máximos que tuvo cada piso de la estructura ante la aplicación del sismo. Estos desplazamientos se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Desplazamientos horizontales máximos de cada piso, correspondientes a cada sismo. Fuente: Elaboración Propia

Piso	Desplazamientos horizontales máximos para cada sismo (m)				
	Pisco	Piura	Ica	Huánuco	Tarapacá
1	0.0237	0.0119	0.0193	0.0073	0.0088
2	0.0603	0.0265	0.0513	0.0174	0.0211
3	0.0958	0.0473	0.0880	0.0245	0.0330
4	0.1256	0.0627	0.1092	0.0290	0.0381

Como se puede apreciar en esta tabla, el sismo de Pisco ocasiona los mayores desplazamientos, siendo así el más perjudicial de los cinco registros analizados.

Por otra parte, el parámetro más importante del análisis es la deriva máxima de entrepiso. Este parámetro se obtiene dividiendo el desplazamiento relativo de entrepiso con la altura correspondiente del entrepiso. En la norma peruana se establece un límite de 0.007 para estructuras de concreto armado. En la Tabla 3.4 se presentan las derivas máximas de entrepiso obtenidas en cada sismo.

Tabla 3.4. Derivas máximas del modelo para cada sismo. Fuente: Elaboración Propia

Piso	Derivas máximas de entrepiso para cada sismo				
	Pisco	Piura	Ica	Huánuco	Tarapacá
1	0.0079	0.0040	0.0064	0.0024	0.0029
2	0.0122	0.0049	0.0107	0.0034	0.0041
3	0.0118	0.0069	0.0122	0.0024	0.0040
4	0.0099	0.0051	0.0071	0.0015	0.0017

Como se muestra en esta tabla, las dimensiones de los elementos estructurales utilizados no evitan que se supere la deriva máxima permitida (0.007) para los sismos de Pisco e Ica. En consecuencia, será necesario mejorar el comportamiento de la estructura, y una opción será la utilización de dispositivos de protección sísmica.

Por otro lado, se obtuvo la cortante basal del modelo con un análisis tiempo-historia realizado por el software. En la Tabla 3.5 se presentan los valores de cortantes basales ocasionadas por cada sismo.

Tabla 3.5. Cortante basal máxima para la primera variante del modelo (sin protección sísmica). Fuente: Elaboración Propia

Edificio	Cortante basal (t)
Sismo Pisco	295
Sismo Piura	170
Sismo Ica	230
Sismo Huánuco	130
Sismo Tarapacá	105

De igual manera que en las derivas, el sismo de Pisco es el más perjudicial porque presenta una cortante basal mayor (295 t). Siendo éstos los resultados, se trabajarán las demás variantes del modelo solamente con el sismo de Pisco.

### 3.2.2. Análisis y diseño con aisladores en la base

#### 3.2.2.1. Diseño de los aisladores

Para el diseño de los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo se utilizará un aislador debajo de cada columna, por lo cual habrá 36 aisladores en total. Los LRB tendrán un módulo de corte de caucho  $G = 54 t/m^2$ , un esfuerzo máximo permisible del caucho  $\sigma_{m\acute{a}x\ per m} = 815 t/m^2$ , y un esfuerzo de fluencia del núcleo de plomo  $\sigma_y = 1020 t/m^2$ .

Por otra parte, será necesaria la construcción de un sistema de elementos de concreto armado que garantice un diafragma rígido a nivel de subestructura. Para esto se consideró un sistema conformado por vigas de 25x25 cm. En la modelación con SAP2000 también se consideró una losa maciza con espesor de 20 cm en la base como si hubiese un piso adicional.

A continuación, se presenta el procedimiento para el dimensionamiento de los aisladores:

#### Paso 1. Cálculo del factor de zonificación sísmica para un sismo máximo posible

Como se mencionó anteriormente, para el dimensionamiento de los aisladores se utilizará el sismo máximo posible o sismo que tiene 10% de probabilidad de ser excedido en 100 años. Para la Zona 4, el factor Z correspondiente tiene un valor igual a 0.675g. La obtención de este valor fue explicada en el Acápite 2.1.3.

#### Paso 2. Estimación de las propiedades de la estructura con aisladores

El periodo  $T_M$  se puede asumir inicialmente como 3 veces el periodo de la estructura sin aisladores, el cual es 0.989 s (Acápite 3.2.1.2). Por consiguiente el periodo  $T_M$  resulta:

$$T_M = 3 * 0.989 = 2.967 \text{ s}$$

El amortiguamiento efectivo de la estructura  $\beta_{eff}$  se puede suponer como 15% del amortiguamiento crítico. Y como en la Tabla 1.3 no se tiene un valor de  $\beta_{eff}$  igual al 15%, se realiza una interpolación lineal, y así se obtiene un factor  $B_M = 1.35$ .

#### Paso 3. Cálculo de la aceleración espectral de diseño y la aceleración espectral máxima posible.

Para calcular la aceleración espectral de diseño y la aceleración espectral máxima se utilizan los factores de la norma peruana E-030: Factor de zona sísmica (Z), tipo de suelo (S), importancia (U) y factor de amplificación sísmica (C).

$$Aceleración = Z * U * C * S$$

donde:

$$Z = 0.675g$$

$$U = 1$$

$$S = 1.1$$

$$C =$$

- a) Para  $T_M < T_P$ :  $C = 2.5$   
 b) Para  $T_P < T_M < T_L$ :  $C = 2.5 * \left(\frac{T_P}{T_M}\right)$   
 c) Para  $T_M > T_L$ :  $C = 2.5 * \left(\frac{T_P * T_L}{T_M^2}\right)$

donde se sabe que  $T_M = 2.967$  s;  $T_P = 1$  s; y  $T_L = 1.6$  s

Como en estructuras con aisladores lo común es tener altos valores de periodo, el factor C se calculará utilizando la condición c).

Paso 4. Cálculo del desplazamiento máximo  $D_M$  y desplazamiento máximo total  $D_{TM}$ .

Con la Ecuación 2.10 se obtiene el desplazamiento máximo.

$$D_M = \frac{(g/4\pi^2) * ZUCS * T_M}{B_M}$$

$$D_M = \frac{(9.81/4\pi^2) * 0.675 * 1 * (2.5 * \frac{1*1.6}{2.967^2}) * 1.1 * 2.967}{1.35} = 0.18 \text{ m}$$

Además, para obtener del desplazamiento total máximo se utilizará la Ecuación 2.11 que considera una excentricidad accidental.

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

siendo d y b las dimensiones en planta de la estructura; y, la distancia del centro de masa proyectado en planta hacia el aislador más alejado; y e, la excentricidad accidental equivalente al 5% de la dimensión mayor en planta. Para el modelo a analizar  $d = b = 30$  m;  $y = 15$  m; y  $e = 1.5$  m. Con estos valores resulta que  $D_{TM}$  es igual a:

$$D_{TM} = 0.18 * \left(1 + 15 * \frac{12 * 1.5}{30^2 + 30^2}\right) = 0.21 \text{ m}$$

Paso 5. Cálculo de la altura efectiva del aislador  $H_i$

La altura efectiva de caucho  $H_i$  se obtiene utilizando la Ecuación 2.12.

$$H_i > \frac{D_{TM}}{\gamma_s}$$

Para una deformación por corte  $\gamma_s$  igual a 1.5,  $H_i$  resulta:

$$H_i = \frac{0.21}{1.5} = 0.14 \text{ m}$$

Para evitar complicaciones constructivas se ajustó un valor de  $H_i$  igual a 15 cm.

Debido a que en la altura efectiva se tendrán láminas de caucho, cada una de 6 mm de espesor, se deberá calcular el número de láminas:

$$N^{\circ} = \frac{0.15 \text{ m}}{0.006 \text{ m}} = 25$$

Por lo tanto, la altura efectiva de caucho está compuesta por 25 láminas de caucho de 6 mm de espesor.

Paso 6. Cálculo del área neta o área efectiva del aislador

El área neta de caucho se obtiene con la Ecuación 2.14.

$$\text{Área neta} = \frac{P_{u,máx}}{\sigma_{máx perm}}$$

El valor del  $P_{u,máx}$  aplicado a cada aislador es igual a 105.7 t y corresponde a la carga última que recibe cada aislador utilizando una combinación de carga vertical igual a 1.25CM + 1.25 CV. Cabe indicar que esta combinación de carga brinda una primera estimación del área neta del aislador. Posteriormente, con los resultados del análisis tiempo-historia se podrá afinar a un valor de área requerida que considere las cargas verticales y laterales. El valor de  $P_{u,máx}$  se presenta en la Tabla D2 del Anexo D, cuyo procedimiento de cálculo se encuentra en dicho anexo. Asimismo, el  $\sigma_{máx perm}$  se estima como 815 t/m<sup>2</sup>, tal como se mencionó en el Capítulo II.

$$\text{Área neta} = \frac{105.7}{815} = 0.129 \text{ m}^2$$

Paso 7. Estimación de la capacidad de carga  $Q_d$

El valor de  $Q_d$  es estimado como el 6% de la masa participativa W que recibe cada aislador. El valor de W se presenta en la Tabla D2 del anexo D y es igual a 63.02 t, por tanto el 6 % de W resulta 3.78 t.

Paso 8. Cálculo del diámetro de plomo  $D_p$

El diámetro del núcleo de plomo se calcula con la Ecuación 2.15. Considerando un valor de  $\sigma_y$  igual a 1020 t/m<sup>2</sup>.

$$D_p = \sqrt{\frac{4 * Q_d}{\pi * \sigma_y}}$$

$$D_p = \sqrt{\frac{4 * 3.78}{\pi * 1020}} = 0.068 \text{ m}$$

Ajustando el valor del diámetro de plomo a 8 cm se deberá recalcular el valor de  $Q_d$ . Para esto se despeja el valor de  $Q_d$  de la Ecuación 2.15:

$$Q_d = \frac{\pi * \sigma_y * D_p^2}{4}$$

$$Q_d = \frac{\pi * 1020 * 0.08^2}{4} = 5.12 \text{ t}$$

siendo entonces el valor final de  $Q_d$  igual a 5.12 t.

Paso 9. Definición del diámetro del aislador a utilizar  $D_i$

Ahora que se tiene el valor del diámetro de plomo  $D_p$ , se puede obtener el diámetro del aislador  $D_i$  usando el área neta calculada en el Paso 6.

$$\text{Área neta} = \frac{(D_i^2 - D_p^2) * \pi}{4}$$

Para un  $P_{u,máx}$  igual a 105.7 t y un  $Q_d$  igual a 5.12 t, se escoge un valor comercial de  $D_i = 0.455\text{m}$ . (Ver Tabla 2.2). Con lo cual se obtiene una nueva área efectiva de  $0.1575\text{ m}^2$ .

Además, como recomendación se debe comprobar que se cumpla la Ecuación 2.16.

$$D_i/6 < D_p < D_i/3$$

$$0.075 < 0.08 < 0.15 \text{ (Cumple)}$$

Paso 10. Cálculo de la rigidez secundaria  $K_d$

Esta rigidez la aporta el caucho, y se emplea la Ecuación 2.17 para su obtención.

$$K_d = \frac{\pi * (D_i^2 - D_p^2) * G}{4 * H_i}$$

Para un módulo de corte del caucho  $G = 54\text{ t/m}^2$

$$K_d = \frac{\pi * (0.455^2 - 0.08^2) * 54}{4 * 0.15} = 56.72\text{ t/m}$$

Paso 11. Cálculo de la rigidez efectiva  $K_{eff}$

La rigidez efectiva se obtiene con la Ecuación 2.18.

$$K_{eff} = \frac{Q_d}{D_{TM}} + K_d$$

Usando los valores de  $Q_d$ ,  $D_{TM}$  y  $K_d$  calculados en los pasos anteriores, la ecuación resulta:

$$K_{eff} = \frac{5.12}{0.21} + 56.72 = 81.10\text{ t/m}$$

Paso 12. Cálculo del amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$

Este amortiguamiento se obtendrá con la formulación propuesta por el FEMA, presentada en la Ecuación 2.19.

$$\beta_{eff} = \frac{4Q_d * (D_{TM} - 1.1Q_d/(10K_d))}{2\pi * K_{eff} * D_{TM}^2}$$

Usando los valores de  $Q_d$ ,  $D_{TM}$ ,  $K_d$  y  $K_{eff}$  calculados en los pasos anteriores, el amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$  resulta:

$$\beta_{eff} = \frac{4 * 5.12 * (0.21 - 1.1 * 5.12/567)}{2\pi * 81.1 * 0.21^2} = 0.18$$

Paso 13. Cálculo del periodo  $T_M$

El periodo  $T_M$  experimental se calcula utilizando la Ecuación 2.20:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_M * g}}$$

donde M es la masa total de la estructura que es igual a 2268.6 t (Ver Tabla D2 en el Anexo D); y  $K_M$  es la rigidez de todo el sistema de aisladores, igual a los 36 aisladores multiplicado por  $K_d$ . Entonces:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{2268.6}{(36 * 56.72) * 9.81}} = 2.11 \text{ s}$$

Paso 14. Verificación de los valores obtenidos

En este paso se comparan el amortiguamiento efectivo  $B_{\text{eff}}$  y el periodo  $T_M$  propuestos en el Paso 2, con los valores calculados en los Pasos 12 y 13.

$$\begin{aligned} \beta_{\text{eff}} \text{ propuesto} &= 0.15 \neq \beta_{\text{eff}} \text{ calculado} = 0.18 \\ T_M \text{ propuesto} &= 2.97 \text{ s} \neq T_M \text{ calculado} = 2.11 \text{ s} \end{aligned}$$

Los valores propuestos no se asemejan a los calculados, por consiguiente se debe realizar un procedimiento iterativo hasta obtener los valores reales de  $T_M$  y  $\beta_{\text{eff}}$  antes de pasar al Paso 15. Es decir, se reiniciará el procedimiento de cálculo desde el Paso 3, pero tomando los nuevos valores de  $\beta_{\text{eff}}$  y  $T_M$  obtenidos en los pasos 12 y 13 respectivamente.

En la Tabla 3.6 se presentan los resultados calculados al realizar la primera iteración.

Tabla 3.6. Resultados de la primera iteración. Elaboración: Propia

Parámetro	Primera Iteración
$T_M$ (s)	2.11
$\beta_{\text{eff}}$	0.18
$B_M$	1.44
$D_M$ (m)	0.24
$D_{TM}$ (m)	0.28
$H_i$ (m)	0.18
$D_i$ (m)	0.455
$D_p$ (m)	0.08
$Q_d$ (t)	5.12
$K_d$ (t/m)	47.27
$K_{\text{eff}}$ (t/m)	65.66
$K_i$ (t/m)	472.72
$F_y$ (t)	5.64
$T_M'$ (s)	2.32
$\beta_{\text{eff}}'$	0.18

Los resultados de la primera iteración muestran que el valor de  $\beta_{\text{eff}}$  ya convergió, pero el valor de  $T_M$  sigue teniendo una diferencia:

$$\begin{aligned}\beta_{\text{eff}} = 0.18 &= \beta_{\text{eff}}' = 0.18 \\ T_M = 2.11 \text{ s} &\neq T_M' = 2.32 \text{ s}\end{aligned}$$

Entonces será necesario realizar una segunda iteración utilizando los valores de  $\beta_{\text{eff}}$  y  $T_M$  obtenidos en la primera iteración. En la Tabla 3.7 se muestran los valores calculados al realizar la segunda iteración.

Tabla 3.7. Resultados de la segunda iteración Elaboración: Propia

Parámetro	Segunda Iteración
$T_M'$ (s)	2.32
$\beta_{\text{eff}}'$	0.18
$B_M$	1.44
$D_M$ (m)	0.22
$D_{TM}$ (m)	0.25
$H_i$ (m)	0.18
$D_i$ (m)	0.455
$D_p$ (m)	0.08
$Q_d$ (t)	5.12
$K_d$ (t/m)	47.27
$K_{\text{eff}}$ (t/m)	67.41
$K_i$ (t/m)	472.72
$F_y$ (t)	5.64
$T_M''$ (s)	2.32
$\beta_{\text{eff}}''$	0.18

Los resultados de la segunda iteración muestran que los valores de  $\beta_{\text{eff}}$  y  $T_M$  ya convergieron, por lo que el procedimiento finaliza con la segunda iteración.

$$\begin{aligned}\beta_{\text{eff}}' = 0.18 &= \beta_{\text{eff}}'' = 0.18 \\ T_M' = 2.32 \text{ s} &= T_M'' = 2.32 \text{ s}\end{aligned}$$

El resumen de las propiedades del aislador es:

$$\begin{aligned}D_i &= 0.455 \text{ m} \\ D_p &= 0.08 \text{ m} \\ K_d &= 47 \text{ t/m} \\ K_{\text{eff}} &= 67 \text{ t/m} \\ \beta_{\text{eff}} &= 0.18\end{aligned}$$

Como ya se obtuvieron los valores definitivos de las propiedades de los aisladores, se procede a realizar el Paso 15.

#### Paso 15. Cálculo de la altura total del aislador $H_T$

Se utilizará la Ecuación 2.21 para adicionar a la altura de caucho las placas de acero. En el Paso 5 se definió que se utilizarán 25 placas de caucho, por lo que se requieren de 24 placas de acero para intercalarse con las placas de caucho. El espesor de cada placa de acero  $t_{\text{acero}}$  es de 3 mm y la altura total de caucho es de 0.15 m.

$$H_T = H_i + 24 * t_{acero}$$

$$H_T = 0.15 + 24 * 0.003 = 0.222 \text{ m}$$

### Paso 16. Cálculo de la rigidez vertical $K_V$

La rigidez vertical se obtendrá sumando la rigidez equivalente del acero y la rigidez equivalente del conjunto caucho-plomo. De la Ecuación 2.22, se obtiene:

$$K_V = \frac{E_C A_{acero}}{H_i} + \frac{E_p A_{plomo}}{H_T}$$

donde:

$A_{acero}$  : área de la placa de acero igual a  $0.1575 \text{ m}^2$  (igual al área efectiva de caucho)

$E_p$  : módulo de elasticidad del plomo igual a  $1400000 \text{ t/m}^2$

$A_{plomo}$  : área del núcleo de plomo. Para un  $D_p$  de 8 cm el área resulta  $0.005 \text{ m}^2$

$E_c$  : módulo de compresión para el conjunto acero-caucho. Para calcularlo se usa la Ecuación 2.23:

$$\frac{1}{E_c} = \left( \frac{1}{6 * G * S^2} + \frac{4}{3 * K} \right)$$

siendo K el módulo de compresibilidad del elastomérico, estimado como  $2 \times 10^5 \text{ t/m}^2$ ; mientras que S es un factor de forma del aislador, calculado con la Ecuación 2.24.

$$S = \frac{D_i^2 - D_p^2}{4 * D_i * t_{caucho}}$$

Para un  $D_i = 0.455 \text{ m}$ , un  $D_p = 0.08 \text{ m}$  y un  $t_{caucho} = 6 \text{ mm}$ , el factor S resulta igual a 18.37 y el valor de  $E_c$  queda igual a  $63239.98 \text{ t/m}^2$ . En consecuencia, la rigidez vertical resulta:

$$K_V = \frac{63239.98 * 0.1575}{0.15} + \frac{1400000 * 0.005}{0.222} = 97934 \text{ t/m}$$

Obtenida la rigidez vertical  $K_V$ , se da por finalizado el procedimiento de diseño de los aisladores elastoméricos para este modelo de estructura.

### **3.2.2.2. Resultados del análisis**

Los resultados del análisis tiempo-historia de la estructura se obtienen con el software SAP2000. Para esto se asignaron las propiedades del aislador usando la propiedad LINK (Ver Anexo B). Además, las aceleraciones sísmicas en la base están escaladas a una aceleración máxima de 0.45g.

El periodo obtenido con el software SAP2000 es:

$$T = 2.39 \text{ s}$$

El valor obtenido es mayor a dos veces el valor del periodo del modelo sin dispositivo sísmico, el cual es 0.989 s. Por consiguiente, los aisladores flexibilizaron satisfactoriamente la estructura.

En la Tabla 3.8 se presentan los desplazamientos horizontales máximos de cada piso; y en la Tabla 3.9, las derivas máximas de entrepiso. Ambas tablas muestran los resultados

correspondientes al Sismo de Pisco, que fue el más perjudicial por ocasionar los mayores desplazamientos y los más altos valores de cortante basal.

Tabla 3.8. Desplazamientos máximos para el modelo con aisladores.

Piso	Desplazamientos horizontales máximos (m)
Base	0.0931
1	0.1029
2	0.1117
3	0.1196
4	0.1264

Tabla 3.9. Derivas máximas del modelo con aisladores.

Piso	Derivas máximas de entrepiso
1	0.0033
2	0.0029
3	0.0026
4	0.0023

En la Tabla 3.8 se aprecia que en la base se produce un desplazamiento horizontal debido a la poca rigidez de los aisladores en esa dirección. Asimismo, en la Tabla 3.9 se aprecia que las derivas máximas de entrepiso no superan el límite establecido por la norma E-030 de 0.007 para estructuras de concreto armado.

Por otro lado, se obtuvo la cortante basal, cuyo valor es:

$$V_b = 90 \text{ t}$$

Como se aprecia, este valor es mucho menor a la cortante de 295 t obtenida en el modelo sin dispositivo sísmico. Por lo tanto se concluye que la estructura tiene un buen comportamiento al incluirse aisladores en la base.

### 3.2.3. Análisis y diseño con amortiguadores

#### 3.2.3.1. Diseño de los amortiguadores

Para el diseño de los amortiguadores de fluido viscoso, se realizará el procedimiento explicado en el Acápito 2.2.1. Los dispositivos tendrán un coeficiente de amortiguamiento  $C$  (t-s/m) y una rigidez axial  $K$  (t/m) que se ajusten a los resultados del diseño.

##### Paso 1. Definición del tipo de estructura y del sismo de diseño

Según el COMMITTEE VISION 2000, la estructura de edificación, al estar destinada a oficinas, corresponde al tipo básico. Asimismo, la estructura se diseñará para resistir un sismo raro (10% de probabilidad de excedencia en 50 años) tal como se recomienda en la norma peruana E-030.

##### Paso 2. Elección del nivel de desempeño

Usando la Tabla 1.4 el nivel de desempeño corresponde a un nivel de seguridad para las estructuras básicas

### Paso 3. Elección de la deriva objetivo

Usando la Tabla 1.6, para el nivel de seguridad le corresponde una deriva objetivo de 0.0058, la cual se encuentra dentro del límite establecido por la norma E-030 de 0.007 para elementos de concreto armado.

### Paso 4. Determinación de ubicación y disposición de los amortiguadores

Se consideran cuatro configuraciones de ubicación de amortiguadores, los cuales estarán colocados en los pórticos exteriores en ambas direcciones. Las configuraciones fueron mostradas en el Acápito 3.1.2.

### Paso 5. Determinación del amortiguamiento viscoso $\beta_{visc}$

En primer lugar se determina el cociente B a partir de la relación entre la deriva máxima, obtenida con un análisis tiempo-historia de la edificación sin dispositivo sísmico, y la deriva objetivo.

$$B = \frac{\text{Deriva Máxima}}{\text{Deriva Objetivo}}$$

La deriva máxima, para el sismo de Pisco, resultó ser 0.0122, tal como se presentó en la Tabla 3.4.

Entonces, el factor B será igual a:

$$B = \frac{0.0122}{0.0058} = 2.10$$

Utilizando ese valor de B en la Ecuación 2.26 (Fórmula de Newmark) se determina el  $\beta_{eff}$ .

$$B = \frac{2.31 - 0.41 * \ln(5)}{2.31 - 0.41 * \ln(\beta_{eff})} \rightarrow \beta_{eff} \approx 41\%$$

Finalmente, con la Ecuación 2.27 se obtiene el  $\beta_{visc}$  que requerirán los amortiguadores para llegar a la deriva objetivo.

$$\beta_{visc} = \beta_{eff} - 5\% \approx 36\%$$

### Paso 6. Estimación del exponente de velocidad $\alpha$

En este trabajo de tesis se trabajará con dispositivos lineales por su facilidad en el modelamiento y diseño. Además, como se comentó en el Acápito 1.2.2.4, tanto los amortiguadores lineales como los no lineales producen una reducción similar en el desplazamiento lateral. En consecuencia, como se emplearán amortiguadores lineales, el exponente de velocidad será igual a 1.

### Paso 7. Cálculo del coeficiente de amortiguamiento C

Asumiendo que todos los amortiguadores tienen un coeficiente "C" constante, se determina su valor utilizando la Ecuación 2.28.

$$C = \frac{\beta_{\text{visc}} * 4\pi \sum_i m_i \phi_i^2}{T(\sum_i \phi_{ri}^2 \text{Cos}^2\theta_i) * N}$$

siendo  $\beta_{\text{visc}}$  el amortiguamiento viscoso del amortiguador igual a 36%;  $m_i$ , la masa participativa de cada entrepiso;  $\theta_i$ , el ángulo de inclinación del amortiguador con respecto a la horizontal igual a 26.56°;  $\phi_i$ , el desplazamiento lateral normalizado de cada piso;  $\phi_{ri}$ , el desplazamiento relativo para cada piso, obtenido de los desplazamientos laterales normalizados; y T el periodo de la estructura sin dispositivo igual a 0.989 s.

Como se puede ver, en esta ecuación se ha adherido un parámetro N, que es el número de amortiguadores utilizados por piso en cada dirección. Los cálculos de las sumatorias de la ecuación son mostrados en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Cálculos para diseñar los amortiguadores. Fuente: Elaboración Propia

Piso	$\phi_i^*$	$\phi_{ri}$	$m_i$ (t-s <sup>2</sup> /m)**	$\text{Cos}\theta_i$	$\sum_i \phi_{ri}^2 \text{Cos}^2\theta_i$	$\sum_i m_i \phi_i^2$
Piso 1	0.189	0.189	59.741	0.894	0.028	2.13
Piso 2	0.480	0.291	59.741	0.894	0.068	13.77
Piso 3	0.763	0.283	58.750	0.894	0.064	34.20
Piso 4	1.000	0.237	53.017	0.894	0.045	53.10
<i>TOTAL</i>					0.205	103.12

\*El valor de  $\phi_i$  se obtiene dividiendo el desplazamiento horizontal entre el desplazamiento horizontal del último piso, tal como se explicó en el Acápite 1.2.2.4. Se usarán los desplazamientos del sismo de Pisco (Tabla 3.3)

\*\*Los valores de  $m_i$  se obtienen a partir de los datos de la Tabla D2 del Anexo D. En el Anexo D los valores están en toneladas. Para aplicar la formulación es necesario que la masa esté en t-s<sup>2</sup>/m, por lo tanto se dividieron los valores de la Tabla D2 entre la aceleración de la gravedad.

Como resultado se obtuvieron los siguientes valores de coeficiente “C”.

- C= 1150 t-s/m para la primera configuración. (N=2)
- C= 576 t-s/m para la segunda y tercera configuración. (N=4)
- C= 384 t-s/m para la cuarta configuración. (N=6)

#### Paso 8. Cálculo de la rigidez del brazo metálico K

Para el cálculo de la rigidez K se considera que el brazo metálico es de un perfil tipo PIPE (circular tubular) con las siguientes propiedades:

Diámetro exterior = 10.7 in

Diámetro interior = 10 in

Área transversal = 7.34x10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>

Módulo de elasticidad = 2.1x10<sup>7</sup> ton/m<sup>2</sup>

Asimismo, para poder conectar el amortiguador con el pórtico de la estructura se ha considerado una longitud aproximada de 6 metros del brazo metálico.

Con estas características se obtiene la rigidez axial  $K$  utilizando la Ecuación 2.29.

$$K = \frac{E \cdot A}{L}$$

$$K = \frac{2.1 \times 10^7 \times 7.34 \times 10^{-3}}{6} \approx 25698 \text{ t/m}$$

### Paso 9. Evaluación de las nuevas derivas

Utilizando el software SAP2000 se somete a la estructura con amortiguadores a una aceleración sísmica en la base. Luego se evalúan si los valores obtenidos de derivas máximas de entrepiso se mantienen cercanos a la deriva objetivo de 0.0058 indicada en el Paso 3. En la Tabla 3.11 se presentan las derivas obtenidas para cada configuración usando el acelerograma del sismo de Pisco.

Tabla 3.11. Derivas Máximas obtenidas para el edificio con amortiguadores. Fuente: Elaboración propia.

Piso	Deriva máxima de entrepiso para el sismo de Pisco			
	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3	Conf. 4
1	0.0046	0.0045	0.0045	0.0044
2	0.0063	0.0062	0.0062	0.0062
3	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051
4	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025

Como se aprecia en esta tabla, todas las derivas se encuentran por debajo de la deriva máxima permitida por la norma peruana. Asimismo, no existen variaciones significativas entre las cuatro configuraciones utilizadas. Esto se debe a que la suma total de los coeficientes de amortiguamiento de cada amortiguador resulta ser la misma en las cuatro configuraciones. Es decir, las cuatro configuraciones proporcionan un mismo amortiguamiento efectivo al sistema.

### Paso 10. Evaluación del amortiguamiento viscoso $\beta_{visc}$

Tal como se mencionó en el Capítulo II, para verificar que el amortiguamiento viscoso determinado en el Paso 5 sea similar al que se obtiene en el software, se aplicará la función pulso en la base de la estructura para generar un movimiento similar al movimiento libre amortiguado. La función pulso utilizada se ilustra en la Figura 3.13 y el movimiento libre amortiguado que tuvo la estructura se ilustra en la Figura 3.14. En esta última, el eje horizontal representa al tiempo y el eje vertical al desplazamiento lateral.

Con la Ecuación 2.30 del decremento logarítmico se podrá obtener el valor del amortiguamiento efectivo que tiene el sistema.

$$\ln \left( \frac{x_t}{x_{(t+nT)}} \right) \approx \frac{2\pi * n * \beta_{eff}}{\sqrt{1 - \beta_{eff}^2}}$$

donde:

$\beta_{eff}$ : Amortiguamiento efectivo de la estructura.

$x_t$ : Desplazamiento máximo para un tiempo  $t$ .

$X_{t+nT}$ : Desplazamiento máximo para un tiempo  $t+nT$ .

$n$ : Número de ciclos entre los dos desplazamientos máximos considerados

### Función Pulso

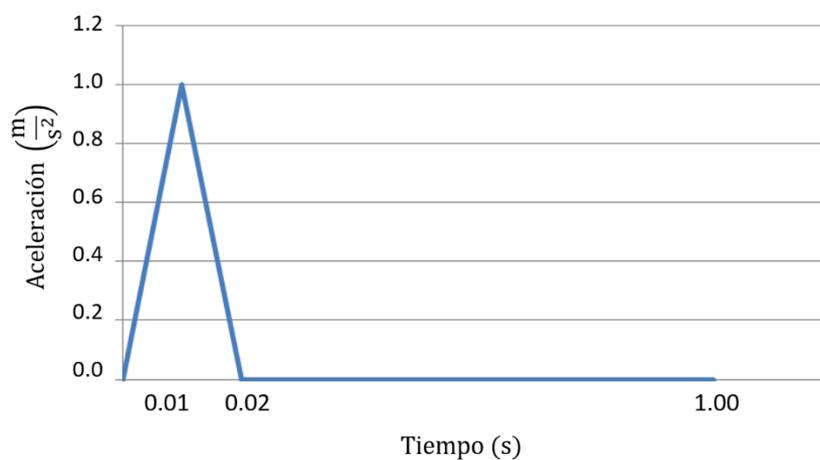


Figura 3.13. Función pulso. Fuente: Elaboración Propia

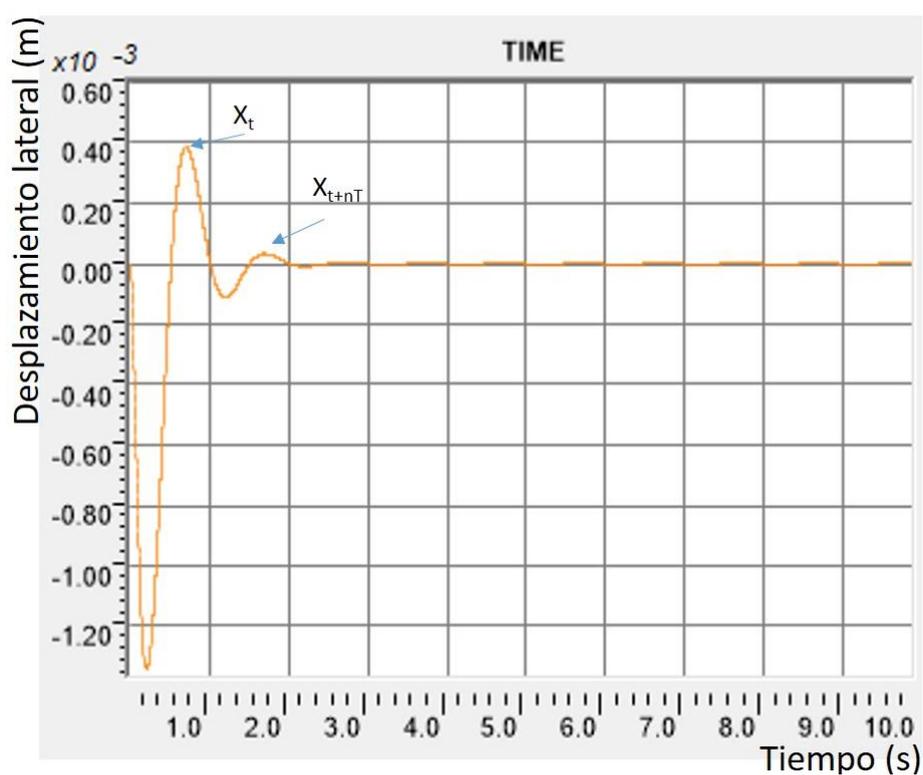


Figura 3.14. Movimiento de la estructura con la función pulso. Fuente: Elaboración Propia

Como se tomarán dos desplazamientos máximos seguidos, el primero y el segundo, el valor de  $n$  será 1. Asimismo, de la Figura 3.14 se obtienen:

$$X_t = 0.39 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$X_{t+nT} = 0.025 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Reemplazando en la Ecuación 2.30 del decremento logarítmico se obtiene un amortiguamiento efectivo  $\beta_{\text{eff}}$  de 40.1%, que al restarle el 5% correspondiente al amortiguamiento de los elementos estructurales, resultará en un  $\beta_{\text{visc}}$  igual a 35.1 %. Debido a que este valor es cercano al 36% obtenido en el Paso 5, no se realiza ninguna iteración.

Es importante tener en cuenta que con la fórmula de Newmark, el amortiguamiento efectivo se obtiene directamente como porcentaje, mientras que con la fórmula del decremento logarítmico el amortiguamiento se obtiene como decimal y debe ser convertido a porcentaje.

### Paso 11. Diseño de los dispositivos de amortiguación y conexiones metálicas

Las conexiones metálicas y los dispositivos de amortiguación serán diseñados con los esfuerzos críticos obtenidos del análisis tiempo historia realizado con el SAP2000. Esto implica que se deben obtener en los amortiguadores las fuerzas axiales máximas resultantes de las sollicitaciones sísmicas.

En la Tabla 3.12 se muestran los valores de fuerza axial máxima que soporta cada amortiguador cuando se aplica el sismo, y en la Tabla 3.13 se presentan las capacidades de carga axial de los amortiguadores comerciales para resistir las cargas actuantes. Para el diseño se deben tomar los amortiguadores comerciales.

Tabla 3.12. Cargas axiales en los amortiguadores. Fuente: Elaboración propia

Piso	Carga axial actuante (t)			
	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
1°	110	80	80	70
2°	150	100	100	80
3°	120	70	70	50
4°	60	35	35	25

Tabla 3.13. Capacidad de carga axial de los amortiguadores comerciales a usar. Fuente: Elaboración propia

Piso	Capacidad (t)			
	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
1°	150	100	100	100
2°	150	100	100	100
3°	150	100	100	50
4°	100	50	50	50

### 3.2.3.2. Resultados del análisis

Los resultados fueron obtenidos al aplicar una aceleración sísmica en la base de la estructura utilizando el software SAP2000. Para eso se ingresan las propiedades de los amortiguadores utilizando la propiedad LINK, tal como se explica en el Anexo B.

En la modelación se obtuvo el mismo periodo de 0.989 segundos que se obtuvo en el modelo sin dispositivos. Tal como mencionaron Torres y Guevara (2012), esto ocurre porque los amortiguadores de fluido viscoso no modifican la rigidez de la estructura.

En la Tabla 3.14 se presentan los desplazamientos máximos horizontales obtenidos para cada configuración. Los resultados de las derivas máximas de entrepiso fueron mostrados en la Tabla 3.11.

De la misma manera que en el modelo con aisladores, se trabajó con el registro del sismo de Pisco puesto que éste produce los mayores desplazamientos.

Tabla 3.14. Desplazamientos máximos para el modelo con amortiguadores. Fuente: Elaboración propia.

Desplazamientos horizontales máximos (m) - sismo de Pisco				
Piso	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
1	0.0139	0.0134	0.0135	0.0133
2	0.0328	0.0319	0.0320	0.0318
3	0.0482	0.0471	0.0473	0.0470
4	0.0557	0.0546	0.0549	0.0545

Como se puede apreciar en esta tabla, los resultados de las cuatro configuraciones son muy similares porque las cuatro configuraciones proporcionan un mismo amortiguamiento efectivo al sistema.

Finalmente, en la Tabla 3.15 se presentan las cortantes basales obtenidas para cada configuración.

Tabla 3.15. Cortante basal máxima para cada modelo con amortiguadores. Fuente: Elaboración propia

Cortante basal máxima (t) – Sismo de Pisco			
Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
208	204	205	203

Con esta tabla se confirma que el uso de diferentes configuraciones de amortiguadores no afecta significativamente en los resultados, siempre que la suma de las capacidades de los amortiguadores, en cada una de las configuraciones, sea la misma. Además, los valores obtenidos de las cortantes basales son menores en un 30 % al valor de 295 t obtenido para el modelo sin dispositivo.



## Capítulo IV

### Análisis comparativo del desempeño sísmico

En este capítulo, se presenta un análisis comparativo del desempeño sísmico en base a los resultados obtenidos del análisis tiempo-historia realizado a dieciocho modelos de estructuras de edificios. Los parámetros a evaluar en esta comparación son: el período de las estructuras, la frecuencia fundamental, los desplazamientos laterales máximos en cada piso, las derivas máximas de entrepiso y la cortante basal máxima.

En el primer acápite de este capítulo se describen los modelos utilizados y sus características principales; y en los siguientes acápites se presentan los cuadros comparativos de los resultados obtenidos del análisis tiempo historia realizado con el software SAP2000.

#### 4.1. Descripción de los modelos de estructuras

Los modelos de estructuras son aporricadas de concreto armado con una altura de entrepiso constante igual a 3 metros. Las edificaciones tienen losas aligeradas de 20 cm de espesor y su uso estará destinado a oficinas en todos sus pisos y a una azotea en el último piso. Para todos los modelos las vigas tienen dimensiones de 35x35 cm, y las columnas disminuyen sus dimensiones en los pisos superiores para evitar un sobredimensionamiento. Se realizó un pre-dimensionamiento de los elementos estructurales utilizando la carga vertical. Posteriormente, aplicando a la edificación el 30% de la carga muerta como carga lateral, se obtuvo una primera estimación de la deriva de entrepiso. Dado que se busca medir la eficiencia de los dispositivos para mejorar las propiedades de la estructura, se iteraron las dimensiones de los elementos hasta que la deriva máxima de entrepiso de todos los modelos estuviese en el rango de 0.01, que es superior al límite de 0.007 establecido por la norma E-30. De esta forma, se podrá apreciar la capacidad de los amortiguadores y aisladores para reducir la deriva a valores aceptables.

Se analizarán en total dieciocho modelos de estructuras agrupadas en tres grupos distintos en función de la forma y área de la planta. Los modelos del Grupo 1 tienen una planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>, los del Grupo 2 tienen una planta cuadrada pero con un área de 324 m<sup>2</sup>; y los del Grupo 3 tienen una planta rectangular de 540 m<sup>2</sup>.

Similar al modelo analizado en el Capítulo III, cada uno de los dieciocho modelos fueron analizados con variantes utilizando amortiguadores y aisladores. En la Tabla 4.1 se presentan las principales características geométricas de cada uno de los modelos analizados tales como su número de pisos, número de vanos en la dirección en X, número de vanos en la dirección en Y, área en planta y esbeltez, siendo esta última la relación entre la altura del

edificio y su dimensión menor en planta. Asimismo, de la Figura 4.1 a la Figura 4.3 se presentan ilustrativamente las vistas en planta de los modelos para cada grupo.

Tabla 4.1. Características de los modelos. Fuente: Elaboración propia

	Modelo	N° Pisos	N° Vanos en dirección X	N° Vanos en dirección Y	Área de planta (m <sup>2</sup> )	Esbeltez
<b>GRUPO 1</b>	Modelo G1.M1	4	5	5	900	0.40
	Modelo G1.M2	7	5	5	900	0.70
	Modelo G1.M3	10	5	5	900	1.00
	Modelo G1.M4	13	5	5	900	1.40
	Modelo G1.M5	17	5	5	900	1.70
	Modelo G1.M6	20	5	5	900	2.00
<b>GRUPO 2</b>	Modelo G2.M1	4	3	3	324	0.67
	Modelo G2.M2	7	3	3	324	1.17
	Modelo G2.M3	10	3	3	324	1.67
	Modelo G2.M4	13	3	3	324	2.17
	Modelo G2.M5	17	3	3	324	2.83
	Modelo G2.M6	20	3	3	324	3.33
<b>GRUPO 3</b>	Modelo G3.M1	4	3	5	540	0.67
	Modelo G3.M2	7	3	5	540	1.17
	Modelo G3.M3	10	3	5	540	1.67
	Modelo G3.M4	13	3	5	540	2.17
	Modelo G3.M5	17	3	5	540	2.83
	Modelo G3.M6	20	3	5	540	3.33

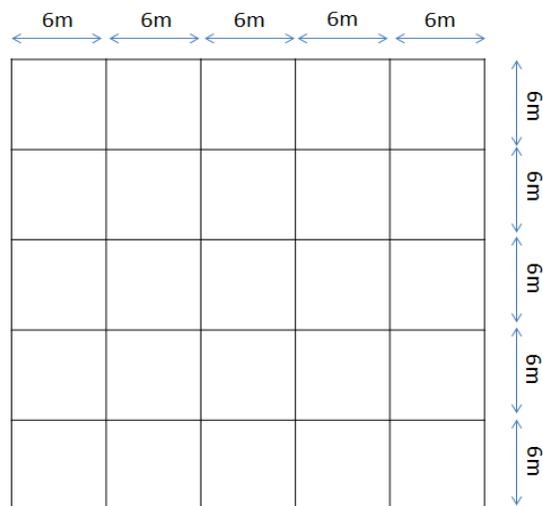


Figura 4.1. Vista en planta de los modelos del Grupo 1.

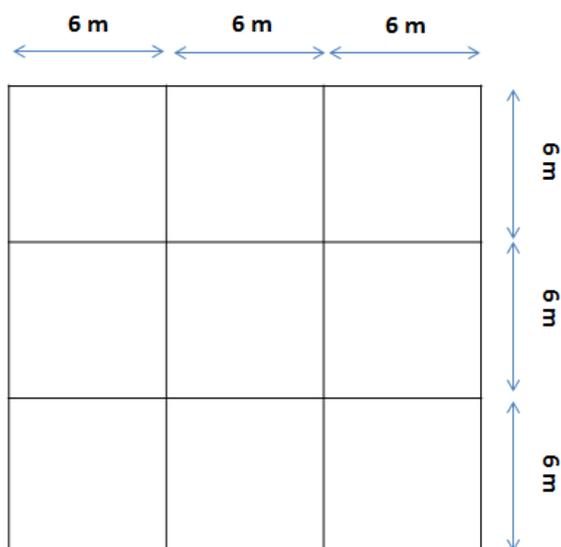


Figura 4.2. Vista en planta de los modelos del Grupo 2.

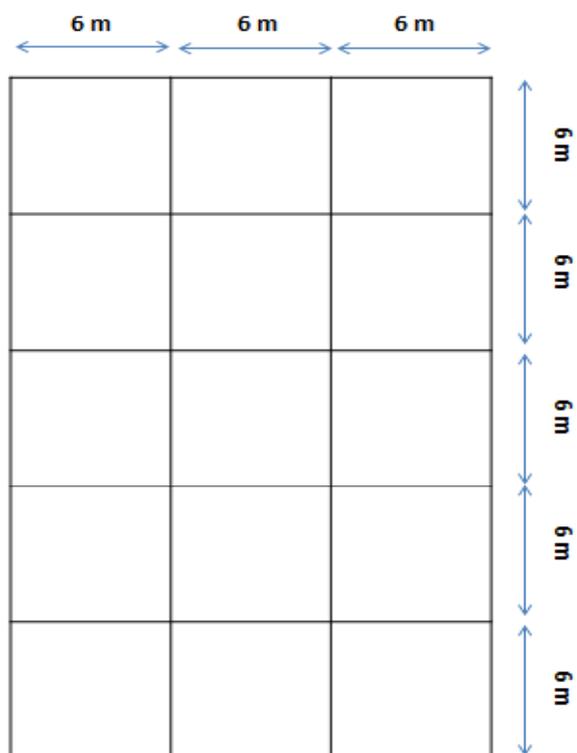


Figura 4.3. Vista en planta de los modelos del Grupo 3.

De la Tabla 4.2 a la Tabla 4.4 se presentan las dimensiones de las vigas y columnas para los modelos de los Grupos 1, 2 y 3 respectivamente.

Tabla 4.2. Dimensiones de las columnas. Modelos del Grupo 1.

Piso	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
Piso 1	40x40	50x50	50x50	55x55	55x55	55x55
Piso 2	40x40	50x50	50x50	55x55	50x50	55x55
Piso 3	35x35	50x50	50x50	50x50	50x50	55x55
Piso 4	35x35	45x45	50x50	50x50	50x50	55x55
Piso 5	-	45x45	50x50	50x50	50x50	55x55
Piso 6	-	40x40	45x45	50x50	50x50	55x55
Piso 7	-	40x40	45x45	50x50	50x50	50x50
Piso 8	-	-	45x45	50x50	50x50	50x50
Piso 9	-	-	40x40	50x50	50x50	50x50
Piso 10	-	-	40x40	45x45	50x50	50x50
Piso 11	-	-	-	45x45	50x50	50x50
Piso 12	-	-	-	45x45	50x50	50x50
Piso 13	-	-	-	40x40	50x50	50x50
Piso 14	-	-	-	-	45x45	45x45
Piso 15	-	-	-	-	45x45	45x45
Piso 16	-	-	-	-	40x40	45x45
Piso 17	-	-	-	-	40x40	40x40
Piso 18	-	-	-	-	-	40x40
Piso 19	-	-	-	-	-	40x40
Piso 20	-	-	-	-	-	40x40

Tabla 4.3. Dimensiones de las columnas. Modelos del Grupo 2.

Piso	G2.M1	G2.M2	G2.M3	G2.M4	G2.M5	G2.M6
Piso 1	40x40	45x45	50x50	45x45	55x55	60x60
Piso 2	40x40	45x45	50x50	40x40	55x55	60x60
Piso 3	35x35	45x45	50x50	35x35	55x55	55x55
Piso 4	35x35	40x40	50x50	35x35	55x55	55x55
Piso 5	-	40x40	50x50	35x35	55x55	55x55
Piso 6	-	35x35	45x45	35x35	55x55	55x55
Piso 7	-	35x35	45x45	35x35	50x50	55x55
Piso 8	-	-	45x45	35x35	50x50	50x50
Piso 9	-	-	40x40	35x35	50x50	50x50
Piso 10	-	-	40x40	35x35	50x50	50x50
Piso 11	-	-	-	35x35	50x50	50x50
Piso 12	-	-	-	35x35	50x50	50x50
Piso 13	-	-	-	30x30	50x50	50x50
Piso 14	-	-	-	-	45x45	45x45
Piso 15	-	-	-	-	45x45	45x45
Piso 16	-	-	-	-	40x40	45x45
Piso 17	-	-	-	-	40x40	40x40
Piso 18	-	-	-	-	-	40x40
Piso 19	-	-	-	-	-	40x40
Piso 20	-	-	-	-	-	40x40

Tabla 4.4. Dimensiones de las columnas. Modelos del Grupo 3.

Piso	G3.M1	G3.M2	G3.M3	G3.M4	G3.M5	G3.M6
Piso 1	40x40	50x50	50x50	55x55	55x55	55x55
Piso 2	40x40	50x50	50x50	55x55	50x50	55x55
Piso 3	35x35	50x50	50x50	50x50	50x50	55x55
Piso 4	35x35	45x45	50x50	50x50	50x50	55x55
Piso 5	-	45x45	50x50	50x50	50x50	55x55
Piso 6	-	40x40	45x45	50x50	50x50	55x55
Piso 7	-	40x40	45x45	50x50	50x50	50x50
Piso 8	-	-	45x45	50x50	50x50	50x50
Piso 9	-	-	40x40	50x50	50x50	50x50
Piso 10	-	-	40x40	45x45	50x50	50x50
Piso 11	-	-	-	45x45	50x50	50x50
Piso 12	-	-	-	45x45	50x50	50x50
Piso 13	-	-	-	40x40	50x50	50x50
Piso 14	-	-	-	-	45x45	45x45
Piso 15	-	-	-	-	45x45	45x45
Piso 16	-	-	-	-	40x40	45x45
Piso 17	-	-	-	-	40x40	40x40
Piso 18	-	-	-	-	-	40x40
Piso 19	-	-	-	-	-	40x40
Piso 20	-	-	-	-	-	40x40

## 4.2. Configuraciones de los dispositivos sísmicos

Cada uno de los modelos a analizar tiene variantes con aisladores y amortiguadores con la finalidad de evaluar la eficiencia de ambos dispositivos y mejorar el comportamiento de la estructura frente a un sismo. En la Tabla 4.5 se presenta la cantidad de variantes para los modelos de cada grupo.

Tabla 4.5. Cantidad de variantes en cada grupo. Fuente: Elaboración propia

Grupo	Variantes sin dispositivo	Variantes con aisladores	Variantes con amortiguadores
Grupo 1	1	1	4
Grupo 2	1	1	1
Grupo 3	1	1	1

Se utilizará un aislador debajo de cada columna en todos los casos; es decir para los modelos del Grupo 1, que tienen 36 columnas, se usarán 36 aisladores; para los modelos del Grupo 2 se usarán 16 aisladores; y para los modelos del Grupo 3 se utilizarán 24 aisladores.

Además, como lo indica la Tabla 4.5, los modelos del Grupo 1 tendrán cuatro variantes de amortiguadores, las cuales son las configuraciones que se utilizaron en el Capítulo III (ver Figura 3.3 a la Figura 3.6). Asimismo, para los Grupos 2 y 3 se usará sólo una variante de amortiguadores, los cuales serán colocados en el primer y tercer vano, tal como se muestra en la Figura 4.4.

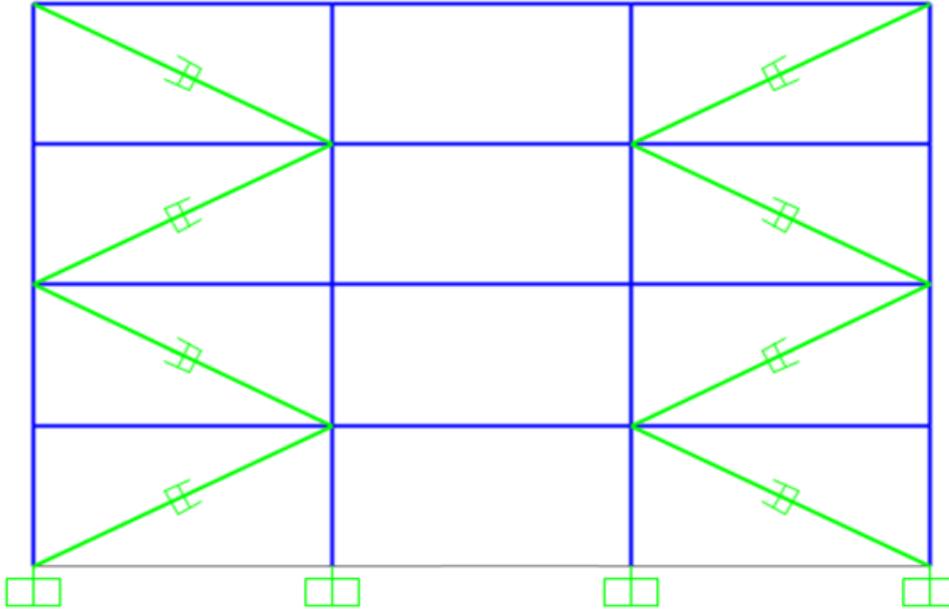


Figura 4.4. Distribución de amortiguadores para modelos del Grupo 2 y 3.

En el caso del Grupo 3, los amortiguadores se evaluarán en la dirección más perjudicial del sismo, es decir, los amortiguadores serán colocados en la dirección más corta del modelo.

### 4.3. Dimensionamiento de los aisladores y de los amortiguadores

Utilizando las metodologías explicadas en los Acápites 2.1.3 y 2.2.1, se pueden dimensionar los aisladores elastoméricos y amortiguadores de fluido viscoso respectivamente. Se realizó el dimensionamiento de estos dispositivos para cada uno de los modelos de los tres grupos. En total se realizaron 72 variantes, siendo 36 variantes del Grupo 1, 18 variantes del Grupo 2 y 18 variantes del Grupo 3.

De la Tabla 4.6 a la Tabla 4.8 se muestran las dimensiones y rigideces de los aisladores que serán utilizados en cada modelo.

Tabla 4.6. Resultados del dimensionamiento de los aisladores - Grupo 1.  
Fuente: Elaboración propia

Modelo	Grupo 1					
	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
N° Pisos	4	7	10	13	17	20
N° Aisladores	36	36	36	36	36	36
$D_i$ (cm)	45.5	57	70	80	90	100
$D_p$ (cm)	8	10	12	15	15	18
$H_i$ (cm)	15	18	15	18	21	21
$K_{eff}$ (t/m)	70	110	185	225	250	325
$K_i$ (t/m)	470	740	1350	1450	1900	2300
$K_v$ (t/m)	98000	142000	287000	330000	457000	500000



Tabla 4.10. Resultados de los coeficientes de amortiguamiento y rigideces axiales de los amortiguadores – Grupo 2.

Modelo	Grupo 2					
	G2.M1	G2.M2	G2.M3	G2.M4	G2.M5	G2.M6
N° Pisos	4	7	10	13	17	20
C (t-s/m)	280	400	360	500	800	1000
K (t/m)	25000	25000	25000	25000	25000	25000

Tabla 4.11. Resultados de los coeficientes de amortiguamiento y rigideces axiales de los amortiguadores – Grupo 3.

Modelo	Grupo 3					
	G3.M1	G3.M2	G3.M3	G3.M4	G3.M5	G3.M6
N° Pisos	4	7	10	13	17	20
C (t-s/m)	350	400	680	850	1300	1600
K (t/m)	25000	25000	25000	25000	25000	25000

#### 4.4. Cuadros comparativos del periodo

El periodo fundamental de vibrar es el primer parámetro evaluado. Su valor fue obtenido con el software SAP2000. Este parámetro permite comparar los cambios en la rigidez de la estructura al utilizar amortiguadores de fluido viscoso y aisladores elastoméricos.

De la Tabla 4.12 a la Tabla 4.14 se presentan los valores del periodo fundamental para cada modelo y sus respectivas variantes.

Tabla 4.12. Periodo de los modelos del Grupo 1. Fuente: Elaboración Propia

Modelo	Periodo (s) – Grupo 1		
	Sin dispositivo sísmico	Con aisladores	Con amortiguadores*
G1.M1	0.99	2.39	0.97
G1.M2	1.62	2.82	1.62
G1.M3	2.05	2.97	2.05
G1.M4	3.07	3.85	3.07
G1.M5	4.50	5.23	4.50
G1.M6	5.50	5.51	5.50

\*El periodo fundamental es el mismo en cada una de las cuatro variantes analizadas con amortiguadores.

Tabla 4.13. Periodo de los modelos del Grupo 2. Fuente: Elaboración Propia

Modelo	Periodo (s) – Grupo 2		
	Sin dispositivo sísmico	Con aisladores	Con amortiguadores
G2.M1	0.93	2.23	0.93
G2.M2	1.61	2.63	1.61
G2.M3	1.96	2.86	1.96
G2.M4	3.89	4.45	3.89
G2.M5	4.73	5.46	4.73
G2.M6	4.89	5.60	4.89

Tabla 4.14. Periodo de los modelos del Grupo 3. Fuente: Elaboración Propia

Modelo	Periodo (s) – Grupo 3		
	Sin dispositivo sísmico	Con aisladores	Con amortiguadores
G3.M1	0.99	2.37	0.99
G3.M2	1.64	2.79	1.64
G3.M3	2.08	3.05	2.08
G3.M4	3.11	3.94	3.11
G3.M5	4.60	5.33	4.60
G3.M6	5.01	5.63	5.01

En estas tablas se observa que las variantes con amortiguadores de fluido viscosos tienen el mismo periodo que las variantes sin dispositivo sísmico. En cambio, las variantes con aisladores tienen periodos superiores a las variantes sin dispositivo. Esto se debe a que los aisladores flexibilizan la base de edificación permitiendo que ésta se desplace lateralmente.

Como se puede apreciar en las tablas, los periodos fundamentales obtenidos fueron muy altos. Esto se debió a que en un principio se predimensionaron las estructuras sin dispositivo para una deriva de 0.01, que es muy superior a la deriva límite de 0.007 indicada en la norma peruana. Realizando verificaciones en el SAP2000, se comprobó que, si se incrementa la rigidez de los edificios para que la deriva tenga valores aceptables cercanos a 0.007, se obtendrían menores valores de periodos equivalentes a un tercio de los presentados en las tablas, aproximadamente.

Para poder realizar una comparación más detallada, se transformó el período  $T$  en frecuencia fundamental  $f$  ( $f = 1/T$ ) y se graficó en función de la esbeltez del edificio. De la Figura 4.5 a la Figura 4.7 se presentan las variaciones que tuvo la frecuencia fundamental en cada modelo. En las figuras, el eje vertical representa la Frecuencia (Hz); y el eje horizontal, el valor de la esbeltez. Cabe indicar que la curva correspondiente a las variantes sin dispositivo coincide con la curva de los amortiguadores de fluido viscoso porque los amortiguadores no modifican el periodo de la estructura sin dispositivo.

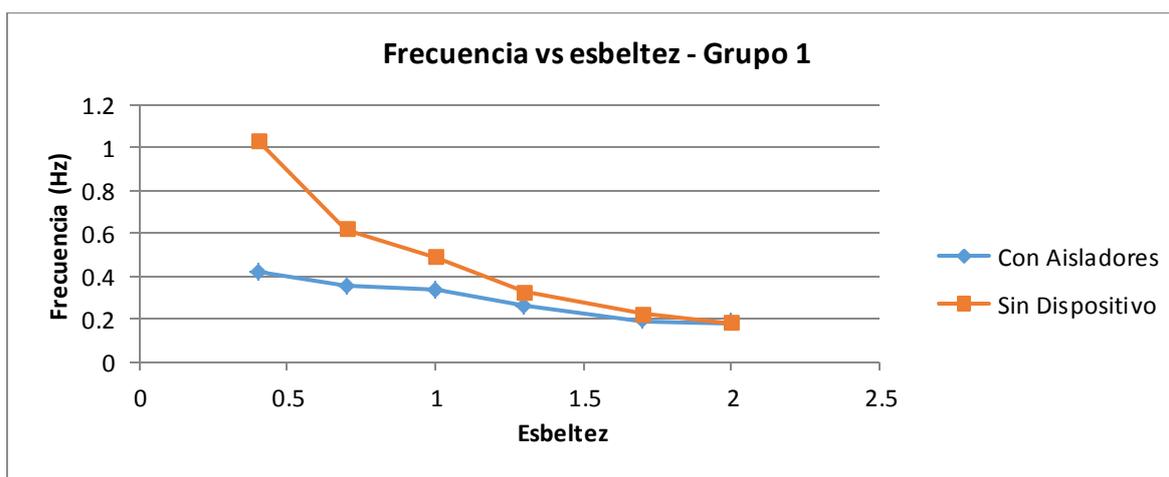


Figura 4.5. Variación de la frecuencia vs esbeltez de los modelos del Grupo 1. Fuente: Elaboración Propia

Observando las figuras se deduce que en los modelos más esbeltos el valor de la frecuencia de las estructuras con aisladores es muy similar al valor de la frecuencia de los modelos sin dispositivo. Esto implica que a mayor esbeltez de la edificación no ocurre una

flexibilización de la estructura, siendo los aisladores poco eficientes. Como se sabe la esbeltez es la relación entre la altura de la edificación y la menor dimensión en planta.

Asimismo, en los modelos con poca esbeltez existe una gran diferencia entre la frecuencia con aisladores y sin dispositivo. Los aisladores flexibilizan la estructura de tal manera que el valor de la frecuencia de las variantes con aisladores resulta ser menos del 70% del valor de la frecuencia de la variante sin dispositivo para esbelteces menores a 1 aproximadamente.

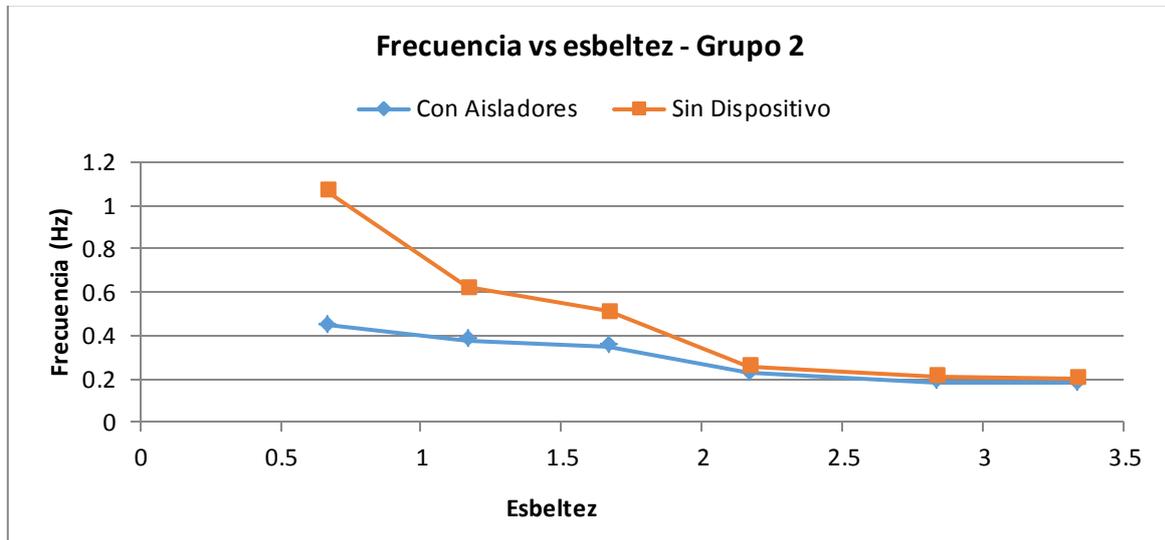


Figura 4.6. Variación de la frecuencia vs esbeltez de los modelos del Grupo 2. Fuente: Elaboración Propia

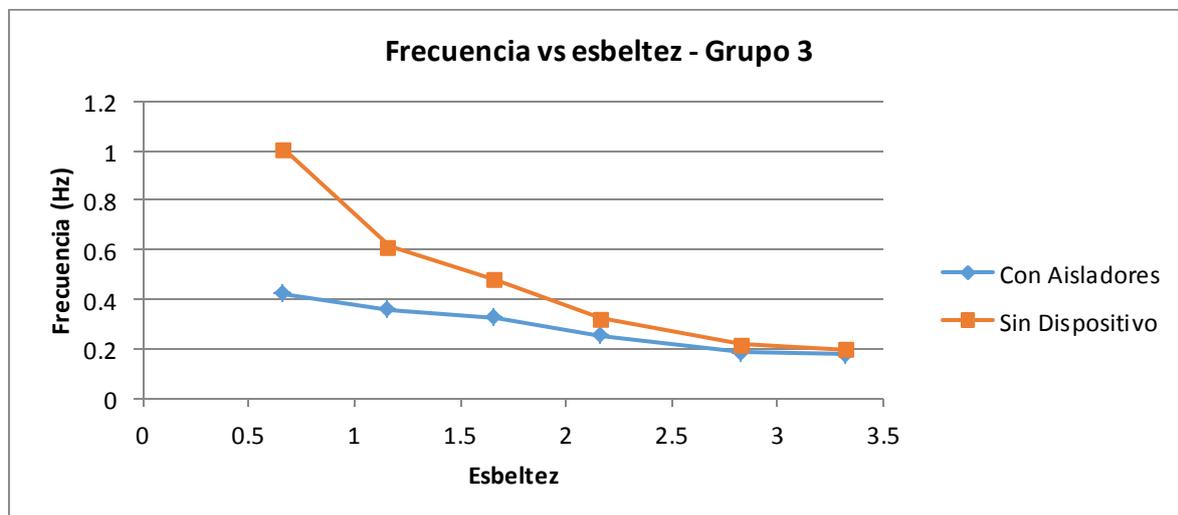


Figura 4.7. Variación de la frecuencia vs esbeltez de los modelos del Grupo 3. Fuente: Elaboración Propia

#### 4.5. Cuadros comparativos de los desplazamientos

En este acápite se presentan los resultados comparativos de los desplazamientos horizontales máximos, obtenidos en los modelos, al aplicarse el sismo de Pisco. Estos desplazamientos que fueron obtenidos con el SAP2000 se encuentran en el Anexo E. Tal como se mencionó en el Capítulo III, este sismo es el más perjudicial, causando mayores

desplazamientos. De la Figura 4.8 a la Figura 4.13 se presentan los resultados obtenidos para los modelos del Grupo 1. Cada Figura tiene siete curvas, una de ellas representa los resultados de la variante sin dispositivo, cuatro curvas representan las variantes con amortiguadores (con desplazamientos máximos casi idénticos), otra curva representa la variante con aisladores y la última curva representa la variante con aisladores pero con desplazamiento relativo a la base. De la Figura 4.14 a la Figura 4.25 se presentan los resultados de los desplazamientos horizontales máximos obtenidos para los modelos del Grupo 2 y 3. En estas figuras aparecen cuatro curvas debido a que solo se tiene una configuración de amortiguadores. En cada figura, el eje de las abscisas representa el desplazamiento horizontal en metros y el eje de las ordenadas representa los diferentes niveles de las edificaciones. Como se puede apreciar en las figuras, las curvas correspondientes a las estructuras con aisladores no empiezan desde cero porque desarrollan un desplazamiento horizontal en la base. Las curvas punteadas, denominadas en las figuras como “con aisladores (relativo)” representan al desplazamiento de las variantes con aisladores sin considerar el desplazamiento en la base.

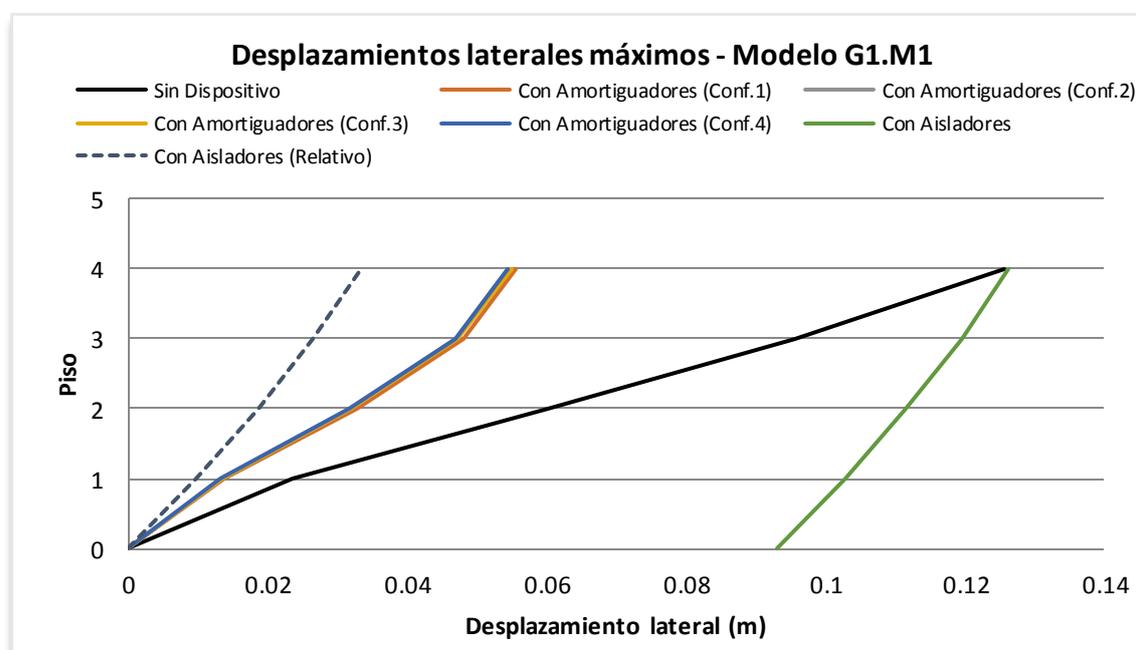


Figura 4.8. Desplazamientos laterales máximos del modelo G1.M1. Edificación de 4 pisos con planta cuadrada y pórticos de cinco vanos.

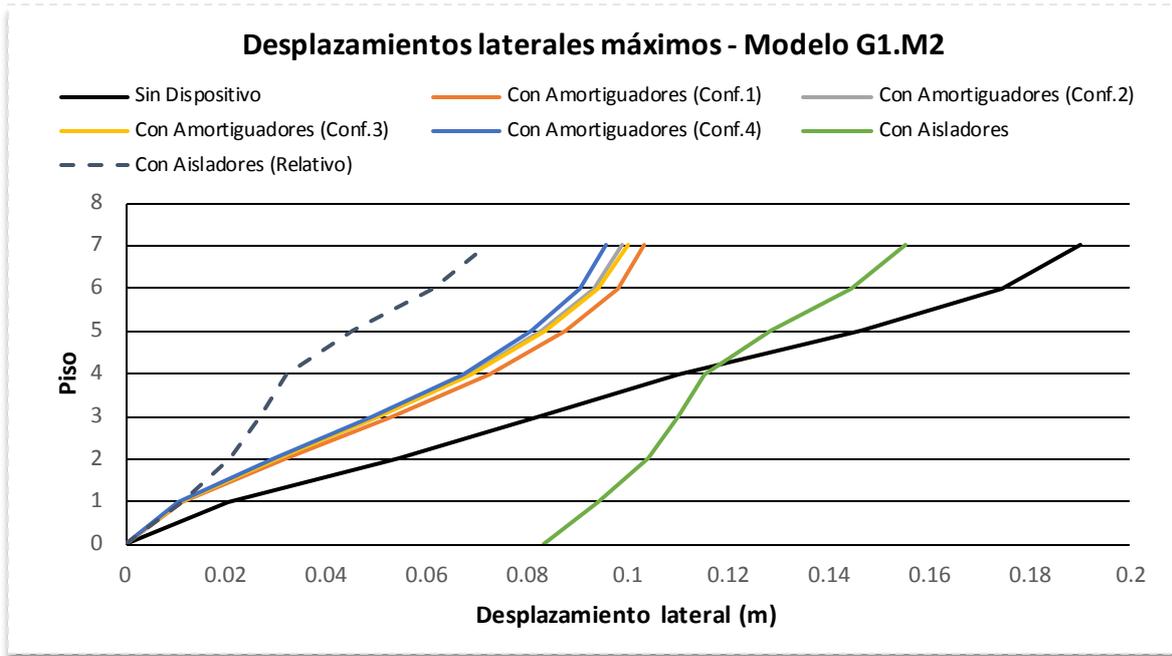


Figura 4.9. Desplazamientos laterales máximos del modelo G1.M2. Edificación de 7 pisos con planta cuadrada y pórticos de cinco vanos.

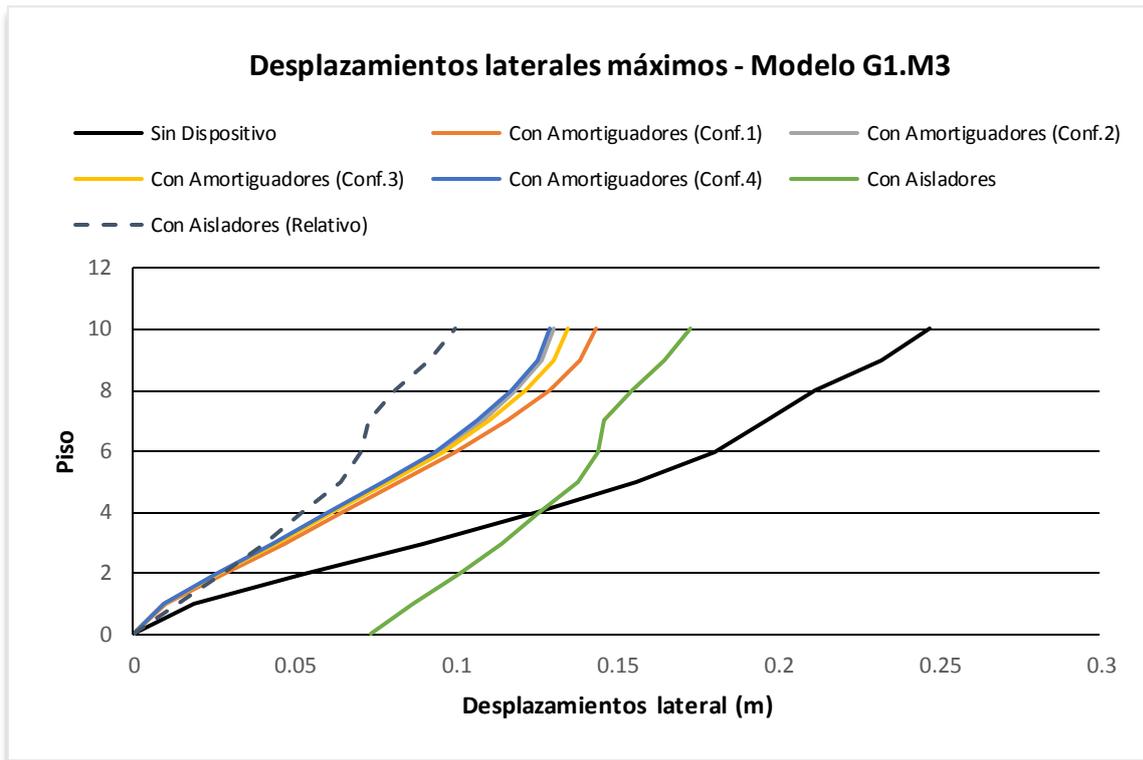


Figura 4.10. Desplazamientos laterales máximos del modelo G1.M3. Edificación de 10 pisos con planta cuadrada y pórticos de cinco vanos.

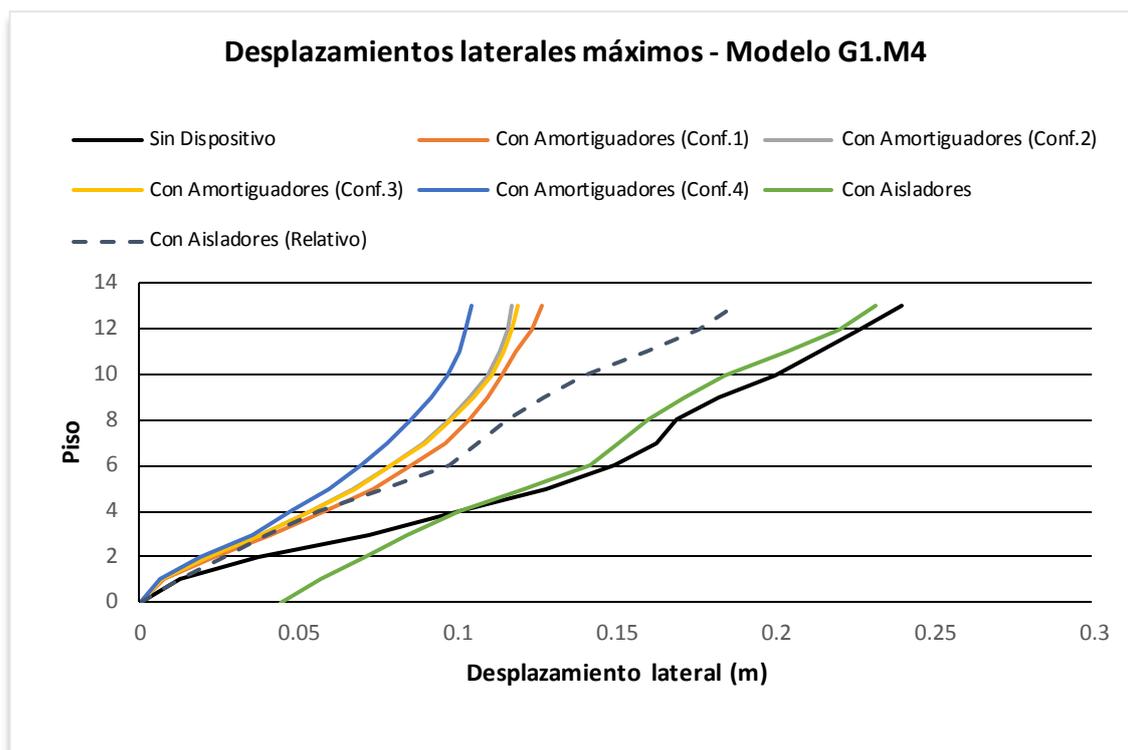


Figura 4.11. Desplazamientos laterales máximos del modelo G1.M4. Edificación de 13 pisos con planta cuadrada y pórticos de cinco vanos.

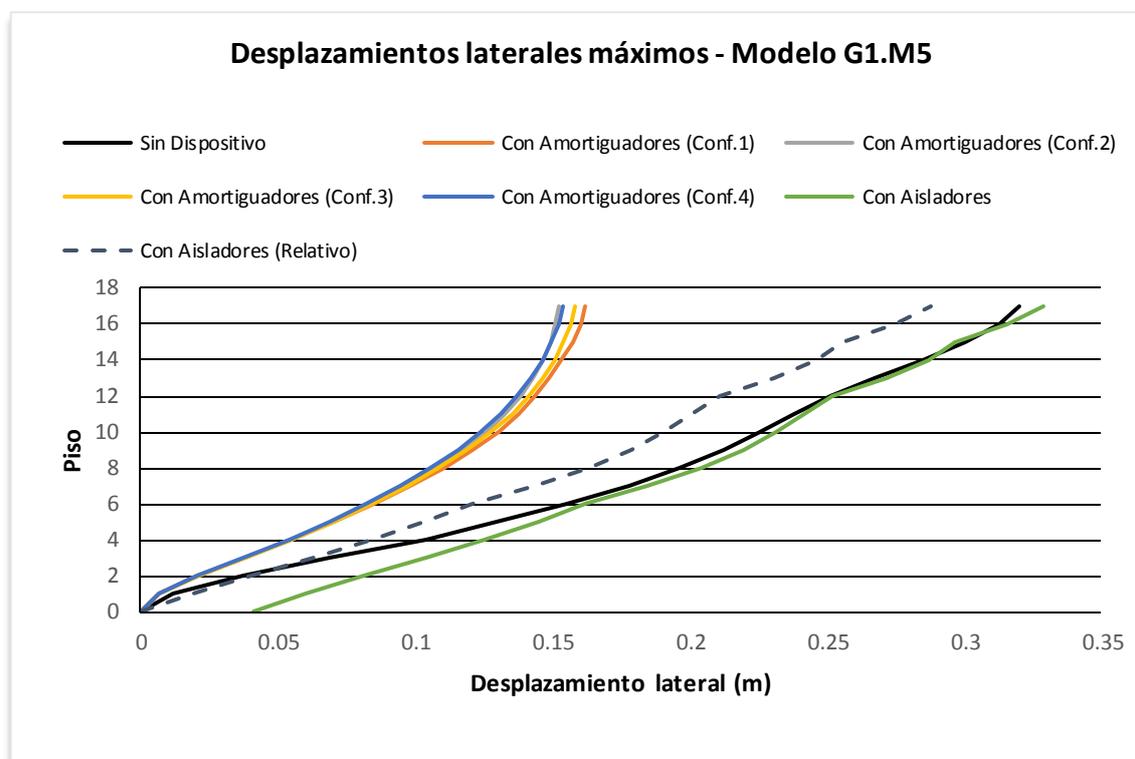


Figura 4.12. Desplazamientos laterales máximos del modelo G1.M5. Edificación de 17 pisos con planta cuadrada y pórticos de cinco vanos.

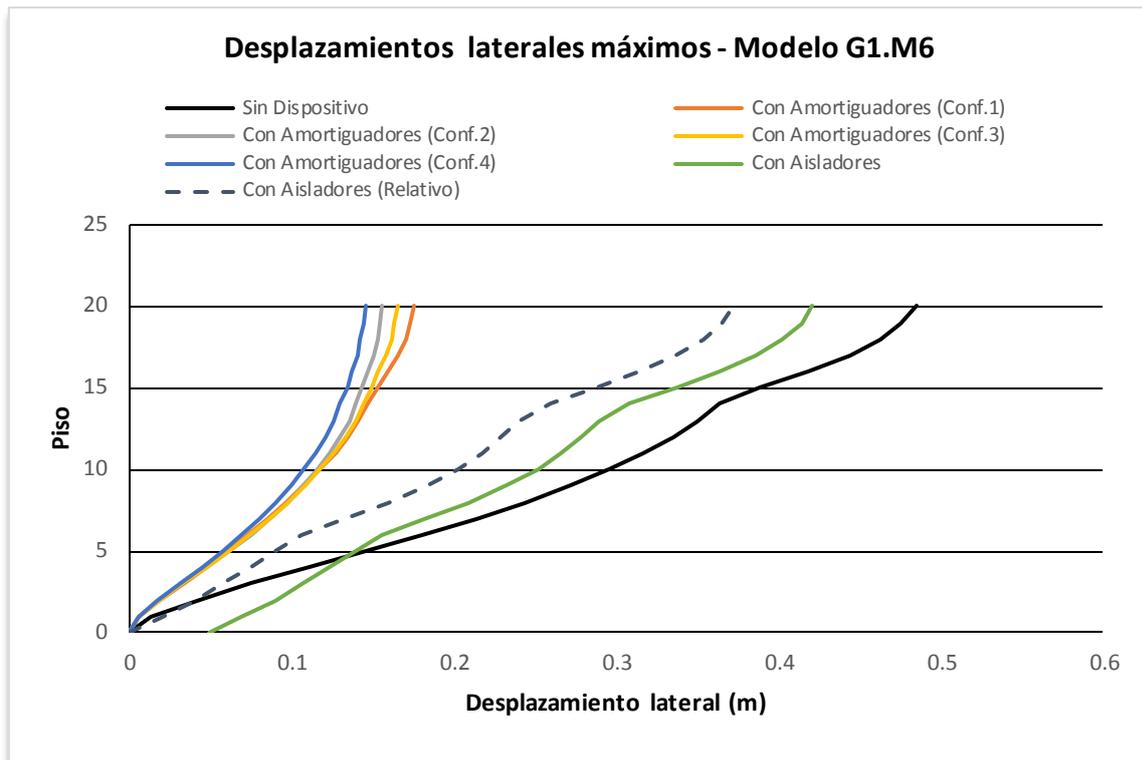


Figura 4.13. Desplazamientos laterales máximos del modelo G1.M6. Edificación de 20 pisos con planta cuadrada y pórticos de cinco vanos.

De la Figura 4.8 a la Figura 4.13, correspondientes a los resultados del Grupo 1, se observa que existe una clara variación en el desempeño de los aisladores y amortiguadores al modificar la altura del modelo.

De la Figura 4.8 a la Figura 4.10 se observa que para los modelos G1.M1, G1.M2 y G1.M3, correspondientes a estructuras de poca y mediana altura, las variantes con aisladores tienen un mejor desempeño sísmico que las demás variantes debido a que la curva del desplazamiento de las variantes con aisladores tiene una pendiente mucho mayor. Asimismo, las variantes con amortiguadores también tuvieron un buen desempeño en comparación a la variante sin dispositivo, pero con un performance menor si se compara con las estructuras con aisladores. Esto se debe a que sus desplazamientos son mayores en comparación con los desplazamientos de la estructura con aisladores, pero menores con respecto a la estructura sin dispositivo. Asimismo, se aprecia que las curvas que representan los desplazamientos de las estructuras con amortiguadores no tuvieron diferencias significativas entre las cuatro variantes. Esto se debió a que se trabajó para una misma capacidad en cada una de las variantes y se evaluó para una misma carga sísmica.

En los modelos de gran altura, G1.M4, G1.M5 y G1.M6, cuyos resultados se muestran de la Figura 4.11 a la Figura 4.13, los amortiguadores mejoran ampliamente el desempeño de las estructuras puesto que los desplazamientos laterales de las estructuras con amortiguadores son menores en comparación con los desplazamientos laterales de las estructuras con aisladores y sin dispositivo. Por el contrario, las variantes con aisladores prácticamente no tienen diferencia en su desempeño sísmico si se comparan con las estructuras sin dispositivo sísmico.

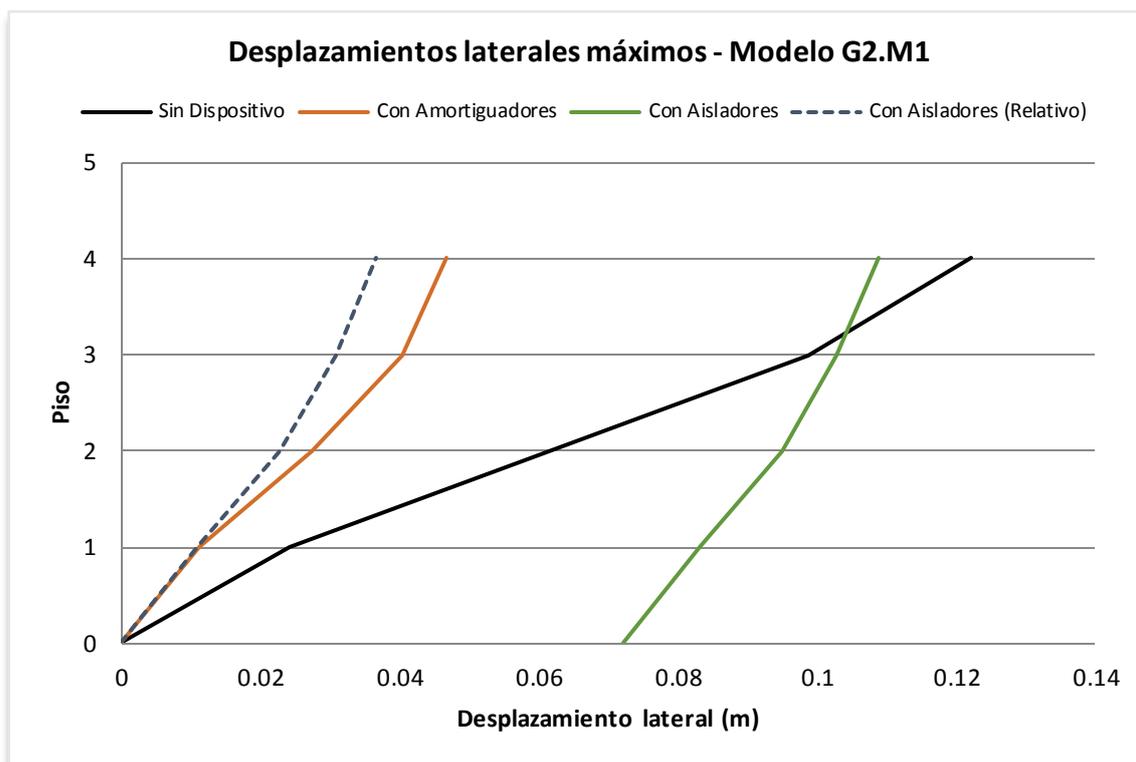


Figura 4.14. Desplazamientos laterales máximos del modelo G2.M1. Edificación de 4 pisos con planta cuadrada y pórticos de tres vanos.

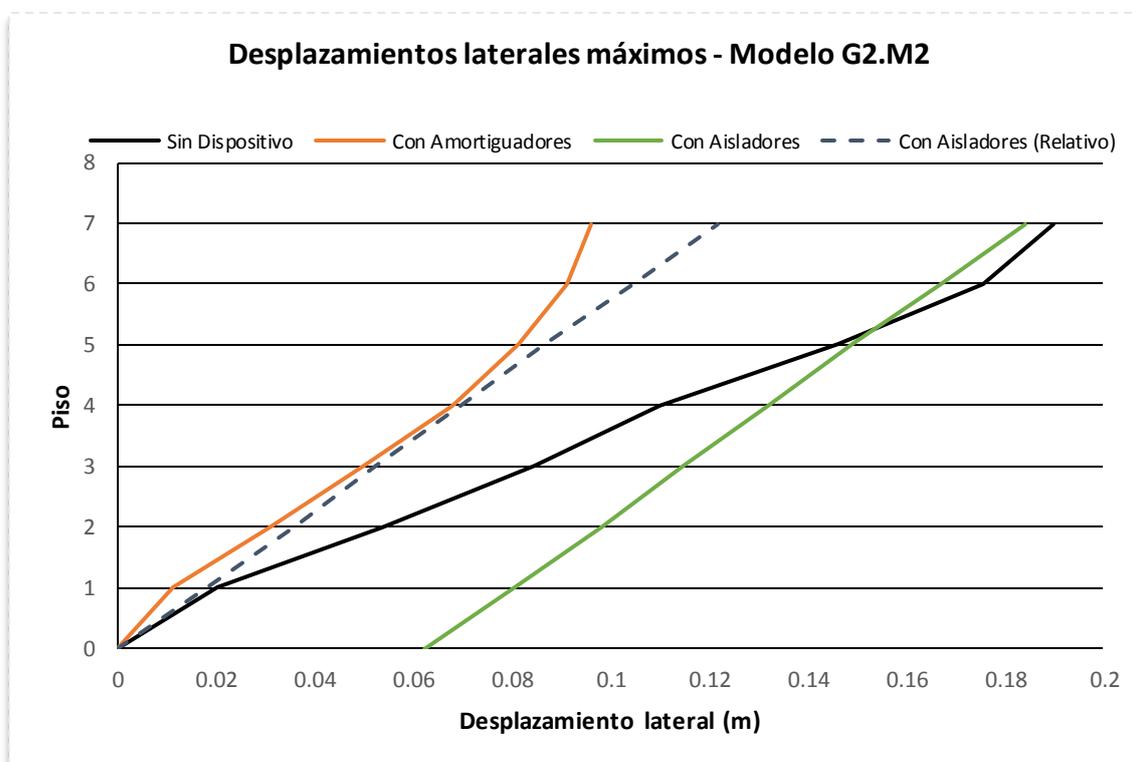


Figura 4.15. Desplazamientos laterales máximos del modelo G2.M2. Edificación de 7 pisos con planta cuadrada y pórticos de tres vanos.

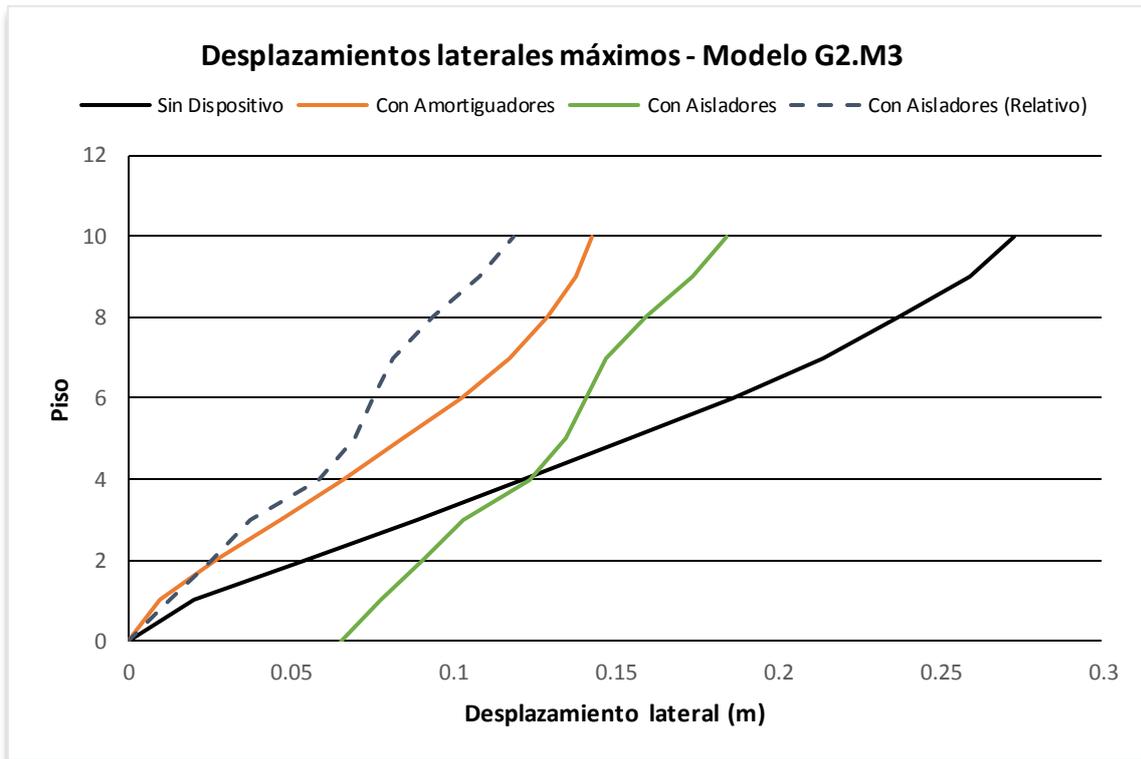


Figura 4.16. Desplazamientos laterales máximos del modelo G2.M3. Edificación de 10 pisos con planta cuadrada y pórticos de tres vanos.

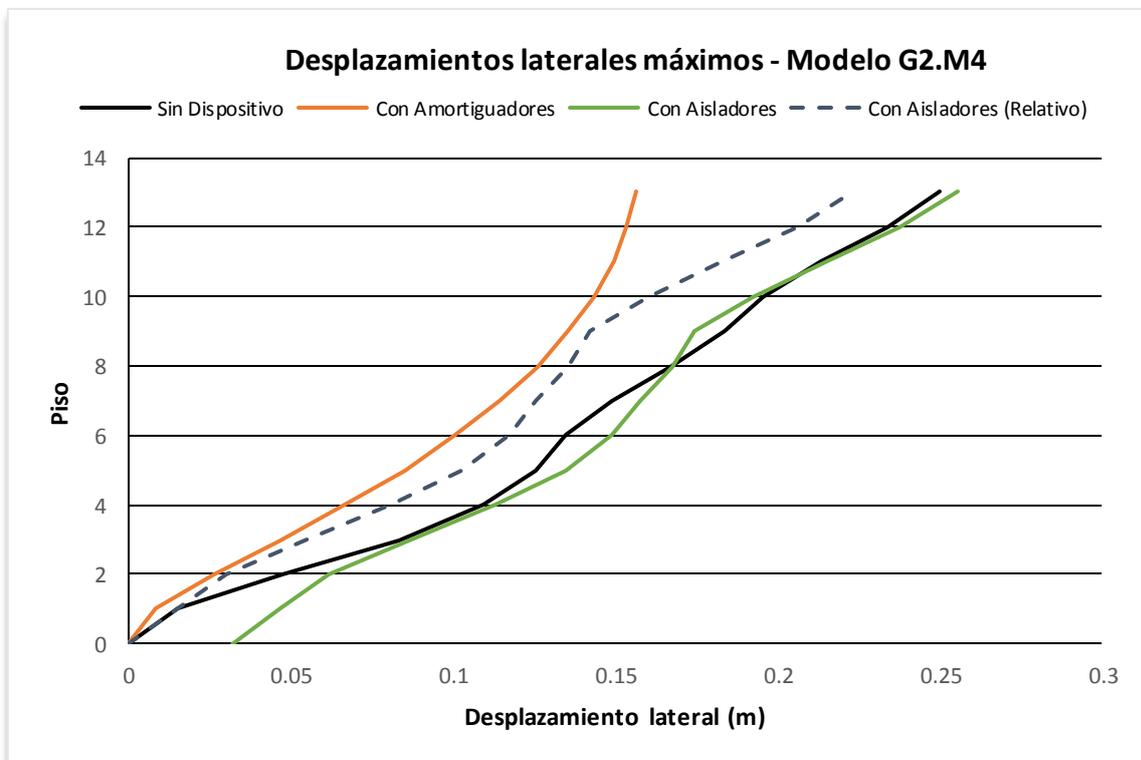


Figura 4.17. Desplazamientos laterales máximos del modelo G2.M4. Edificación de 13 pisos con planta cuadrada y pórticos de tres vanos.

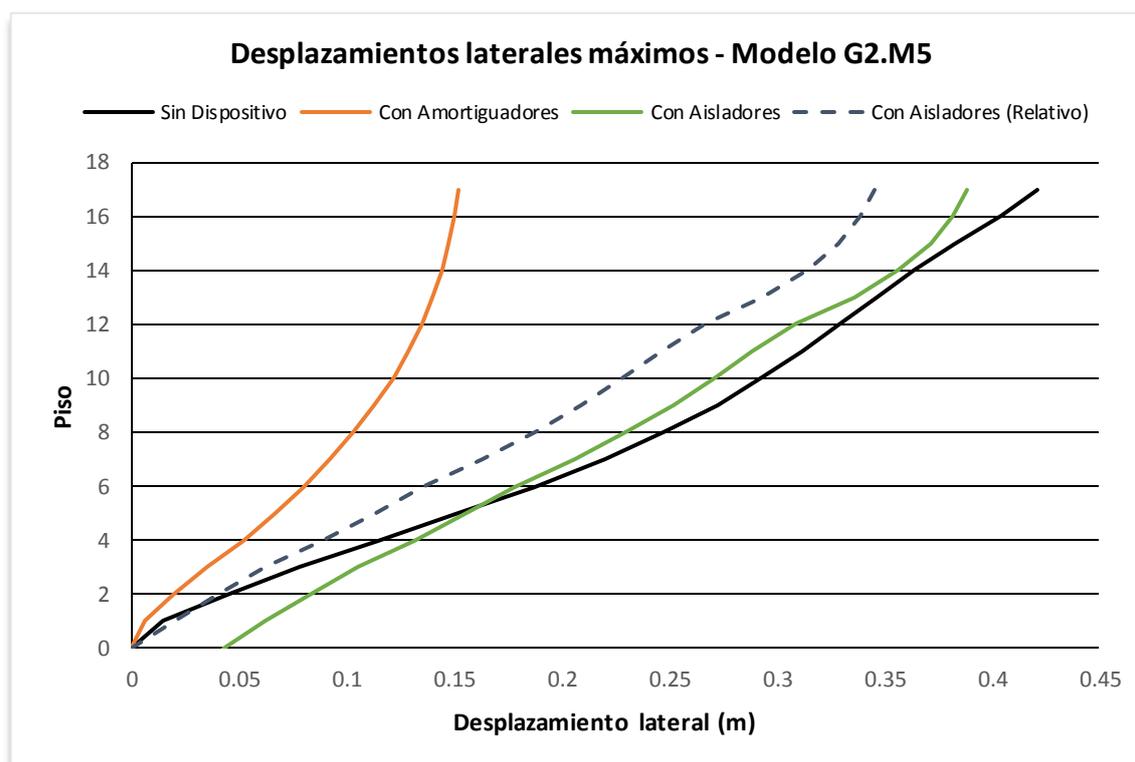


Figura 4.18. Desplazamientos laterales máximos del modelo G2.M5. Edificación de 17 pisos con planta cuadrada y pórticos de tres vanos.

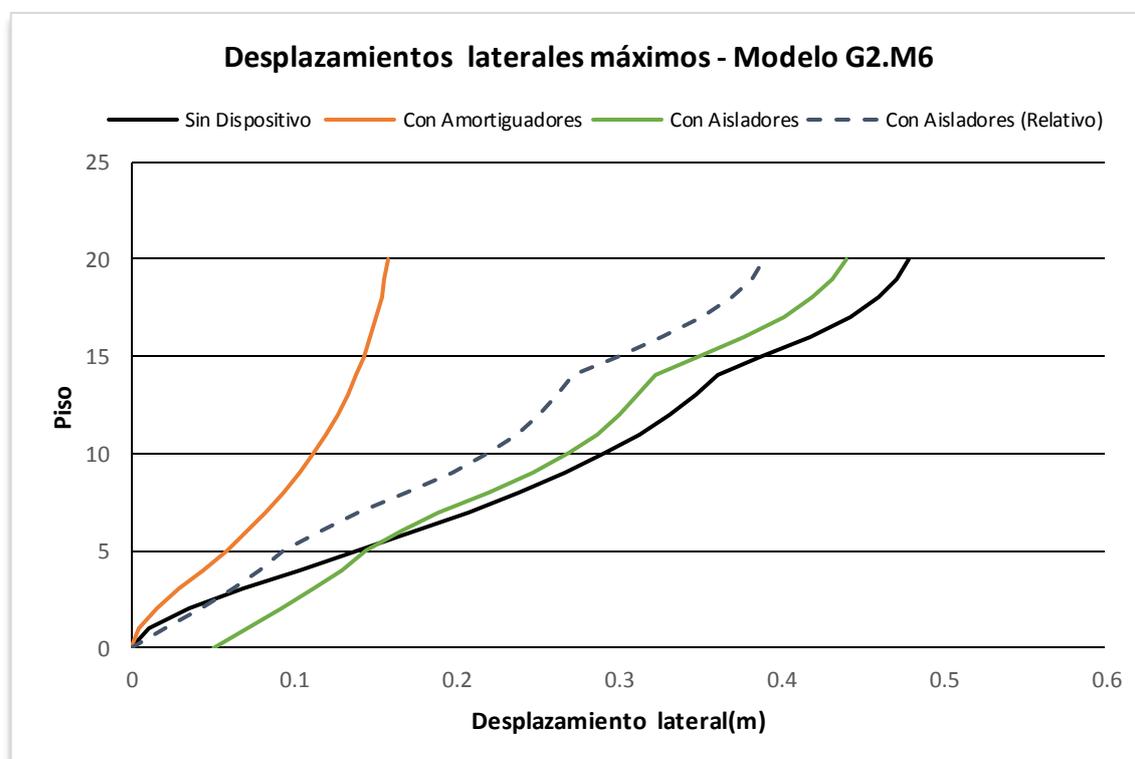


Figura 4.19. Desplazamientos laterales máximos del modelo G2.M6. Edificación de 20 pisos con planta cuadrada y pórticos de tres vanos.

Para el segundo grupo de modelos, al igual que en el primer grupo, la eficiencia de los dispositivos varía dependiendo de la altura del modelo.

En los modelos G2.M1, G2.M2 y G2.M3 correspondiente a las estructuras de 4, 7 y 10 pisos (Figuras 4.14, 4.15 y 4.16), las variantes que utilizan aisladores han tenido un buen desempeño sísmico en comparación a las variantes sin dispositivo, dado que la curva del desplazamiento de las variantes con aisladores tiene una pendiente mayor. Asimismo, las variantes con amortiguadores también tuvieron un alto desempeño en comparación con las variantes sin dispositivos, y su comportamiento es tan bueno como el de las variantes con aisladores.

En los modelos G2.M4, G2.M5 y G2.M6, correspondientes a las estructuras de 13, 17 y 20 pisos (Figuras 4.17, 4.18 y 4.19) los amortiguadores mejoran ampliamente el desempeño de las estructuras, tal es así que el desplazamiento en el último piso de las variantes que utilizan amortiguadores es menor que en las variantes sin dispositivo. En cambio, las variantes con aisladores no tienen un correcto comportamiento puesto que sus curvas se asemejan a las variantes sin dispositivo sísmico.

Por último, de la Figura 4.20 a la Figura 4.25 se presentan los resultados correspondientes a los modelos del Grupo 3, cuya planta tiene una distribución rectangular y están conformada por pórticos de tres y cinco vanos. El sismo fue aplicado perpendicularmente a la dirección mayor de los modelos, de tal manera que la dirección que tiene 3 vanos es la que resiste el sismo aplicado.

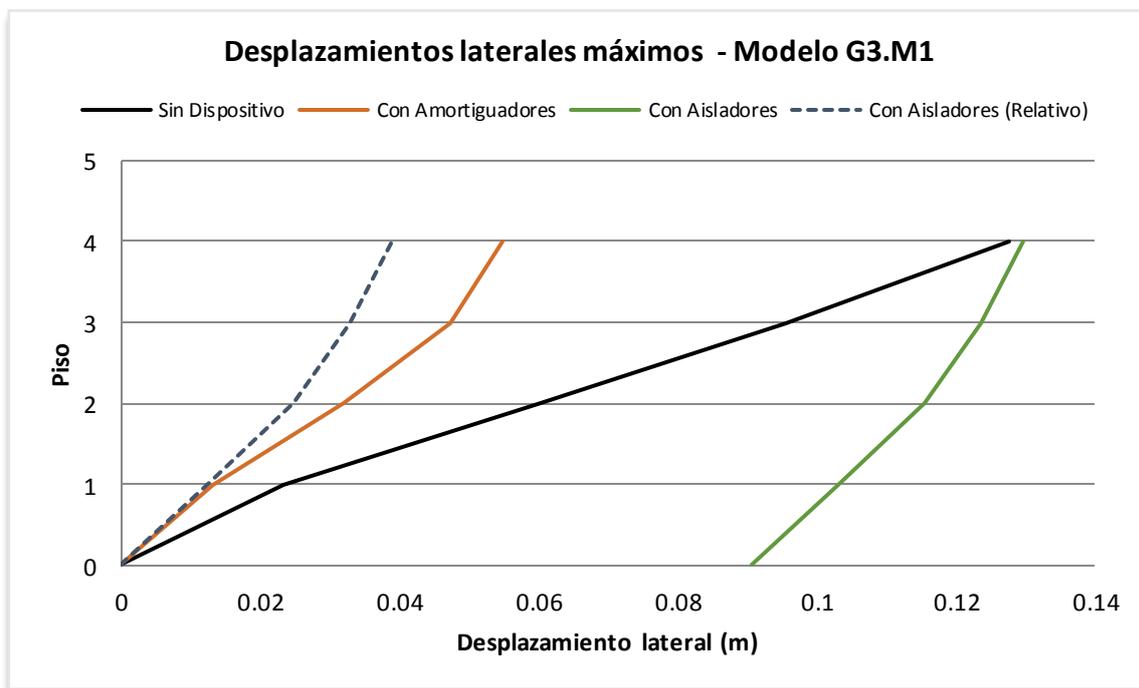


Figura 4.20. Desplazamientos laterales máximos del modelo G3.M1. Edificación de 4 pisos con planta rectangular y pórticos de tres y cinco vanos.

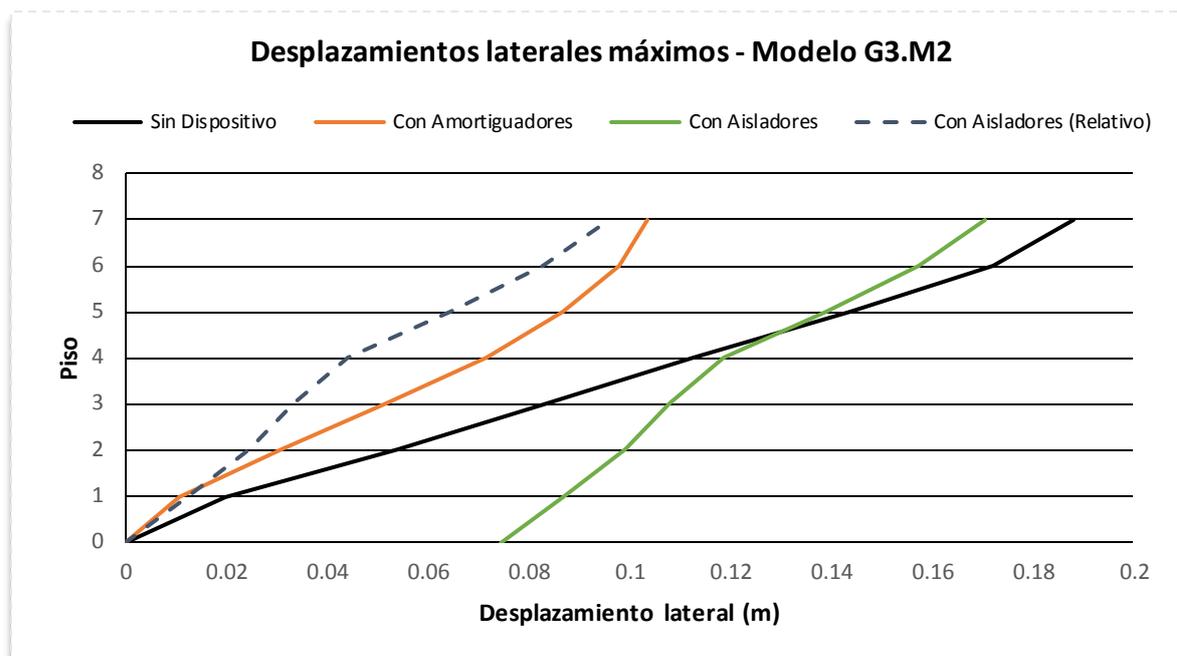


Figura 4.21. Desplazamientos laterales máximos del modelo G3.M2. Edificación de 7 pisos con planta rectangular y pórticos de tres y cinco vanos.

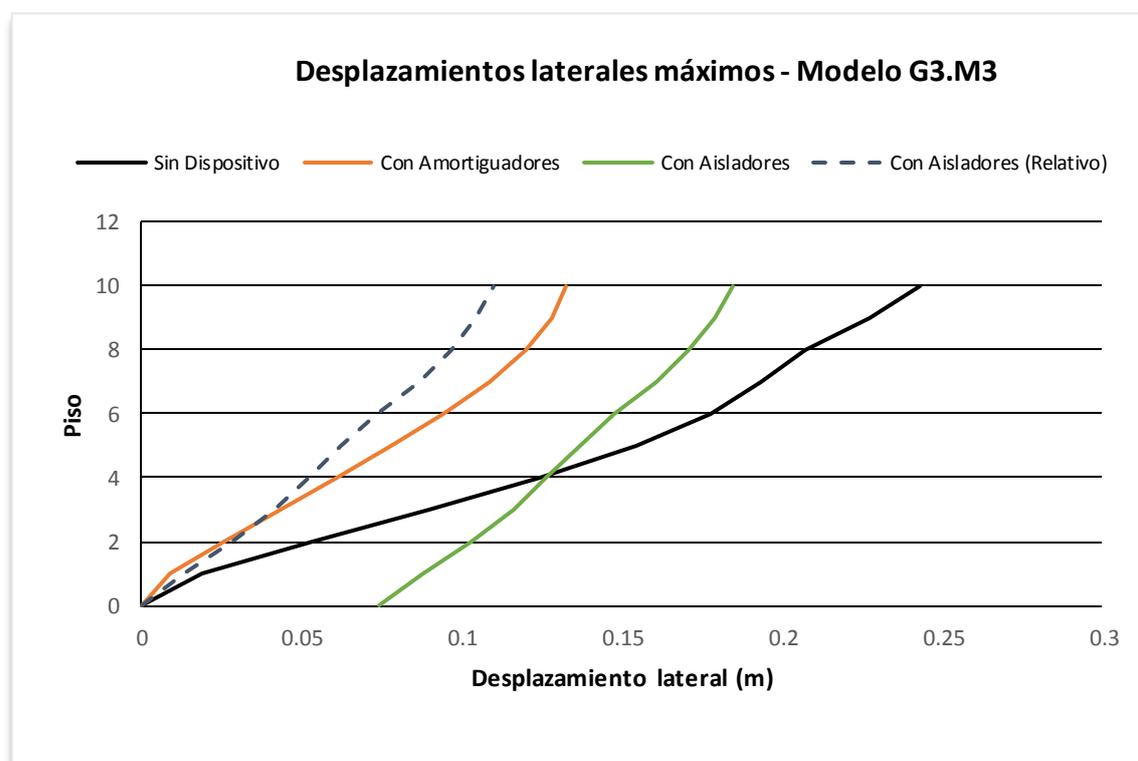


Figura 4.22. Desplazamientos laterales máximos del modelo G3.M3. Edificación de 10 pisos con planta rectangular y pórticos de tres y cinco vanos.

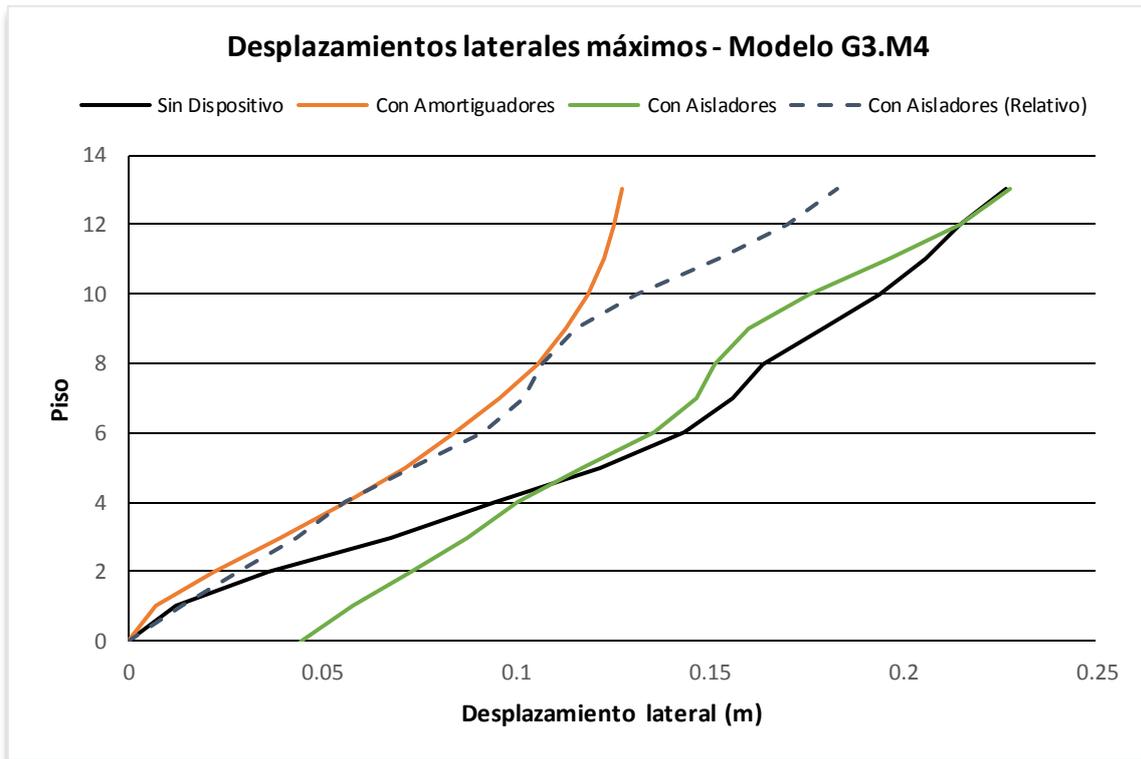


Figura 4.23. Desplazamientos laterales máximos del modelo G3.M4. Edificación de 13 pisos con planta rectangular y pórticos de tres y cinco vanos.

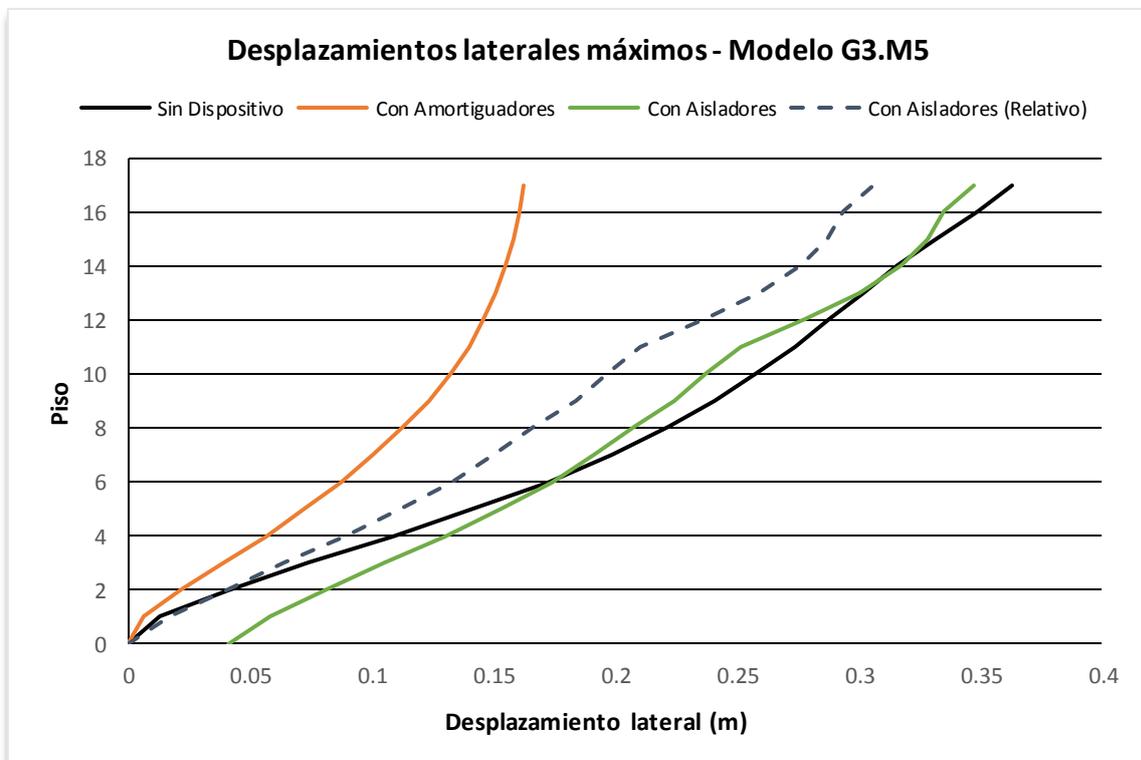


Figura 4.24. Desplazamientos laterales máximos del modelo G3.M5. Edificación de 17 pisos con planta rectangular y pórticos de tres y cinco vanos.

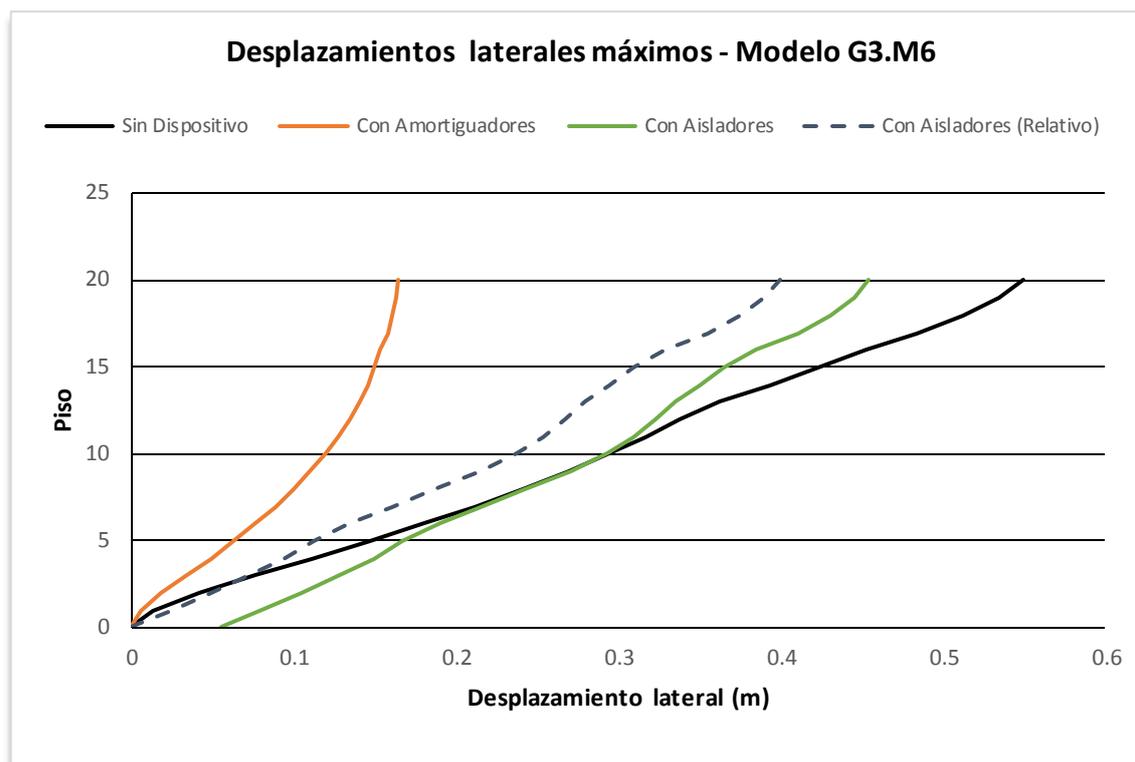


Figura 4.25. Desplazamientos laterales máximos del modelo G3.M6. Edificación de 20 pisos con planta rectangular y pórticos de tres y cinco vanos.

En este último grupo, al igual que en los anteriores, hay una clara diferencia entre el desempeño de los dispositivos en los modelos de poca y gran altura.

En los modelos G3.M1, G3.M2 y G3.M3 que corresponden a estructuras de 4, 7 y 10 pisos, (Figuras 4.20, 4.21 y 4.22), las variantes con aisladores tuvieron un notable desempeño sísmico. Las curvas que representan su desplazamiento tienen una mayor pendiente, lo que indica menores desplazamientos relativos. En contraste, las variantes con amortiguadores no consiguen tener el mismo nivel de desempeño que las variantes con aisladores; no obstante, tienen un mejor comportamiento que las variantes sin dispositivo.

En modelos G3.M4, G3.M5 y G3.M6, de 13, 17 y 20 pisos, cuyos resultados se muestran de la Figura 4.23 a la Figura 4.25, los amortiguadores brindan un mejor comportamiento en las estructuras, disminuyendo los desplazamientos horizontales. En cambio, las variantes que utilizan aisladores tienen un desempeño muy similar a las estructuras sin dispositivo, siendo sus curvas muy parecidas. Por lo tanto se deduce que no es tan eficiente usar aisladores en edificaciones de gran altura.

#### 4.6. Cuadros comparativos de las derivas máximas de entrepiso

Tal como se indica en las especificaciones del *COMMITTEE VISION 2000*, uno de los parámetros esenciales para medir el desempeño sísmico es la deriva máxima de entrepiso. En el caso de la norma peruana E-030, el valor límite de la deriva máxima de entrepiso es 0.007 para estructuras aporricadas de concreto armado.

De la Figura 4.26 a la Figura 4.28 se presentan gráficamente los valores de las derivas máximas obtenidas para cada uno de los modelos y sus variantes. El consolidado de las derivas obtenidas de todos los pisos de cada modelo se presenta en las tablas del Anexo F.

Cabe indicar que las derivas máximas de entrepiso, de los modelos estructurales analizados, resultaron estar en el rango de 0.012, siendo diferente al valor de 0.01 obtenido en el pre-dimensionamiento. Esto sucedió porque el análisis realizado en los dos casos fue distinto. Para el caso en donde se obtuvieron las derivas máximas en el rango de 0.012 se realizó un análisis tiempo-historia utilizando acelerogramas de sismos; mientras que para el caso del predimensionamiento, se realizó un análisis estático utilizando el 30% de la carga muerta como carga lateral.

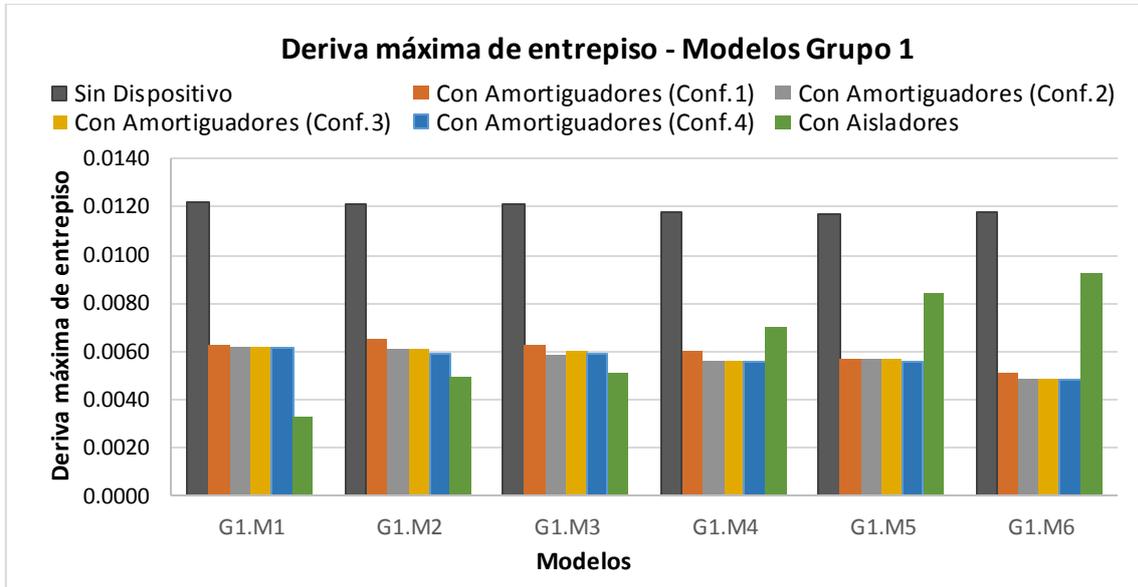


Figura 4.26. Derivas máximas de entrepiso de los modelos del Grupo 1. Modelos con una planta cuadrada y pórticos de cinco vanos. Fuente: Elaboración Propia

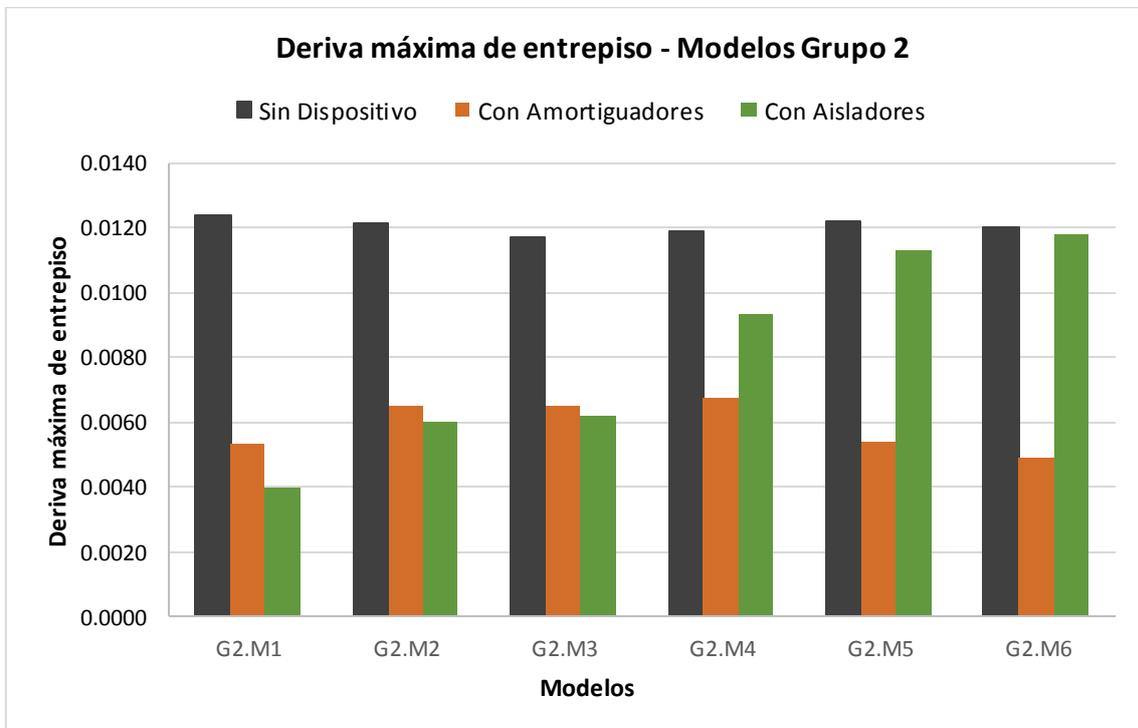


Figura 4.27. Derivas máximas de entrepiso de los modelos del Grupo 2. Modelos con una planta cuadrada y pórticos de tres vanos. Fuente: Elaboración Propia

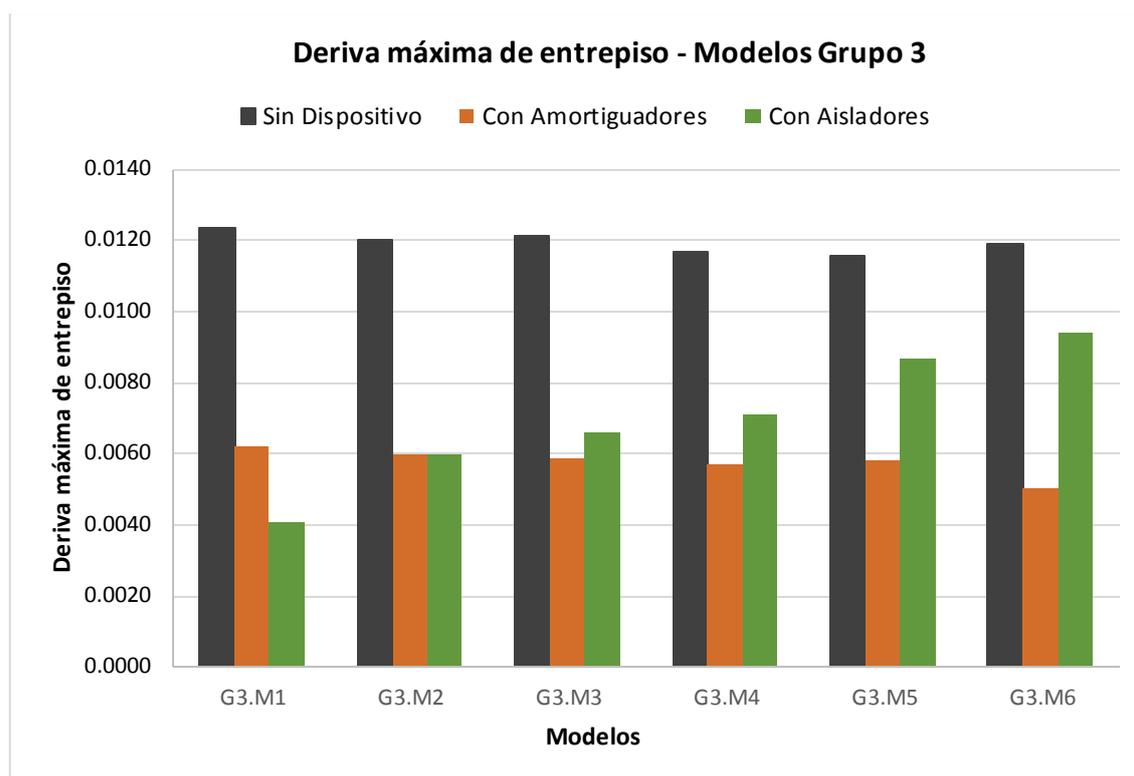


Figura 4.28. Derivas máximas de entrepiso de los modelos del Grupo 3. Modelos con una planta rectangular, y pórticos de tres y cinco vanos. Fuente: Elaboración Propia

En las figuras se observa que en todas las variantes sin dispositivo sísmico, consideradas en el análisis, se supera ampliamente la deriva límite de 0.007 establecida por la norma peruana E-030, siendo así necesario mejorar el comportamiento de la estructura, y una opción será la utilización de dispositivos de protección sísmica.

Al incluir los dispositivos de protección sísmica se logra disminuir la deriva máxima en todos los modelos. No obstante, en algunos casos con aisladores esa reducción de la deriva no es suficiente.

Para los tres grupos, las variantes con aisladores han tenido un excelente comportamiento en los modelos con esbeltez menor a 1.2. Siendo la esbeltez la relación entre la altura de la edificación y la menor dimensión en planta. Inclusive, las derivas máximas para estos modelos son menores a los obtenidos en las variantes con amortiguadores. En cambio, en los modelos de mayor altura, los aisladores no redujeron la deriva máxima a un valor inferior a 0.007.

Por otro lado, en todas las variantes que utilizaron amortiguadores la deriva máxima resultó estar por debajo del límite 0.007 exigido por la norma peruana E-030. Con lo que se concluye que el uso de amortiguadores mejora el comportamiento de la estructura independientemente de la altura de la misma, y tiene un mejor desempeño sísmico que los aisladores en edificaciones de mayor altura.

Asimismo, para determinar la influencia de la esbeltez del edificio en la efectividad de los aisladores y amortiguadores, se vio conveniente graficar la variación de la deriva máxima de entrepiso en función de la esbeltez.

De la Figura 4.29 a la Figura 4.31 se presentan las variaciones de las derivas máximas correspondientes a los modelos de los Grupos 1, 2 y 3.

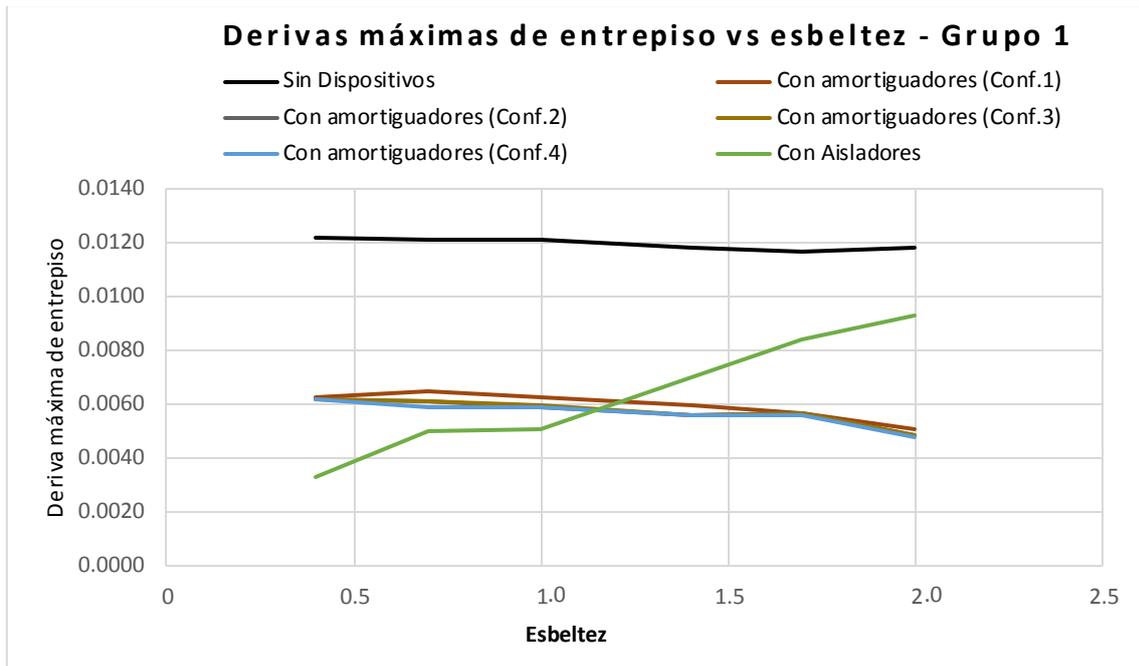


Figura 4.29. Variación de la deriva máxima en función de la esbeltez – Grupo 1. Modelos con una planta cuadrada y pórticos de cinco vanos. Fuente: Elaboración Propia

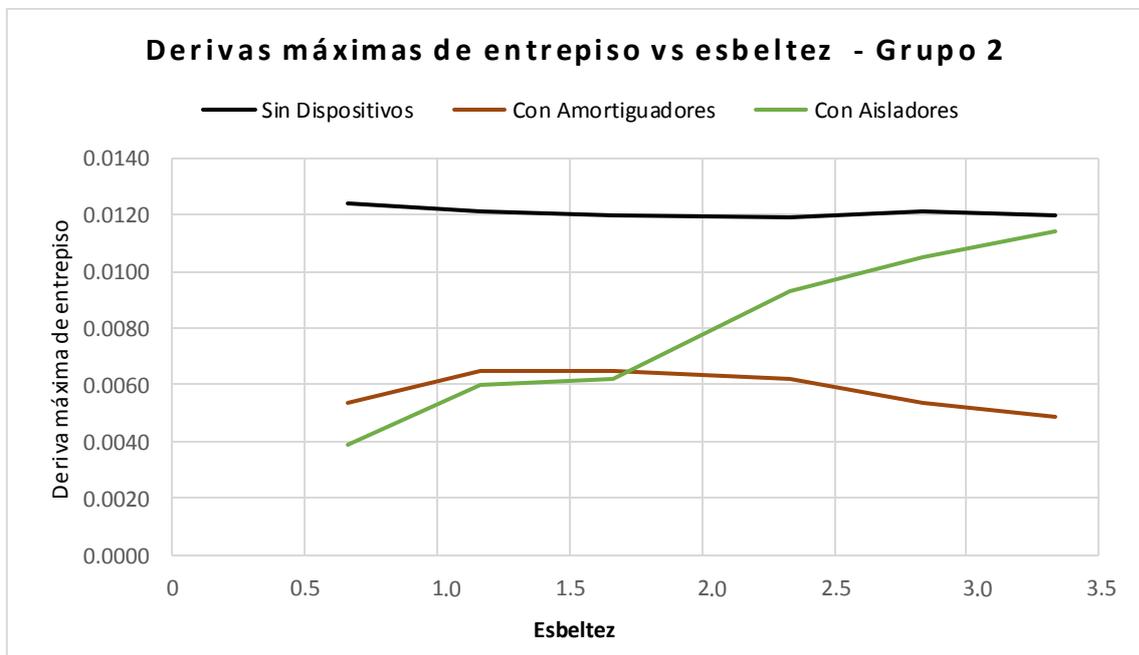


Figura 4.30. Variación de la deriva máxima en función de la esbeltez – Grupo 2. Modelos con una planta cuadrada y pórticos de tres vanos. Fuente: Elaboración Propia

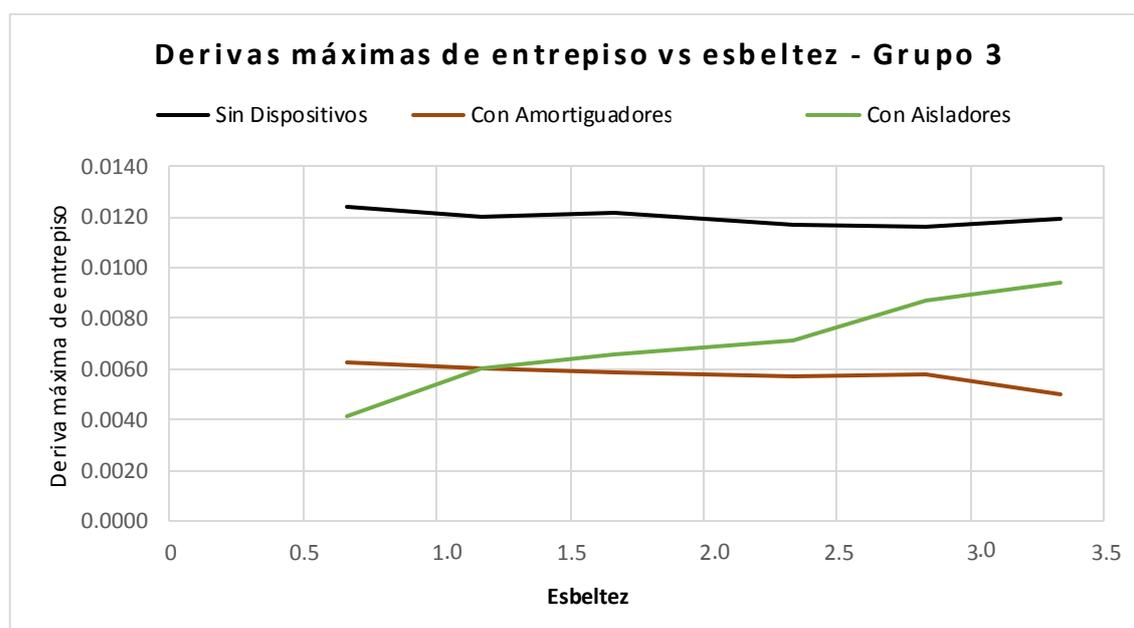


Figura 4.31 Variación de la deriva máxima en función de la esbeltez – Grupo 3. Modelos con una planta rectangular y pórticos de tres y cinco vanos. Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en estas figuras, el desempeño disminuye en las variantes que utilizan aisladores elastoméricos conforme se incrementa el valor de la esbeltez del edificio. Sin embargo, cuando la esbeltez tiene un valor menor a 1.2, las estructuras con aisladores tienen un mejor desempeño que las estructuras con amortiguadores porque las derivas máximas de entrepiso son menores. Con respecto al valor límite de deriva, de 0.007, indicado por la Norma E-030, este valor es superado en las variantes analizadas con aisladores para valores altos de esbeltez. Esto ocurre en los modelos con aisladores del Grupo 1 cuando la esbeltez es superior a 1.5; en los modelos del Grupo 2, para una esbeltez de 1.8; y en los modelos del Grupo 3, para una esbeltez de 2. En cambio, en las edificaciones con amortiguadores se observa una reducción significativa de la deriva máxima conforme se incrementa el valor de la esbeltez. En todas las variantes con amortiguadores los valores obtenidos de las derivas máximas se encuentran por debajo del límite de 0.007. Asimismo, en el Grupo 1, donde se utilizaron cuatro configuraciones de distribución de amortiguadores, se aprecia que no se tuvieron diferencias sustanciales en las derivas máximas obtenidas. Esto sucedió porque se trabajó para una misma capacidad en cada una de las variantes y se evaluó para una misma carga sísmica.

Por otra parte, las edificaciones analizadas de los Grupos 2 y 3, con igual número de pisos, tienen el mismo valor de esbeltez a pesar que la forma y el área de la planta son distintas. Al comparar las Figuras 4.30 y Figura 4.31, se observa que la curva correspondiente a las variantes con aisladores del Grupo 3 da valores ligeramente menores de deriva máxima en comparación con los valores de la curva obtenida para las variantes con aisladores del Grupo 2. Esto quizás se debe a que las variantes del Grupo 3 tiene un mayor área en planta, y en consecuencia tiene más aisladores que rigidizan la base de la edificación. En cambio, para las variantes con amortiguadores no se aprecian diferencias significativas entre las derivas máximas obtenidas de los modelos del Grupo 2 y 3.

#### 4.7. Cuadros comparativos de la cortante basal máxima

Los resultados de la cortante basal de cada modelo se muestran de la Tabla 4.15 a la Tabla 4.17. Estos resultados fueron obtenidos con el programa SAP2000 utilizando el análisis tiempo-historia. Es importante mencionar que en el Grupo 1, los resultados obtenidos para las variantes con amortiguadores fueron muy similares, puesto que se registró una variación del orden del 1% entre los resultados de cortante basal. Por este motivo, sólo se muestran en la Tabla 4.15 los resultados de la segunda configuración de amortiguadores, la cual corresponde a dispositivos ubicados en el segundo y cuarto vano.

La cortante basal es un parámetro importante porque da una idea de las fuerzas internas que se desarrollan en los elementos estructurales. Cuando la cortante basal es menor, las fuerzas internas en los elementos estructurales serán menores.

Tabla 4.15. Cortante basal máxima – Grupo 1. Modelos con una planta cuadrada y pórticos de cinco vanos. Fuente: Elaboración Propia

Cortante Basal (t)	Sin dispositivo	Con aisladores	Con amortiguadores
G1.M1	295	91	204
G1.M2	340	122	215
G1.M3	301	155	167
G1.M4	185	129	125
G1.M5	115	93	76
G1.M6	91	86	57

Tabla 4.16. Cortante basal máxima – Grupo 2. Modelos con una planta cuadrada y pórticos de tres vanos. Fuente: Elaboración Propia

Cortante Basal (t)	Sin dispositivo	Con aisladores	Con amortiguadores
G2.M1	118	36	54
G2.M2	135	46	59
G2.M3	135	60	48
G2.M4	39	30	19
G2.M5	32	27	14
G2.M6	40	34	18

Tabla 4.17. Cortante basal máxima – Grupo 3. Modelos con una planta rectangular y pórticos de tres y cinco vanos. Fuente: Elaboración Propia

Cortante Basal (t)	Sin dispositivo	Con aisladores	Con amortiguadores
G3.M1	195	55	128
G3.M2	215	76	122
G3.M3	199	89	107
G3.M4	110	73	74
G3.M5	65	49	37
G3.M6	66	56	40

En edificaciones aporricadas, a mayor altura de edificación, se espera que la cortante basal se incremente debido a que la edificación tiene mayor masa participativa. No obstante, eso no sucede en los modelos analizados. En las tablas mostradas se aprecia que los modelos de 7 y 10 pisos (G1.M2, G1.M3, G2.M2, G2.M3, G3.M2 y G3.M3) obtuvieron los valores de cortante basal más altos. Esto sucedió porque la masa no es el único parámetro que influye en el valor de la cortante basal, sino también influye el período del edificio; y a mayor altura de un edificio aporricado, mayor será el período. Por lo tanto, una mayor altura de edificación no siempre implica una cortante basal mayor. Para verificar qué edificaciones deberían tener una mayor cortante basal, se analizó la ecuación de la Norma E-030 para el cálculo de la cortante basal.

$$V_b = \frac{ZUCS}{R}P \quad (\text{Ec. 4.1})$$

donde:

- $V_b$  = cortante basal máxima (t)  
 $Z$  = factor de zona  
 $U$  = factor de importancia  
 $C$  = factor de amplificación sísmica  
 $S$  = factor de suelo  
 $R$  = factor de reducción sísmica  
 $P$  = peso de la estructura (t)

Dado que en todos los edificios analizados se trabajó con las mismas condiciones, los factores  $Z$ ,  $U$ ,  $S$  y  $R$  fueron constantes en cada uno de los modelos. No obstante, el periodo y la masa de la estructura varían, y dado que  $C$  depende del período (a mayor periodo, menor  $C$ , ver Acápíte 3.1.3), la cortante basal de la estructura se incrementa conforme aumenta el valor del producto  $C*P$ . De la Tabla 4.18 a la Tabla 4.20, se presentan los valores de  $C*P$  obtenidos para cada uno de los modelos. Puesto que los modelos con aisladores y amortiguadores siguen la misma tendencia que los modelos sin dispositivo, sólo se incluyen los resultados de los modelos sin dispositivo sísmico.

Tabla 4.18. Producto  $C*P$  – Grupo 1. Modelos con una planta cuadrada y pórticos de cinco vanos. Fuente: Elaboración Propia

Modelo	Peso, P (t)	Periodo, T (s)	C	$C*P$ (t)
G1.M1	2268	0.99	2.50	5670
G1.M2	4138	1.62	1.524	6306
G1.M3	6105	2.05	0.951	5810
G1.M4	7832	3.07	0.424	3323
G1.M5	10196	4.50	0.197	2014
G1.M6	12082	5.50	0.1321	1597

Tabla 4.19. Producto C\*P – Grupo 2. Modelos con una planta cuadrada y pórticos de tres vanos. Fuente: Elaboración Propia

Modelo	Peso, P (t)	Periodo, T (s)	C	C*P (t)
G2.M1	845	0.93	2.500	2112
G2.M2	1516	1.61	1.542	2339
G2.M3	2293	1.96	1.041	2387
G2.M4	2776	3.89	0.264	733
G2.M5	3776	4.73	0.179	675
G2.M6	4559	4.89	0.167	762

Tabla 4.20. Producto C\*P – Grupo 3. Modelos con una planta rectangular y pórticos de tres y cinco vanos. Fuente: Elaboración Propia

Modelo	Peso, P (t)	Periodo, T (s)	C	C*P (t)
G3.M1	1385	0.99	2.500	3462
G3.M2	2533	1.64	1.487	3767
G3.M3	3741	2.08	0.924	3458
G3.M4	4808	3.11	0.413	1988
G3.M5	6248	4.60	0.189	1181
G3.M6	7403	5.01	0.159	1179

Tal como se aprecia en estas tablas, los modelos de 7 y 10 pisos, sombreados de color celeste, tuvieron los valores más altos de C\*P. De esta manera se verifica, al realizar un análisis tiempo-historia, que estos modelos tengan valores más altos de cortante basal en comparación con los obtenidos del resto de estructuras analizadas.

Los resultados de la Tabla 4.15 a la Tabla 4.17 se representaron gráficamente de la Figura 4.32 a la Figura 4.34. Con los resultados mostrados en las figuras, se observa que el uso de aisladores elastoméricos en la base permite reducir ampliamente la cortante basal en los modelos de poca y mediana altura (4, 7 y 10 pisos). Esta reducción está comprendida entre el 50 y 70% de la cortante basal sin dispositivo sísmico. En cambio, en edificaciones de mayor altura (13, 17 y 20 pisos), la cortante basal solamente se redujo entre un 10 y 30% aproximadamente. Esto sucede porque la flexibilidad en la base de las estructuras analizadas con aisladores fue mucho más clara en los modelos de poca altura que en los modelos de mayor altura. Esto se comprueba observando los resultados de los periodos fundamentales mostrados en la Tabla 4.12 a la Tabla 4.14, en donde el periodo de los modelos de poca altura con aisladores se incrementa ampliamente, en comparación con el periodo de los modelos sin dispositivos sísmicos produciendo una mayor flexibilización en la base de las edificaciones analizadas. No obstante, para los modelos de mayor altura, el incremento del período fue mínimo ocasionando poca flexibilización en la base de las estructuras analizadas.

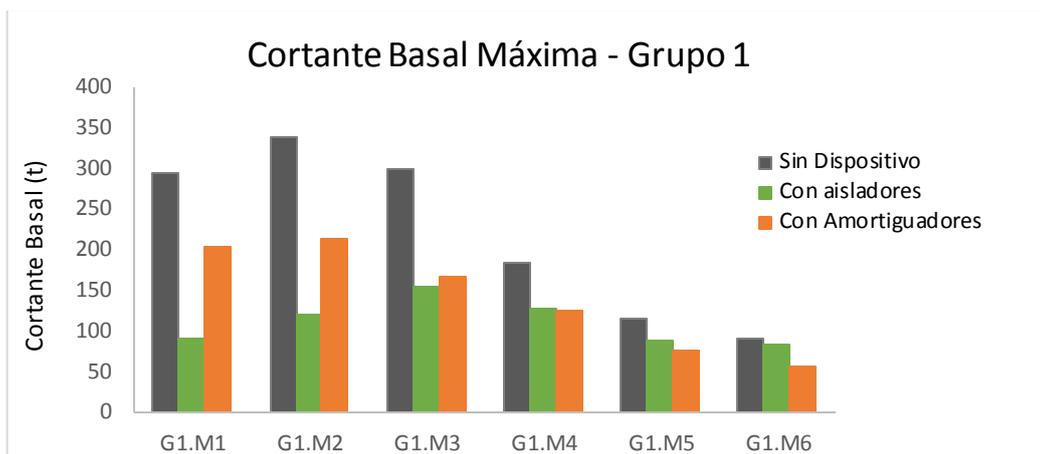


Figura 4.32. Cortante basal máxima en los modelos del Grupo 1. Modelos con una planta cuadrada y pórticos de cinco vanos. Fuente: Elaboración Propia

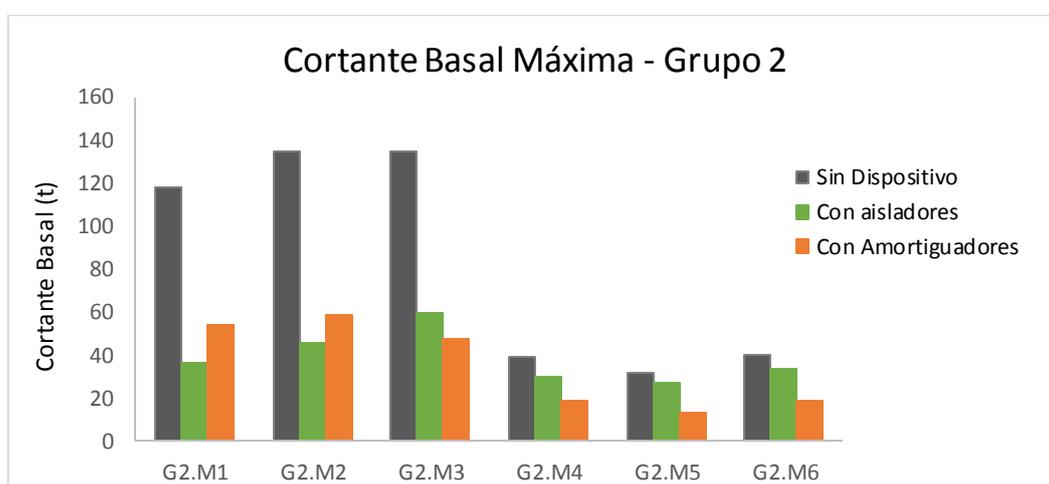


Figura 4.33. Cortante basal máxima en los modelos del Grupo 2. Modelos con una planta cuadrada y pórticos de tres vanos. Fuente: Elaboración Propia

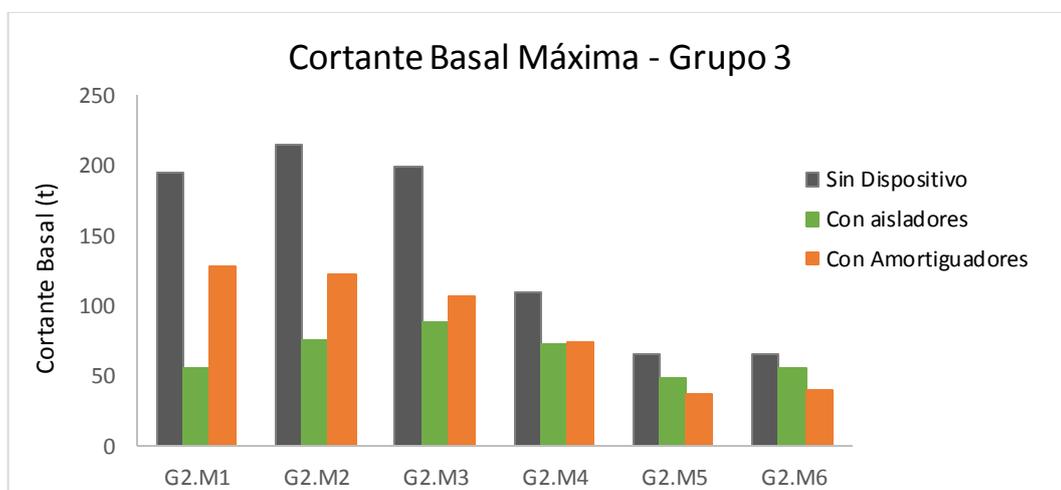


Figura 4.34. Cortante basal máxima en los modelos del Grupo 3. Modelos con una planta rectangular y pórticos de tres y cinco vanos. Fuente: Elaboración Propia

Asimismo, los resultados de cortante basal, correspondientes a las variantes con amortiguadores de fluido viscoso, son menores en todos los casos con respecto a los resultados de las variantes sin dispositivo. En la mayoría de los casos esa reducción se encuentra entre el 40 y 60 % de la cortante basal sin dispositivo. Estos resultados, al compararse con los resultados de las variantes con aisladores, se aprecia que para modelos de baja altura los aisladores fueron más eficientes porque redujeron más el valor de la cortante basal; por el contrario, para los modelos de mayor altura los amortiguadores fueron más eficientes porque redujeron más la cortante basal que los aisladores.

## Conclusiones y recomendaciones

En el presente trabajo de tesis se realizó un análisis tiempo-historia a dieciocho modelos de estructuras aporticadas con alturas de 12 a 60 metros. Para el análisis se emplearon cinco registros de acelerogramas de sismos reales, los cuales fueron escalados a una aceleración máxima de 0.45g, que es la máxima aceleración esperada en Piura. Los registros utilizados corresponden a sismos ocurridos en Pisco (2007), Ica (2013), Huánuco (2011), Piura (2014) y Tarapacá (2005). Cada sismo fue aplicado a cada uno de los modelos y los resultados fueron obtenidos usando el programa SAP2000.

Para medir el desempeño de los dispositivos, cada modelo fue analizado con tres configuraciones estructurales distintas: a) sin dispositivo sísmico, b) con aisladores y c) con amortiguadores. En cada modelo se obtuvieron los resultados de periodos, desplazamientos laterales máximos, derivas máximas de entrepiso y cortante basal máxima. Dado que con el registro correspondiente al sismo de Pisco (2007) se dio la situación más crítica, es decir los mayores desplazamientos laterales y mayor cortante basal, el análisis de los resultados fue efectuado utilizando este sismo.

Con los resultados de los periodos se verifica que los amortiguadores de fluido viscoso no alteran el periodo fundamental de la estructura, y en consecuencia no afectan su rigidez. En cambio, en los modelos con aisladores se obtienen valores de periodo más altos en comparación a los modelos sin dispositivo, esto se debe a que los aisladores flexibilizan la base de la estructura y reducen las aceleraciones sísmicas. No obstante, en las edificaciones más esbeltas el incremento del periodo es mínimo, siendo los aisladores poco eficientes.

Por otra parte, con los resultados de derivas máximas de entrepiso y de cortante basal máxima, se concluye que para edificaciones aporticadas con esbeltez menor a 1.2 y frecuencia superior a 0.6Hz, los aisladores tienen un mejor desempeño sísmico que los amortiguadores puesto que reducen sustancialmente el valor de la cortante basal máxima y de las derivas de entrepiso en comparación a los amortiguadores. Por el contrario, para edificaciones con esbeltez superior a 1.2 y frecuencia inferior a 0.6Hz se concluye que los amortiguadores tienen un mejor desempeño que los aisladores puesto que la reducción de la deriva y la cortante basal obtenida con los aisladores fue mucho menor que la reducción lograda con el uso de los amortiguadores.

En base a los resultados obtenidos de los modelos del Grupo 2 y Grupo 3, correspondientes a los modelos con un área cuadrada de 18x18 m y un área rectangular de 30x18 m respectivamente, se concluye que, a pesar que los modelos de ambos grupos tienen igual valor de esbeltez para una misma altura, las derivas de entrepiso de los modelos del Grupo 2 con aisladores son aproximadamente 5% mayores a las derivas de los modelos del Grupo 3 también con aisladores. Esto posiblemente se deba a que los modelos del Grupo 3, al tener un área mayor en planta y más columnas, requirieron un mayor número de aisladores,

lo que resultó en una mayor rigidez, que ayudó a controlar mejor las derivas de entrepiso. En cambio, para las variantes con amortiguadores no se aprecian diferencias significativas en las derivas máximas obtenidas entre los modelos del Grupo 2 y 3, por lo que la distribución en planta no tuvo influencia.

El uso de distintos arreglos de amortiguadores de fluido-viscoso en un mismo modelo de edificación no produce diferencias significativas en los resultados de desplazamientos laterales, derivas y cortantes basales siempre que la suma de las capacidades de carga de los amortiguadores en la dirección de análisis sea la misma.

Actualmente, en el mundo existen muchas estructuras construidas con aisladores y amortiguadores que fueron diseñadas con las especificaciones del FEMA274. Estas estructuras han tenido un buen comportamiento ante sismos de gran magnitud. Sin embargo, el uso de aisladores y amortiguadores no está muy extendido en el Perú, quizás por la carencia de metodologías de diseño con estos dispositivos en nuestras normas y por la poca difusión de su comportamiento estructural. Dado que nuestro país se ubica en una zona de gran actividad sísmica, sería recomendable que la norma peruana E-030 también incluya una sección sobre el diseño de los aisladores y amortiguadores; de esta manera, se promovería el diseño y construcción de estructuras que contemplen estos dispositivos.

## Referencias bibliográficas

- Aguiar, R. (2008): “Análisis sísmico en edificios” Escuela Politécnica del Ejército. Quito-Ecuador.
- Andrade, L. (2004): “Control de la deriva en las normas de diseño sismorresistente” Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Arriagada, J (2005): “Aislación sísmica de un edificio de oficinas de siete pisos”. Universidad Austral de Chile.
- ASCE / SEI 7-10 - American Society of Civil Engineers, “Minimum design loads for buildings and other structures”, pp. 208-221, 2010.
- Avilés, R. (2001): “Dispositivos para el control de vibraciones”. Universidad Austral de Chile.
- ATC-40 (1996): “Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings”.
- Benavente, J.; Traverso, I. (2013): “Comparación del análisis y diseño de un edificio de concreto armado de siete pisos con y sin aislamiento en la base”. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Burgos, M (2012): “Disipador de energía fluido viscosos”. CDV-Perú.
- CDV-Perú (2012): “Ingeniería antisísmica”. URL página web: <http://cdvperu.com/>
- Colegio de Ingenieros del Perú (2014): “Aisladores sísmicos en la construcción del centro de información FIC UNI 25 11 14” Consejo departamental de Lima. URL Video: <https://www.youtube.com/watch?v=nWeAsZ1FQWI>
- Corporación de desarrollo tecnológico (2012): “Protección sísmica de estructuras”. Cámara Chilena de la Construcción.
- Dynamic Isolation Systems (2007): “Aislamiento sísmico para edificaciones y puentes”

- Federal Emergency Management Agency 274 (1997), “Nerhp guidelines for the seismic rehabilitation of buildings”. Chapter 9.
- Guevara, D. y Torres, P. (2012): “Diseño de un edificio aporticado con amortiguadores de fluido-viscoso en disposición diagonal”. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Miyamoto y Gilani (2011): “Performance based engineering by using seismic dampers for improved performance and reduction in repair cost” Miyamoto International.
- Muñoz, J. A. (2001). Diseño sismorresistente basado en desempeño. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Kelly, J. M. (1995): “Base isolation: linear theory and design, J. Earthquake Spectra, 6, 223-244.
- Kit Miyamoto y Hideki (2010): “Probabilistic seismic risk identification of steel building with viscous dampers. Tokyo Institute of Technology”
- Korswagen, P.; Arias, J. y Huaranga, P. (2012): “Análisis y diseño de estructuras con aisladores sísmicos en el Perú”. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Marsico, M. (2008), Tesis doctoral: “*Seismic isolation and energy dissipation: theoretical basis and applications*”. Universita degli Studi di Napoli Federico II.
- Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento (2016): “Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente”.
- Morales, L. y Contreras, J. (2012): “Protección de una edificación existente con disipadores de energía” Pontificia Universidad Católica del Perú.
- NCh2745 (2013): “Análisis sísmico con aislación sísmica”. Norma Chilena.
- Ingeniería y Construcción (2012): “Manual de SAP2000”. URL del canal de YouTube: <https://www.youtube.com/user/ingrubby2011>
- Seismic Protection Technologies (2014): “Aisladores sísmicos”.
- Structural Engineers Association of California (1995): “COMMITTEE VISION 2000”
- Terán, A. (2013): “Diseño de sistemas pasivos de disipación de energía”. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, México.

## **ANEXOS**



## Anexo A

### Pautas para el proceso constructivo de los dispositivos de protección sísmica

En esta sección se presenta brevemente las recomendaciones para la instalación de los aisladores y de los amortiguadores.

#### Aisladores Elastoméricos

Para comenzar con el proceso de montaje, primero hay que encajar y posicionar los insertos al concreto utilizando las plantillas provistas por el fabricante de los aisladores.

Este proceso requiere bastante precisión y algunos ajustes de obra, puesto que generalmente el acero colocado en las bases es bastante denso.

En la Figura A1 se presenta la instalación del aislador en su posición definitiva sobre los aceros de anclaje. Esta tarea se realiza utilizando la grúa de la obra. Las perforaciones de las placas de acero deben coincidir con los aceros.



Figura A1. Instalación de un aislador en la base. Fuente: Seismic Protection Technologies, 2014.

Una vez terminada esta instalación se procede a completar el acero de acuerdo al diseño estructural y a ubicar el encofrado perimetral de la columna, teniendo la precaución de que

el nivel interior del encofrado quede 5 mm sobre la placa superior del aislador. Esto se presenta en la Figura A2.



Figura A2. Instalación de un aislador en la base. Fuente: Seismic Protection Technologies, 2014.

Es importante tener en cuenta que se deberán realizar ensayos de laboratorio de aisladores prototipos y ensayos para el control de calidad de los aisladores en obra. Los prototipos de aisladores serán sometidos a ensayos de compresión y corte combinados a fin de refrendar las propiedades consideradas en el diseño.

#### Amortiguadores de Fluido Viscoso

En los amortiguadores con disposición diagonal se deberá utilizar un brazo metálico que servirá para anclar el amortiguador a la estructura, tal como se presenta en la Figura A3.



Figura A3. Disposición diagonal. Fuente: CDV Perú, 2012.

En la colocación de los amortiguadores en disposición Chevron se deberán colocar estructuras metálicas que servirán como anclaje con el sistema estructural, tal como se presenta en la Figura A4.



Figura A4. Amortiguadores en disposición Chevron. Fuente: Burgos M., 2012.



## Anexo B

### Procedimiento para modelar los dispositivos de protección sísmica en SAP2000

Para modelar estos dispositivos en el SAP2000 se selecciona en el menú, la opción *Frame Sections*. Luego se selecciona la opción *link/support proprieties* e inmediatamente después aparecerá la pantalla mostrada en la Figura B1.

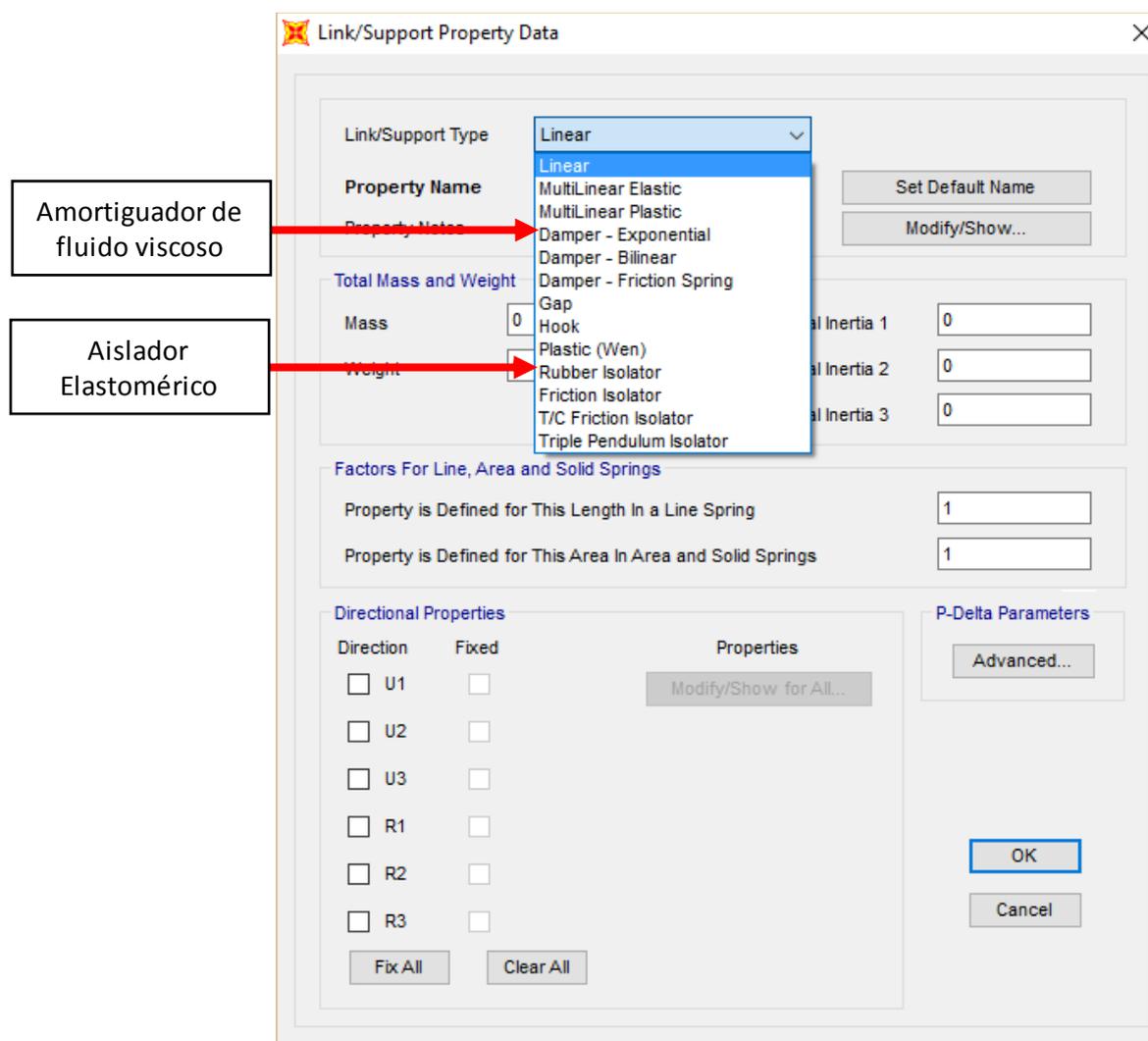


Figura B1. Elección del tipo de dispositivo.

En esta ventana, se deberá escoger el tipo de dispositivo que se utilizará haciendo click en la opción de *link/support type*. Para los aisladores elastoméricos se selecciona la opción *Rubber Isolator*, mientras que para los amortiguadores de fluido viscoso se selecciona *Damper-Exponential*.

### Aisladores elastoméricos

Luego de seleccionar la opción *Rubber Isolator* se deben seleccionar los recuadros de *direction* U1, U2 y U3. Esto se realiza para especificar que el aislador tendrá propiedades en esas tres direcciones. Asimismo se selecciona la opción *NonLinear* para U2 y U3 (Ver Figura B2). La dirección U1 será la dirección vertical y las direcciones U2 y U3 las direcciones horizontales.

**Link/Support Property Data**

Link/Support Type: Rubber Isolator

Property Name: LIN2

Property Notes:

Total Mass and Weight:

Mass	0	Rotational Inertia 1	0
Weight	0	Rotational Inertia 2	0
		Rotational Inertia 3	0

Factors For Line, Area and Solid Springs:

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1

Directional Properties:

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

P-Delta Parameters: Advanced...

Buttons: OK, Cancel

Figura B2. Selección de las direcciones de las propiedades del aislador.

En primer lugar, se configuran las propiedades de la dirección vertical haciendo click en la opción *Modify/Show for U1*. Luego, aparecerá una ventana (Figura B3) en la cual se deberá ingresar el valor de rigidez vertical en el primer recuadro; y en el segundo recuadro, el valor de amortiguamiento efectivo en la dirección vertical. Cabe indicar, que según los fabricantes DIS, el valor del amortiguamiento efectivo en la dirección vertical se puede

asumir igual al valor del amortiguamiento efectivo en la dirección horizontal, por lo tanto se optó por colocar el mismo valor.

The image shows a software dialog box titled "Link/Support Directional Properties". It is divided into two main sections:

- Identification:**
  - Property Name: Aislador
  - Direction: U1
  - Type: Rubber Isolator
  - NonLinear: No
- Properties Used For All Analysis Cases:**
  - Effective Stiffness: 92462.34
  - Effective Damping: 0.244

At the bottom, there are "OK" and "Cancel" buttons. A blue arrow points from a text box labeled "Rigidez Vertical Kv" to the "Effective Stiffness" input field.

Figura B3. Propiedades del aislador en la dirección vertical.

Luego se ingresan las propiedades en las direcciones U2 y U3, las cuales serán iguales en ambas direcciones debido a la forma circular del aislador. Al ingresar en la opción Modify/Show for U2 y U3, se coloca la rigidez efectiva  $K_{eff}$ , el amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$ , la rigidez elástica, el esfuerzo de fluencia  $F_y$  y un valor de 0.1 que equivale a la relación entre la rigidez  $K_d$  y la rigidez  $K_i$ , tal como se muestra en la Figura B4.

Finalmente, luego de haber ingresado todas las propiedades del aislador, se selecciona en el menú *draw* la opción *Draw 1 joint link*, tal como lo indica la Figura B5. Con esa opción, se colocarán los aisladores en los lugares donde se desean ubicar.

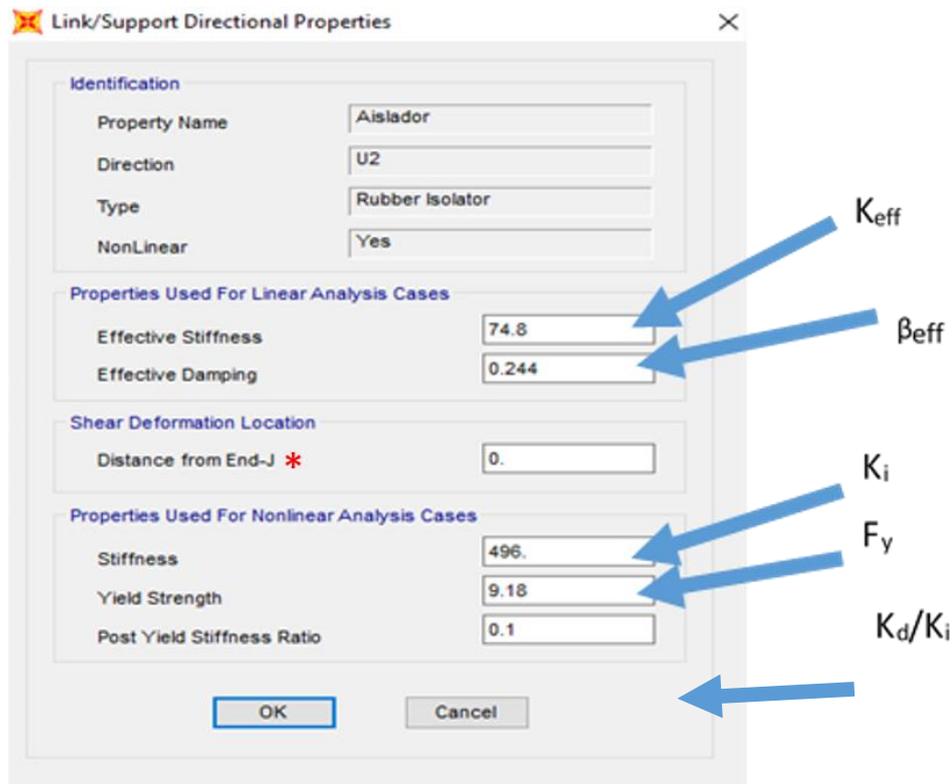


Figura B4. Propiedades del aislador en la dirección horizontal.

“Distance from End-J” es la distancia vertical desde el borde superior del aislador al borde en donde se produce la deformación máxima en el aislador, que es ocasionada por la cortante basal. Dado que en el aislador la deformación máxima se da en el extremo superior, la distancia será 0.

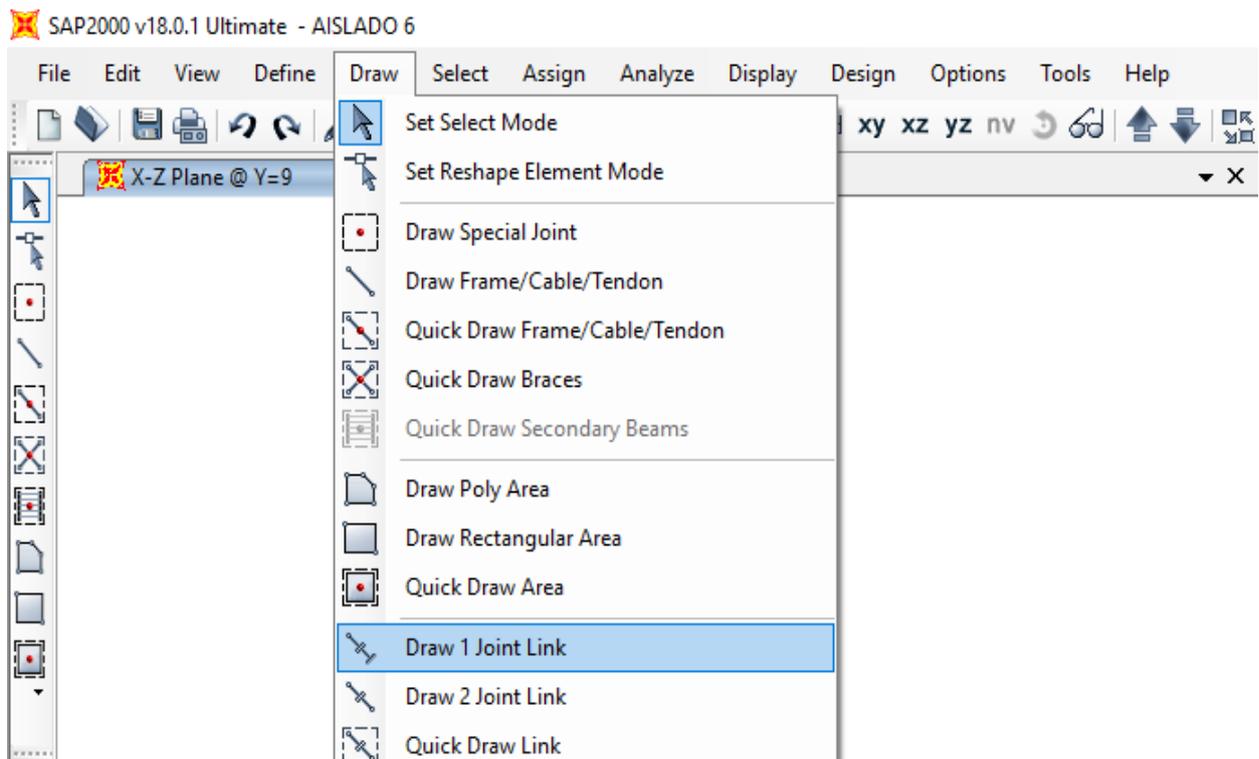


Figura B5. Opción para ubicar los aisladores elastoméricos.

### Amortiguadores de Fluido viscoso

En los amortiguadores de fluido viscoso, tal como se aprecia en Ecuación 1.10, la fuerza ejercida en el dispositivo tendrá un comportamiento exponencial ( $F=CV^\alpha$ ), el cual dependerá del valor de exponente de velocidad  $\alpha$ . Asimismo, la variación exponencial de la fuerza se puede apreciar en la curva “Línea 1” de la Figura 1.16. Por consiguiente, se selecciona el tipo Damper-Exponential. Posteriormente, se activa la dirección U1 dado que el amortiguador trabaja solamente en su dirección longitudinal, tal como se aprecia en la figura 1.17. Además, se selecciona la opción Nonlinear, dado que el tipo de análisis será un análisis tiempo-historia no lineal. Cabe indicar que la opción Nonlinear se refiere solamente al tipo de análisis; más adelante se seleccionará el valor del exponente de velocidad  $\alpha$  para indicar si es un amortiguador lineal o no lineal.

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Damper - Exponential

Property Name: LIN1

Property Notes:

Total Mass and Weight

Mass: 0. Rotational Inertia 1: 0.

Weight: 0. Rotational Inertia 2: 0.

Rotational Inertia 3: 0.

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

P-Delta Parameters

Advanced...

OK

Cancel

Figura B6. Selección de las propiedades del amortiguador.

Luego se selecciona la opción *Modify/Show for U1*, y se ingresan las propiedades del amortiguador. Las propiedades *Effective stiffness* y *effective damping* se dejan en blanco; y

las propiedades que se ingresan son la Rigidez  $K$ , el coeficiente de amortiguamiento  $C$  y el exponente de velocidad  $\alpha$ , tal como se aprecia en la Figura B7.

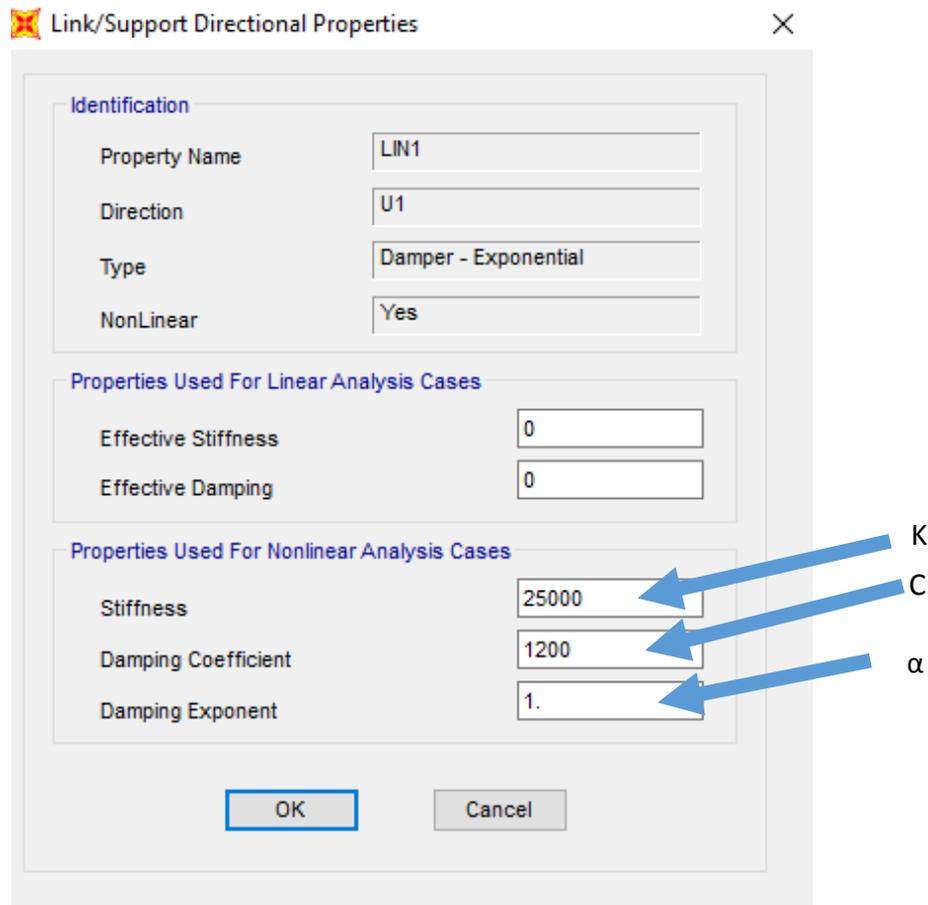


Figura B7. Propiedades del amortiguador.

Finalmente, luego de haber ingresado todas las propiedades del amortiguador, se selecciona en el menú *draw* la opción *Draw 2 joint link*, tal como lo indica la Figura B8. Con esa opción se podrán ir colocando los amortiguadores en los lugares donde se desean ubicar. Para ubicarlos se selecciona el punto de inicio del amortiguador y su punto final.

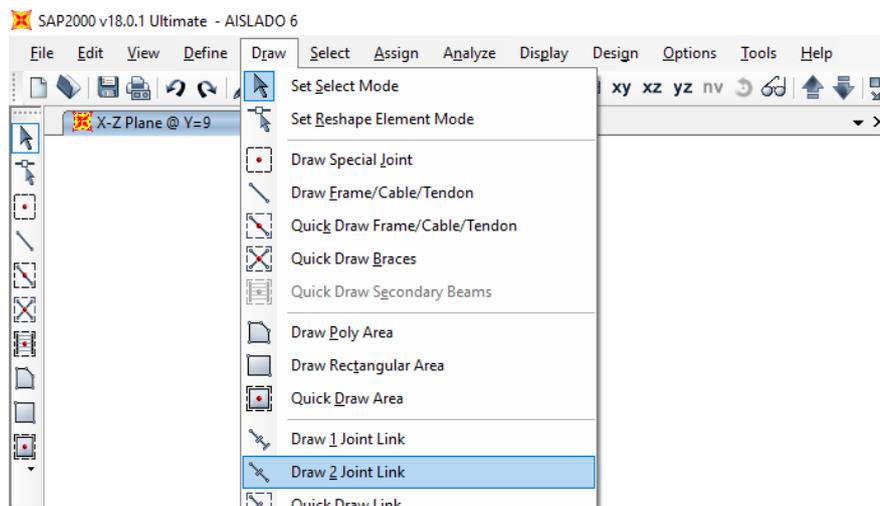


Figura B8. Opción para dibujar los amortiguadores.

## Anexo C

### Procedimiento para definir la masa participativa y para ingresar el registro sísmico en el análisis tiempo historia del SAP2000

En el software SAP2000, para poder realizar correctamente el análisis dinámico tiempo-historia, se debe definir previamente la masa participativa de la estructura. En el caso de una estructura con uso de oficinas, la masa participativa será: Carga Muerta + 25% Carga Viva.

Para ingresar la masa participativa al SAP2000, se debe seleccionar en el menú, la opción *define*, y luego la opción *Mass Source*. Posteriormente se elige la opción *modify/show mass source* en donde aparecerá una ventana, como la que se presenta en la Figura C1.

Load Pattern	Multiplier
DEAD	1.
CM	1.
CV	0.25

Figura C1. Masa participativa de la estructura

Tal como se muestra en esta figura, la carga muerta (CM), correspondiente al peso de las losas y piso terminado, y el peso propio de las vigas y columnas (DEAD), tienen un *multiplier* de 1; y la carga viva (CV) tiene un *multiplier* de 0.25. Al colocar las opciones de esta manera, la masa participativa será calculada como  $CM + 0.25CV$ , tal como lo indica la norma peruana E-030 para edificaciones con un uso de oficinas.

Luego de definir la masa participativa de la estructura se ingresa el registro de aceleraciones siguiendo los siguientes pasos:

Paso 1. Se debe ir al menú *define* y seleccionar la opción *Functions* para posteriormente entrar a *Time History*. En la Figura C2 se presenta el paso mencionado.

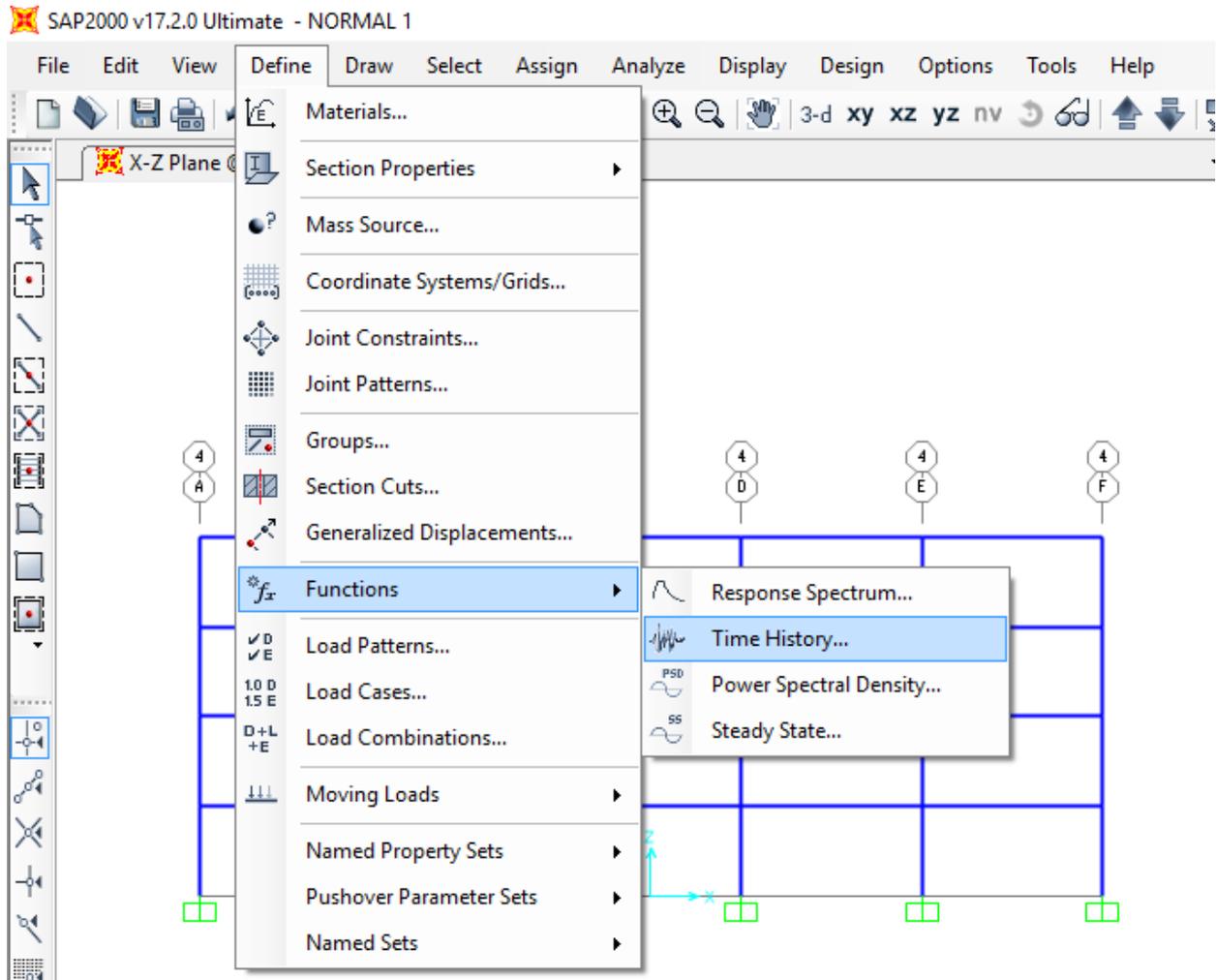


Figura C2. Registro del análisis tiempo-historia

Paso 2. Aparecerá una ventana con título *Define Time History Functions*, tal como lo indica la Figura C3. En esta ventana se debe escoger a la opción *From File* y luego presionar *Add New Function*.

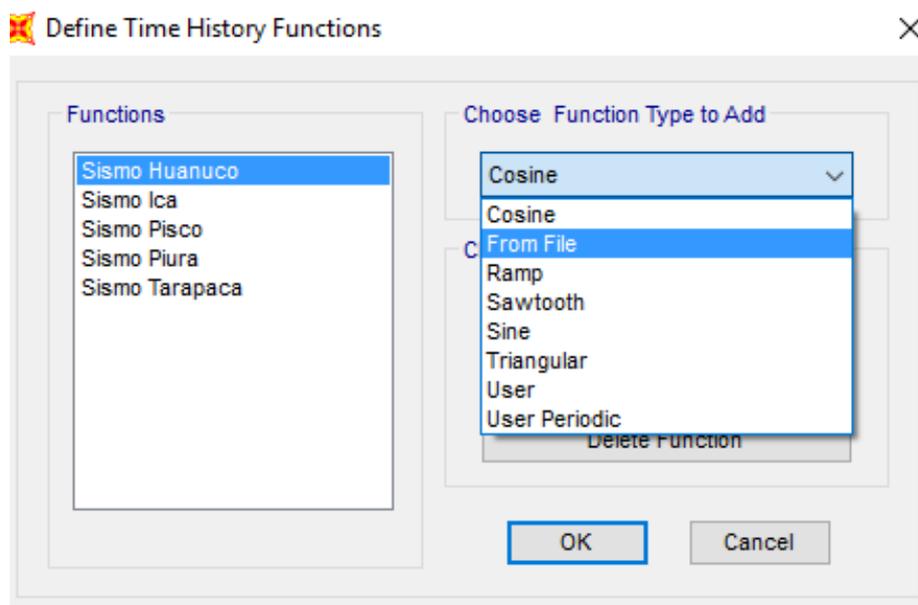


Figura C3. Selección del tipo de registro.

Paso 3. A continuación aparecerá la pantalla que se muestra en la Figura C4. Para ingresar el registro se selecciona la opción *Browse* y se seleccionará el archivo donde se encuentra el registro. Normalmente este archivo tiene formato.txt. En la sección *Header Lines to Skip* se escribirá el número de línea en el cual el programa empezará a considerar los valores del registro en el archivo. Esto se realiza porque muchas veces en las primeras líneas del archivo se encuentra información del sismo, mas no los valores. Por último, en la opción *Values Are*, se debe indicar si en el archivo están los valores de aceleración y su tiempo respectivo, o si sólo indica los valores de aceleración. En el segundo caso será necesario indicar el diferencial de tiempo entre valores.

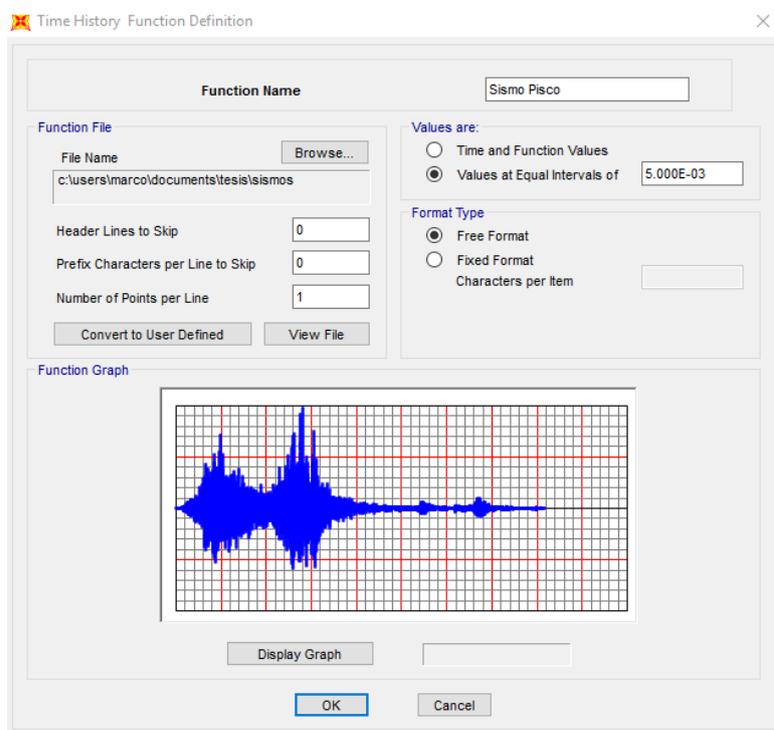


Figura C4. Ingreso del registro sísmico.

**Paso 4.** Luego de haber ingresado el registro a la base de datos del SAP2000, se deberá crear el tipo de análisis, que en este caso es un análisis tiempo-historia. Para hacerlo se deberá ingresar en el menú *define* la opción *Load Cases*, tal como se aprecia en la Figura C5.

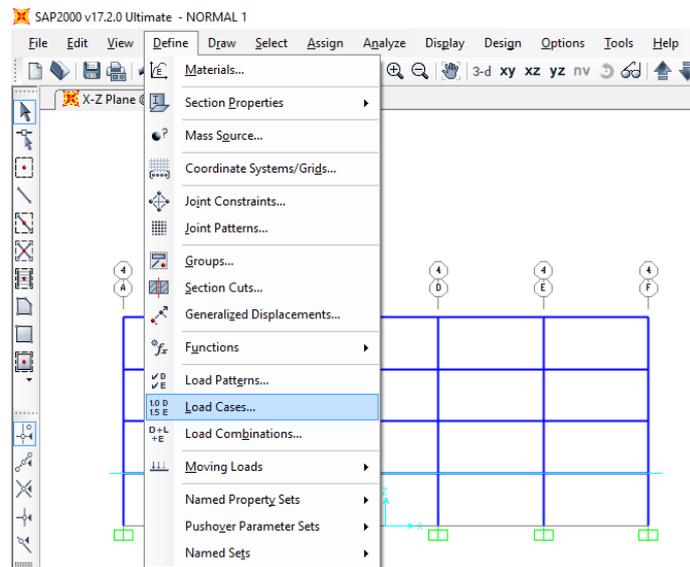


Figura C5. Selección de la opción de tipo de análisis.

**Paso 5.** A continuación aparecerá una ventana, la cual se muestra en la Figura C6, en donde se definen los parámetros de la aceleración.

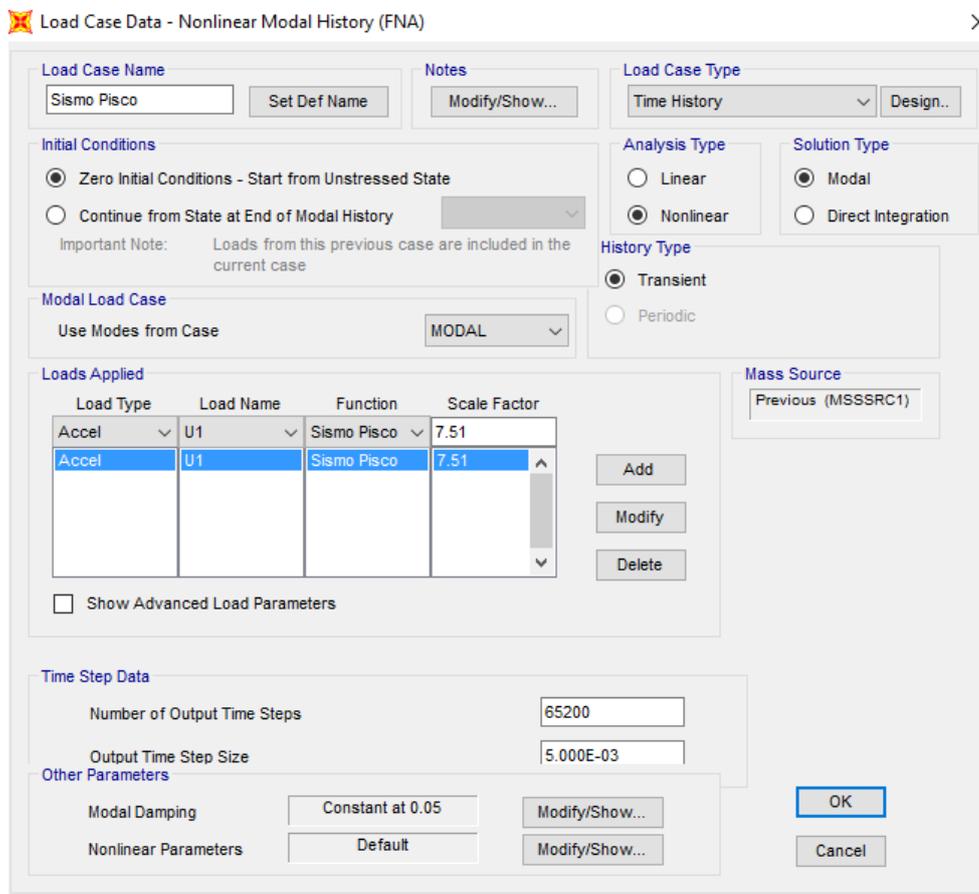


Figura C6. Propiedades del sismo.

En la opción *Load Case Type*, se deberá escoger la opción *Time History*; y en *Analysis Type*, se selecciona si será un análisis lineal o no lineal. Luego en la opción *Loads Applied* se deberán seleccionar los siguientes parámetros: en *Load Type* se selecciona la opción *Accel*; en *Load Name* se escoge la dirección del sismo; en *Function* se deberá ingresar el registro definido en el Paso 3; y por último, en *Scale Factor* se deberá asignar el factor necesario para escalar el registro a una aceleración máxima de 0.45g (en este caso). Finalmente, en la parte inferior se decidirá el número de puntos y el diferencial de tiempo que utilizará el sistema para medir el comportamiento de la estructura. Se puede escoger el mismo número de puntos y el mismo diferencial de tiempo del registro sísmico.



## Anexo D

### Resultados obtenidos del metrado de cargas para cada modelo

En este anexo se detallan las consideraciones tomadas para el metrado de cargas realizado a cada uno de los dieciocho modelos de estructuras que se analizaron en este trabajo de tesis.

#### D.1. Consideraciones

- Se toman en cuenta solamente las cargas verticales correspondientes a la carga muerta y carga viva.
- El uso de todos los modelos de estructuras es de oficinas para la planta típica, y de azotea para el último piso.
- Las columnas y las vigas son de concreto armado con un peso específico de  $2.4 \text{ t/m}^3$ .
- Las losas son aligeradas con un peso de  $0.3 \text{ t/m}^2$ .
- El piso terminado se idealiza como carga muerta de  $0.1 \text{ t/m}^2$ .
- La carga viva para la planta típica con un uso de oficina es de  $0.25 \text{ t/m}^2$ , y para la azotea es de  $0.1 \text{ t/m}^2$ .
- En la planta típica se considera una tabiquería móvil de altura total, que se idealiza como carga viva de  $0.1 \text{ t/m}^2$ .

#### D.2. Formulación de cálculo de metrado de cargas

Con las consideraciones mencionadas, se obtienen las siguientes cargas:

##### Planta típica:

$$\text{Carga muerta CM} = 0.4 * \text{Área de planta} + \text{Peso específico del Concreto} * \text{Volumen Columnas} + \text{Peso específico del Concreto} * \text{Volumen Vigas}$$

$$\text{Carga Viva CV} = 0.35 * \text{Área de planta}$$

##### Azotea:

$$\text{Carga muerta CM} = 0.4 * \text{Área de planta} + \text{Peso específico del Concreto} * \text{Volumen Columnas} + \text{Peso específico del Concreto} * \text{Volumen Vigas}$$

$$\text{Carga Viva CV} = 0.1 * \text{Área de planta}$$

Además, se toman en cuenta dos combinaciones de carga:

- a) CM + 0.25 CV: correspondiente a la masa participativa. Los resultados de esta combinación se utilizan para obtener la carga W que recibe cada aislador; y para

dimensionar el diámetro del núcleo de plomo. Asimismo, se emplean para el dimensionamiento de los amortiguadores de fluido viscoso.

- b)  $1.25CM + 1.25CV$ : correspondiente a la máxima carga actuante en la estructura. Esta combinación se utiliza para dimensionar el área neta de caucho del aislador. Al dividir esta carga entre el número de aisladores se obtiene la carga  $P_{u,máx}$ .

#### D.4. Ejemplo de cálculo del metrado de cargas

El ejemplo de cálculo corresponde al metrado de cargas del modelo de estructura analizado en el Capítulo III.

En la Figura D1 se muestra la vista en planta del modelo; y en la Tabla D1 sus características geométricas.

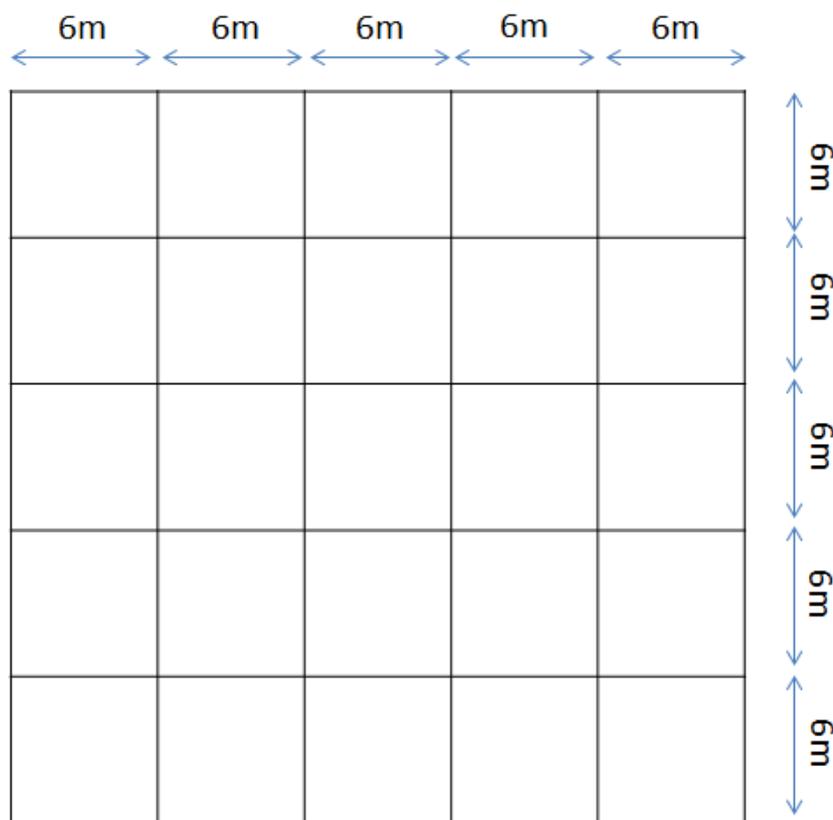


Figura D1. Planta típica del modelo. Fuente: Elaboración propia

Tabla D1. Características de la geometría del modelo. Elaboración: Propia

Piso	Altura de entrepiso (m)	Nº de columnas	Dimensiones Columnas (cm)	Dimensiones Vigas (cm)	Área de planta (m <sup>2</sup> )	Espesor de losa (cm)
1	3	36	40x40	35x35	900	20
2	3		40x40	35x35	900	20
3	3		35x35	35x35	900	20
4	3		35x35	35x35	900	20

Entonces, el metrado se realiza de la siguiente manera:

a) Masa participativa (CM + 0.25CV):

Piso 1:

$$0.4 * 900 + 2.4 * (36 * 3 * 0.4 * 0.4 + 60 * 6 * 0.35 * 0.35) + 0.25 * (0.35 * 900)$$

$$\mathbf{586.06 \text{ t}}$$

Piso 2:

$$0.4 * 900 + 2.4 * (36 * 3 * 0.4 * 0.4 + 60 * 6 * 0.35 * 0.35) + 0.25 * (0.35 * 900)$$

$$\mathbf{586.06 \text{ t}}$$

Piso 3:

$$0.4 * 900 + 2.4 * (36 * 3 * 0.35 * 0.35 + 60 * 6 * 0.35 * 0.35) + 0.25 * (0.35 * 900)$$

$$\mathbf{576.34 \text{ t}}$$

Piso 4:

$$0.4 * 900 + 2.4 * (36 * 3 * 0.35 * 0.35 + 60 * 6 * 0.35 * 0.35) + 0.25 * (0.1 * 900)$$

$$\mathbf{520.09 \text{ t}}$$

Por lo tanto la masa participativa total es:  $586.06 + 586.06 + 576.34 + 520.09 = \mathbf{2268.56 \text{ t}}$ ,  
y la carga W que recibe cada aislador es:  $2268.56/36 = \mathbf{63.02 \text{ t}}$

b) Máxima carga en la estructura (1.25CM + 1.25CV):

Piso 1:

$$1.25 * [0.4 * 900 + 2.4 * (36 * 3 * 0.4 * 0.4 + 60 * 6 * 0.35 * 0.35) + 0.35 * 900]$$

$$\mathbf{1027.87 \text{ t}}$$

Piso 2:

$$1.25 * [0.4 * 900 + 2.4 * (36 * 3 * 0.4 * 0.4 + 60 * 6 * 0.35 * 0.35) + 0.35 * 900]$$

$$\mathbf{1027.87 \text{ t}}$$

Piso 3:

$$1.25 * [0.4 * 900 + 2.4 * (36 * 3 * 0.35 * 0.35 + 60 * 6 * 0.35 * 0.35) + 0.35 * 900]$$

$$\mathbf{1015.74 \text{ t}}$$

Piso 4:

$$1.25 * [0.4 * 900 + 2.4 * (36 * 3 * 0.35 * 0.35 + 60 * 6 * 0.35 * 0.35) + 0.1 * 900]$$

$$\mathbf{734.49 \text{ t}}$$

Por lo tanto la máxima carga en la estructura es:  $1027.87 + 1027.87 + 1015.74 + 734.49 = \mathbf{3806.01 \text{ t}}$

Asimismo la carga máxima  $P_{u,m\acute{a}x}$  que recibe cada aislador es:  $3806.01/36 = \mathbf{105.72 \text{ t}}$

### D.5. Resultados de los metrados de cargas

Los resultados de los metrados de cargas de todos los modelos analizados en este trabajo de tesis son presentados desde la Tabla D2 a la Tabla D19. Asimismo, para las combinaciones de carga (CM+0.25CV y 1.25CM+1.25CV) se presentan respectivamente la carga W que recibe cada aislador y la máxima carga  $P_{u,max}$  que debe soportar cada aislador.

Tabla D2. Metrado de cargas del Modelo G1.M1. Modelo de cuatro pisos con un área cuadrada de 900 m<sup>2</sup> y 36 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	40x40	35x35	586.06	1027.89
Piso 2	40x40	35x35	586.06	1027.89
Piso 3	35x35	35x35	576.34	1015.74
Piso 4	35x35	35x35	520.09	734.49
<b>Total de la estructura</b>			2268.55	3806.01
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>P<sub>u,máx</sub> (t)</b>
			63.02	105.72

Tabla D3. Metrado de cargas del Modelo G2.M1. Modelo de cuatro pisos con un área cuadrada de 324 m<sup>2</sup> y 16 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	40x40	35x35	218.71	379.71
Piso 2	40x40	35x35	218.71	379.71
Piso 3	35x35	35x35	214.39	374.31
Piso 4	35x35	35x35	194.14	273.06
<b>Total de la estructura</b>			845.98	1406.79
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>P<sub>u,máx</sub> (t)</b>
			52.87	87.92

Tabla D4. Metrado de cargas del Modelo G3.M1. Modelo de cuatro pisos con un área rectangular de 540 m<sup>2</sup> y con 24 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	40x40	35x35	357.93	624.6
Piso 2	40x40	35x35	357.93	624.6
Piso 3	35x35	35x35	351.45	616.5
Piso 4	35x35	35x35	317.7	447.75
<b>Total de la estructura</b>			1385.01	2313.45
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>P<sub>u,máx</sub> (t)</b>
			57.70	96.39

Tabla D5. Metrado de cargas del Modelo G1.M2. Modelo de siete pisos con un área cuadrada de 900 m<sup>2</sup> y 36 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	50x50	35x35	609.39	1057.05
Piso 2	50x50	35x35	609.39	1057.05
Piso 3	50x50	35x35	609.39	1057.05
Piso 4	45x45	35x35	597.07	1041.66
Piso 5	45x45	35x35	597.07	1041.66
Piso 6	40x40	35x35	586.06	1027.89
Piso 7	40x40	35x35	529.81	746.64
<b>Total de la estructura</b>			4138.20	7029.00
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			114.95	195.25

Tabla D6. Metrado de cargas del Modelo G2.M2. Modelo de siete pisos con un área cuadrada de 324 m<sup>2</sup> y 16 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga última (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	45x45	35x35	223.61	385.83
Piso 2	45x45	35x35	223.61	385.83
Piso 3	45x45	35x35	223.61	385.83
Piso 4	40x40	35x35	218.71	379.71
Piso 5	40x40	35x35	218.71	379.71
Piso 6	35x35	35x35	214.39	374.31
Piso 7	35x35	35x35	194.14	273.06
<b>Total de la estructura</b>			1516.82	2564.28
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pumáx (t)</b>
			94.80	160.26

Tabla D7. Metrado de cargas del Modelo G3.M2. Modelo de siete pisos con un área rectangular de 540 m<sup>2</sup> y 24 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 2	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 3	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 4	45x45	35x35	365.27	633.78
Piso 5	45x45	35x35	365.27	633.78
Piso 6	40x40	35x35	357.93	624.60
Piso 7	40x40	35x35	324.18	455.85
<b>Total de la estructura</b>			2533.10	4280.95
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			105.54	178.33

Tabla D8. Metrado de cargas del Modelo G1.M3. Modelo de diez pisos con un área cuadrada de 900 m<sup>2</sup> y 36 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	50x50	35x35	624.51	1075.95
Piso 2	50x50	35x35	624.51	1075.95
Piso 3	50x50	35x35	624.51	1075.95
Piso 4	50x50	35x35	624.51	1075.95
Piso 5	50x50	35x35	624.51	1075.95
Piso 6	45x45	35x35	612.19	1060.56
Piso 7	45x45	35x35	612.19	1060.56
Piso 8	45x45	35x35	612.19	1060.56
Piso 9	40x40	35x35	601.18	1046.79
Piso 10	40x40	35x35	544.93	765.54
<b>Total de la estructura</b>			6105.25	10373.76
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			169.59	288.16

Tabla D9. Metrado de cargas del Modelo G2.M3. Modelo de diez pisos con un área cuadrada de 324 m<sup>2</sup> y 16 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	50x50	35x35	235.13	400.23
Piso 2	50x50	35x35	235.13	400.23
Piso 3	50x50	35x35	235.13	400.23
Piso 4	50x50	35x35	235.13	400.23
Piso 5	50x50	35x35	235.13	400.23
Piso 6	45x45	35x35	229.66	393.39
Piso 7	45x45	35x35	229.66	393.39
Piso 8	45x45	35x35	229.66	393.39
Piso 9	40x40	35x35	224.76	387.27
Piso 10	40x40	35x35	204.51	286.02
<b>Total de la estructura</b>			2293.93	3854.61
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			143.37	240.91

Tabla D10. Metrado de cargas del Modelo G3.M3. Modelo de diez pisos con un área rectangular de 540 m<sup>2</sup> y 24 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	50x50	35x35	383.05	656.01
Piso 2	50x50	35x35	383.05	656.01
Piso 3	50x50	35x35	383.05	656.01
Piso 4	50x50	35x35	383.05	656.01
Piso 5	50x50	35x35	383.05	656.01
Piso 6	45x45	35x35	374.85	645.75
Piso 7	45x45	35x35	374.85	645.75
Piso 8	45x45	35x35	374.85	645.75
Piso 9	40x40	35x35	367.50	636.57
Piso 10	40x40	35x35	333.75	467.82
<b>Total de la estructura</b>			3741.10	6321.69
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			155.87	263.40

Tabla D11. Metrado de cargas del Modelo G1.M4. Modelo de trece pisos con un área cuadrada de 900 m<sup>2</sup> y 36 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	55x55	35x35	623.00	1074.06
Piso 2	55x55	35x35	623.00	1074.06
Piso 3	50x50	35x35	609.39	1057.05
Piso 4	50x50	35x35	609.39	1057.05
Piso 5	50x50	35x35	609.39	1057.05
Piso 6	50x50	35x35	609.39	1057.05
Piso 7	50x50	35x35	609.39	1057.05
Piso 8	50x50	35x35	609.39	1057.05
Piso 9	50x50	35x35	609.39	1057.05
Piso 10	45x45	35x35	597.08	1041.66
Piso 11	45x45	35x35	597.08	1041.66
Piso 12	45x45	35x35	597.08	1041.66
Piso 13	40x40	35x35	529.81	746.64
<b>Total de la estructura</b>			7832.77	13419.09
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			217.58	372.75

Tabla D12. Metrado de cargas del Modelo G2.M4. Modelo de trece pisos con un área cuadrada de 324 m<sup>2</sup> y 16 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	45x45	35x35	223.61	385.83
Piso 2	40x40	35x35	218.72	379.71
Piso 3	35x35	35x35	214.40	374.31
Piso 4	35x35	35x35	214.40	374.31
Piso 5	35x35	35x35	214.40	374.31
Piso 6	35x35	35x35	214.40	374.31
Piso 7	35x35	35x35	214.40	374.31
Piso 8	35x35	35x35	214.40	374.31
Piso 9	35x35	35x35	214.40	374.31
Piso 10	35x35	35x35	214.40	374.31
Piso 11	35x35	35x35	214.40	374.31
Piso 12	35x35	35x35	214.40	374.31
Piso 13	30x30	35x35	190.40	268.38
<b>Total de la estructura</b>			2776.71	4777.02
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			173.54	298.56

Tabla D13. Metrado de cargas del Modelo G3.M4. Modelo de trece pisos con un área rectangular de 540 m<sup>2</sup> y 24 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	55x55	35x35	382.55	655.38
Piso 2	55x55	35x35	382.55	655.38
Piso 3	55x55	35x35	382.55	655.38
Piso 4	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 5	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 6	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 7	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 8	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 9	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 10	45x45	35x35	365.27	633.78
Piso 11	45x45	35x35	365.27	633.78
Piso 12	45x45	35x35	365.27	633.78
Piso 13	40x40	35x35	324.18	455.85
<b>Total de la estructura</b>			4808.56	8187.57
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			200.36	341.15

Tabla D14. Metrado de cargas del Modelo G1.M5. Modelo de diecisiete pisos con un área cuadrada de 900 m<sup>2</sup> y 36 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	55x55	35x35	615.44	1064.61
Piso 2	50x50	35x35	608.47	1055.90
Piso 3	50x50	35x35	608.47	1055.90
Piso 4	50x50	35x35	608.47	1055.90
Piso 5	50x50	35x35	608.47	1055.90
Piso 6	50x50	35x35	608.47	1055.90
Piso 7	50x50	35x35	608.47	1055.90
Piso 8	50x50	35x35	608.47	1055.90
Piso 9	50x50	35x35	608.47	1055.90
Piso 10	50x50	35x35	608.47	1055.90
Piso 11	50x50	35x35	608.47	1055.90
Piso 12	50x50	35x35	608.47	1055.90
Piso 13	50x50	35x35	608.47	1055.90
Piso 14	45x45	35x35	589.52	1032.21
Piso 15	45x45	35x35	589.52	1032.21
Piso 16	40x40	35x35	578.50	1018.44
Piso 17	40x40	35x35	522.25	737.19
<b>Total de la estructura</b>			10196.89	17555.49
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			283.25	487.65

Tabla D15. Metrado de cargas del Modelo G2.M5. Modelo de diecisiete pisos con un área cuadrada de 324 m<sup>2</sup> y 16 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	55x55	35x35	229.09	392.67
Piso 2	55x55	35x35	229.09	392.67
Piso 3	55x55	35x35	229.09	392.67
Piso 4	55x55	35x35	229.09	392.67
Piso 5	55x55	35x35	229.09	392.67
Piso 6	55x55	35x35	229.09	392.67
Piso 7	50x50	35x35	223.04	385.11
Piso 8	50x50	35x35	223.04	385.11
Piso 9	50x50	35x35	223.04	385.11
Piso 10	50x50	35x35	223.04	385.11
Piso 11	50x50	35x35	223.04	385.11
Piso 12	50x50	35x35	223.04	385.11
Piso 13	50x50	35x35	223.04	385.11
Piso 14	45x45	35x35	217.57	378.27
Piso 15	45x45	35x35	217.57	378.27
Piso 16	40x40	35x35	212.67	372.15
Piso 17	40x40	35x35	192.42	270.90
<b>Total de la estructura</b>			3776.00	6451.38
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			236.00	403.21

Tabla D16. Metrado de cargas del Modelo G3.M5. Modelo de diecisiete pisos con un área rectangular de 540 m<sup>2</sup> y 24 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	55x55	35x35	377.77	649.40
Piso 2	50x50	35x35	373.12	643.59
Piso 3	50x50	35x35	373.12	643.59
Piso 4	50x50	35x35	373.12	643.59
Piso 5	50x50	35x35	373.12	643.59
Piso 6	50x50	35x35	373.12	643.59
Piso 7	50x50	35x35	373.12	643.59
Piso 8	50x50	35x35	373.12	643.59
Piso 9	50x50	35x35	373.12	643.59
Piso 10	50x50	35x35	373.12	643.59
Piso 11	50x50	35x35	373.12	643.59
Piso 12	50x50	35x35	373.12	643.59
Piso 13	50x50	35x35	373.12	643.59
Piso 14	45x45	35x35	360.49	627.80
Piso 15	45x45	35x35	360.49	627.80
Piso 16	40x40	35x35	353.14	618.62
Piso 17	40x40	35x35	319.39	449.87
<b>Total de la estructura</b>			6248.74	10696.55
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			260.36	445.69

Tabla D17. Metrado de cargas del Modelo G1.M6. Modelo de veinte pisos con un área cuadrada de 900 m<sup>2</sup> y 36 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	55x55	35x35	1074.06	1074.06
Piso 2	55x55	35x35	1074.06	1074.06
Piso 3	55x55	35x35	1074.06	1074.06
Piso 4	55x55	35x35	1074.06	1074.06
Piso 5	55x55	35x35	1074.06	1074.06
Piso 6	55x55	35x35	1074.06	1074.06
Piso 7	50x50	35x35	1057.05	1057.05
Piso 8	50x50	35x35	1057.05	1057.05
Piso 9	50x50	35x35	1057.05	1057.05
Piso 10	50x50	35x35	1057.05	1057.05
Piso 11	50x50	35x35	1057.05	1057.05
Piso 12	50x50	35x35	1057.05	1057.05
Piso 13	50x50	35x35	1057.05	1057.05
Piso 14	45x45	35x35	1041.66	1041.66
Piso 15	45x45	35x35	1041.66	1041.66
Piso 16	45x45	35x35	1041.66	1041.66
Piso 17	40x40	35x35	1027.89	1027.89
Piso 18	40x40	35x35	1027.89	1027.89
Piso 19	40x40	35x35	1027.89	1027.89
Piso 20	40x40	35x35	746.64	746.64
<b>Total de la estructura</b>			12082.95	20799.00
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			335.64	577.75

Tabla D18. Metrado de cargas del Modelo G2.M6. Modelo de veinte pisos con un área cuadrada de 324 m<sup>2</sup> y 16 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	60x60	35x35	241.76	408.51
Piso 2	60x60	35x35	241.76	408.51
Piso 3	55x55	35x35	235.13	400.23
Piso 4	55x55	35x35	235.13	400.23
Piso 5	55x55	35x35	235.13	400.23
Piso 6	55x55	35x35	235.13	400.23
Piso 7	55x55	35x35	235.13	400.23
Piso 8	50x50	35x35	229.09	392.67
Piso 9	50x50	35x35	229.09	392.67
Piso 10	50x50	35x35	229.09	392.67
Piso 11	50x50	35x35	229.09	392.67
Piso 12	50x50	35x35	229.09	392.67
Piso 13	50x50	35x35	229.09	392.67
Piso 14	45x45	35x35	223.61	385.83
Piso 15	45x45	35x35	223.61	385.83
Piso 16	45x45	35x35	223.61	385.83
Piso 17	40x40	35x35	218.72	379.71
Piso 18	40x40	35x35	218.72	379.71
Piso 19	40x40	35x35	218.72	379.71
Piso 20	40x40	35x35	198.47	278.46
<b>Total de la estructura</b>			4559.17	7749.27
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			284.95	484.33

Tabla D19. Metrado de cargas del Modelo G3.M6. Modelo de veinte pisos con un área rectangular de 540 m<sup>2</sup> y 24 columnas.

Piso	Sección Columnas	Sección Vigas	Masa Participativa (t) (CM+0.25CV)	Carga máxima (t) (1.25CM+1.25CV)
Piso 1	55x55	35x35	382.55	655.38
Piso 2	55x55	35x35	382.55	655.38
Piso 3	55x55	35x35	382.55	655.38
Piso 4	55x55	35x35	382.55	655.38
Piso 5	55x55	35x35	382.55	655.38
Piso 6	55x55	35x35	382.55	655.38
Piso 7	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 8	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 9	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 10	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 11	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 12	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 13	50x50	35x35	373.48	644.04
Piso 14	45x45	35x35	365.27	633.78
Piso 15	45x45	35x35	365.27	633.78
Piso 16	45x45	35x35	365.27	633.78
Piso 17	40x40	35x35	357.93	624.60
Piso 18	40x40	35x35	357.93	624.60
Piso 19	40x40	35x35	357.93	624.60
Piso 20	40x40	35x35	324.18	455.85
<b>Total de la estructura</b>			7403.49	12671.55
<b>Lo que recibe cada aislador</b>			<b>W (t)</b>	<b>Pu,máx (t)</b>
			308.48	527.98

## Anexo E

### Resultados obtenidos de los desplazamientos horizontales máximos

En esta sección se presentan los desplazamientos horizontales máximos ocasionados por el sismo de Pisco (2007) y que fueron obtenidos con el programa SAP2000. De la Tabla E1 a la Tabla E12 se muestran los resultados pertenecientes a los modelos de los tres grupos analizados en esta tesis. Los modelos analizados incluyen los modelos sin dispositivos, los modelos con aisladores y los modelos con amortiguadores. Los valores de estas tablas fueron presentados gráficamente en el Capítulo IV, de la Figura 4.8 a la Figura 4.25. Asimismo, se sombreamán de color celeste a los desplazamientos laterales máximos ocurridos en cada modelo.

Tabla E1. Desplazamientos horizontales máximos de los modelos sin dispositivo del Grupo 1, correspondientes a planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>.

Piso	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
Base	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Piso 1	0.0237	0.0203	0.0188	0.0131	0.0120	0.0133
Piso 2	0.0603	0.0542	0.0529	0.0375	0.0377	0.0415
Piso 3	0.0958	0.0823	0.0892	0.0726	0.0688	0.0753
Piso 4	<b>0.1256</b>	0.1099	0.1250	0.1008	0.1040	0.1108
Piso 5	-	0.1463	0.1562	0.1279	0.1295	0.1461
Piso 6	-	0.1744	0.1803	0.1494	0.1556	0.1803
Piso 7	-	<b>0.1901</b>	0.1969	0.1626	0.1780	0.2135
Piso 8	-	-	0.2114	0.1688	0.1966	0.2442
Piso 9	-	-	0.2323	0.1823	0.2121	0.2718
Piso 10	-	-	<b>0.2472</b>	0.2001	0.2254	0.2963
Piso 11	-	-	-	0.2138	0.2379	0.3173
Piso 12	-	-	-	0.2266	0.2511	0.3351
Piso 13	-	-	-	<b>0.2398</b>	0.2677	0.3500
Piso 14	-	-	-	-	0.2849	0.3639
Piso 15	-	-	-	-	0.300	0.3885
Piso 16	-	-	-	-	0.3125	0.4188
Piso 17	-	-	-	-	<b>0.3204</b>	0.4444
Piso 18	-	-	-	-	-	0.4632
Piso 19	-	-	-	-	-	0.4756
Piso 20	-	-	-	-	-	<b>0.4850</b>

Tabla E2. Desplazamientos horizontales máximos de los modelos con aisladores del Grupo 1, correspondientes a planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>.

Piso	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
Base	0.0931	0.0832	0.0735	0.0443	0.0411	0.0491
Piso 1	0.1029	0.0942	0.0860	0.0574	0.0602	0.0694
Piso 2	0.1117	0.1040	0.1013	0.0712	0.0817	0.0898
Piso 3	0.1196	0.1100	0.1140	0.0842	0.1039	0.1075
Piso 4	<b>0.1264</b>	0.1153	0.1263	0.1010	0.1252	0.1238
Piso 5	-	0.1283	0.1379	0.1210	0.1447	0.1393
Piso 6	-	0.1400	0.1444	0.1420	0.1619	0.1558
Piso 7	-	<b>0.1550</b>	0.1464	0.1505	0.1847	0.1813
Piso 8	-	-	0.1549	0.1600	0.2046	0.2091
Piso 9	-	-	0.1650	0.1719	0.2199	0.2328
Piso 10	-	-	<b>0.1732</b>	0.1844	0.2318	0.2518
Piso 11	-	-	-	0.2037	0.2420	0.2666
Piso 12	-	-	-	0.2201	0.2520	0.2783
Piso 13	-	-	-	<b>0.2319</b>	0.2716	0.2890
Piso 14	-	-	-	-	0.2870	0.3085
Piso 15	-	-	-	-	0.2964	0.3377
Piso 16	-	-	-	-	0.3154	0.3634
Piso 17	-	-	-	-	<b>0.3290</b>	0.3858
Piso 18	-	-	-	-	-	0.4029
Piso 19	-	-	-	-	-	0.4145
Piso 20	-	-	-	-	-	<b>0.4212</b>

Tabla E3. Desplazamientos horizontales máximos de los modelos con amortiguadores del Grupo 1, correspondientes a la configuración N° 1 (amortiguadores en el tercer vano), y planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>.

Piso	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
Base	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Piso 1	0.0139	0.0121	0.0099	0.0077	0.0066	0.0061
Piso 2	0.0328	0.0303	0.0279	0.0234	0.0208	0.0186
Piso 3	0.0482	0.0499	0.0469	0.0415	0.0379	0.0340
Piso 4	<b>0.0557</b>	0.0686	0.0652	0.0585	0.0546	0.0476
Piso 5	-	0.0876	0.0824	0.0733	0.0701	0.0610
Piso 6	-	0.0980	0.1001	0.0857	0.0847	0.0733
Piso 7	-	<b>0.1033</b>	0.1164	0.0961	0.0981	0.0854
Piso 8	-	-	0.1293	0.1042	0.1104	0.0969
Piso 9	-	-	0.1388	0.1099	0.1212	0.1077
Piso 10	-	-	<b>0.1436</b>	0.1138	0.1304	0.1178
Piso 11	-	-	-	0.1186	0.1378	0.1270
Piso 12	-	-	-	0.1238	0.1438	0.1348
Piso 13	-	-	-	<b>0.1270</b>	0.1489	0.1415
Piso 14	-	-	-	-	0.1534	0.1477
Piso 15	-	-	-	-	0.1572	0.1536
Piso 16	-	-	-	-	0.1603	0.1595
Piso 17	-	-	-	-	<b>0.1622</b>	0.1656
Piso 18	-	-	-	-	-	0.1702
Piso 19	-	-	-	-	-	0.1735
Piso 20	-	-	-	-	-	<b>0.1757</b>

Tabla E4. Desplazamientos horizontales máximos de los modelos con amortiguadores del Grupo 1, correspondientes a la configuración N° 2 (amortiguadores en el segundo y cuarto vano), y planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>.

Piso	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
Base	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Piso 1	0.0134	0.0123	0.0094	0.0071	0.0066	0.0061
Piso 2	0.0319	0.0303	0.0263	0.0215	0.0212	0.0187
Piso 3	0.0471	0.0486	0.0441	0.0382	0.0382	0.0335
Piso 4	<b>0.0546</b>	0.0669	0.0615	0.0538	0.0549	0.0482
Piso 5	-	0.0829	0.0782	0.0674	0.0701	0.0619
Piso 6	-	0.0933	0.0947	0.0791	0.0838	0.0747
Piso 7	-	<b>0.0988</b>	0.1084	0.0891	0.0963	0.0867
Piso 8	-	-	0.1189	0.0975	0.1075	0.0976
Piso 9	-	-	0.1267	0.1042	0.1174	0.1074
Piso 10	-	-	<b>0.1307</b>	0.1095	0.1258	0.1162
Piso 11	-	-	-	0.1132	0.1327	0.1237
Piso 12	-	-	-	0.1157	0.1383	0.1301
Piso 13	-	-	-	<b>0.1172</b>	0.1428	0.1355
Piso 14	-	-	-	-	0.1464	0.1401
Piso 15	-	-	-	-	0.1491	0.1439
Piso 16	-	-	-	-	0.1512	0.1474
Piso 17	-	-	-	-	<b>0.1525</b>	0.1507
Piso 18	-	-	-	-	-	0.1531
Piso 19	-	-	-	-	-	0.1549
Piso 20	-	-	-	-	-	<b>0.1560</b>

Tabla E5. Desplazamientos horizontales máximos de los modelos con amortiguadores del Grupo 1, correspondientes a la configuración N° 3 (amortiguadores en el primer y quinto vano), y planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>.

Piso	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
Base	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Piso 1	0.0135	0.0119	0.0093	0.0071	0.0066	0.0060
Piso 2	0.0320	0.0303	0.0262	0.0215	0.0210	0.0185
Piso 3	0.0473	0.0487	0.0442	0.0382	0.0380	0.0331
Piso 4	<b>0.0549</b>	0.0669	0.0619	0.0539	0.0548	0.0477
Piso 5	-	0.0835	0.0791	0.0677	0.0702	0.0615
Piso 6	-	0.0942	0.0962	0.0795	0.0842	0.0744
Piso 7	-	<b>0.1000</b>	0.1106	0.0897	0.0971	0.0867
Piso 8	-	-	0.1218	0.0983	0.1087	0.0980
Piso 9	-	-	0.1304	0.1053	0.1189	0.1083
Piso 10	-	-	<b>0.1349</b>	0.1108	0.1278	0.1176
Piso 11	-	-	-	0.1148	0.1352	0.1258
Piso 12	-	-	-	0.1175	0.1413	0.1330
Piso 13	-	-	-	<b>0.1193</b>	0.1464	0.1391
Piso 14	-	-	-	-	0.1507	0.1445
Piso 15	-	-	-	-	0.1541	0.1493
Piso 16	-	-	-	-	0.1568	0.1538
Piso 17	-	-	-	-	<b>0.1585</b>	0.1582
Piso 18	-	-	-	-	-	0.1614
Piso 19	-	-	-	-	-	0.1637
Piso 20	-	-	-	-	-	<b>0.1652</b>

Tabla E6. Desplazamientos horizontales máximos de los modelos con amortiguadores del Grupo 1, correspondientes a la configuración N° 4 (amortiguadores en el primer, tercer y quinto vano), y planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>.

Piso	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
Base	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Piso 1	0.0133	0.0105	0.0092	0.0064	0.0065	0.0057
Piso 2	0.0318	0.0256	0.0257	0.0189	0.0207	0.0172
Piso 3	0.047	0.0431	0.0434	0.0356	0.0375	0.0316
Piso 4	<b>0.0545</b>	0.0609	0.0608	0.0478	0.0539	0.0451
Piso 5	-	0.0779	0.0774	0.0596	0.0689	0.058
Piso 6	-	0.0906	0.0935	0.0696	0.0824	0.0697
Piso 7	-	<b>0.0957</b>	0.1069	0.0782	0.0946	0.0807
Piso 8	-	-	0.1173	0.0857	0.1057	0.0907
Piso 9	-	-	0.1252	0.0919	0.1154	0.0996
Piso 10	-	-	<b>0.1294</b>	0.0971	0.1240	0.1076
Piso 11	-	-	-	0.1008	0.1312	0.1145
Piso 12	-	-	-	0.1028	0.1373	0.1206
Piso 13	-	-	-	<b>0.1048</b>	0.1423	0.1258
Piso 14	-	-	-	-	0.1465	0.1303
Piso 15	-	-	-	-	0.1497	0.1342
Piso 16	-	-	-	-	0.1521	0.1375
Piso 17	-	-	-	-	<b>0.1536</b>	0.1405
Piso 18	-	-	-	-	-	0.1427
Piso 19	-	-	-	-	-	0.1443
Piso 20	-	-	-	-	-	<b>0.1453</b>

Tabla E7. Desplazamientos horizontales máximos de los modelos sin dispositivo del Grupo 2, correspondientes a planta cuadrada de 324 m<sup>2</sup>.

Piso	G2.M1	G2.M2	G2.M3	G2.M4	G2.M5	G2.M6
Base	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Piso 1	0.0243	0.0205	0.0190	0.0153	0.0146	0.0110
Piso 2	0.0615	0.0539	0.0551	0.0476	0.0451	0.0359
Piso 3	0.0988	0.0846	0.0892	0.0833	0.0782	0.0685
Piso 4	<b>0.1224</b>	0.1100	0.1215	0.1096	0.1149	0.1043
Piso 5	-	0.1464	0.1546	0.1255	0.1512	0.1402
Piso 6	-	0.1756	0.1861	0.1347	0.1876	0.1750
Piso 7	-	<b>0.1898</b>	0.2139	0.1490	0.2203	0.2079
Piso 8	-	-	0.2375	0.1669	0.2487	0.2389
Piso 9	-	-	0.2591	0.1836	0.2729	0.2669
Piso 10	-	-	<b>0.2732</b>	0.1954	0.2937	0.2918
Piso 11	-	-	-	0.2138	0.3125	0.3134
Piso 12	-	-	-	0.2342	0.3300	0.3319
Piso 13	-	-	-	<b>0.2498</b>	0.3466	0.3476
Piso 14	-	-	-	-	0.3640	0.3612
Piso 15	-	-	-	-	0.3835	0.3873
Piso 16	-	-	-	-	0.4047	0.4182
Piso 17	-	-	-	-	<b>0.4214</b>	0.4437
Piso 18	-	-	-	-	-	0.4609
Piso 19	-	-	-	-	-	0.4721
Piso 20	-	-	-	-	-	<b>0.4788</b>

Tabla E8. Desplazamientos horizontales máximos de los modelos con aisladores del Grupo 2, correspondientes a planta cuadrada de 324 m<sup>2</sup>.

Piso	G2.M1	G2.M2	G2.M3	G2.M4	G2.M5	G2.M6
Base	0.0722	0.0624	0.0654	0.0321	0.0425	0.0501
Piso 1	0.0833	0.0805	0.0780	0.0472	0.0625	0.0714
Piso 2	0.0950	0.0981	0.0919	0.0621	0.0828	0.0926
Piso 3	0.1030	0.1150	0.1044	0.0863	0.1053	0.1126
Piso 4	<b>0.1090</b>	0.1320	0.1229	0.1141	0.1315	0.1296
Piso 5	-	0.1492	0.1328	0.1350	0.1534	0.1445
Piso 6	-	0.1672	0.1408	0.1494	0.1754	0.1673
Piso 7	-	<b>0.1842</b>	0.1473	0.1576	0.1992	0.1878
Piso 8	-	-	0.1597	0.1675	0.2307	0.2220
Piso 9	-	-	0.1736	0.1745	0.2521	0.2471
Piso 10	-	-	<b>0.1853</b>	0.1922	0.2717	0.2632
Piso 11	-	-	-	0.2153	0.2891	0.2877
Piso 12	-	-	-	0.2379	0.3097	0.3012
Piso 13	-	-	-	<b>0.2555</b>	0.3360	0.3123
Piso 14	-	-	-	-	0.3571	0.3229
Piso 15	-	-	-	-	0.3718	0.3494
Piso 16	-	-	-	-	0.3819	0.3772
Piso 17	-	-	-	-	<b>0.3884</b>	0.4019
Piso 18	-	-	-	-	-	0.4198
Piso 19	-	-	-	-	-	0.4324
Piso 20	-	-	-	-	-	<b>0.4403</b>

Tabla E9. Desplazamientos horizontales máximos de los modelos con amortiguadores del Grupo 2, correspondiente a planta cuadrada de 324 m<sup>2</sup>.

Piso	G2.M1	G2.M2	G2.M3	G2.M4	G2.M5	G2.M6
Base	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Piso 1	0.0113	0.0112	0.0096	0.0082	0.0061	0.0049
Piso 2	0.0273	0.0308	0.0274	0.0272	0.0196	0.0159
Piso 3	0.0404	0.0502	0.0469	0.0430	0.0357	0.0299
Piso 4	<b>0.0469</b>	0.0679	0.0663	0.0612	0.0518	0.0445
Piso 5	-	0.0814	0.0848	0.0799	0.0668	0.0586
Piso 6	-	0.0912	0.1025	0.0972	0.0804	0.0715
Piso 7	-	<b>0.0960</b>	0.1174	0.1143	0.0928	0.0833
Piso 8	-	-	0.1291	0.1260	0.1037	0.0942
Piso 9	-	-	0.1381	0.1358	0.1133	0.1038
Piso 10	-	-	<b>0.1431</b>	0.1436	0.1218	0.1125
Piso 11	-	-	-	0.1495	0.1291	0.1202
Piso 12	-	-	-	0.1537	0.1352	0.1271
Piso 13	-	-	-	<b>0.1592</b>	0.1404	0.1332
Piso 14	-	-	-	-	0.1446	0.1387
Piso 15	-	-	-	-	0.1479	0.1434
Piso 16	-	-	-	-	0.1504	0.1475
Piso 17	-	-	-	-	<b>0.1520</b>	0.1513
Piso 18	-	-	-	-	-	0.1542
Piso 19	-	-	-	-	-	0.1564
Piso 20	-	-	-	-	-	<b>0.1580</b>

Tabla E10. Desplazamientos horizontales máximos de los modelos sin dispositivo del Grupo 3, correspondientes a planta rectangular de 540 m<sup>2</sup>.

Piso	G3.M1	G3.M2	G3.M3	G3.M4	G3.M5	G3.M6
Base	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Piso 1	0.0234	0.0200	0.0188	0.0121	0.0133	0.0133
Piso 2	0.0605	0.0543	0.0533	0.0330	0.0409	0.0418
Piso 3	0.0958	0.0838	0.0897	0.0680	0.0741	0.0760
Piso 4	<b>0.1277</b>	0.1127	0.1247	0.0950	0.1089	0.1117
Piso 5	-	0.1480	0.1548	0.1221	0.1421	0.1467
Piso 6	-	0.1723	0.1780	0.1435	0.1723	0.1801
Piso 7	-	<b>0.1884</b>	0.1932	0.1560	0.1989	0.2120
Piso 8	-	-	0.2069	0.1638	0.2217	0.2412
Piso 9	-	-	0.2274	0.1796	0.2411	0.2693
Piso 10	-	-	<b>0.2430</b>	0.1940	0.2580	0.2947
Piso 11	-	-	-	0.2060	0.2736	0.3174
Piso 12	-	-	-	0.2150	0.2882	0.3376
Piso 13	-	-	-	<b>0.2266</b>	0.3020	0.3632
Piso 14	-	-	-	-	0.3163	0.3936
Piso 15	-	-	-	-	0.3319	0.4234
Piso 16	-	-	-	-	0.3493	0.4530
Piso 17	-	-	-	-	<b>0.3630</b>	0.4837
Piso 18	-	-	-	-	-	0.5123
Piso 19	-	-	-	-	-	0.5349
Piso 20	-	-	-	-	-	<b>0.5497</b>

Tabla E11. Desplazamientos horizontales máximos de los modelos con aisladores del Grupo 3, correspondientes a planta rectangular de 540 m<sup>2</sup>.

Piso	G3.M1	G3.M2	G3.M3	G3.M4	G3.M5	G3.M6
Base	0.0908	0.0746	0.0744	0.0445	0.0411	0.0553
Piso 1	0.1032	0.0870	0.0830	0.0582	0.0581	0.0796
Piso 2	0.1155	0.0992	0.1028	0.0731	0.0811	0.1051
Piso 3	0.1236	0.1080	0.1160	0.0879	0.1056	0.1287
Piso 4	<b>0.1299</b>	0.1190	0.1265	0.1004	0.1300	0.1495
Piso 5	-	0.1370	0.1369	0.1174	0.1531	0.1674
Piso 6	-	0.1550	0.1479	0.1361	0.1737	0.1906
Piso 7	-	<b>0.1707</b>	0.1610	0.1467	0.1911	0.2157
Piso 8	-	-	0.1710	0.1515	0.2080	0.2424
Piso 9	-	-	0.1788	0.1604	0.2247	0.2705
Piso 10	-	-	<b>0.1845</b>	0.1757	0.2379	0.2928
Piso 11	-	-	-	0.1969	0.2517	0.3095
Piso 12	-	-	-	0.2148	0.2779	0.3226
Piso 13	-	-	-	<b>0.2277</b>	0.3004	0.3354
Piso 14	-	-	-	-	0.3179	0.3497
Piso 15	-	-	-	-	0.3287	0.3647
Piso 16	-	-	-	-	0.3347	0.3849
Piso 17	-	-	-	-	<b>0.3471</b>	0.4105
Piso 18	-	-	-	-	-	0.4307
Piso 19	-	-	-	-	-	0.4454
Piso 20	-	-	-	-	-	<b>0.4548</b>

Tabla E12. Desplazamientos horizontales máximos de los modelos con amortiguadores del Grupo 3, correspondientes a planta rectangular de 540 m<sup>2</sup>.

Piso	G3.M1	G3.M2	G3.M3	G3.M4	G3.M5	G3.M6
Base	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Piso 1	0.0133	0.0152	0.0088	0.0070	0.0065	0.0059
Piso 2	0.0321	0.0310	0.0247	0.0215	0.0211	0.0185
Piso 3	0.0478	0.0490	0.0421	0.0381	0.0384	0.0332
Piso 4	<b>0.0558</b>	0.0660	0.0594	0.0545	0.0556	0.0481
Piso 5	-	0.0810	0.0761	0.0692	0.0714	0.0621
Piso 6	-	0.0980	0.0923	0.0823	0.0859	0.0750
Piso 7	-	<b>0.1038</b>	0.1060	0.0940	0.0991	0.0872
Piso 8	-	-	0.1170	0.1038	0.1110	0.0983
Piso 9	-	-	0.1253	0.1120	0.1216	0.1082
Piso 10	-	-	<b>0.1298</b>	0.1186	0.1309	0.1172
Piso 11	-	-	-	0.1235	0.1389	0.1252
Piso 12	-	-	-	0.1270	0.1457	0.1323
Piso 13	-	-	-	<b>0.1293</b>	0.1514	0.1384
Piso 14	-	-	-	-	0.1562	0.1438
Piso 15	-	-	-	-	0.1601	0.1486
Piso 16	-	-	-	-	0.1631	0.1529
Piso 17	-	-	-	-	<b>0.1651</b>	0.1571
Piso 18	-	-	-	-	-	0.1602
Piso 19	-	-	-	-	-	0.1626
Piso 20	-	-	-	-	-	<b>0.1642</b>

## Anexo F

### Resultados obtenidos de las derivas máximas de entrepiso

En esta sección se presentan las derivas máximas de entrepiso ocasionadas por el sismo de Pisco (2007). De la Tabla F1 a la Tabla F12 se detallan los resultados de todos los modelos, de los tres grupos analizados. Los modelos analizados fueron sin dispositivo, con aisladores y con amortiguadores. El consolidado de estas tablas se presentó en el Capítulo IV, de la Figura 4.26 a la Figura 4.34. En cada tabla se sombreadá de color celeste la deriva máxima en cada modelo.

Tabla F1. Derivas máximas de entrepiso de los modelos sin dispositivo del Grupo 1, correspondientes a planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>.

Piso	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
Piso 1	0.0079	0.0068	0.0063	0.0044	0.0040	0.0044
Piso 2	<b>0.0122</b>	0.0113	0.0114	0.0081	0.0086	0.0094
Piso 3	0.0118	0.0094	<b>0.0121</b>	<b>0.0118</b>	0.0104	0.0113
Piso 4	0.0099	0.0092	0.0119	0.0094	<b>0.0117</b>	<b>0.0118</b>
Piso 5	-	<b>0.0121</b>	0.0104	0.0090	0.0085	0.0118
Piso 6	-	0.0094	0.0080	0.0072	0.0087	0.0114
Piso 7	-	0.0052	0.0055	0.0044	0.0075	0.0111
Piso 8	-	-	0.0048	0.0021	0.0062	0.0102
Piso 9	-	-	0.0070	0.0045	0.0052	0.0092
Piso 10	-	-	0.0050	0.0059	0.0044	0.0082
Piso 11	-	-	-	0.0046	0.0042	0.0070
Piso 12	-	-	-	0.0043	0.0044	0.0059
Piso 13	-	-	-	0.0044	0.0055	0.0050
Piso 14	-	-	-	-	0.0057	0.0046
Piso 15	-	-	-	-	0.0050	0.0082
Piso 16	-	-	-	-	0.0042	0.0101
Piso 17	-	-	-	-	0.0026	0.0085
Piso 18	-	-	-	-	-	0.0063
Piso 19	-	-	-	-	-	0.0041
Piso 20	-	-	-	-	-	0.0031

Tabla F2. Derivas máximas de entrepiso de los modelos con aisladores del Grupo 1, correspondientes a planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>.

Piso	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
Piso 1	<b>0.0033</b>	<b>0.0037</b>	0.0042	0.0044	0.0064	0.0068
Piso 2	0.0029	0.0033	<b>0.0051</b>	0.0046	0.0072	0.0068
Piso 3	0.0026	0.0020	0.0042	0.0043	0.0074	0.0059
Piso 4	0.0023	0.0018	0.0041	0.0056	0.0071	0.0054
Piso 5	-	0.0043	0.0039	0.0067	0.0065	0.0052
Piso 6	-	0.0039	0.0022	<b>0.0070</b>	0.0057	0.0055
Piso 7	-	0.0050	0.0007	0.0028	<b>0.0076</b>	0.0085
Piso 8	-	-	0.0028	0.0032	0.0066	<b>0.0093</b>
Piso 9	-	-	0.0034	0.0040	0.0051	0.0079
Piso 10	-	-	0.0027	0.0042	0.0040	0.0063
Piso 11	-	-	-	0.0064	0.0034	0.0049
Piso 12	-	-	-	0.0055	0.0033	0.0039
Piso 13	-	-	-	0.0039	0.0065	0.0036
Piso 14	-	-	-	-	0.0051	0.0065
Piso 15	-	-	-	-	0.0031	0.0097
Piso 16	-	-	-	-	0.0063	0.0086
Piso 17	-	-	-	-	0.0045	0.0075
Piso 18	-	-	-	-	-	0.0057
Piso 19	-	-	-	-	-	0.0039
Piso 20	-	-	-	-	-	0.0022

Tabla F3. Derivas máximas de entrepiso de los modelos con amortiguadores del Grupo 1, correspondientes a la configuración N° 1 (amortiguadores en el tercer vano), y planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>.

Piso	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
Piso 1	0.0046	0.0040	0.0033	0.0026	0.0022	0.0020
Piso 2	<b>0.0063</b>	0.0061	0.0060	0.0052	0.0047	0.0042
Piso 3	0.0051	<b>0.0065</b>	<b>0.0063</b>	<b>0.0060</b>	<b>0.0057</b>	<b>0.0051</b>
Piso 4	0.0025	0.0062	0.0061	0.0057	0.0056	0.0045
Piso 5	-	0.0063	0.0057	0.0049	0.0052	0.0045
Piso 6	-	0.0035	0.0059	0.0041	0.0049	0.0041
Piso 7	-	0.0018	0.0054	0.0035	0.0045	0.0040
Piso 8	-	-	0.0043	0.0027	0.0041	0.0038
Piso 9	-	-	0.0032	0.0019	0.0036	0.0036
Piso 10	-	-	0.0016	0.0013	0.0031	0.0034
Piso 11	-	-	-	0.0016	0.0025	0.0031
Piso 12	-	-	-	0.0017	0.0020	0.0026
Piso 13	-	-	-	0.0011	0.0017	0.0022
Piso 14	-	-	-	-	0.0015	0.0021
Piso 15	-	-	-	-	0.0013	0.0020
Piso 16	-	-	-	-	0.0010	0.0020
Piso 17	-	-	-	-	0.0006	0.0020
Piso 18	-	-	-	-	-	0.0015
Piso 19	-	-	-	-	-	0.0011
Piso 20	-	-	-	-	-	0.0007

Tabla F4. Derivas máximas de entrepiso de los modelos con amortiguadores del Grupo 1, correspondientes a la configuración N° 2 (amortiguadores en el segundo y cuarto vano), y planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>.

Piso	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
Piso 1	0.0045	0.0041	0.0031	0.0024	0.0022	0.0020
Piso 2	<b>0.0062</b>	0.0060	0.0056	0.0048	0.0049	0.0042
Piso 3	0.0051	<b>0.0061</b>	<b>0.0059</b>	<b>0.0056</b>	<b>0.0057</b>	<b>0.0049</b>
Piso 4	0.0025	0.0061	0.0058	0.0052	0.0056	0.0049
Piso 5	-	0.0053	0.0056	0.0045	0.0051	0.0046
Piso 6	-	0.0035	0.0055	0.0039	0.0046	0.0043
Piso 7	-	0.0018	0.0046	0.0033	0.0042	0.0040
Piso 8	-	-	0.0035	0.0028	0.0037	0.0036
Piso 9	-	-	0.0026	0.0022	0.0033	0.0033
Piso 10	-	-	0.0013	0.0018	0.0028	0.0029
Piso 11	-	-	-	0.0012	0.0023	0.0025
Piso 12	-	-	-	0.0008	0.0019	0.0021
Piso 13	-	-	-	0.0005	0.0015	0.0018
Piso 14	-	-	-	-	0.0012	0.0015
Piso 15	-	-	-	-	0.0009	0.0013
Piso 16	-	-	-	-	0.0007	0.0012
Piso 17	-	-	-	-	0.0004	0.0011
Piso 18	-	-	-	-	-	0.0008
Piso 19	-	-	-	-	-	0.0006
Piso 20	-	-	-	-	-	0.0004

Tabla F5. Derivas máximas de entrepiso de los modelos con amortiguadores del Grupo 1, correspondientes a la configuración N° 3 (amortiguadores en el primer y quinto vano), y planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>.

Piso	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
Piso 1	0.0045	0.0040	0.0031	0.0024	0.0022	0.0020
Piso 2	<b>0.0062</b>	<b>0.0061</b>	0.0056	0.0048	0.0048	0.0042
Piso 3	0.0051	0.0061	<b>0.0060</b>	<b>0.0056</b>	<b>0.0057</b>	<b>0.0049</b>
Piso 4	0.0025	0.0061	0.0059	0.0052	0.0056	0.0049
Piso 5	-	0.0055	0.0057	0.0046	0.0051	0.0046
Piso 6	-	0.0036	0.0057	0.0039	0.0047	0.0043
Piso 7	-	0.0019	0.0048	0.0034	0.0043	0.0041
Piso 8	-	-	0.0037	0.0029	0.0039	0.0038
Piso 9	-	-	0.0029	0.0023	0.0034	0.0034
Piso 10	-	-	0.0015	0.0018	0.0030	0.0031
Piso 11	-	-	-	0.0013	0.0025	0.0027
Piso 12	-	-	-	0.0009	0.0020	0.0024
Piso 13	-	-	-	0.0006	0.0017	0.0020
Piso 14	-	-	-	-	0.0014	0.0018
Piso 15	-	-	-	-	0.0011	0.0016
Piso 16	-	-	-	-	0.0009	0.0015
Piso 17	-	-	-	-	0.0006	0.0015
Piso 18	-	-	-	-	-	0.0011
Piso 19	-	-	-	-	-	0.0008
Piso 20	-	-	-	-	-	0.0005

Tabla F6. Derivas máximas de entrepiso de los modelos con amortiguadores del Grupo 1, correspondientes a la configuración N° 4 (amortiguadores en el primer, tercer y quinto vano), y planta cuadrada de 900 m<sup>2</sup>.

Piso	G1.M1	G1.M2	G1.M3	G1.M4	G1.M5	G1.M6
Piso 1	0.0044	0.0035	0.0031	0.0021	0.0022	0.0019
Piso 2	<b>0.0062</b>	0.0050	0.0055	0.0042	0.0047	0.0038
Piso 3	0.0051	0.0058	<b>0.0059</b>	<b>0.0056</b>	<b>0.0056</b>	<b>0.0048</b>
Piso 4	0.0025	<b>0.0059</b>	0.0058	0.0041	0.0055	0.0045
Piso 5	-	0.0057	0.0055	0.0039	0.0050	0.0043
Piso 6	-	0.0042	0.0054	0.0033	0.0045	0.0039
Piso 7	-	0.0017	0.0045	0.0029	0.0041	0.0037
Piso 8	-	-	0.0035	0.0025	0.0037	0.0033
Piso 9	-	-	0.0026	0.0021	0.0032	0.0030
Piso 10	-	-	0.0014	0.0017	0.0029	0.0027
Piso 11	-	-	-	0.0012	0.0024	0.0023
Piso 12	-	-	-	0.0007	0.0020	0.0020
Piso 13	-	-	-	0.0007	0.0017	0.0017
Piso 14	-	-	-	-	0.0014	0.0015
Piso 15	-	-	-	-	0.0011	0.0013
Piso 16	-	-	-	-	0.0008	0.0011
Piso 17	-	-	-	-	0.0005	0.0010
Piso 18	-	-	-	-	-	0.0007
Piso 19	-	-	-	-	-	0.0005
Piso 20	-	-	-	-	-	0.0003

Tabla F7. Derivas máximas de entrepiso de los modelos sin dispositivo del Grupo 2, correspondientes a planta cuadrada de 324 m<sup>2</sup>.

Piso	G2.M1	G2.M2	G2.M3	G2.M4	G2.M5	G2.M6
Piso 1	0.0081	0.0068	0.0063	0.0051	0.0049	0.0037
Piso 2	<b>0.0124</b>	0.0111	<b>0.0120</b>	0.0108	0.0102	0.0083
Piso 3	0.0124	0.0102	0.0114	<b>0.0119</b>	0.0110	0.0109
Piso 4	0.0079	0.0085	0.0108	0.0088	0.0121	0.0119
Piso 5	-	<b>0.0121</b>	0.0110	0.0053	<b>0.0121</b>	<b>0.0120</b>
Piso 6	-	0.0097	0.0105	0.0031	0.0121	0.0116
Piso 7	-	0.0047	0.0093	0.0048	0.0109	0.0110
Piso 8	-	-	0.0079	0.0060	0.0095	0.0103
Piso 9	-	-	0.0072	0.0056	0.0081	0.0093
Piso 10	-	-	0.0047	0.0039	0.0069	0.0083
Piso 11	-	-	-	0.0061	0.0063	0.0072
Piso 12	-	-	-	0.0068	0.0058	0.0062
Piso 13	-	-	-	0.0052	0.0055	0.0052
Piso 14	-	-	-	-	0.0058	0.0045
Piso 15	-	-	-	-	0.0065	0.0087
Piso 16	-	-	-	-	0.0071	0.0103
Piso 17	-	-	-	-	0.0056	0.0085
Piso 18	-	-	-	-	-	0.0057
Piso 19	-	-	-	-	-	0.0037
Piso 20	-	-	-	-	-	0.0022

Tabla F8. Derivas máximas de entrepiso de los modelos con aisladores del Grupo 2, correspondientes a planta cuadrada de 324 m<sup>2</sup>.

Piso	G2.M1	G2.M2	G2.M3	G2.M4	G2.M5	G2.M6
Piso 1	0.0037	0.0060	0.0042	0.0050	0.0067	0.0071
Piso 2	<b>0.0039</b>	0.0059	0.0046	0.0050	0.0068	0.0061
Piso 3	0.0027	0.0056	0.0042	0.0081	0.0075	0.0067
Piso 4	0.0020	0.0057	<b>0.0062</b>	<b>0.0093</b>	0.0087	0.0057
Piso 5	-	0.0057	0.0033	0.0070	0.0073	0.0050
Piso 6	-	<b>0.0060</b>	0.0027	0.0048	0.0073	0.0076
Piso 7	-	0.0057	0.0022	0.0027	0.0079	0.0068
Piso 8	-	-	0.0041	0.0033	<b>0.0105</b>	<b>0.0114</b>
Piso 9	-	-	0.0046	0.0023	0.0071	0.0084
Piso 10	-	-	0.0039	0.0059	0.0065	0.0054
Piso 11	-	-	-	0.0077	0.0058	0.0082
Piso 12	-	-	-	0.0075	0.0069	0.0045
Piso 13	-	-	-	0.0059	0.0088	0.0037
Piso 14	-	-	-	-	0.0070	0.0035
Piso 15	-	-	-	-	0.0049	0.0088
Piso 16	-	-	-	-	0.0034	0.0093
Piso 17	-	-	-	-	0.0022	0.0082
Piso 18	-	-	-	-	-	0.0060
Piso 19	-	-	-	-	-	0.0042
Piso 20	-	-	-	-	-	0.0026

Tabla F9. Derivas máximas de entrepiso de los modelos con amortiguadores del Grupo 2, correspondientes a planta cuadrada de 324 m<sup>2</sup>.

Piso	G2.M1	G2.M2	G2.M3	G2.M4	G2.M5	G2.M6
Piso 1	0.0038	0.0037	0.0032	0.0031	0.0020	0.0016
Piso 2	<b>0.0053</b>	<b>0.0065</b>	0.0059	0.0060	0.0045	0.0037
Piso 3	0.0044	0.0065	<b>0.0065</b>	0.0053	<b>0.0054</b>	0.0047
Piso 4	0.0022	0.0059	0.0065	0.0061	0.0054	<b>0.0049</b>
Piso 5	-	0.0045	0.0062	<b>0.0062</b>	0.0050	0.0047
Piso 6	-	0.0033	0.0059	0.0058	0.0045	0.0043
Piso 7	-	0.0016	0.0050	0.0057	0.0041	0.0039
Piso 8	-	-	0.0039	0.0039	0.0036	0.0036
Piso 9	-	-	0.0030	0.0033	0.0032	0.0032
Piso 10	-	-	0.0017	0.0026	0.0028	0.0029
Piso 11	-	-	-	0.0020	0.0024	0.0026
Piso 12	-	-	-	0.0014	0.0020	0.0023
Piso 13	-	-	-	0.0018	0.0017	0.0020
Piso 14	-	-	-	-	0.0014	0.0018
Piso 15	-	-	-	-	0.0011	0.0016
Piso 16	-	-	-	-	0.0008	0.0014
Piso 17	-	-	-	-	0.0005	0.0013
Piso 18	-	-	-	-	-	0.0010
Piso 19	-	-	-	-	-	0.0007
Piso 20	-	-	-	-	-	0.0005

Tabla F10. Derivas máximas de entrepiso de los modelos sin dispositivo del Grupo 3, correspondientes a planta rectangular de 540 m<sup>2</sup>.

Piso	G3.M1	G3.M2	G3.M3	G3.M4	G3.M5	G3.M6
Piso 1	0.0078	0.0067	0.0063	0.0040	0.0044	0.0044
Piso 2	<b>0.0124</b>	0.0114	0.0115	0.0070	0.0092	0.0095
Piso 3	0.0118	0.0098	<b>0.0121</b>	<b>0.0117</b>	0.0111	0.0114
Piso 4	0.0106	0.0094	0.0117	0.0090	<b>0.0116</b>	<b>0.0119</b>
Piso 5	-	<b>0.0120</b>	0.0100	0.0090	0.0111	0.0117
Piso 6	-	0.0081	0.0077	0.0071	0.0101	0.0111
Piso 7	-	0.0054	0.0051	0.0042	0.0089	0.0106
Piso 8	-	-	0.0046	0.0026	0.0076	0.0097
Piso 9	-	-	0.0068	0.0053	0.0065	0.0094
Piso 10	-	-	0.0052	0.0048	0.0056	0.0085
Piso 11	-	-	-	0.0040	0.0052	0.0076
Piso 12	-	-	-	0.0030	0.0049	0.0067
Piso 13	-	-	-	0.0039	0.0046	0.0085
Piso 14	-	-	-	-	0.0048	0.0101
Piso 15	-	-	-	-	0.0052	0.0099
Piso 16	-	-	-	-	0.0058	0.0099
Piso 17	-	-	-	-	0.0046	0.0102
Piso 18	-	-	-	-	-	0.0095
Piso 19	-	-	-	-	-	0.0075
Piso 20	-	-	-	-	-	0.0049

Tabla F11. Derivas máximas de entrepiso de los modelos con aisladores del Grupo 3, correspondientes a planta rectangular de 540 m<sup>2</sup>.

Piso	G3.M1	G3.M2	G3.M3	G3.M4	G3.M5	G3.M6
Piso 1	0.0041	0.0041	0.0029	0.0046	0.0057	0.0081
Piso 2	<b>0.0041</b>	0.0041	<b>0.0066</b>	0.0050	0.0077	0.0085
Piso 3	0.0027	0.0029	0.0044	0.0049	0.0082	0.0079
Piso 4	0.0021	0.0037	0.0035	0.0042	0.0081	0.0069
Piso 5	-	<b>0.0060</b>	0.0035	0.0057	0.0077	0.0060
Piso 6	-	0.0060	0.0037	<b>0.0062</b>	0.0069	0.0077
Piso 7	-	0.0052	0.0044	0.0035	0.0058	0.0084
Piso 8	-	-	0.0033	0.0016	0.0056	0.0089
Piso 9	-	-	0.0026	0.0030	0.0056	<b>0.0094</b>
Piso 10	-	-	0.0019	0.0051	0.0044	0.0074
Piso 11	-	-	-	0.0071	0.0046	0.0056
Piso 12	-	-	-	0.0060	<b>0.0087</b>	0.0044
Piso 13	-	-	-	0.0043	0.0075	0.0043
Piso 14	-	-	-	-	0.0058	0.0048
Piso 15	-	-	-	-	0.0036	0.0050
Piso 16	-	-	-	-	0.0020	0.0067
Piso 17	-	-	-	-	0.0041	0.0085
Piso 18	-	-	-	-	-	0.0067
Piso 19	-	-	-	-	-	0.0049
Piso 20	-	-	-	-	-	0.0031

Tabla F12. Derivas máximas de entrepiso de los modelos con amortiguadores del Grupo 3, correspondientes a planta rectangular de 540 m<sup>2</sup>.

Piso	G3.M1	G3.M2	G3.M3	G3.M4	G3.M5	G3.M6
Piso 1	0.0044	0.0051	0.0029	0.0023	0.0022	0.0020
Piso 2	<b>0.0063</b>	0.0053	0.0053	0.0048	0.0049	0.0042
Piso 3	0.0052	<b>0.0060</b>	<b>0.0058</b>	<b>0.0055</b>	<b>0.0058</b>	0.0049
Piso 4	0.0027	0.0057	0.0058	0.0055	0.0057	<b>0.0050</b>
Piso 5	-	0.0050	0.0056	0.0049	0.0053	0.0047
Piso 6	-	0.0057	0.0054	0.0044	0.0048	0.0043
Piso 7	-	0.0019	0.0046	0.0039	0.0044	0.0041
Piso 8	-	-	0.0037	0.0033	0.0040	0.0037
Piso 9	-	-	0.0028	0.0027	0.0035	0.0033
Piso 10	-	-	0.0015	0.0022	0.0031	0.0030
Piso 11	-	-	-	0.0016	0.0027	0.0027
Piso 12	-	-	-	0.0012	0.0023	0.0024
Piso 13	-	-	-	0.0008	0.0019	0.0020
Piso 14	-	-	-	-	0.0016	0.0018
Piso 15	-	-	-	-	0.0013	0.0016
Piso 16	-	-	-	-	0.0010	0.0014
Piso 17	-	-	-	-	0.0007	0.0014
Piso 18	-	-	-	-	-	0.0010
Piso 19	-	-	-	-	-	0.0008
Piso 20	-	-	-	-	-	0.0005